

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di laurea specialistica
in INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

Dipartimento
DICAM

Tesi di laurea in
GEOLOGIA TECNICA LS

***Il sottosuolo del centro storico di Modena.
Caratterizzazione e analisi
delle problematiche geologico-tecniche.***

CANDIDATO:
Mauro Baranello

RELATORE:
Dott.ssa **Lisa Borgatti**

CORRELATORE:
Prof. **Guido Gottardi**

Anno Accademico [2009/2010] - Sessione III

Indice

1.	Introduzione	5
2.	Inquadramento geografico	7
2.1	Geologia e Geomorfologia	8
2.2	Idrogeologia	12
3.	La Piazza Grande	15
3.1	Analisi delle evidenze storiche nel sottosuolo	15
	L'età romana	15
	Le alluvioni	16
	Il Medioevo	16
3.2	Fasi costruttive della torre	17
3.3	Evoluzione nel corso dei secoli e rapporto tra strutture	19
3.4	Situazione recente ed attuale	21
4.	Problematiche geologiche e deformazioni nell'area del centro storico della città di Modena	25
4.1	La subsidenza	25
4.2	Cedimenti delle fondazioni	28
	Natura del cedimento	28
4.3	Fenomeni legati alla sismicità	29
	Fenomeno della liquefazione	30
5.	Metodi	35
5.1	ArcGIS	35
5.2	Microsoft Excel	35
5.3	Microsoft Access	36
5.4	Rockworks15	36

5.5	Google Earth.....	36
6.	Raccolta dati	37
6.1	Litologia e stratigrafia.....	37
6.2	Piezometri e piezometrie	38
6.3	Dati pluviometrici.....	40
6.4	Permanent Scatterer	40
	Introduzione ai Permanent Scatterer (PS).....	40
	Raccolta dati	42
6.5	Sondaggi e prove di laboratorio.....	43
7.	Analisi dei dati	47
7.1	Database e modello 3D in Rockworks15.....	47
7.2	Livelli piezometrici in relazione alla pluviometria.....	54
7.3	Analisi dei fenomeni di subsidenza	56
8.	Proposte per la salvaguardia della torre	63
8.1	Sottofondazioni	63
	Sottomurazione	64
	Sottofondazioni con micropali.....	65
	Esempi di sottofondazione con micropali	66
	Torre Ghirlandina.....	69
8.2	Regolazione del livello di falda.....	70
8.3	Monitoraggio.....	71
9.	Considerazioni finali	73
	Bibliografia	75
	Ringraziamenti	Errore. Il segnalibro non è definito.

1. Introduzione

Il seguente elaborato metterà in luce gli aspetti, le problematiche e le criticità di carattere geologico-tecnico riguardanti il centro storico di Modena con particolare interesse per l'area monumentale di Piazza Grande, dove si collocano il Duomo e la torre Ghirlandina, partendo da un'analisi generale del territorio modenese fino al dettaglio sulla storia della città e l'evoluzione che gli edifici hanno avuto nel tempo (Figura 1). Attraverso un'approfondita raccolta dati, si è creato un database dei dati di sottosuolo e in seguito si è sviluppato un modello 3D del terreno che ha permesso di ricostruire la stratigrafia del sottosuolo, individuare gli acquiferi e la piezometria di questi ultimi. Questi dati permettono di trarre alcune conclusioni significative sulle cause dei dissesti a carico degli edifici e su alcune possibili soluzioni per la salvaguardia del Duomo e della Ghirlandina, simboli di Modena, e patrimonio mondiale dell'umanità (Unesco, 1997).



Figura 1. Duomo di Modena e Torre Ghirlandina. (Picasa Web Album)

2. Inquadramento geografico

Modena (Mòdna in dialetto modenese, dall'etrusco Mutna, mutato poi in Mutina dai romani) è un comune italiano di 184.478 abitanti, capoluogo dell'omonima provincia in Emilia-Romagna (Figura 2).

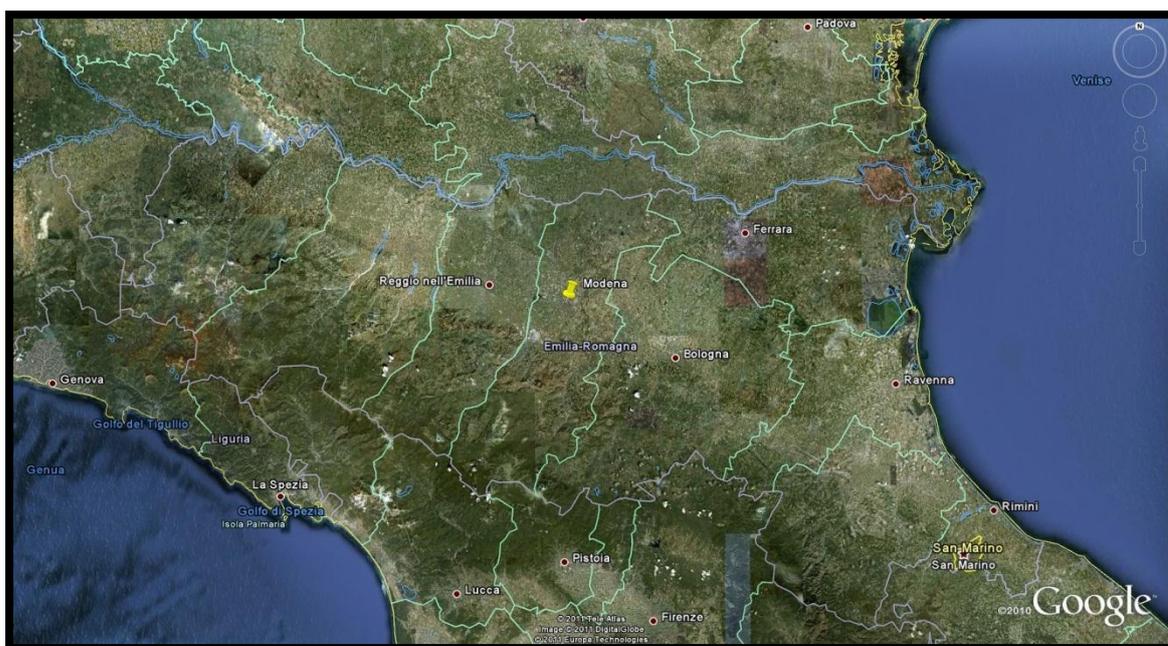


Figura 2. Vista satellitare della regione Emilia-Romagna; evidenziato dal cursore il comune di Modena. (Google)

La città è collocata nella Val Padana in posizione centrale rispetto alla regione stessa ed è individuabile nella cartografia IGM 1:50.000 dalla tavoletta n.201. Due fiumi la circondano, il Secchia e il Panaro, che a loro volta danno vita ad una rete idrografica che nel Medioevo assumeva l'aspetto di un ventaglio di cavi e canali navigabili che circondavano la città. Ad esempio, il canale Naviglio era punto di partenza per Ferrara, Venezia e l'Oriente; attualmente è interrato e trasformato nel corso, prima detto Estense, poi Vittorio Emanuele II, come molti altri canali di cui resta traccia nei nomi delle strade del centro storico (Corso Canal Chiaro, Corso Canal Grande).

Il territorio, nella media della pianura, è regolarmente inclinato verso NE, mentre le prime propaggini dell'Appennino modenese si trovano circa 10 km a sud della città, già fuori dal territorio comunale.

2.1 Geologia e Geomorfologia

Il sottosuolo della pianura modenese è costituito da depositi continentali di età Plio-quadernaria che costituiscono il colmamento del bacino padano, legato all'orogenesi dell'Appennino settentrionale. Questa successione ha carattere regressivo con alla base peliti e sabbie seguite da un corpo sedimentario fluvio-deltizio progradante, ricoperto al tetto da depositi continentali.

Il riempimento del bacino marino, fino alle condizioni di continentalità, è avvenuto attraverso eventi tettonico-sedimentari separati nel tempo da periodi di forte subsidenza bacinale. Questo andamento a impulsi successivi è testimoniato da numerose superfici di discontinuità stratigrafica che "marcano" le diverse fasi e affiorano sul margine appenninico.

Si possono distinguere tre principali sequenze deposizionali (cicli sedimentari o deposizionali), composte a loro volta da sequenze o cicli base (unità stratigrafiche) comprendenti un episodio sedimentario, solitamente ripetitivo, che determina il sistema deposizionale (Figura 3):

1 - Sequenza deposizionale inferiore (Supersistema del Pliocene medio-superiore, Di Dio, 1998; P1 e P2, Ricci Lucchi *et alii*, 1982);

2 - Sequenza deposizionale intermedia (Supersistema del Quaternario marino, Di Dio, 1998; Qm, Ricci Lucchi *et alii*, 1982);

3 - Sequenza deposizionale superiore (Supersistema Emiliano-Romagnolo, Di Dio, 1998; Qc, Ricci Lucchi *et alii*, 1982).

La sequenza deposizionale superiore, che interessa più direttamente il presente lavoro, si è sedimentata in seguito all'ultima fase di subsidenza bacinale e quiescenza tettonica attraverso la deposizione di una sequenza costituita da depositi di piana alluvionale e conoide distale di alimentazione appenninica.

I depositi che costituiscono l'unità deposizionale superiore comprendono tutto il ciclo sedimentario continentale e possono essere suddivisi in una unità inferiore e una superiore separate da una discontinuità legata a una fase tettonica regionale collocabile

fra 350.000 e 400.000 anni fa. Questa è a sua volta suddivisibile in sub-unità che nell’alta pianura sono marcate da paleosuoli che documentano lunghe interruzioni della sedimentazione. Ogni sub-unità costituisce un ciclo trasgressivo-regressivo nel quale a periodi di intensa erosione dei rilievi da parte di fiumi con grandi capacità di trasporto si alternano periodi di minor erosione durante i quali vengono incisi i depositi della fase precedente con una deposizione a granulometria fine.

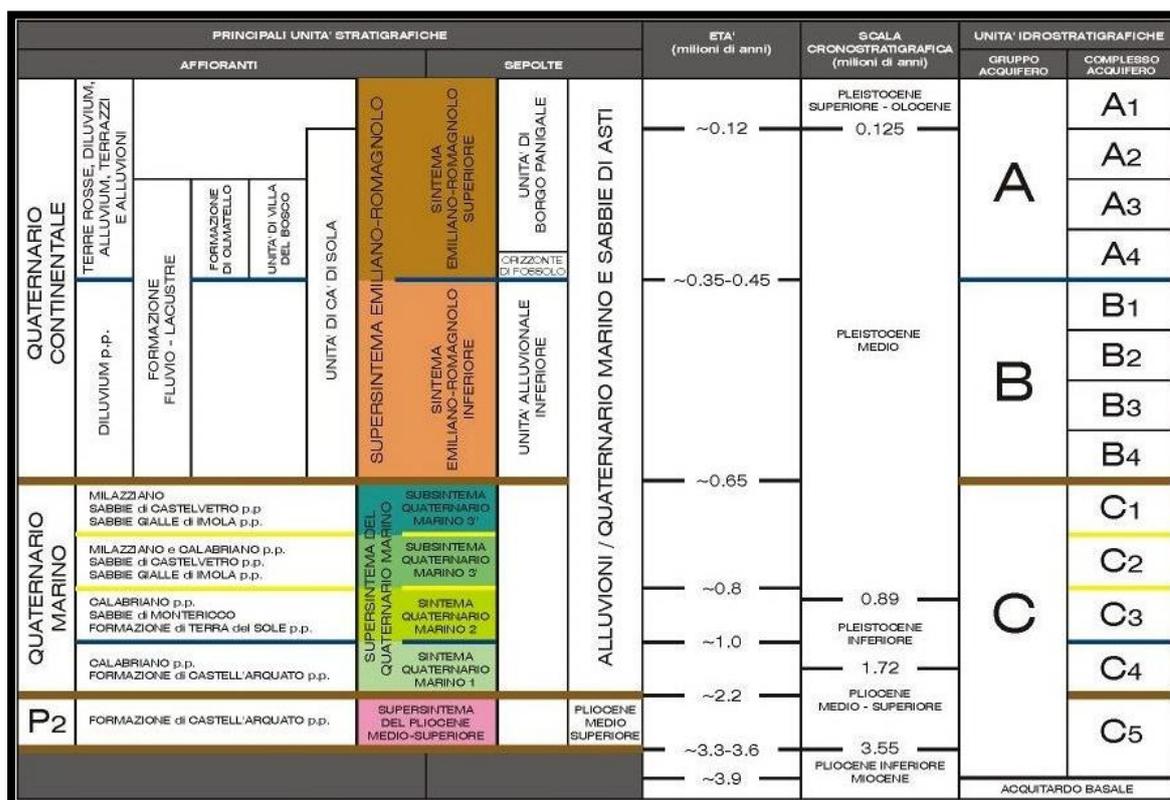


Figura 3. Schema stratigrafico dei depositi plio-quadernari del bacino padano con indicazione delle principali unità stratigrafiche, sequenze deposizionali ed unità idrostratigrafiche. (Gasperi & Pizzolo, 2009)

Sull’ultima di queste sub-unità, databile a partire da 4.000-4.500 anni fa, costituita da uno spessore di circa 10-12 m di sedimenti passanti da argillosi ad argilloso-limosi, e in minor misura limoso-sabbiosi, si è imposta la paleoidrografia che ha condizionato lo sviluppo urbano della città e del territorio circostante e che costituisce l’odierno reticolo idrografico.

È da tenere in considerazione che il colmamento del bacino marino padano e la successiva fase di deposizione continentale è avvenuto con spessori di sedimenti molto

diversi da zona a zona. Si passa da poche centinaia di metri in corrispondenza del margine appenninico fino a 4 km in corrispondenza di Modena e 8 km solo poco più a nord.

Contestualmente alla chiusura del ciclo sedimentario ha preso avvio un assetto geomorfologico che, con le successive evoluzioni, ha portato alla situazione attuale che si identifica in una piana alluvionale leggermente immergente verso nord-est concordante con i fiumi Secchia ad occidente e Panaro ad oriente che drena le acque della città di Modena.

Riassumendo, alcune delle cause che hanno determinato l'attuale assetto geologico e geomorfologico, sono:

- la presenza di sequenze sedimentarie Plio-pleistoceniche colmanti il bacino marino padano attraverso eventi tettonico-sedimentari e subsidenza bacinale;
- la presenza di successivi depositi continentali, di deposizione fluviale, controllati dalle aree sorgenti, dalla subsidenza post-bacinale e dalle variazioni climatiche;
- la neotettonica, che può determinare la rottura degli equilibri raggiunti e il rinnovarsi dei cicli di erosione/deposito.

Precisato quanto sopra, dal punto di vista litostratigrafico, risulta che Modena è edificata su terreni alluvionali depositati dai corsi d'acqua sia principali (Secchia, Panaro) che minori, per uno spessore oscillante tra i 250 m a sud e i 350 m a nord del centro cittadino (Figura 4).

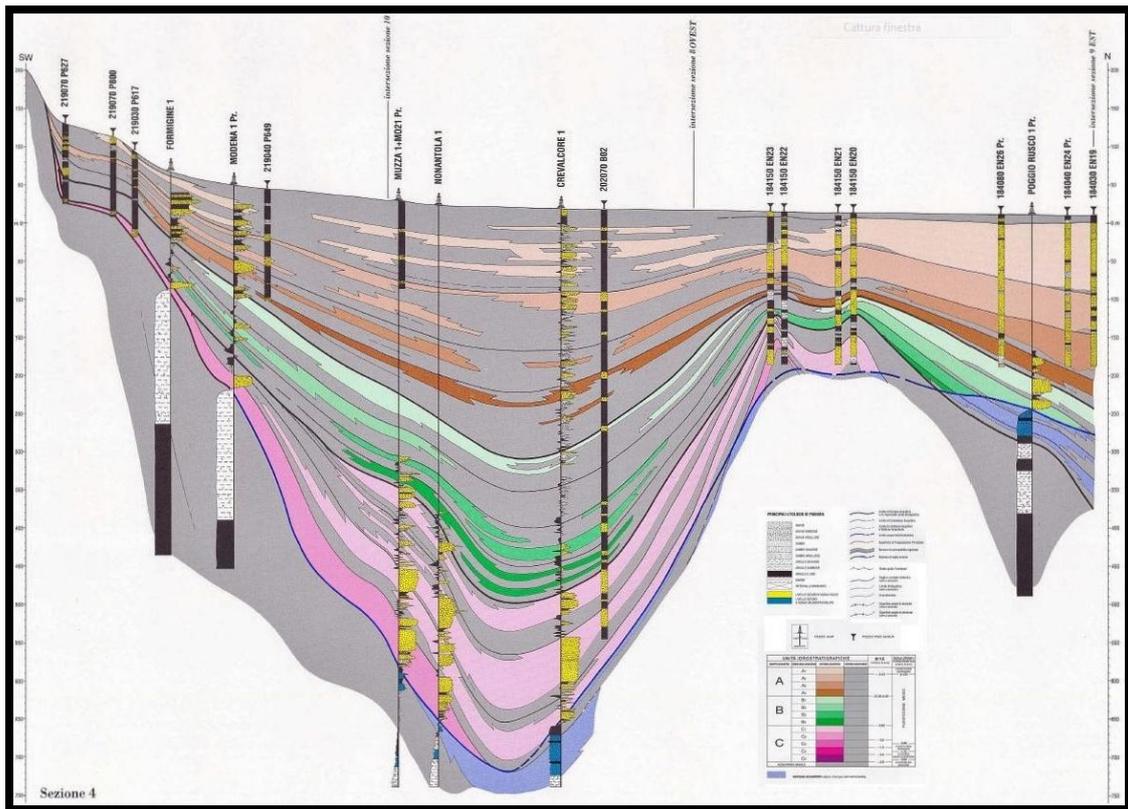


Figura 4. Sezione idrostratigrafica del sottosuolo della panura modenese. (Servizio Geologico Sismico e dei Suoli)

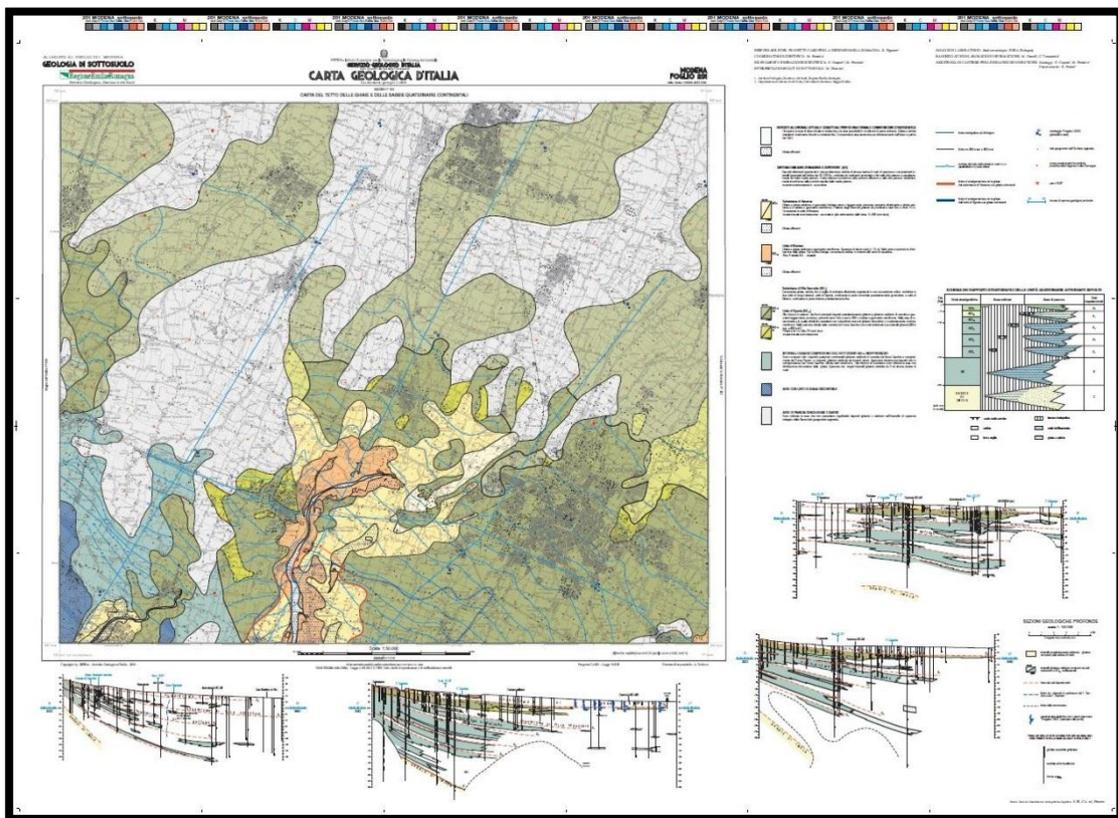


Figura 5. Carta Geologica d'Italia. Foglio 201 Modena

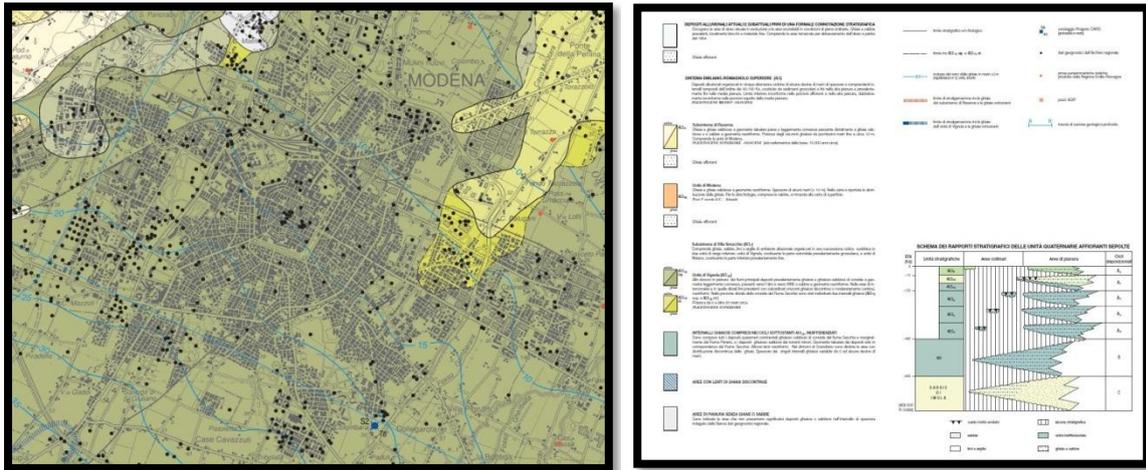


Figura 6. Carta Geologica d'Italia. Foglio 201 Modena. Dettaglio del centro abitato di Modena con legenda.

2.2 Idrogeologia

Per quanto attiene il modello idrogeologico, il sistema acquifero sotterraneo della città di Modena è condizionato dalla situazione del territorio sotteso a monte, caratterizzato dalla presenza dei corpi alluvionali (conoidi) formati dai corsi d'acqua appenninici al loro sbocco in pianura. Il sistema deposizionale delle conoidi determina nel sottosuolo la presenza di corpi permeabili (ghiaiosi e sabbiosi) sede di falde acquifere, intercalati da altri meno permeabili (limosi e argillosi); i primi diminuiscono di spessore man mano che ci si allontana dal margine collinare, e si suddividono in più livelli, assottigliandosi fino a scomparire nella zona a nord della città (Figura 7).

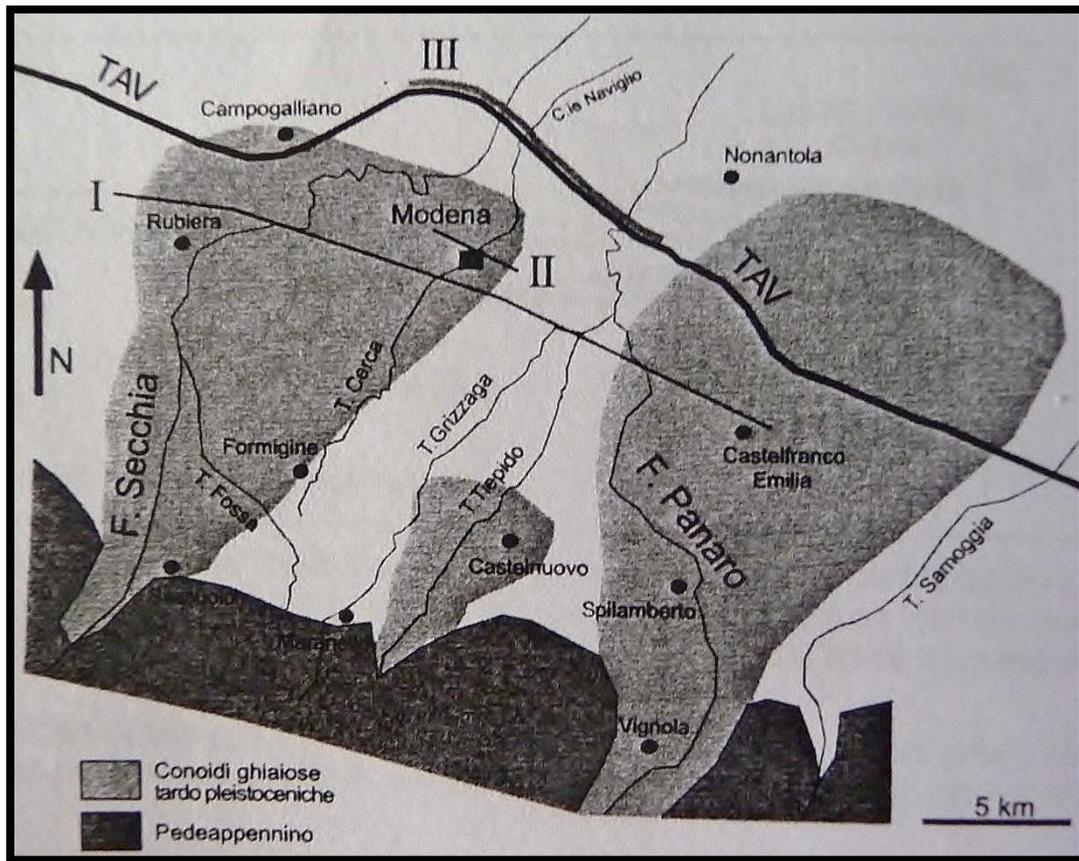


Figura 7. Idrografia principale dell'alta e media pianura modenese. E' illustrata la distribuzione dei corpi ghiaiosi che costituiscono le conoidi pede-montane dei fiumi Secchia e Panaro. (Lugli, Dori, Fontana, & Panini, 17(2/1),2004)

La massima potenzialità, come spessore, numero e ricchezza di acque, si ha nel corpo centrale della conoide del fiume Secchia che in massima parte ricade nel comune di Modena.

L'alimentazione delle falde acquifere avviene prevalentemente presso il margine collinare e in prossimità degli alvei, laddove le ghiaie arrivano fino alla superficie del suolo, attraverso l'infiltrazione di acque meteoriche o superficiali.

La circolazione sotterranea delle acque avviene da sud in direzione nord/nord-est; nel territorio comunale gli acquiferi captati sono di tipo confinato, con falde in pressione, e non ricevono alimentazione da aree poste entro i confini amministrativi.

Dal punto di vista litostratigrafico, per ciò che riguarda la presenza di falde sotterranee, i dati a disposizione hanno permesso di differenziare, all'interno dei primi ottanta metri di profondità, tre distinti livelli permeabili saturi:

a) una prima falda, sospesa in strati limo-sabbiosi di modesto spessore e profondi appena qualche metro, caratterizzata da oscillazioni freatiche assai poco marcate, ad andamento spiccatamente stagionale;

b) un secondo livello con acqua in pressione, molto più importante del precedente all'interno di un banco ghiaioso a profondità compresa fra 19/35 m dal p.c., che si mantiene continuo per una vasta area;

c) un terzo orizzonte saturo, pure sede di una falda in pressione, con caratteristiche idrogeologiche molto simili alla superiore, che si sviluppa in profondità, mediamente da 50 a 62 m dal p.c., anch'esso ben definito arealmente per una notevole estensione.

Non è possibile condizionare la qualità delle acque sotterranee in modo significativo entro il comune di Modena (se si esclude naturalmente la possibilità di atti dolosi che portino inquinanti direttamente alle falde profonde attraverso pozzi); è al contrario possibile incidere significativamente sugli equilibri ricarica-prelievi.

3. La Piazza Grande

3.1 Analisi delle evidenze storiche nel sottosuolo

Il contributo storico/archeologico è di fondamentale importanza per comprendere l'evoluzione del tessuto urbanistico nell'area di Piazza Grande e permette anche di delineare le principali fasi costruttive della Ghirlandina e di valutare con maggior dettaglio l'entità dell'asestamento della torre.

L'età romana

L'area immediatamente circostante la Ghirlandina è collocata fuori le mura della città romana di Mutina, a poche decine di metri dalla porta occidentale in una zona percorsa dall'antica strada consolare di Marco Emilio Lepido (187 a.C.), il cui basolato è stato intercettato dai sondaggi ai piedi della torre (Figura 8).



Figura 8. Foto area del centro storico di Modena. In rosso il perimetro della città romana; in azzurro traccia dell'antica Via Emilia; in giallo perimetro della città medioevale al momento della costruzione della Ghirlandina. (Cadignani, 2009)

La Via Emilia era già presente prima ancora della fondazione di Mutina; essa era realizzata in ciottoli e ghiaia ed era larga circa 4,5 m. All'età augustea è da riferire una

ristrutturazione della strada, con ciottoli e ghiaia, legata all'ingrandimento della città romana; all'inizio dell'età imperiale difatti, Piazza Grande fu adibita ad area residenziale con ricche domus dotate di pregevoli mosaici (precedentemente sull'area sorgeva una necropoli). Tra il III e il IV secolo la zona fu interessata da una nuova trasformazione che portò ad un rinnovamento della Via Emilia con la realizzazione di una nuova massicciata in basole di trachite.

Complessivamente il deposito archeologico che si è formato in età romana varia da uno spessore di circa 1,5 m a sud di Piazza grande, a circa 4 m in prossimità delle absidi del duomo per ridursi a circa 1,6 m in corrispondenza della Ghirlandina (valore non elevato poiché l'area non è stata soggetta a rialzamenti di terreno o a demolizioni come avvenuto per le zone circostanti).

Le alluvioni

Le alluvioni verificatesi a Modena a partire dalla fine del IV-inizio V secolo fino all'alto Medioevo hanno permesso di pareggiare l'irregolarità e colmare la depressione in corrispondenza della Ghirlandina formando un nuovo piano di calpestio a circa 1,7-2 m da quello attuale.

Il Medioevo

Nel corso dell'Alto Medioevo la massicciata dell'antica via Emilia fu spostata poco più a nord su un terreno evidentemente più compatto; in questo periodo il baricentro della città si sposta più ad ovest.

L'area di Piazza Grande torna ad essere utilizzata come area cimiteriale di pertinenza della nuova cattedrale costruita sulle rovine della precedente. Il piano di calpestio viene quindi alzato di ulteriori 80 cm raggiungendo grosso modo la quota attuale (34 m s.l.m.).

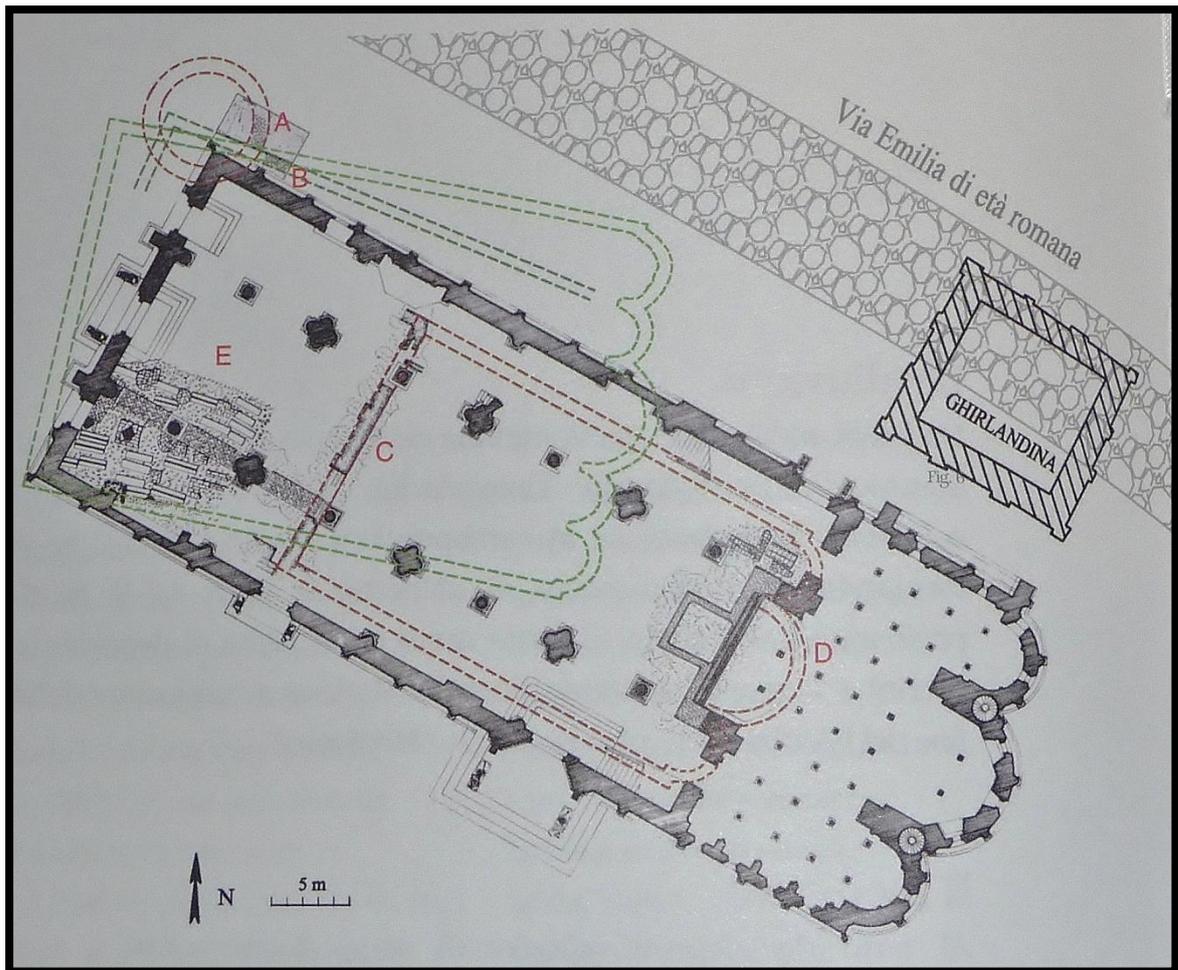


Figura 9. Duomo di Modena e Torre Ghirlandina in rapporto all'orientamento dell'antica via Emilia. In marrone ipotesi ricostruttiva del perimetro della cattedrale altomedievale; in verde chiaro ipotesi ricostruttiva del perimetro della cattedrale prelanfranchiana; in verde scuro nuovo orientamento della cattedrale prelanfranchiana. (Acidini Luchinat, Serchia, Piconi, 1984)

Da questa quota iniziano i lavori per la costruzione del Duomo e della Ghirlandina; le fondazioni raggiungono rispettivamente -1,5 e -3,6 m. La fossa di fondazione della Ghirlandina non arriva quindi ad intercettare i depositi archeologici romani ma si ferma ai depositi alluvionali accumulati, come detto in precedenza, sui resti della vecchia Via Emilia romana.

3.2 Fasi costruttive della torre

Ci sono diverse ipotesi sulla divisione delle fasi costruttive della torre Ghirlandina. La data di inizio lavori varia tra il 1099 e il 1106 in base alle interpretazioni fatte dagli studiosi sui documenti dell'epoca mentre la fine dei lavori è riconducibile al 1319.

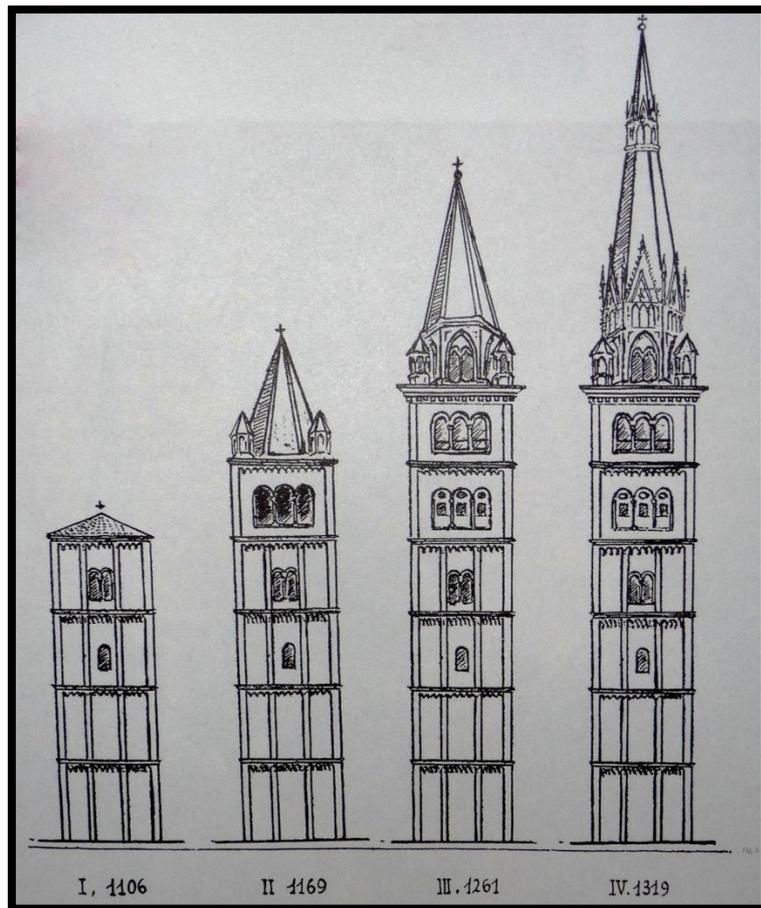


Figura 10. Ipotesi delle fasi costruttive della torre secondo William Montorsi. (Montorsi, 1976)

La torre è stata eretta quindi in un intervallo temporale pari a circa 200 anni associabile a 4 fasi costruttive ben distinte (Figura 10):

- ✓ Fase 1: vengono realizzate le fondazioni e la base della Ghirlandina fino all'inizio del fusto. Si tratta complessivamente di un'altezza di 13 metri. I motivi per cui i lavori vengono sospesi sono da associare presumibilmente ai cedimenti del terreno non previsti e all'assestamento della torre.
- ✓ Fase 2: elevazione del fusto e costruzione della prima loggia per un'altezza di circa 32 m. La fase due si distingue soprattutto per i materiali di rivestimento della muratura esterna e per l'apparato scultorio che cambiano rispetto la fase precedente. I lavori sono databili in un periodo che va tra il 1169 e il 1184.
- ✓ Fase 3: viene costruita la seconda loggia. Le fonti documentarie la collocano in riferimento al 1261 come data di realizzazione.
- ✓ Fase 4: la guglia va a completare l'opera. Data di fine costruzione 1319.

Questa divisione in fasi è sicuramente una criticità importante per ciò che riguarda la stabilità dell'opera e dovrà sicuramente esser presa in considerazione durante la fase di analisi dell'elaborato. Le fasi e quindi le pause nella realizzazione, erano difatti spesso causate da assestamenti o cedimenti della torre, non sempre previste nel progetto, che hanno portato più di una volta a tentativi di correzione della pendenza di quest'ultima, fattore che nel tempo può andare ad inficiare notevolmente sulla stabilità della torre e sulla risposta del terreno alle variazioni di forze in gioco.

3.3 Evoluzione nel corso dei secoli e rapporto tra strutture

Attraverso un rilievo fotogrammetrico e topografico svolto nel 2006 dall'Università di Parma in collaborazione con la ditta FO.A.R.T. si è potuto in parte ricostruire l'evoluzione della torre e il rapporto di quest'ultima con gli edifici circostanti (in particolar modo con il Duomo).

Sin dall'inizio della sua costruzione, la torre ha risentito della presenza del Duomo, struttura sicuramente più pesante ma a sua volta più stabile considerando che sorge su terreno maggiormente consolidato; questo ha portato ad un'inclinazione della torre in direzione sud. Solo dopo il completamento del sesto e ultimo piano della Ghirlandina, questa ha modificato l'andamento dell'inclinazione a favore della sacrestia (direzione ovest) mantenendolo fino ad oggi. Questa variazione è sicuramente imputabile alla costruzione di arconi (1338) di collegamento tra torre e Duomo che, nonostante il basso livello di contrasto in relazione all'altezza della torre, hanno avuto effetti positivi nella stabilizzazione di quest'ultima; l'equilibrio della torre si dimostra quindi estremamente sensibile anche ad interventi modesti.

Se però sul lato meridionale dove sorge il Duomo, la situazione è rimasta pressoché immutata dal XIV secolo a oggi, sul lato occidentale le modifiche apportate nel corso degli anni a sacrestia e palazzi circostanti sono state sicuramente più marcate.

La sacrestia, inizialmente piccola, fu ampliata nel 1476 e sopraelevata in aderenza al lato settentrionale della cattedrale; dopo circa 25 anni un terremoto danneggiò la struttura che venne completamente ristrutturata. Alla fine dell'ottocento l'intero insieme degli

edifici intorno al Duomo subì notevoli modifiche e demolizioni. La più rilevante riguarda la parte nord del Duomo che fu liberata, con parziale demolizione anche del chiostro della sacrestia e che portò all'arretramento del protiro della Porta della Pescheria, allineato con lo spigolo sud-ovest della Ghirlandina che, di fatto, svolgeva in direzione ovest un ruolo di contrasto ai movimenti della torre simile a quello dei benefici arconi sul lato sud (Figura 11).

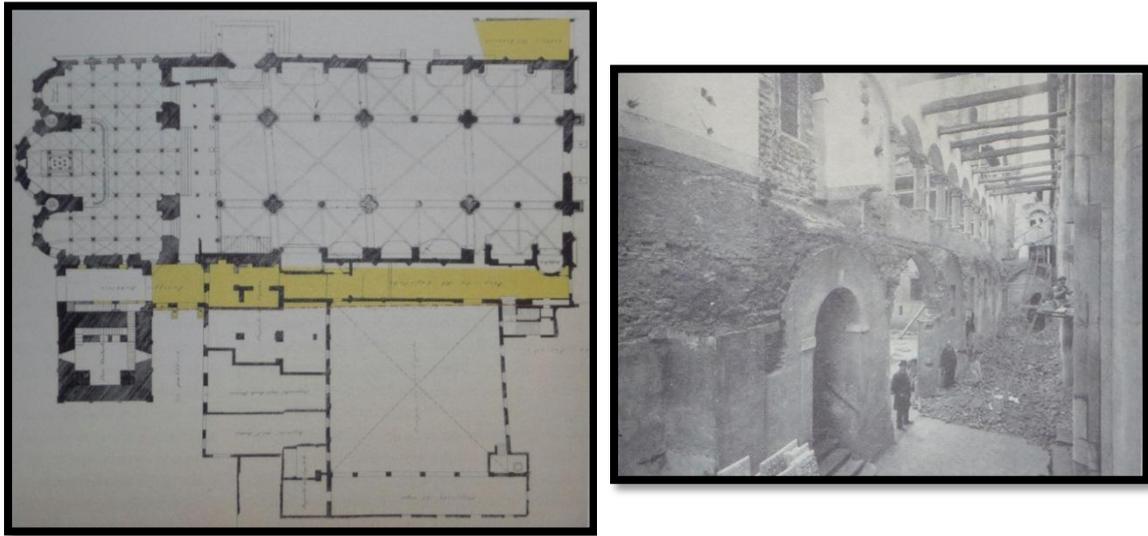


Figura 11. Pianta storica con indicate in giallo le demolizioni e foto dei lavori. (Cadignani, 2009)

Riassumendo, le cause più rilevanti che hanno portato a variazioni di inclinazione della torre (tenendo conto solo del rapporto tra gli edifici) sono:

- ✓ La costruzione contemporanea della torre e della cattedrale ha innescato le prime rotazioni della torre stessa e lo sprofondamento di quest'ultima ha trascinato e dissestato la cattedrale, creando l'evidente convergenza tra i due edifici (Figura 12);

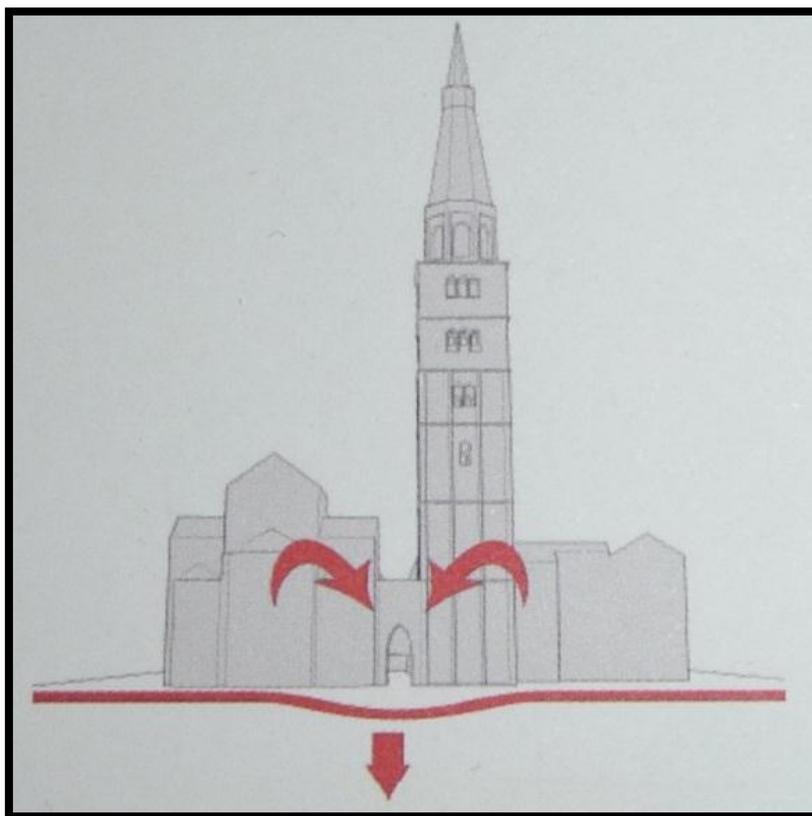


Figura 12. Schema dei dissesti “convergenti” della torre e del Duomo e dell’effetto di trascinamento dello sprofondamento della torre. (Cadignani, 2009)

- ✓ I lavori di demolizione effettuati alla fine dell’Ottocento ed in particolare le demolizioni delle strutture di contrasto su cui la torre si sorreggeva hanno contribuito alla rotazione verso ovest.

3.4 Situazione recente ed attuale

Andando a considerare l’evoluzione dell’inclinazione della torre dalla sua costruzione ad oggi, è possibile vedere come nell’ultimo secolo questa abbia subito un deciso incremento che secondo le previsioni effettuate dai tecnici che hanno partecipato alla stesura del volume “La Torre Ghirlandina”, potrebbe continuare a crescere in maniera decisa (Cadignani, 2009).

La situazione è quindi di certo anomala, poiché si deve tener presente che i cedimenti del terreno normalmente hanno una fase iniziale più accentuata che va via via scemando con il tempo; nel nostro caso, dopo una fase iniziale di forti deformazioni (come

confermato dal grafico seguente), la torre si sarebbe dovuta “stabilizzare” nel tempo verso cedimenti modesti, cosa a quanto pare non vera (Figura 13).

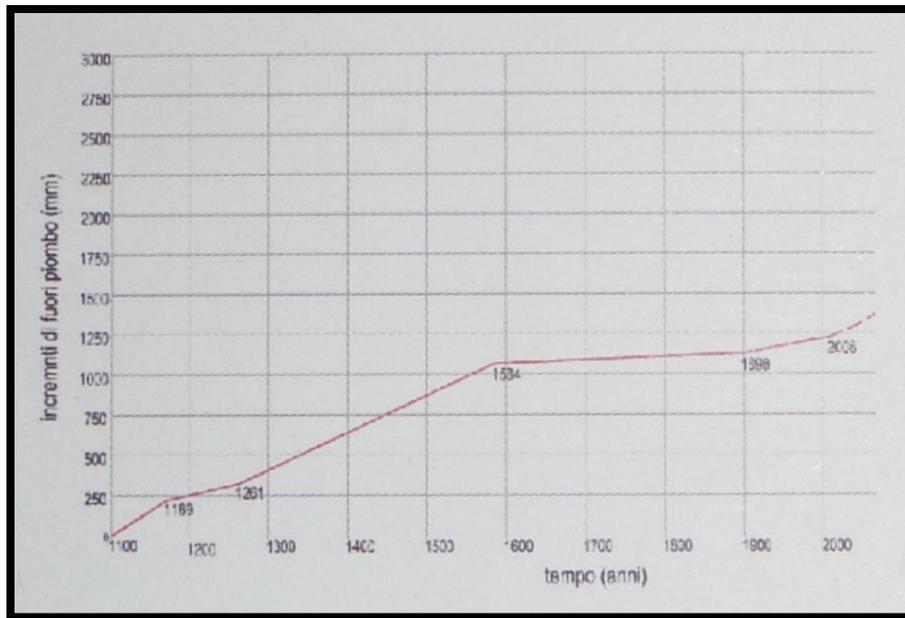


Figura 13. Grafico dell'evoluzione dell'inclinazione della torre dalla costruzione a oggi. (Cadignani, 2009)

Una possibile causa (ipotesi tutta da verificare) si può individuare nella forte variazione nel livello di falda acquifera che si è verificata nell'arco temporale che va dal 1960 a 1990. Nei primi anni '60 infatti, lo sviluppo industriale nella zona del modenese ha portato a grandi emungimenti dalle falde sotterranee per soddisfare il fabbisogno di acqua crescente, che hanno raggiunto il picco intorno al 1976. Il livello di falda era calato in maniera decisa, al punto tale da spingere il Comune di Modena a regolamentare gli emungimenti destinati alle industrie e a mettere in atto una politica ambientale che, ad oggi, ha permesso di arrestare il fenomeno e pervenire ad un ripascimento delle falde acquifere (Figura 14).

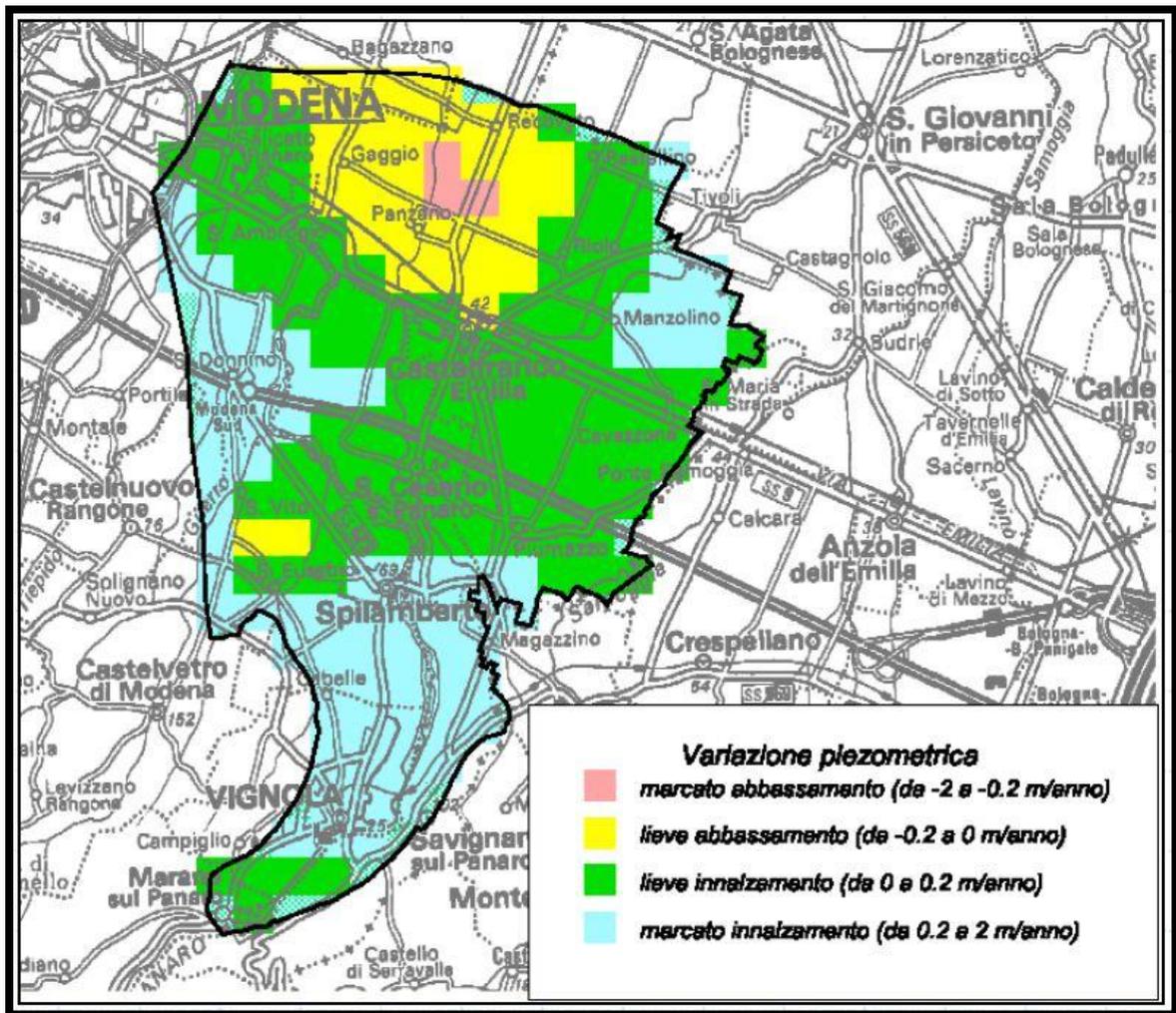


Figura 14. Variazioni piezometriche conoidi appenniniche (Panaro). (Lo stato qualitativo nelle acque sotterranee, 2006)

Considerando quindi quanto la torre sia sensibile ai cambiamenti degli elementi al contorno, una variazione così marcata (in un arco temporale decisamente breve rispetto la storia della torre) del livello di falda può aver incentivato o meglio accelerato l'inclinazione del suo fusto prismatico.

Questi aspetti saranno approfonditi nel capitolo seguente.

4. Problematiche geologiche e deformazioni nell'area del centro storico della città di Modena

4.1 La subsidenza

L'attuale assetto fisico della Pianura Padana è conseguenza di una serie di processi nei quali l'uomo ha rivestito un ruolo notevole. Come è noto, tra i principali fenomeni in gioco assume oggi particolare rilievo la subsidenza, a fianco di altre conseguenze dell'antropizzazione del territorio nonché, per quanto riguarda gli ultimi decenni, dell'innalzamento del livello del mare e del diminuito apporto di sedimenti da parte dei fiumi. Ovviamente questi fenomeni acquistano particolare importanza nella Pianura Padana orientale ma sono estendibili anche alla zona più centrale di quest'ultima, a causa del loro sensibile contributo all'incremento del rischio idraulico del territorio.

La subsidenza è un fenomeno naturale molto diffuso, che interessa ed ha sempre interessato ampie superfici della crosta terrestre. Nella sua continua evoluzione geodinamica la Terra presenta aree stabili, dette cratoniche, ed aree mobili, in cui le tensioni sotterranee si traducono in lente, ma inesorabili deformazioni del suolo, che attraverso i tempi geologici, danno luogo alla formazione di rilievi montuosi, depressioni oceaniche e aree fortemente subsidenti in cui si depositano i sedimenti che vanno a ricoprire buona parte della superficie terrestre.

La subsidenza è quindi un progressivo abbassamento del suolo che porta alla deposizione di sedimenti che vengono a creare un vero e proprio bacino sedimentario. La Pianura Padana (come già descritto in precedenza) è, difatti, il risultato del colmamento di una fossa subsidente di età tardo-terziaria/quaternaria, inserita tra gli insorgenti rilievi alpini ed appenninici; nella zona di maggior sprofondamento, che corrisponde al settore sud-orientale della Pianura Padana, si sono depositati spessori fino a seimila metri in circa 5,5 milioni di anni, nel periodo Pliocene-Quaternario, per la cui sedimentazione è stato necessario un pari valore di abbassamento del suolo.

Tradotto in mm/anno tale subsidenza assume un valore apparentemente insignificante: 1,15 mm/anno. Questo valore può essere in effetti considerato rappresentativo dell'ordine di grandezza della subsidenza naturale.

Le cause della subsidenza possono difatti esser suddivise in due macro famiglie:

- ✓ Subsidenza naturale;
- ✓ Subsidenza artificiale (di natura antropica).

Subsidenza naturale

Il processo rappresenta il progressivo abbassamento del piano campagna dovuto alla compattazione dei materiali; i sedimenti, sono difatti molto porosi e tendono a comprimersi, riducendo il volume dei vuoti se sottoposti a carico. È un processo del tutto naturale riconducibile soprattutto a terreni di tipo alluvionale.

Subsidenza artificiale

La subsidenza artificiale è una componente del fenomeno relativamente nuova; l'intervento dell'uomo può provocare un'accentuazione della subsidenza naturale di una certa zona, come pure può innescare questo fenomeno in un'area esente da movimenti naturali in atto.

Le cause sono da mettere in relazione soprattutto con le perturbazioni indotte nelle condizioni idrogeologiche del territorio.

La causa più comune e di certo più rilevante è l'eccessivo emungimento da falde acquifere, che non permette la possibilità di ricarica naturale di queste ultime. Altre cause possono ricercarsi nella coltivazione degli idrocarburi, liquidi o gassosi, nello sfruttamento di giacimenti saliferi, per dissoluzione degli stessi, di quelli di carbone o di altri minerali.

Anche le opere di bonifica, i riporti di terreno, i prosciugamenti effettuati mediante well-points per l'esecuzione di scavi ma anche il peso stesso dei manufatti su terreni sottostanti costituisce un'ulteriore causa di subsidenza.

L'abbassamento del suolo è, difatti, la conseguenza della compattazione e quindi della contrazione di spessore che i terreni subiscono quando vengono sottoposti ad una variazione di carico geostatico, oppure a variazioni di pressione dei fluidi in essi contenuti. Con l'emungimento di un fluido si provoca un abbassamento della pressione del serbatoio roccioso come se si aumentasse la pressione originata dal peso dei sedimenti sovrastanti (Figura 15).

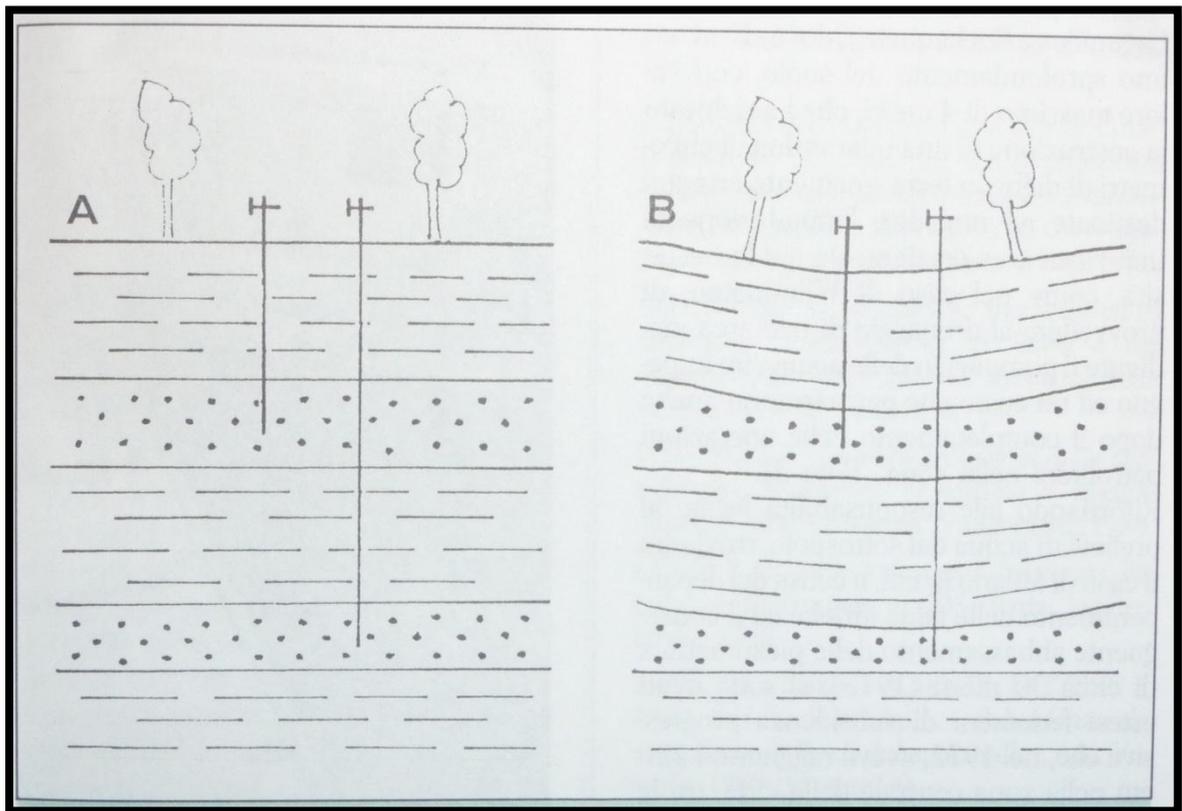


Figura 15. Schema esemplificativo di subsidenza dovuta a prelievi di acqua dal sottosuolo. A) Esecuzione dei pozzi ed estrazione idrica dai livelli acquiferi; B) Abbassamento delle falde idriche sottoposte ad emungimento, compattazione dei terreni interessati dalla depressurizzazione e conseguente abbassamento dei terreni sovrastanti e del suolo. (Barnaba, 1992)

L'entità della subsidenza che si produce in superficie varia sensibilmente da un caso all'altro, in quanto è funzione di varie componenti, litologiche e geotecniche dei depositi; in particolar modo la compressibilità, la profondità e lo spessore dei terreni interessati, l'abbassamento di pressione interna, la durata dell'azione perturbante sono fattori determinanti per una stima dell'abbassamento in superficie (tenendo sempre in considerazione che la contrazione degli strati sotterranei viene via via attenuata verso l'alto).

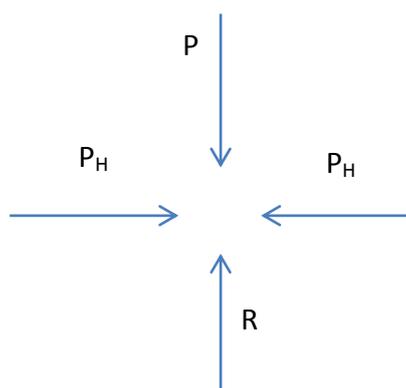
4.2 Cedimenti delle fondazioni

Il termine cedimento indica lo spostamento verticale di una struttura, sia essa un fabbricato, una strada, un rilevato. Le conseguenze del cedimento dipendono non solo dalla sua entità, ma soprattutto dal grado di uniformità e delle caratteristiche della struttura.

Natura del cedimento

Condizioni di equilibrio

Il peso P della struttura e porzione di terreno considerato deve essere bilanciato dalla reazione verticale R fornita dal terreno stesso, mentre la pressione laterale P_H deve essere sufficiente a mantenere l'insieme in equilibrio. Se all'incremento del valore di P non corrisponde un analogo incremento delle altre forze in gioco, l'insieme subirà un cedimento verticale e/o laterale.



Forze statiche e dinamiche

Il cedimento di una fondazione può avvenire per l'azione di forze statiche o dinamiche. L'analisi dell'elaborato prende in considerazione solo le forze statiche ma per completezza verranno riportate anche quelle dinamiche.

Forze statiche comprendono:

- ✓ il peso proprio della struttura ed il sovraccarico considerato;
- ✓ le variazioni di livello della falda freatica sia naturali che artificiali;
- ✓ la subsidenza causata da operazioni di scavo in sotterraneo, ivi comprese le erosioni naturali;

- ✓ la mancanza di resistenza al taglio lungo le superfici di scorrimento.

Forze dinamiche:

- ✓ Le vibrazioni (causate da macchine, esplosivi, infissioni di pali ecc.);
- ✓ I terremoti.

Cedimenti dovuti a variazioni di falda

Considerando le grandi variazioni dei livelli di falda verificatisi per cause antropiche, è necessario considerare il cedimento dovuto a queste variazioni un problema di notevole spessore. Prendendo come esempio una falda freatica con un certo livello d'acqua, su questo piano le pressioni interne sono nulle: al di sopra di esso il terreno è in teoria perfettamente asciutto. In realtà esso è completamente saturo sino ad una certa distanza dalla falda e parzialmente saturo al di sopra di questo ultimo livello. L'acqua contenuta nei pori al di sopra della falda costituisce l'umidità del terreno la cui origine è dovuta alla tensione capillare dell'acqua.

La variazione del livello freatico provoca il costipamento dei grani in un terreno sabbioso e conseguente assestamento della struttura sovrastante. L'elevazione della falda mentre induce una sottopressione sulla struttura, modifica le caratteristiche del terreno riducendo l'angolo di attrito φ ed aumentando il valore di spinta. L'incremento della pressione idrostatica dei pori (pressione neutra) riduce la resistenza al taglio del terreno ed è spesso la causa di deformazioni.

4.3 Fenomeni legati alla sismicità

Il comune di Modena è stato dichiarato sismico dall'Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519 nella quale sono stati definiti i parametri di accelerazione al suolo con probabilità di superamento del 10% in 50 anni compresa fra 0.150 g e 0.175 g. Le indagini effettuate dal Comune di Modena dopo la Deliberazione 112/2007 sul territorio urbanizzato, urbanizzabile, su quello in cui sono previste opere di rilevante interesse pubblico e nei corridoi destinati alle reti infrastrutturali strategiche utilizzando i dati geologici esistenti

nella banca dati comunale hanno evidenziato che, essendo presenti sul territorio comunale depositi di conoide alluvionale con $V_{s30} < 800$ m/s, si possono avere effetti sismici locali determinati da:

- ✓ Amplificazioni sismiche per caratteristiche litologiche;
- ✓ Fenomeni di liquefazione e/o densificazione;
- ✓ Cedimenti.

Partendo da questo presupposto, lo scrivente ritiene importante focalizzare l'attenzione sulla possibilità di occorrenza di fenomeni di liquefazione nel centro abitato di Modena.

Fenomeno della liquefazione

Principio degli sforzi efficaci

Per comprendere il fenomeno della liquefazione è necessario prima considerare il Principio degli Sforzi Efficaci. Questo afferma che in un terreno saturo, i cui spazi interstiziali sono riempiti completamente d'acqua, agisce nello scheletro solido una tensione efficace σ' data da:

$$\sigma' = \sigma - p \quad (1)$$

dove σ è la tensione totale agente ortogonalmente a qualsiasi piano passante per un generico punto, e p è la pressione dell'acqua nel medesimo punto. Esprimendo il Criterio di Resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci, la resistenza al taglio che può essere mobilitata su un piano normale n soggetto a una tensione normale totale σ_n , è data da:

$$\tau_n = (\sigma_n - p) \tan \phi + c \quad (2)$$

essendo ϕ l'angolo di resistenza al taglio del materiale e c la coesione.

Cause del fenomeno

La liquefazione è quel fenomeno che si ha quando un terreno saturo privo di coesione passa dallo stato solido a quello liquido. Il passaggio di fase è dovuto all'incremento della pressione interstiziale e la perdita di resistenza a taglio.

Il fenomeno della liquefazione dei terreni durante i terremoti, interessa in genere i depositi sabbiosi e/o sabbioso limosi sciolti, a granulometria uniforme, normalmente consolidati e saturi.

Durante un evento sismico infatti, le sollecitazioni indotte nel terreno, possono determinare un aumento delle pressioni interstiziali fino ad eguagliare la pressione litostatica e la tensione di sconfinamento, annullando la resistenza al taglio del terreno (secondo il principio delle pressioni efficaci di Terzaghi (1)), e inducendo fenomeni di fluidificazione.

Dalla equazione (2) si vede che la liquefazione si raggiunge quando il valore della tensione tangenziale τ_n tende a zero. Al diminuire quindi della coesione c , dell'angolo di attrito ϕ , della tensione totale σ_n , e all'aumentare della pressione interstiziale p il pericolo per un terreno di passare allo stato fluido aumenta. Tale pericolo riguarda pertanto i depositi superficiali di terreni incoerenti o debolmente coerenti, in presenza di falde acquifere.

Dai casi verificatisi in passato si è capito che questo fenomeno è profondamente influenzato dal numero dei cicli N del terremoto, dalla densità relativa D del terreno e dalla sua granulometria. Un terreno incoerente, a parità di altri fattori, è maggiormente esposto al pericolo della liquefazione quanto minore è la sua densità relativa. Il potenziale di liquefazione aumenta poi, ovviamente, al crescere di N .

Riassumendo, la probabilità che un deposito raggiunga la liquefazione dipende da:

- ✓ Grado di addensamento;
- ✓ Granulometria e forma dei granuli;
- ✓ Condizioni di drenaggio;
- ✓ Andamento ciclico delle sollecitazioni sismiche e loro durata;

- ✓ Età del deposito;
- ✓ Profondità della linea di falda (prossima alla superficie).

Effetti della Liquefazione

Il manifestarsi della liquefazione può quindi dare origine ad effetti di varia natura (Monaco, 2008):

- ✓ Sprofondamento di edifici nel terreno;
- ✓ Scorrimento di pendii;
- ✓ Collasso di terrapieni, rilevati stradali e opere di terra in genere;
- ✓ Collasso di palificate per perdita di connessione laterale;
- ✓ Zampillio di copiosi getti d'acqua e di sabbia con formazione dei caratteristici coni;
- ✓ Collasso di opere di sostegno per sovraspinta del terreno a monte.

È quindi di fondamentale importanza tener conto di questo fenomeno ed esser certi che questo non si presenti soprattutto se in riferimento ad un centro abitato o infrastrutture.

Tornando al caso di Modena, nella Figura 16 sono riportate le aree in cui sono presenti

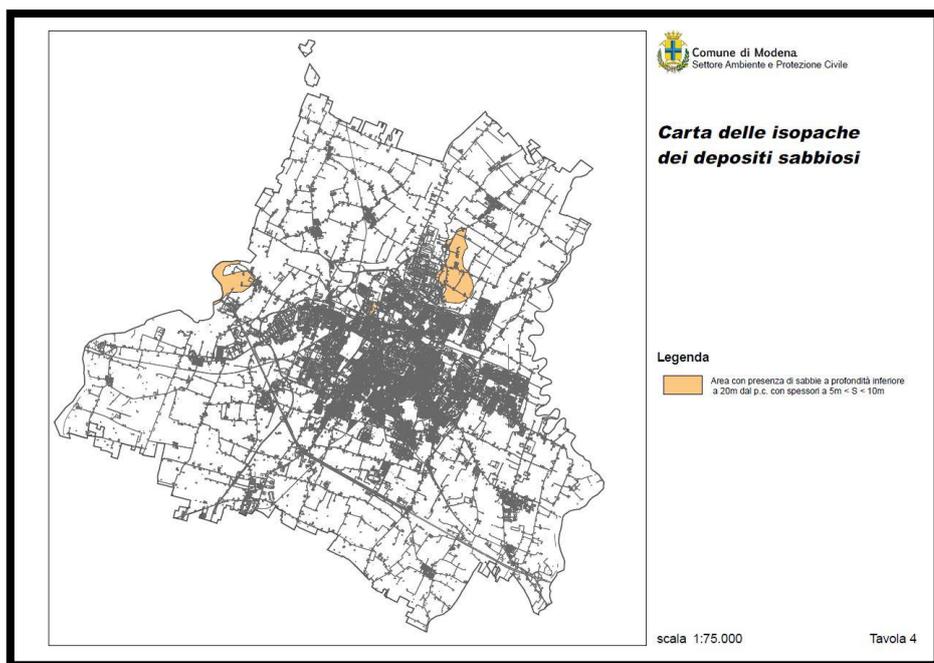


Figura 16. Carta delle isopache dei depositi sabbiosi. (SRT - Servizio Risorse e Territorio)

depositi granulari fini con spessori > di 5 m e il livello superiore della falda acquifera a profondità minore di 15 m dal piano campagna, potenzialmente suscettibili di liquefazione. Tali depositi non ricadono però nelle fasce critiche previste in AGI 2000, cioè siamo in casi di esclusione del verificarsi di fenomeni di liquefazione come previsto dagli allegati A1 e A3A della deliberazione 112/2007: non vi sono depositi granulari fini che possano dar luogo a fenomeni di liquefazione (Figura 17).

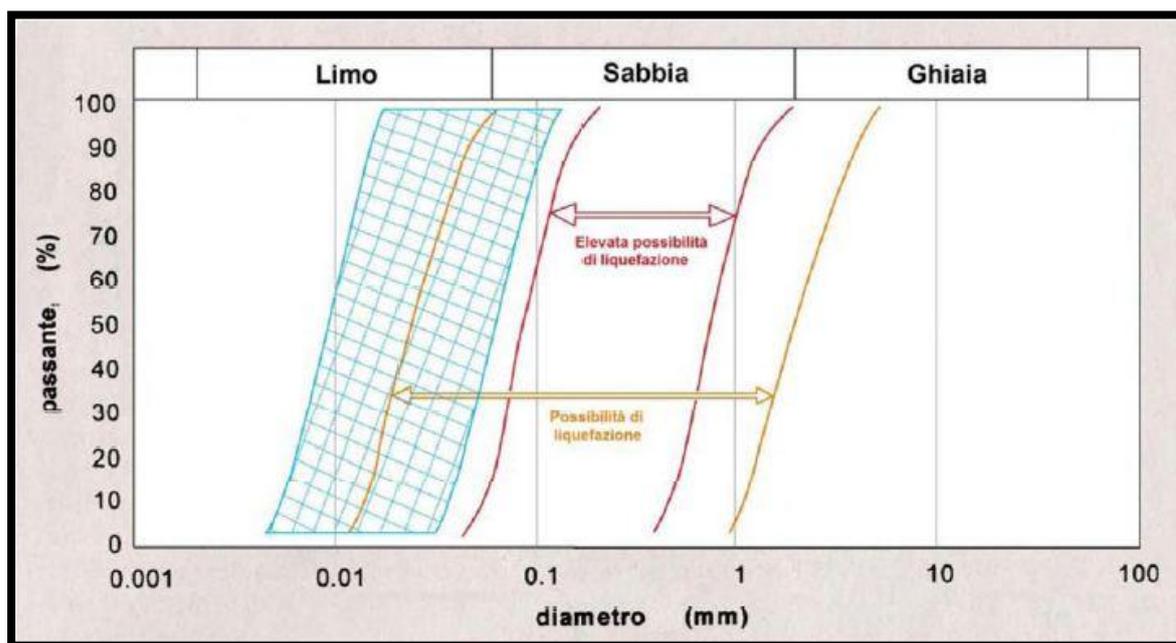


Figura 17. Campo granulometrico dei depositi granulari fini con spessori > di 5m. (SRT - Servizio Risorse e Territorio)

5. Metodi

Partendo da una raccolta dati circostanziata (che verrà illustrata dettagliatamente in seguito), si è arrivati ad effettuare un'elaborazione approfondita del sottosuolo di Modena tramite l'uso dei seguenti programmi/software:

- ✓ ArcGIS;
- ✓ Microsoft Excel;
- ✓ Microsoft Access;
- ✓ RockWorks15;
- ✓ Google Earth.

La combinazione di questi programmi ha portato lo scrivente a creare un database sviluppato utilizzando Microsoft Access 2010, e un modello 3D del sottosuolo del centro storico di Modena tramite l'uso del software RockWorks15. Viene in seguito riportato un sunto di ogni programma utilizzato e la funzione che questo ha adempiuto.

5.1 ArcGIS

ArcGIS è la suite di prodotti software di ESRI per la creazione e la consultazione di un sistema GIS (Geographic Information System). Tra i programmi offerti dalla suite, ArcMap permette la consultazione di Carte tecniche regionali che lo scrivente ha utilizzato per ottenere le coordinate georeferenziate della città di Modena e per lavorare sui dati PS (Permanent Scatterer).

5.2 Microsoft Excel

Microsoft Excel è il foglio elettronico prodotto da Microsoft, dedicato alla produzione ed alla gestione dei fogli elettronici. È parte della suite di software di produttività personale Microsoft Office. È stato utilizzato per l'elaborazione e il confronto dei dati pluviometrici con quelli piezometrici.

5.3 Microsoft Access

È un programma facente parte della suite Microsoft Office che consente di strutturare dei dati in tabelle, di metterli in relazione tra loro come si desidera e di realizzare delle estrazioni specifiche in modo molto semplice, per esempio con delle maschere preimpostate sulla base delle esigenze di chi vuole utilizzare questi dati.

Il programma è stato utilizzato, come prima accennato, per creare un database di facile consultazione riguardante le principali caratteristiche di ogni sondaggio (effettuato nel centro storico di Modena ottenuto tramite la raccolta dati):

- ✓ Ubicazione del foro;
- ✓ Committente;
- ✓ Profondità foro;
- ✓ N. campioni indisturbati;
- ✓ Presenza di piezometri;
- ✓ Prove di laboratorio.

5.4 Rockworks15

RockWorks15 è un software integrato di Rockware per la gestione, analisi e visualizzazione di dati geologici. Il software ha permesso di creare un modello 3D del sottosuolo del centro storico di Modena in modo tale da avere una visione più chiara riguardo gli andamenti dei diversi strati che formano il sottosuolo modenese.

5.5 Google Earth

Google Earth è un software sviluppato da Keyhole (società acquisita da Google nel 2004) che riproduce virtualmente la Terra utilizzando immagini satellitari, fotografie aeree e dati topografici memorizzati in una piattaforma GIS.

Il programma è stato utilizzato in collaborazione con ArcMap per avere coordinate GPS dei sondaggi inseriti nel database Access.

6. Raccolta dati

Per avere un riscontro pratico e ove possibile numerico, sulle problematiche trattate in precedenza, si è portata avanti una campagna di raccolta dati che ha riguardato:

- ✓ litologia e stratigrafia dei terreni;
- ✓ dati piezometrici e pluviometrici;
- ✓ dati di spostamento da satellite elaborati secondo la tecnica Permanent Scatterer;
- ✓ sondaggi, prove penetrometriche e prove di laboratorio tutte localizzate sul territorio modenese e nel dettaglio sulla Piazza Grande di Modena.

Sono riportate in seguito approfondimenti su ognuno dei temi affrontati nella raccolta dati.

6.1 Litologia e stratigrafia

Per avere un inquadramento su vasta scala e in profondità del territorio modenese, comprensivo del livello degli acquiferi presenti e del loro andamento, si è fatto riferimento alle sezioni geologiche presenti sul sito del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (Figura 18), integrandole con le carte redatte dall'ENI-AGIP per conto della Regione Emilia-Romagna in uno studio riguardante le riserve idriche sotterranee della regione.

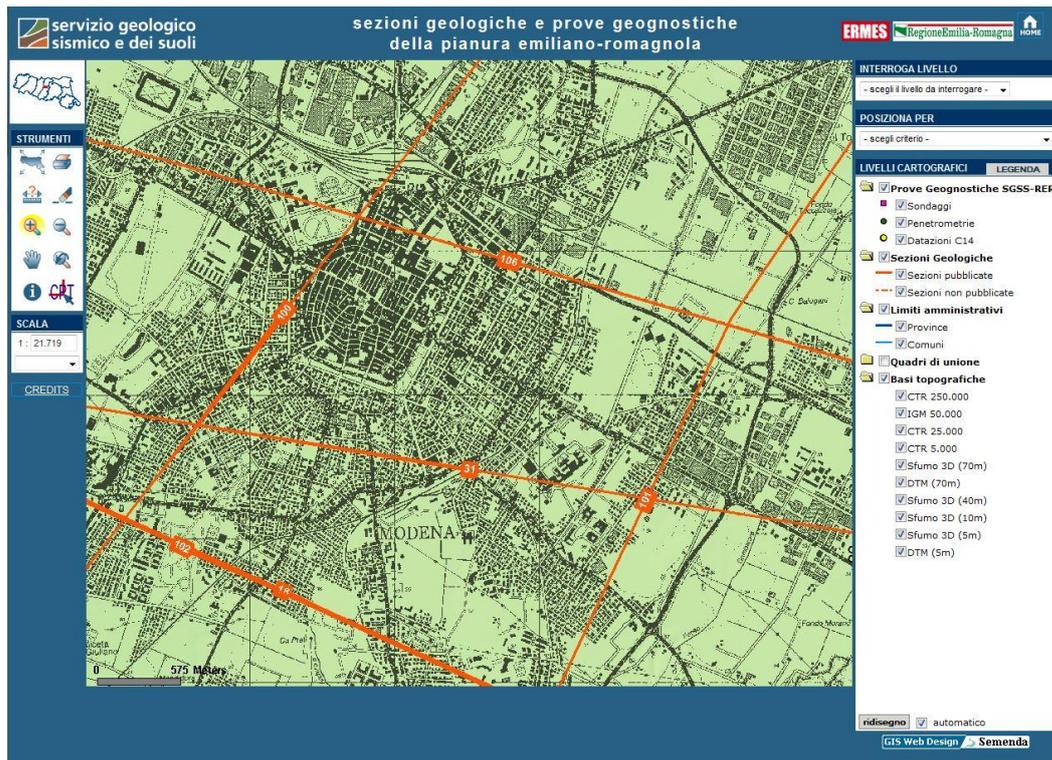


Figura 18. Interfaccia utente del GIS presente sul sito della Regione Emilia-Romagna. (Servizio Geologico Sismico e dei Suoli)

6.2 Piezometri e piezometrie

Per completare le informazioni sugli acquiferi rispetto a quanto visto sopra con le sezioni geologiche, in riferimento al livello e all'andamento delle falde acquifere, sono stati acquisiti i dati piezometrici relativi alle acque sotterranee forniti dall'ARPA attraverso il sito online (Figura 19).

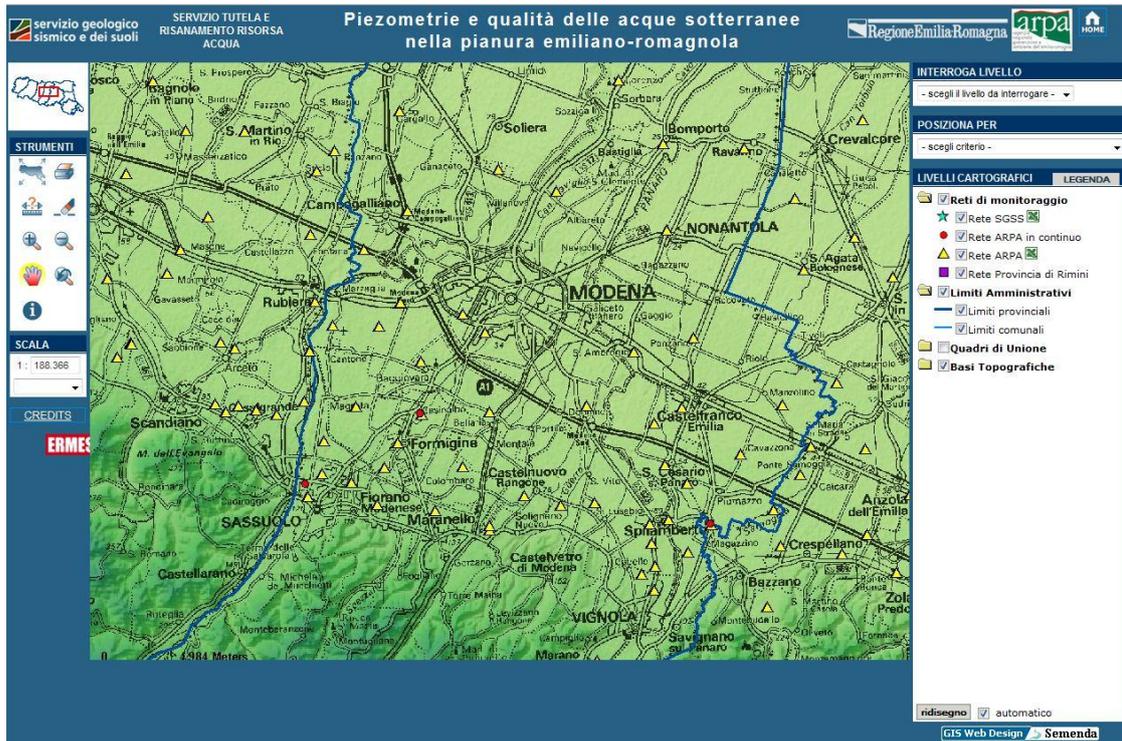


Figura 19. Interfaccia utente del GIS presente sul sito della Regione Emilia-Romagna. (Servizio Geologico Sismico e dei Suoli; Arpa)

Per ogni pozzo ARPA è stato possibile ottenere le serie storiche delle rilevazioni a partire dagli anni 1976 fino ad oggi (Figura 20).

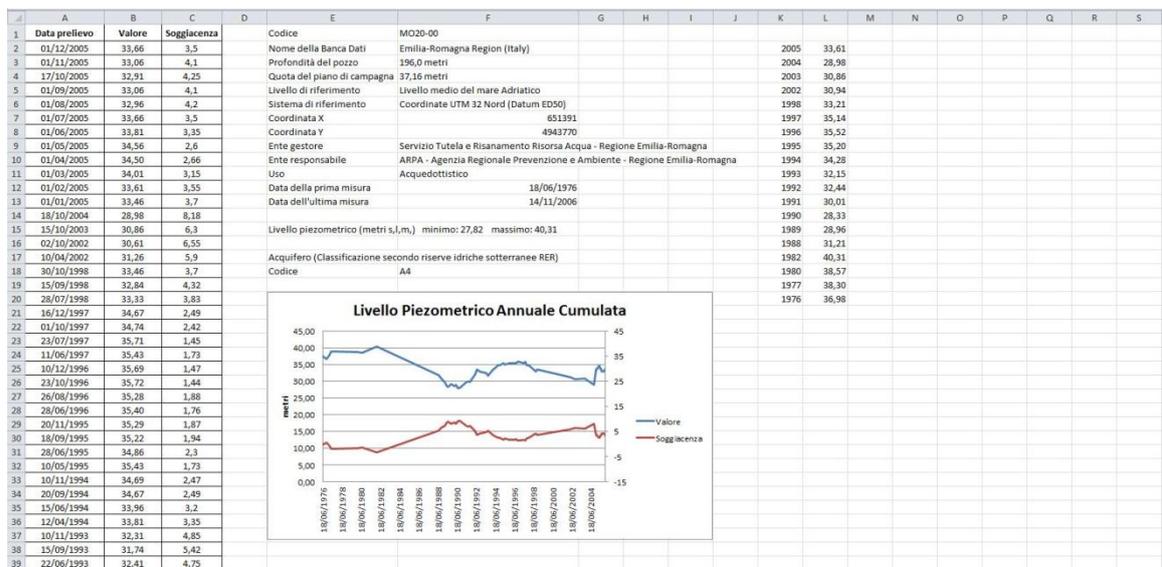


Figura 20. Esempio di dati messi a disposizione dal servizio ARPA Emilia-Romagna con prima elaborazione.

6.3 Dati pluviometrici

Per verificare se la variazione della quota piezometrica è strettamente dipendente dal regime pluviometrico che interessa la zona, si sono scaricati tramite il servizio ARPA Emilia Romagna, Servizio Idro-Meteorologico i dati 'Dexter' di alcune stazioni di registrazione nei dintorni della città di Modena. Anche questi dati, come quelli precedenti, hanno rilevazioni che partono dal 1976 e arrivano fino ai giorni nostri (Figura 21).

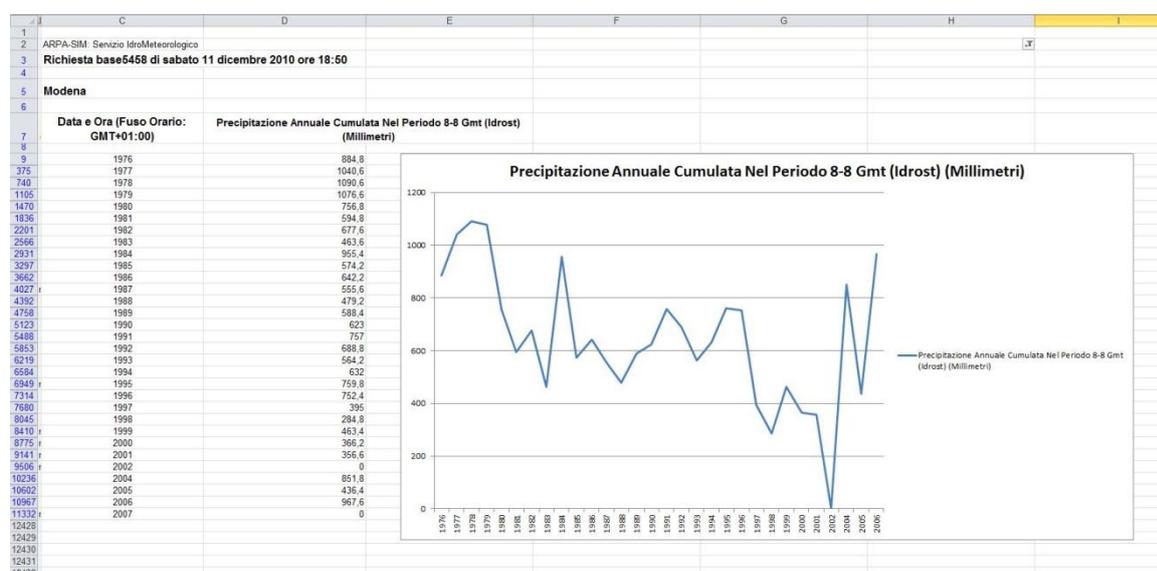


Figura 21. Esempio di dati Dexter. Ogni cella corrisponde alla precipitazione cumulata annuale a partire dal 1976 (i dati sono stati elaborati).

6.4 Permanent Scatterer

Introduzione ai Permanent Scatterer (PS)

Le tecniche avanzate di rilevamento da satellite degli spostamenti della superficie terrestre sono note come interferometria SAR (InSAR).

I sistemi radar coerenti e, nello specifico, i radar di tipo SAR (Synthetic Aperture Radar) sono in grado di misurare la distanza tra il sensore e un bersaglio a terra, registrando il tempo intercorso tra l'emissione dell'onda elettromagnetica e la ricezione del segnale retro-diffuso dal bersaglio stesso. Grazie alla loro periodicità di acquisizione, i dati SAR forniscono misure ripetute della distanza sensore-bersaglio lungo la direzione di vista del

satellite (LOS). Il confronto della distanza, misurata in istanti di tempo diversi, consente di mettere in luce eventuali spostamenti dei bersagli al suolo.

La tecnica convenzionale per lo studio dei dati SAR è l'interferometria differenziale (DInSAR) e si basa sul confronto tra due immagini distinte, acquisite sulla stessa area di interesse. Essa tuttavia risente di alcuni effetti che riducono, o addirittura compromettono, la qualità dei risultati.

Grazie al Politecnico di Milano, che ha sviluppato e brevettato l'algoritmo PSInSAR™ nel 1999, è nata una seconda generazione di tecniche interferometriche, conosciute come Persistent Scatterer Interferometry (PSI). Le tecniche PSI rappresentano una significativa evoluzione rispetto all'interferometria convenzionale.

In particolare, la tecnica PSInSAR™, sfrutta tutte le acquisizioni disponibili su una stessa area di interesse per individuare quei bersagli a terra (i Permanent Scatterers o PS), che mantengono inalterate nel tempo le proprie caratteristiche elettromagnetiche. Per ciascuno di essi è possibile così ricostruire le velocità medie e la serie storica di spostamento nell'intervallo di tempo analizzato, con precisione millimetrica.

I PS corrispondono tipicamente a edifici, rocce esposte e altri rilevati. La densità dei punti di misura dipende dalla tipologia di area d'interesse e di terreno: il tessuto urbano presenta densità solitamente elevate di punti di misura (>100 PS/km²).

I dati, in un'immagine radar, provengono da bersagli di varia natura a terra, pertanto le caratteristiche elettromagnetiche possono variare significativamente anche tra pixel adiacenti di una stessa immagine (Figura 22). È possibile classificare i pixel dell'immagine in due famiglie di bersagli:

- ✓ I bersagli puntiformi, che caratterizzano un solo pixel, o al più pochi altri pixel ad esso connessi;
- ✓ I bersagli distribuiti, che caratterizzano tutto un gruppo di pixel, e che generano caratteristiche pressoché identiche del segnale radar riflesso.

I primi rappresentano i già noti PS, mentre i secondi costituiscono la "famiglia" dei DS (Distributed Scatterer). Questi ultimi punti non saranno presi in considerazione.

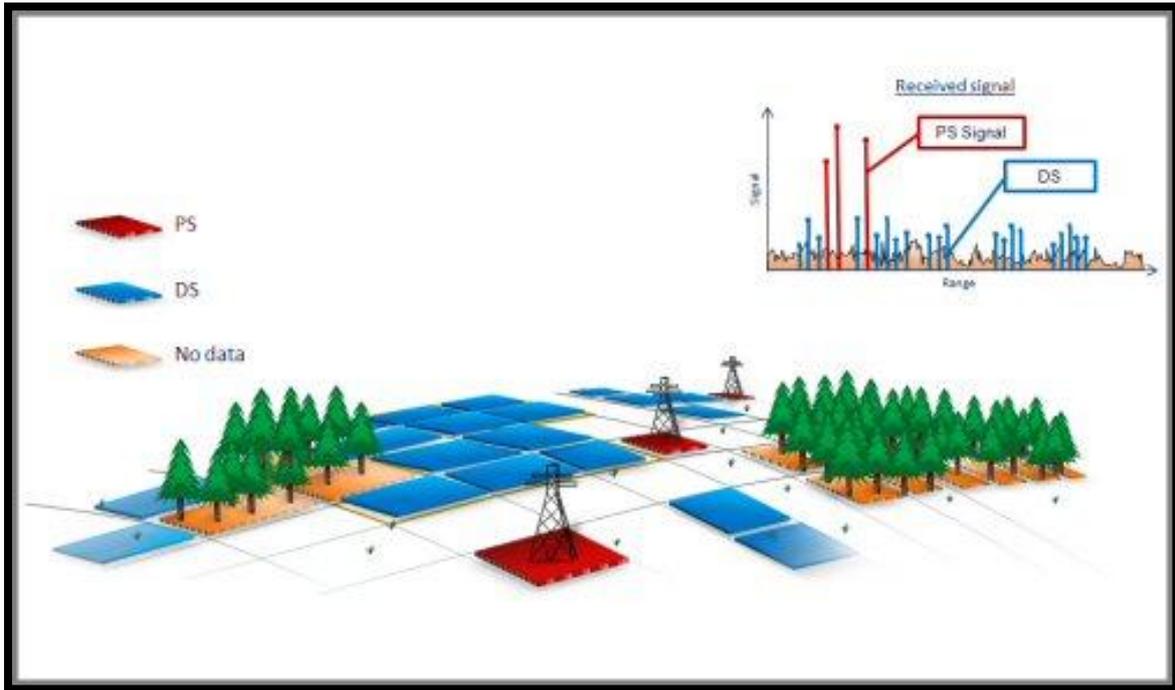


Figura 22. Esempio visivo di permanent scatterer. (TRE sensing the planet, 2011)

Raccolta dati

Attraverso i dati di interferometria radar satellitare prodotti dalla T.R.E. e forniti dal piano straordinario di telerilevamento (PST) del Ministero dell’Ambiente integrati con informazioni provenienti dalla banca dati della Regione Emilia-Romagna, è stato possibile plottare i dati, associandoli alla carta CTR di Modena 1:5000, per ottenere la velocità di spostamento dei PS. I dati sono stati acquisiti dai satelliti ERS1-ERS2:

- ✓ di proprietà dell’ESA (Agenzia Spaziale Europea), furono lanciati rispettivamente il 17 luglio 1991 e il 21 aprile 1995 in un’orbita polare eliosincrona a un’altezza compresa tra i 782 e i 785 km. Sono stati operativi dal 1992 al 2001 e sono stati sviluppati per raccogliere informazioni sulla Terra analizzando terreni, acqua, ghiaccio e atmosfera, utilizzando una varietà di strumenti di misura come:
 - Un Radar altimetrico operante nella banda Ku (porzione della banda K della banda delle microonde dello Spettro elettromagnetico);
 - Un radiometro infrarosso a quattro canali che misura la temperatura dei mari e delle nuvole;
 - Un analizzatore a microonde;

- Un Synthetic aperture radar;
- Un misuratore di vento scatterometro.

Costituiscono quindi un'importantissima fonte dati per studi riguardanti il pianeta Terra.

Il dato è stato utile per avere un riscontro pratico sul fenomeno della subsidenza nella zona del centro storico di Modena (come verrà in seguito illustrato).

6.5 Sondaggi e prove di laboratorio

Per quel che riguarda i sondaggi, si è lavorato su due strade differenti: una, che ha visto la raccolta di dati su sondaggi e prove di laboratorio commissionate dall'Amministrazione comunale di Modena e da altre società esterne al comune per un periodo che copre circa 20 anni a partire dagli anni '80 e che spaziano su tutto il territorio cittadino (in parte i sondaggi in questione erano stati svolti all'interno di una campagna di studi per verificare la fattibilità di una metropolitana che non è mai stata realizzata) (Figura 23).

Tutti i sondaggi sono stati realizzati con la tecnica del carotaggio continuo. Le perforazioni a carotaggio continuo rappresentano l'unico metodo di indagine "diretto" nell'ambito delle tecniche di diagnosi non invasive, dato che viene prelevato un campione del sottosuolo, la cui dimensione è comunque infinitesima rispetto all'estensione dell'area di indagine (i campioni hanno un diametro di 10 cm).

La porzione di terreno estratto in punti accuratamente prestabiliti, permette una lettura diretta della situazione stratigrafica con i seguenti scopi:

- ✓ Ricostruzione geologica del sottosuolo e geomorfologica del paesaggio;
- ✓ Determinazione dell'ambiente sedimentario e delle condizioni di formazione del deposito;
- ✓ Attestazione della presenza di strati antropici;
- ✓ Possibilità di prelievo di materiali all'interno del campione (frammenti ceramici, strutturali, ossei, botanici ecc.) per la definizione degli orizzonti culturali presenti, il loro sviluppo e la loro determinazione cronologica.

Ogni sondaggio ha quindi un numero di campioni indisturbati variabili in base alla profondità raggiunta a cui sono riferite le prove di laboratorio riguardanti:

- ✓ Analisi granulometrica;
- ✓ Compressione ad espansione laterale libera;
- ✓ Triassiale CU;
- ✓ Prova edometrica;
- ✓ Limiti di Atterberg;
- ✓ Prova di taglio CD.



Figura 23. Dettaglio del centro storico di Modena e della zona della stazione. I punti indicano la posizione dei sondaggi analizzati.

L'altra strada ha riguardato l'acquisizione dei dati derivanti dalle prove CPTU effettuate dai tecnici del Dipartimento del DICAM dell'Università di Bologna effettuate nel luglio del 2010 in Piazza Grande a Modena a cui lo scrivente ha partecipato personalmente.

L'indagine con piezocono è realizzata per avere una stratigrafia di dettaglio del sottosuolo ma anche per avere la risalita del livello di falda per ogni verticale.

La prova viene effettuata facendo penetrare alternativamente la punta, la tubazione di rivestimento e tutte e due insieme per tratti di 10 cm misurando rispettivamente la resistenza della punta R_p , la resistenza laterale R_l e la resistenza totale R_t . La resistenza alla punta unitaria $q_c=R_p/10$ è il dato principale che si ricava dalla prova; essa viene in genere presentata sotto forma di diagramma con la profondità ed assieme alla resistenza laterale, permette una classificazione di massima dei terreni attraversati.

Sulla punta del piezocono sono inoltre presenti una o più pietre porose collegate ad un trasduttore, che consente la misura della pressione neutra durante l'infissione; permette anche di effettuare prove di dissipazione della sovrappressione neutra indotta dall'infissione, arrestando la penetrazione per un tempo adeguato.

Dai campioni indisturbati estratti, sono state eseguite prove di laboratorio effettuate nei mesi di ottobre e novembre presso il LAG (Laboratorio di Geotecnica del DICAM) della Facoltà di Ingegneria di Bologna. I campioni:

- ✓ Campione 1: 7,40-7,80 m;
- ✓ Campione 2: 9,40-9,90 m;
- ✓ Campione 3: 15,00-15,50 m.

sono stati sottoposti alle principali prove geotecniche meccaniche e di classificazione al fine di avere una caratterizzazione dettagliata del terreno in esame (Figura 24).



Figura 24. Fotografia del campione 1 subito dopo la sua apertura.

7. Analisi dei dati

7.1 Database e modello 3D in Rockworks15

La campagna di raccolta ha riguardato la raccolta di informazioni su sondaggi e prove di laboratorio commissionate dall'Amministrazione comunale di Modena e da altre società esterne al comune per un periodo che copre circa 20 anni a partire dagli anni '80 e che spaziano su tutto il territorio cittadino. Oltre a questi, sono stati acquisiti i sondaggi effettuati dal Prof. Ing. Lancellotta nel 2008 in Piazza Grande e Piazza della Torre a Modena.

Tra questi, lo scrivente ha selezionato 16 sondaggi significativi scelti in base a dettaglio stratigrafico, campioni indisturbati, prove di laboratorio e profondità del sondaggio in modo tale da creare un database in Microsoft Access per un facile consultazione di questi ultimi (Figura 25).

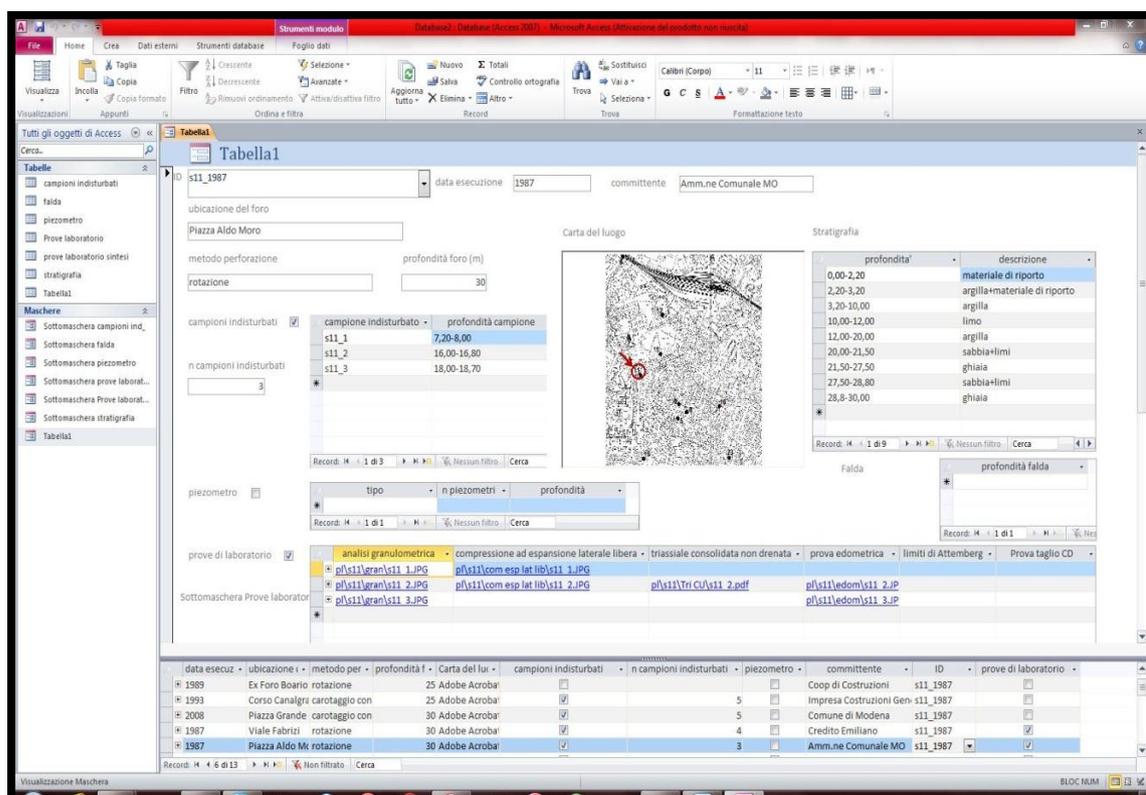


Figura 25. Maschera del database creato dallo scrivente in Microsoft Access 2010.

Il database è stato impostato in modo tale da avere relazioni tra i principali elementi ricavabili da un carotaggio continuo, considerando che tutti i sondaggi scelti hanno impiegato questa tecnica. Attraverso una maschera a tabella, la consultazione del database è stata resa facile e immediata. Com'è possibile vedere dalla Figura 25, utilizzando il menù a tendina della maschera principale, è possibile accedere alla lista dei 16 sondaggi; una volta selezionato quello desiderato, è possibile ottenere immediatamente:

- ✓ Ubicazione del foro tramite mappa CTR 1:5000;
- ✓ Committente;
- ✓ Profondità foro (rispetto il p.c.);
- ✓ Numero campioni indisturbati;
- ✓ Prove di laboratorio ad essi associati;
- ✓ Presenza di piezometri;
- ✓ Metodo di perforazione;
- ✓ Stratigrafia del sondaggio.

Completato il database, si è pensato di utilizzare questa base per ottenere un elaborato che permettesse lo studio del sottosuolo del centro storico di Modena e nel dettaglio Piazza Grande, in maniera più precisa e puntuale.

Attraverso il programma RockWorks15, software integrato di Rockware per la gestione, analisi e visualizzazione di dati geologici, si sono sviluppati due modelli alle differenze finite riguardanti rispettivamente il centro storico di Modena e Piazza Grande a Modena.

Entrambi i sistemi (compresi i punti dei sondaggi) sono stati geo referenziati rispetto le coordinate GPS UTM-WGS84 (la scelta è ricaduta su questo sistema perché è attualmente il più diffuso e di più facile consultazione anche per un eventuale relazione con altri dati).

Dalla Figura 26 è possibile vedere l'interfaccia base del programma Rockworks15. Questo, permette una personalizzazione notevole che può, portare quindi a risultati differenti in base a gli oggetti che si stanno indagando. Alcune delle caratteristiche impostabili per ogni sondaggio sono:

- ✓ Ubicazione (Est-Nord, elevazione, profondità, lat-long, offset ecc.);
- ✓ Orientamento;
- ✓ Stratigrafia;
- ✓ Litologia;
- ✓ Fratture;
- ✓ Livelli d'acqua;
- ✓ Metodologia di costruzione del pozzo.

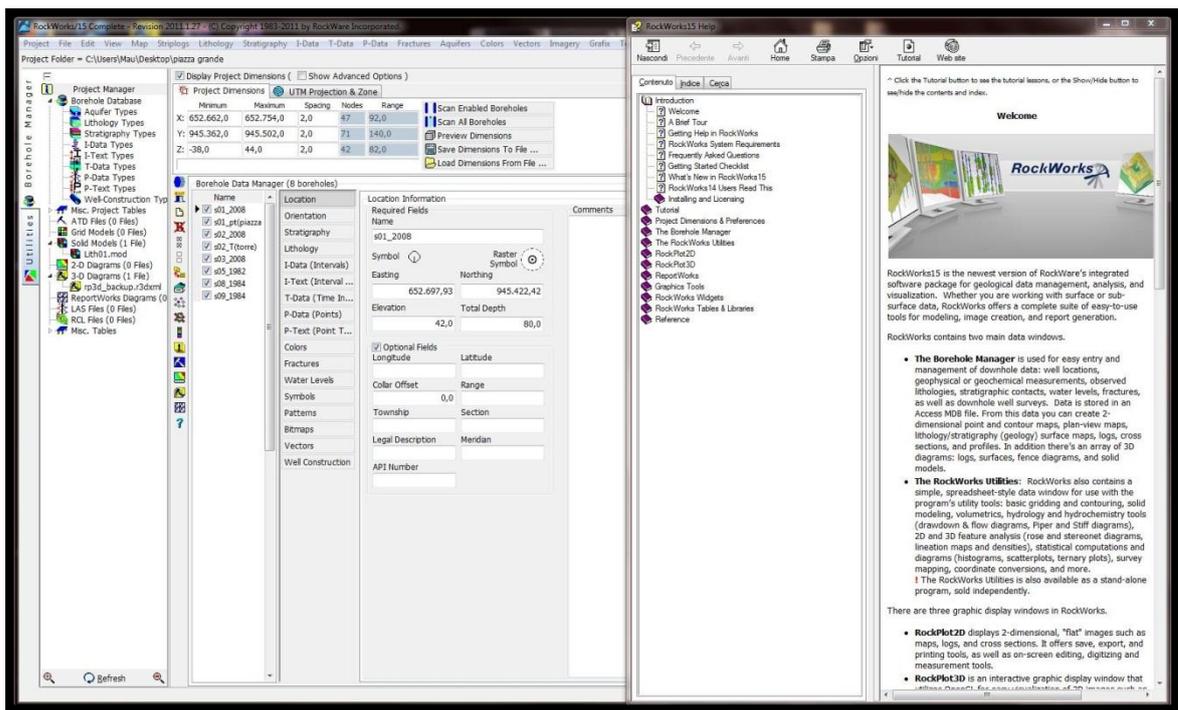


Figura 26. Schermata iniziale del programma Rockworks15. È possibile vedere alcuni sondaggi inseriti nella scheda name.

Lo studio portato avanti dallo scrivente si è concentrato esclusivamente sulla litologia. Assegnati degli archetipi di terreno al programma (Figura 27), si sono inseriti i dati contenuti nel database precedentemente creato in Rockworks15.

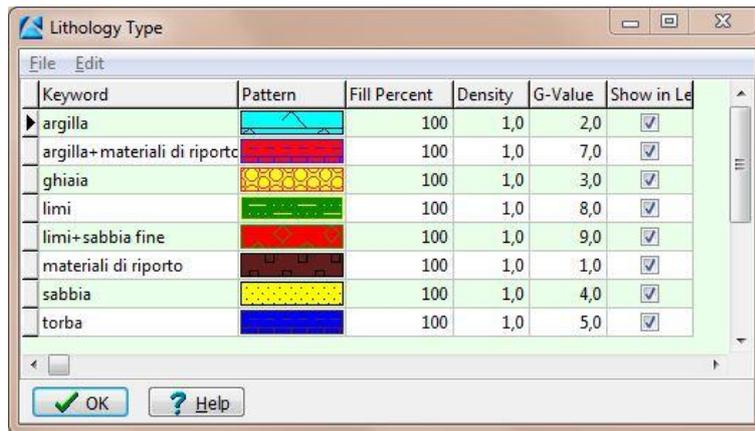


Figura 27. Esempio di finestra in Rockworks15 che permette di inserire gli strati litologici tipo da utilizzare per l'immissione dei dati.

Si sono così ottenuti due modelli, uno per il centro storico e l'altro per Piazza Grande a Modena (Figura 28) dai quali è stato possibile ottenere:

- ✓ Litologia del singolo sondaggio 2D;
- ✓ Litologia del singolo sondaggio 3D;
- ✓ Litologia 3D di tutti i sondaggi;
- ✓ Profili litologici 2D desiderati;
- ✓ Modello 3D alle differenze finite.

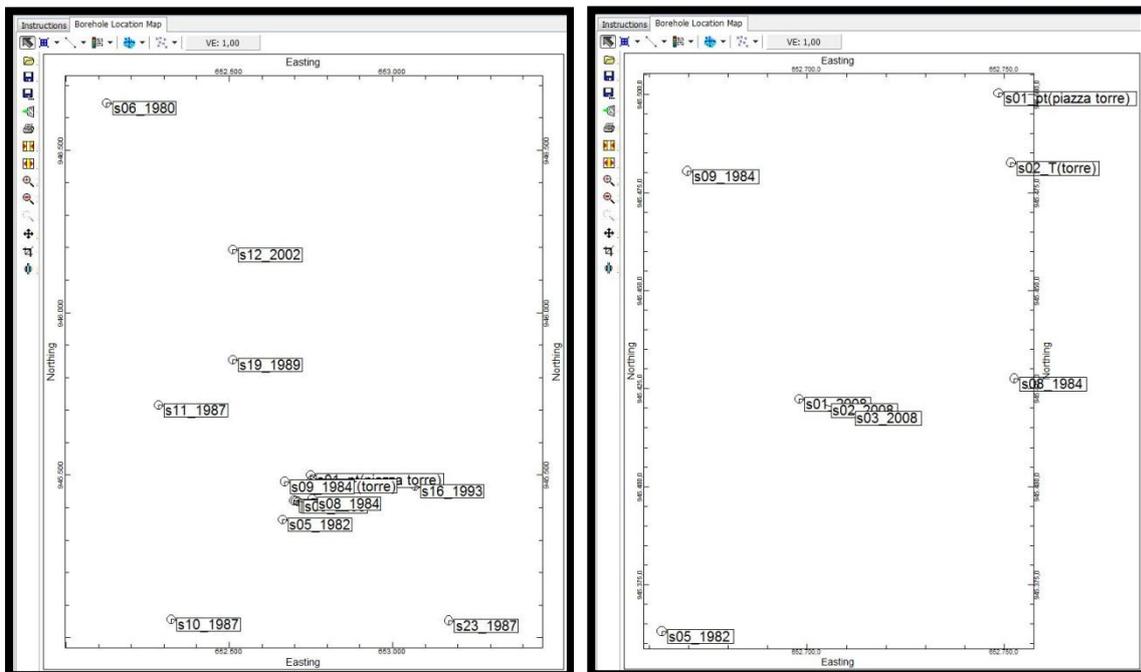


Figura 28. Immagini dei due modelli sviluppati in Rockworks15. A sinistra il modello del Centro Storico; a destra quello di Piazza Grande.

Sono di seguito riportati i modelli 3D dei singoli sondaggi e i modelli 3D alle differenze finite (Figura 29-Figura 34).

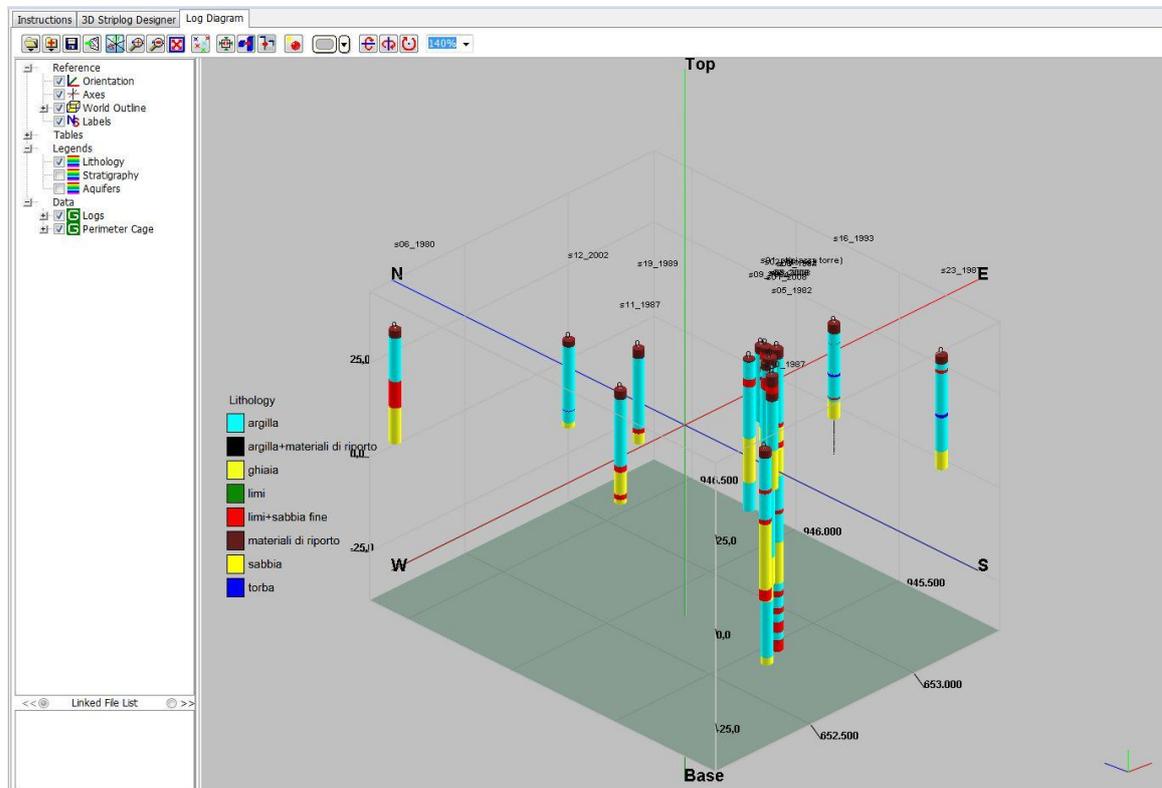


Figura 29. Profilo litologico 3D di tutti i sondaggi del modello Centro Storico (ottenuto con Rockworks15).

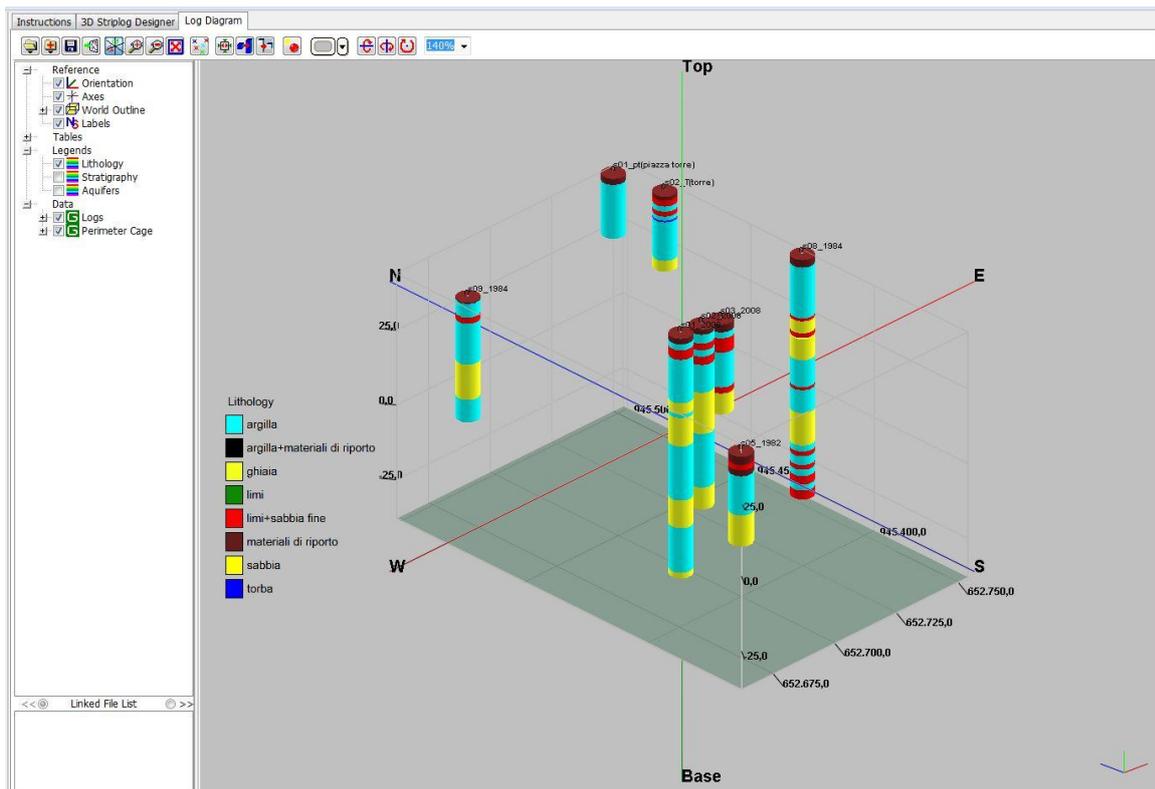


Figura 30. Profilo litologico 3D di tutti i sondaggi del modello Piazza Grande (ottenuto con Rockworks15).

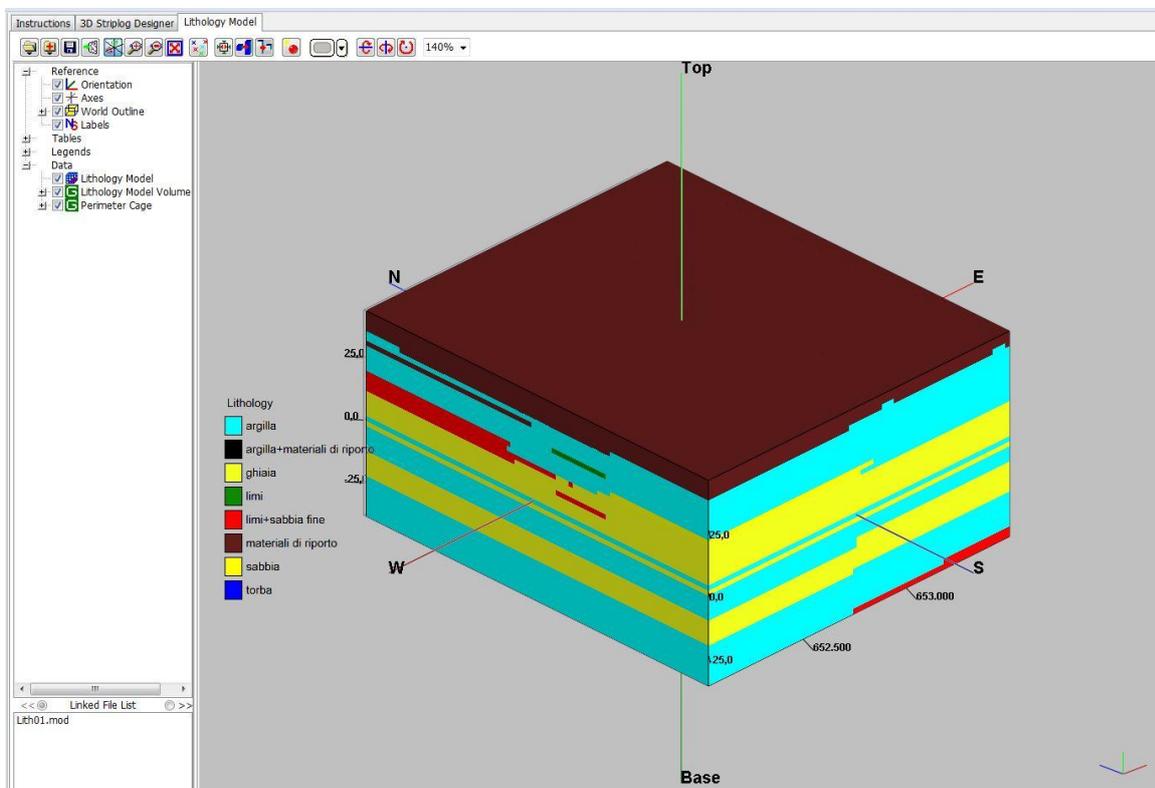


Figura 31. Modello 3D alle differenze finite del Centro Storico di Modena (ottenuto con Rockworks15).

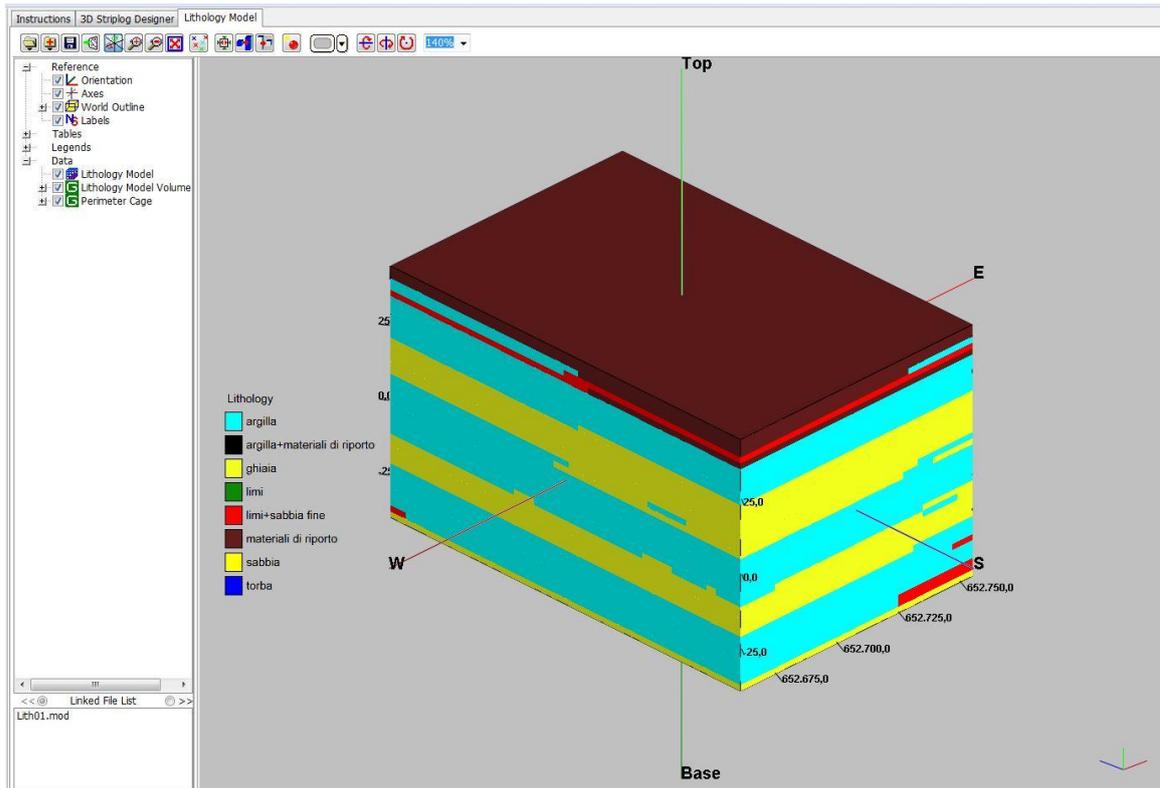


Figura 32. Modello 3D alle differenze finite di Piazza Grande a Modena (ottenuto con Rockworks15).

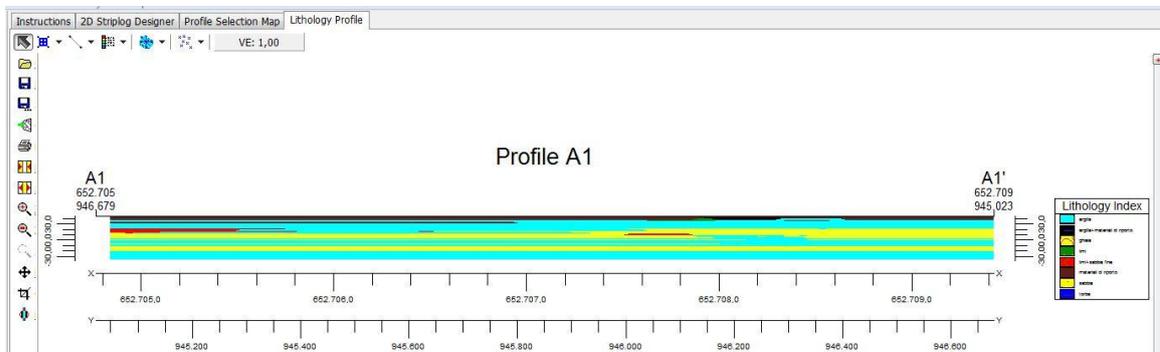


Figura 33. Profilo litologico sviluppato attraverso Rockworks. A1=Nord; A1'=Sud (modello Centro Storico).

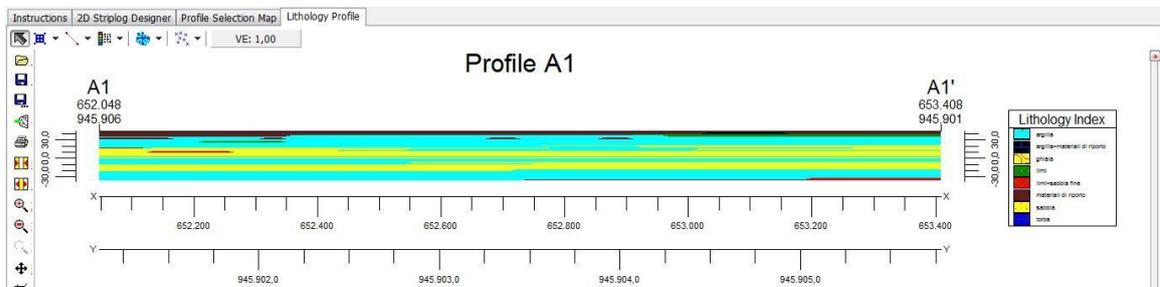


Figura 34. Profilo litologico sviluppato attraverso Rockworks. A1=Ovest; A1'=Est (modello Centro Storico).

Dal profilo di Figura 33, è possibile avere una conferma di come i modelli sviluppati siano corretti. È difatti facile notare come da sud a nord, il livello di ghiaia e sabbia tenda ad assottigliarsi. Il sistema deposizionale delle conoidi determina nel sottosuolo la presenza di corpi permeabili (ghiaiosi e sabbiosi) sede di falde acquifere, intercalati da altri meno permeabili (limosi e argillosi) con geometrie ben riprodotte nel modello. Infatti, primi diminuiscono di spessore man mano che ci si allontana dal margine collinare, e si suddividono in più livelli, assottigliandosi fino a scomparire nella zona a nord della città, conferma la bontà dei 16 sondaggi selezionati e del modello sviluppato. Medesima situazione è riscontrabile nel profilo ovest-est della Figura 34.

7.2 Livelli piezometrici in relazione alla pluviometria

Avendo a disposizione i dati 'Dexter' forniti da ARPA Emilia Romagna, Servizio Idro-Meteorologico di alcune stazioni di registrazione nei dintorni della città di Modena è stato possibile andare a verificare se la falda profonda (50-65 m dal p.c.), di cui come già detto in precedenza, si possiedono le serie storiche a partire dal 1976, è influenzata dal regime pluviometrico che insiste sul territorio modenese.

Dai due grafici seguenti (Figura 35, Figura 36) è possibile vedere come la forte variazione delle precipitazioni negli anni, ha influenzato, seppur in minima parte, l'andamento del livello piezometrico della falda profonda. Il risultato era prevedibile considerando la profondità a cui si trova quest'ultima ma era giusto affrontare il problema in modo tale da capire in che percentuale il regime pluviometrico incidesse sulla variazione del livello di falda acquifera e quindi sugli abbassamenti del territorio provocati dalla subsidenza (il legame tra falda profonda e cedimenti del terreno è stato trattato nel paragrafo precedente).

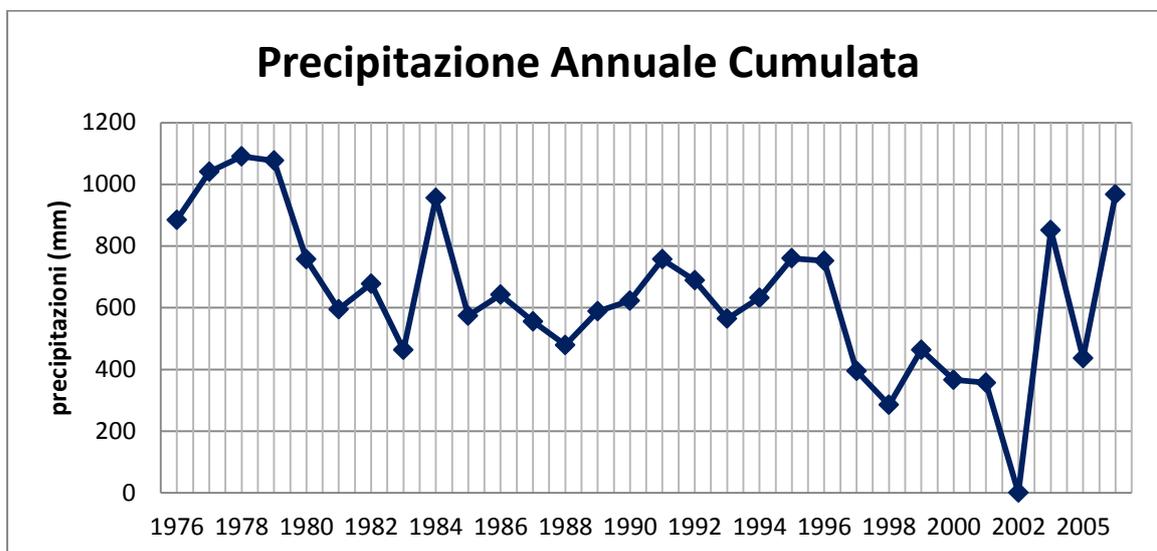


Figura 35. ARPA-SIM: Servizio IdroMeteorologico. Precipitazione Annuale Cumulata a partire dal 1976.

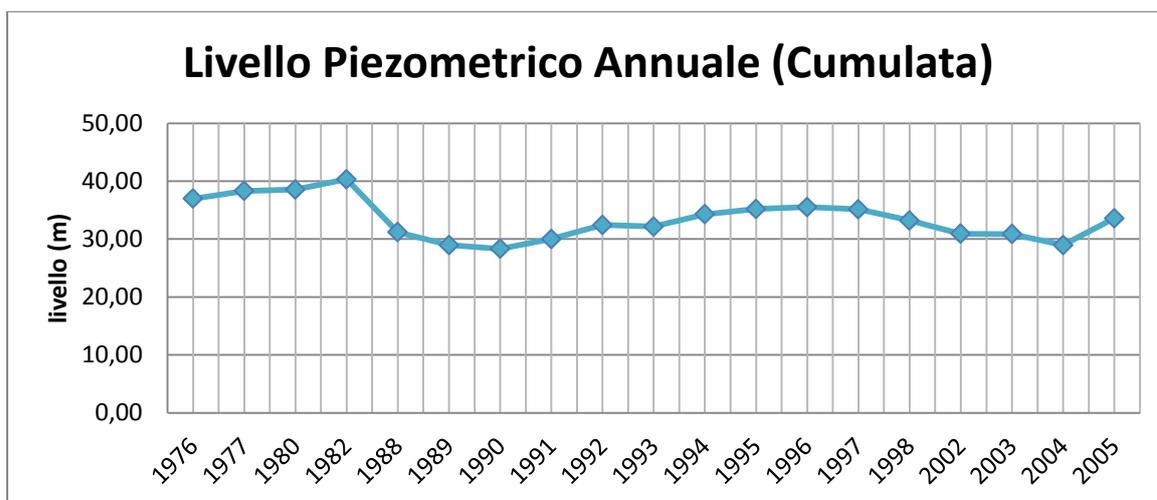


Figura 36. Cumulata Annuale del Livello Piezometrico della falda profonda (50-65m). Dati forniti da ARPA Emilia-Romagna.

7.3 Analisi dei fenomeni di subsidenza

Per comprendere meglio come il fenomeno della subsidenza incida e vada a modificare il territorio della città di Modena si è ricorso all'uso dei PS (Permanent Scatterer) associati alla Carta Tecnica Regionale CTR 1:5000. I dati, come già detto in precedenza, sono stati prodotti dalla T.R.E. (Tele Rilevamento Europa, prima azienda italiana ad occuparsi di PS) attraverso la tecnica di interferometria radar satellitare e forniti dal piano straordinario di telerilevamento (PST) del Ministero dell'Ambiente, integrati con informazioni provenienti dalla banca dati della Regione Emilia-Romagna. Questi, derivano dalle immagini acquisite dai satelliti ERS1-ERS2 nel corso di 9 anni di riprese, più precisamente dall'anno 1992 al 2000. La scala va da valori positivi pari a 2 mm/anno fino a valori negativi di 25 mm/anno, dove per negativo s'intende un allontanamento dal satellite.

Sono stati assunti come stabili o con velocità trascurabile i dati con velocità comprese fra -2 e +2 mm/anno (l'errore di misura commesso dal satellite è compreso tra 1-1,5 mm/anno).

Com'è possibile vedere dalla Figura 37, il centro di Modena ha subito abbassamenti modesti negli anni che vanno a coprire i PS, spostamenti quasi trascurabili. Nella zona nord-ovest, invece, la situazione è sicuramente differente; gli abbassamenti sono più marcati e le velocità sono comprese tra i -10 e i -15 mm/anno. Questo dato dimostra ancora una volta come i cedimenti che si riscontrano nell'abitato di Modena siano casi legati a fattori locali (variazioni locali di litologia e stratigrafia), che a fenomeni di subsidenza generalizzata.

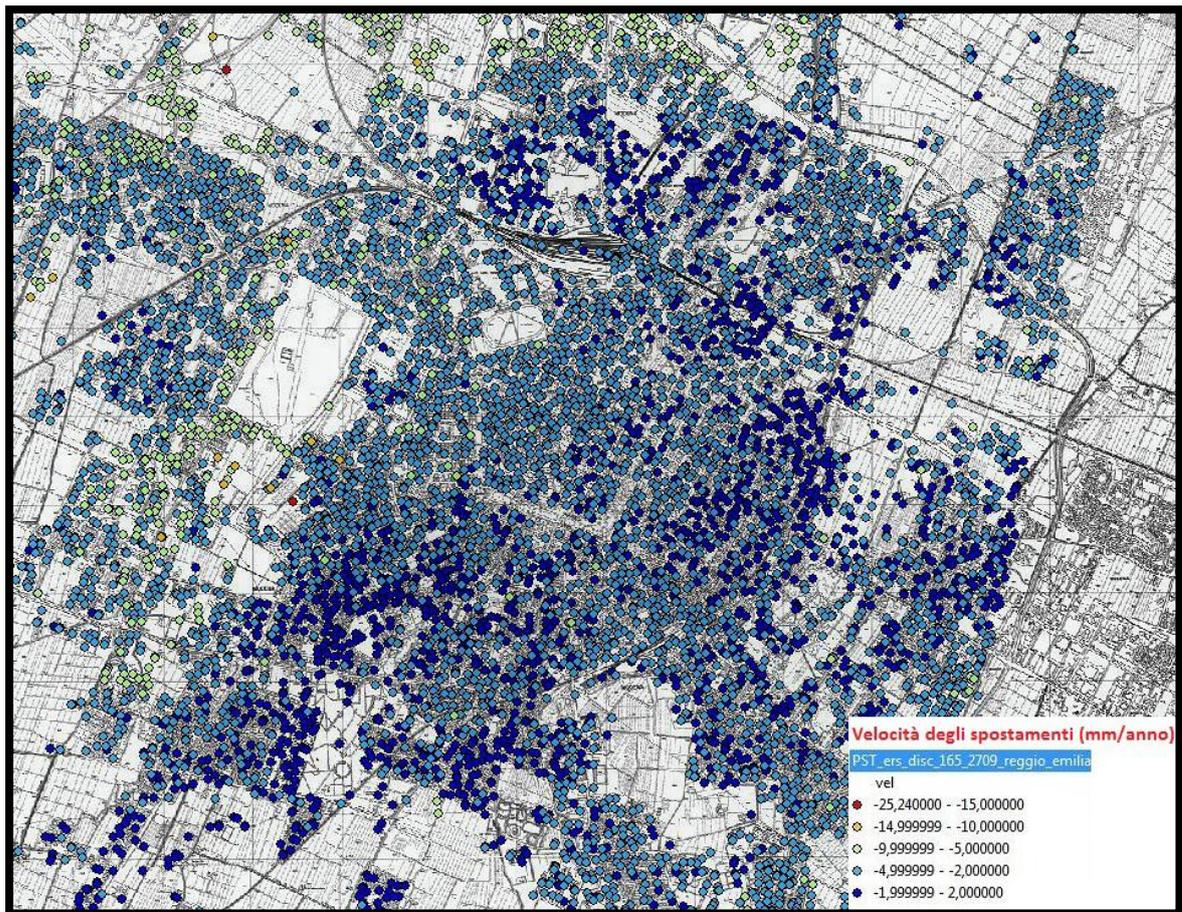


Figura 37. Dettaglio del Comune di Modena tratto dalla Carta Tecnica Regionale CTR 1:5000 attraverso il programma ArcMap con il plot della velocità medie dei punti PS (1992-2000).

Se estendiamo il problema della subsidenza a livello regionale (Figura 38) paragonandolo con i dati PS sopra elaborati riferiti all'abitato di Modena nel medesimo arco temporale, vediamo che i problemi maggiori di subsidenza sono riscontrabili nella provincia di Bologna e in maniera minore in corrispondenza delle città costiere.

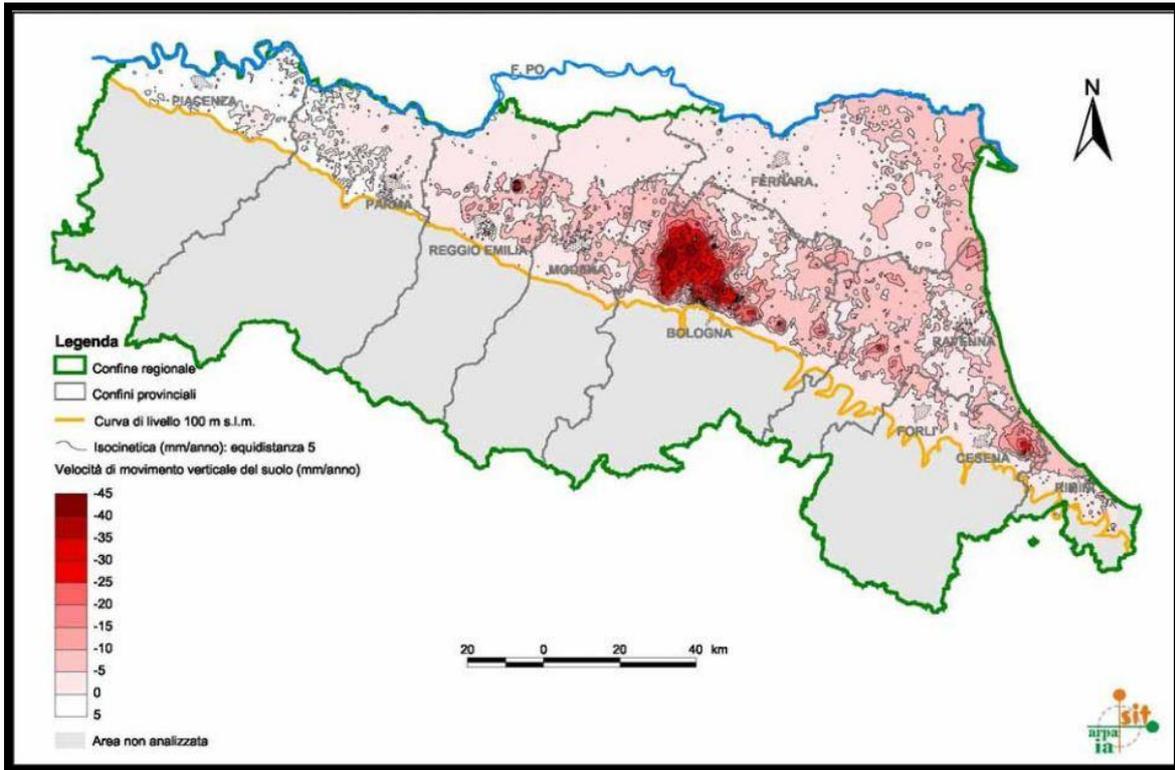


Figura 38. Carta delle velocità di movimento verticale del suolo della regione Emilia-Romagna nel periodo 1992-2000 (Bonsignore, 2007).

Eseguendo un dettaglio sulla Piazza Grande di Modena (Figura 39), è possibile notare come la situazione sia pressoché invariata rispetto quanto detto sopra. È presente solo un punto con abbassamento “importante”, segno che subsidenza e cedimento degli edifici della città di Modena sono fattori indipendenti almeno per quel che riguarda il periodo preso in esame.

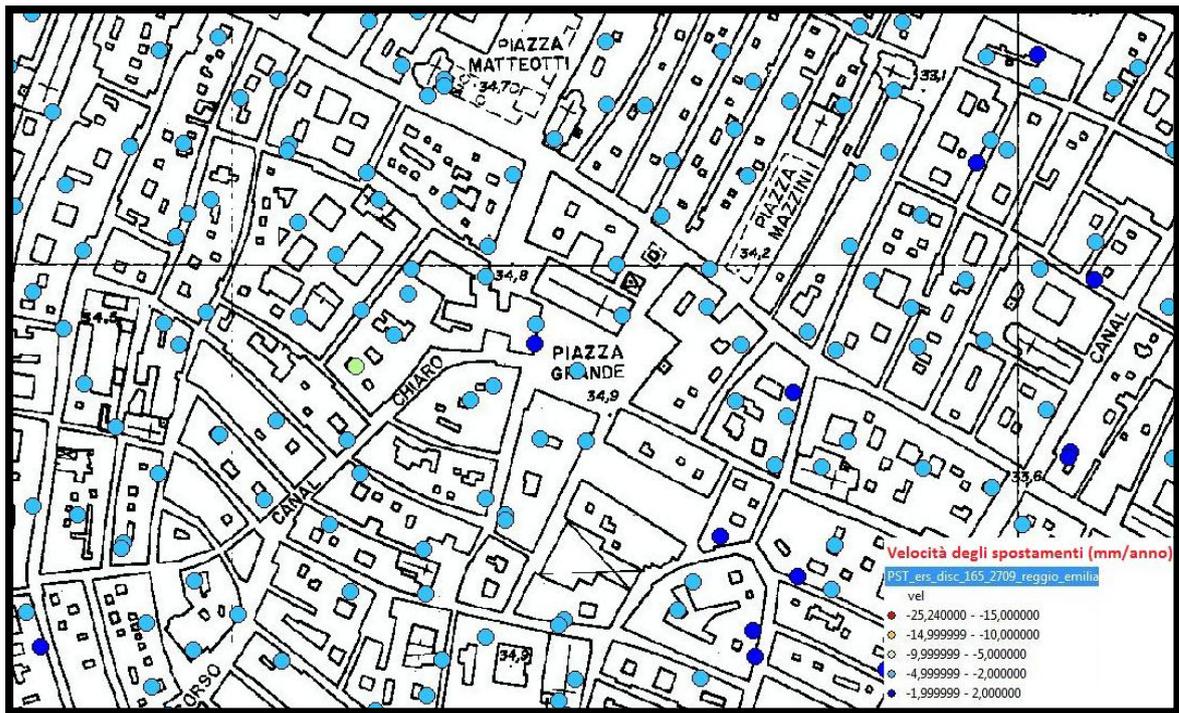


Figura 39. Dettaglio di Piazza Grande tratto da Carta Tecnica Regionale CTR 1:5000 attraverso il programma ArcMap con il plot della velocità dei punti PS.

In ultima analisi, si è messa in relazione la serie temporale della deformazione espressa in mm del punto PS situato nel centro di Piazza Grande a Modena con i dati dei livelli piezometrici della falda profonda (50-65m dal p.c.) forniti dall'ARPA attraverso il sito online.

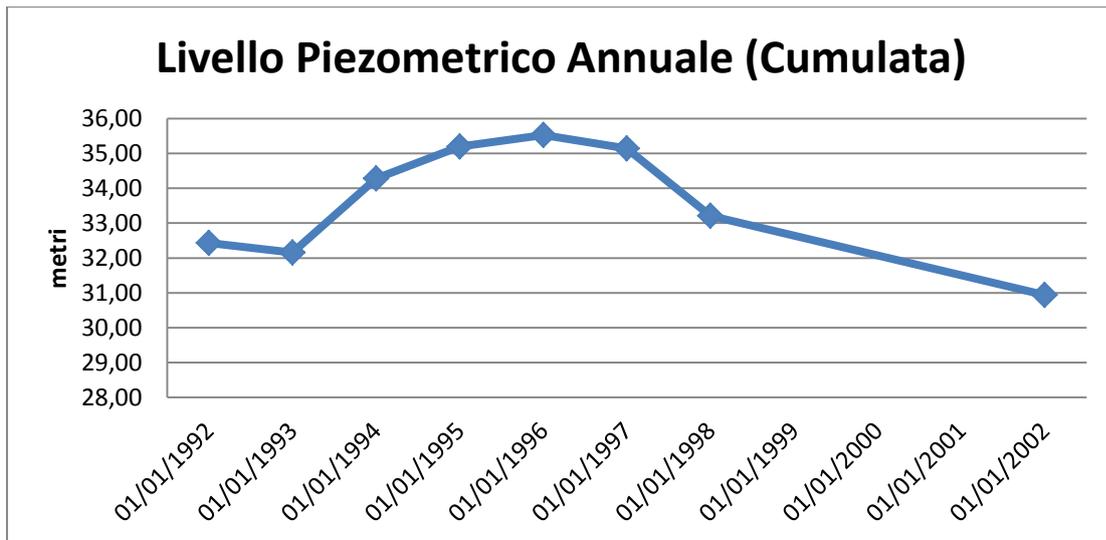


Figura 40. Cumulata Annuale del Livello Piezometrico della falda profonda (50-65m). Dati forniti da ARPA Emilia-Romagna.

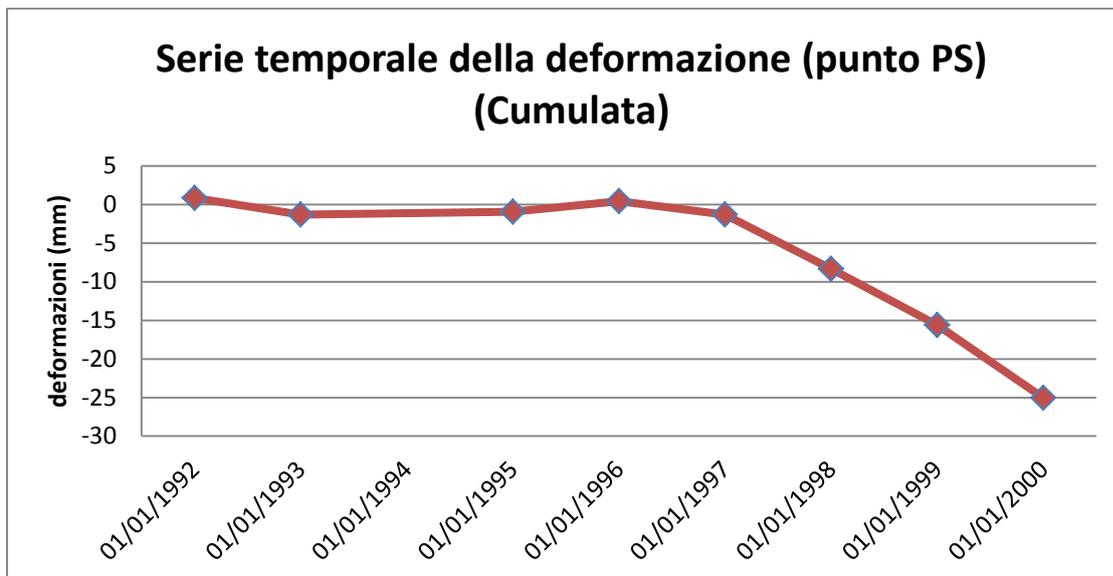


Figura 41. Serie temporale (cumulata annuale) della deformazione di un punto PS in Piazza Grande. Dati registrati da satelliti ERS1-ERS2.

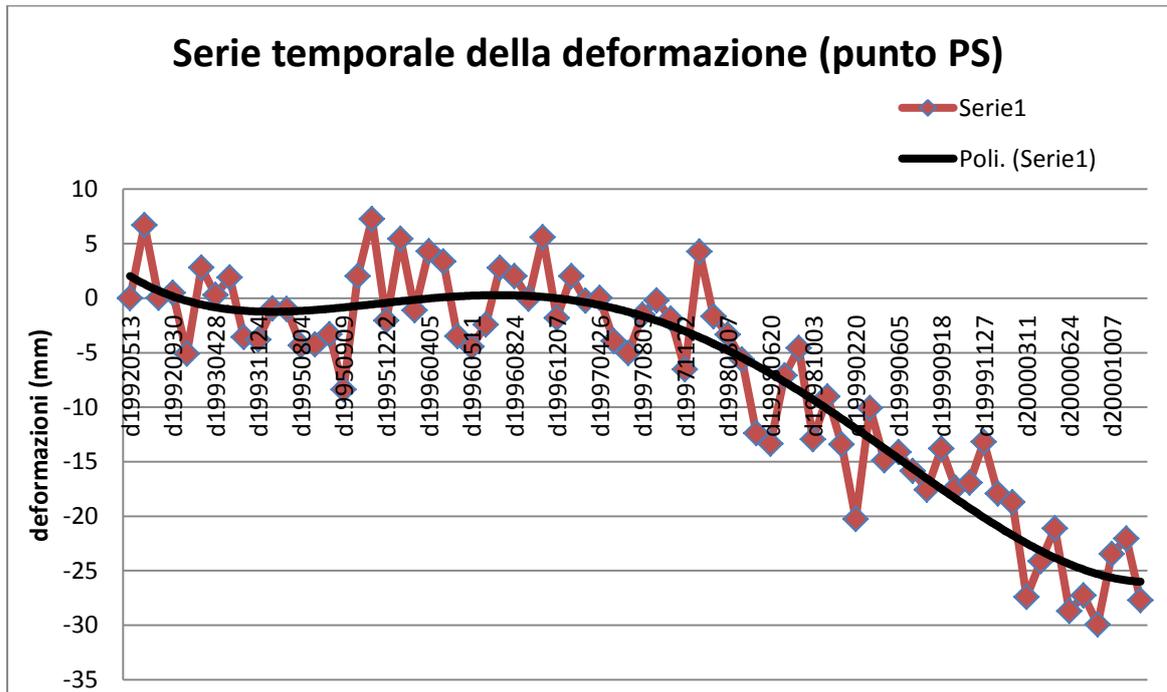


Figura 42 Serie temporale della deformazione di un punto PS in Piazza Grande con linea di tendenza logaritmica. Dati registrati da satelliti ERS1-ERS2.

Analizzando in dettaglio l'andamento dei primi due grafici (Figura 40, Figura 41), è possibile osservare come le due curve abbiano un andamento simile. A partire dal 1996 difatti, un calo marcato del livello di falda ha portato ad un più marcato abbassamento del punto PS ma, anche la variazione dei primi anni '90 della falda, ha portato una certa perturbazione nella deformazione del punto preso in analisi. È da tener sempre presente che questi dati devono essere utilizzati e quindi interpretati con molta cautela poiché non si tiene conto della deviazione standard (la deviazione standard misura la dispersione dei dati intorno al valore atteso) di ogni misura.

In conclusione si ritiene opportuno approfondire gli studi sulla falda superficiale, in modo tale da poter analizzare il rapporto che ha questa con la subsidenza del territorio modenese. Non avendo dati PS più recenti, non si può infatti del tutto escludere che il fenomeno della subsidenza regionale sia una delle cause dei cedimenti che stanno riguardando il Duomo ed in particolar modo la Torre Ghirlandina.

È però noto dagli studi portati avanti da ARPA Emilia-Romagna che nel periodo che va dal 2002 al 2006 gli abbassamenti nella provincia di Modena siano andati calando ulteriormente sino a diventare minimi (Bonsignore, 2007).

8. Proposte per la salvaguardia della torre

Dopo aver contestualizzato ed analizzato il problema legato alla stabilità della torre, vengono suggerite alcune possibili soluzioni da prendere in considerazione per un futuro intervento in sito:

- ✓ Costruzione di sottofondazioni per la torre Ghirlandina;
- ✓ Regolamentazione del livello di falda;
- ✓ Monitoraggio del livello piezometrico delle falde acquifere.

8.1 Sottofondazioni

Il termine sottofondazione è usato nei casi in cui avvenga il trasferimento del peso della struttura da una fondazione esistente a un'altra più profonda. *Quando l'opera è completata la struttura è detta sottofondata.* La necessità di una sottofondazione può derivare da più cause:

- ✓ L'insufficiente fondazione esistente;
- ✓ La necessità di approfondire le fondazioni per ricavare nella struttura nuovi ambienti;
- ✓ La costruzione di altri fabbricati in aderenza, a quote più profonde;
- ✓ La necessità di aumentare il carico sulle fondazioni per sopraelevazioni da costruire;
- ✓ La costruzione di un'opera esterna, quali metropolitane, variazioni di livello nei piani viari ecc.;
- ✓ L'abbassamento della falda dovuto a scavi vicini o ad azioni di pompaggio che mettono in pericolo la fondazione per fenomeni di subsidenza.

Le fondazioni da sottofondare sono generalmente fondazioni superficiali.

I problemi legati all'applicazione di sottofondazioni sono molteplici e le condizioni variano da caso a caso: la natura del terreno, il livello delle falde, le caratteristiche della nuova struttura, quelle della vecchia, l'entità dei carichi. Riuscire quindi a portare a

terminare un lavoro efficace che non provochi alcun danno alla struttura non è sempre di facile soluzione. Le tecniche applicabili per interventi di sottofondazione sono sostanzialmente due:

- ✓ Sottomurazione;
- ✓ Sottofondazioni con micropali.

Sottomurazione

La sottomurazione è il sistema più semplice di sottofondazione. Può essere discontinua o continua sotto una fondazione e ottenuta mediante l'esecuzione di una serie di pozzi in seguito riempiti di calcestruzzo o di muratura di mattoni. La larghezza massima di ogni pozzo è di 1-1,5 m: i tratti di muratura che contemporaneamente vengono sottofondati devono essere equamente distribuiti su tutta la lunghezza del muro.

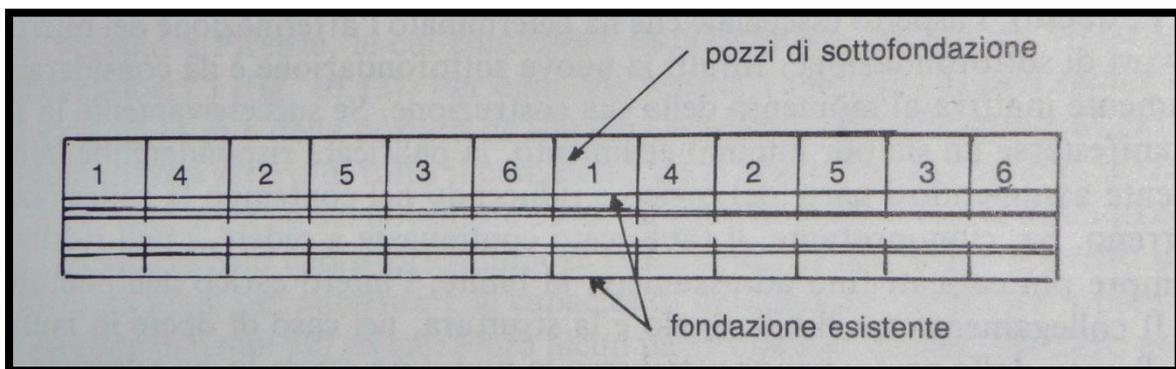


Figura 43. Successione dei pozzi di sottofondazione.

La successione degli scavi va generalmente da 1 a 6 nella posizione indicata nella Figura 43; scavi di ugual numero possono essere eseguiti contemporaneamente. Il contatto tra la nuova fondazione e l'estradosso della muratura da sottofondare deve essere fatto con estrema cura ed avviene quando il materiale della nuova struttura ha fatto presa. Con l'introduzione dei micropali e dei pali ad elementi pressoinflessi, la sottomurazione a campioni è caduta in disuso e viene applicata solo nel caso di terreni particolarmente asciutti, per limitate profondità e limitati carichi. Questa tecnica non verrà quindi presa in considerazione ma per completezza di informazioni si riposta come esempio di sottofondazione a pozzi continui i lavori eseguiti nel 1950 per la ristrutturazione della Casa Bianca a Washington DC.

Sottofondazioni con micropali

L'impiego dei micropali ha da tempo risolto gran parte dei problemi di sottofondazione, compreso il collegamento della palificata alla struttura da sottofondare.

Il primo lavoro di sottofondazione in cui furono impiegati i micropali è stato il consolidamento dell'edificio scolastico A. Angiulli di Napoli nel 1952, eseguito dalla Fondedile che applicò il palo radice brevettato da Lizzi nello stesso anno. I pali avevano un diametro di 10 cm, una lunghezza di 13 m ed erano armati con una barra di 12 mm di diametro. Il terreno, caratteristico del sottosuolo di Napoli, era formato da strati alterni, di spessore variabile, di pozzolana, lapilli e sabbia.

Si rilevò sin da allora che per carichi di lavoro anche di una certa entità i cedimenti erano minimi, dell'ordine di qualche millimetro. Peraltro, per il modo in cui viene realizzata, una sottofondazione con micropali non annulla la fondazione esistente ma la integra, e solo al limite la sostituisce. La costruzione continua ad insistere sul suo vecchio terreno di fondazione; chiamerà a collaborare i pali di mano in mano che si verifichino dei cedimenti.

È questo l'aspetto essenziale che ha determinato l'affermazione dei micropali per lavori di sottofondazione. La nuova sottofondazione è da considerarsi praticamente inattiva al momento della sua costruzione. Se successivamente la struttura manifestasse un sia pur minimo cedimento, la palificata risponderebbe immediatamente assumendosi parte del carico e riconducendo nel contempo la sollecitazione sul terreno. Questo processo andrà avanti fino a che i pali non avranno assunto l'intero carico dell'immobile.

Il collegamento tra il micropalo e la struttura, nel caso di opere in muratura, è realizzato attraverso la perforazione della muratura stessa in modo tale da avere maggior aderenza fra i pali e la struttura da sottofondare (Figura 44).

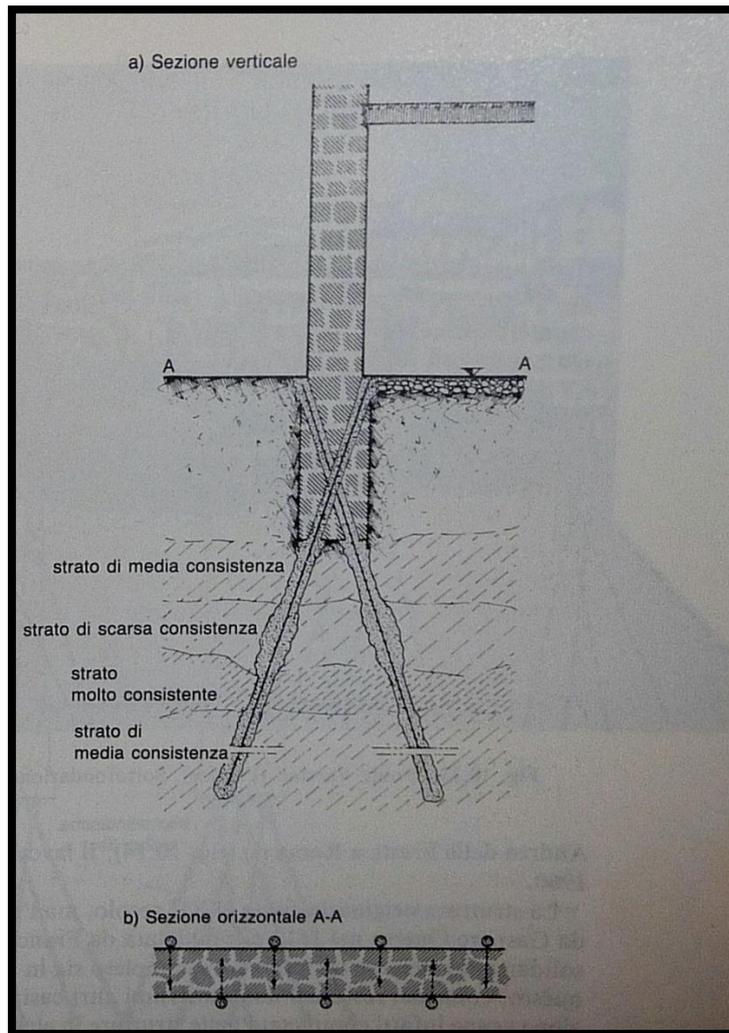


Figura 44. Sottofondazione con micropali (Lizzi).

Esempi di sottofondazione con micropali

A dieci anni di distanza dal primo impiego venne sottofondato con lo stesso sistema il Ponte Vecchio a Firenze, le cui condizioni statiche erano andate via via sempre più aggravandosi (Figura 45). Per ogni pila furono eseguiti 120 pali radice della lunghezza di 14 m e della portata di 100 kN, verificata da varie prove di carico. Un collaudo molto severo di tutto il complesso delle opere eseguite si ebbe in occasione della rovinosa piena del novembre 1966, durante la quale il fiume trascinò oltre il ponte. Questo evento catastrofico impose la necessità di abbassare il livello delle platee sotto gli archi per aumentare la capacità di deflusso dei medesimi: opere che furono eseguite in tempi più recenti senza alcun particolare problema.

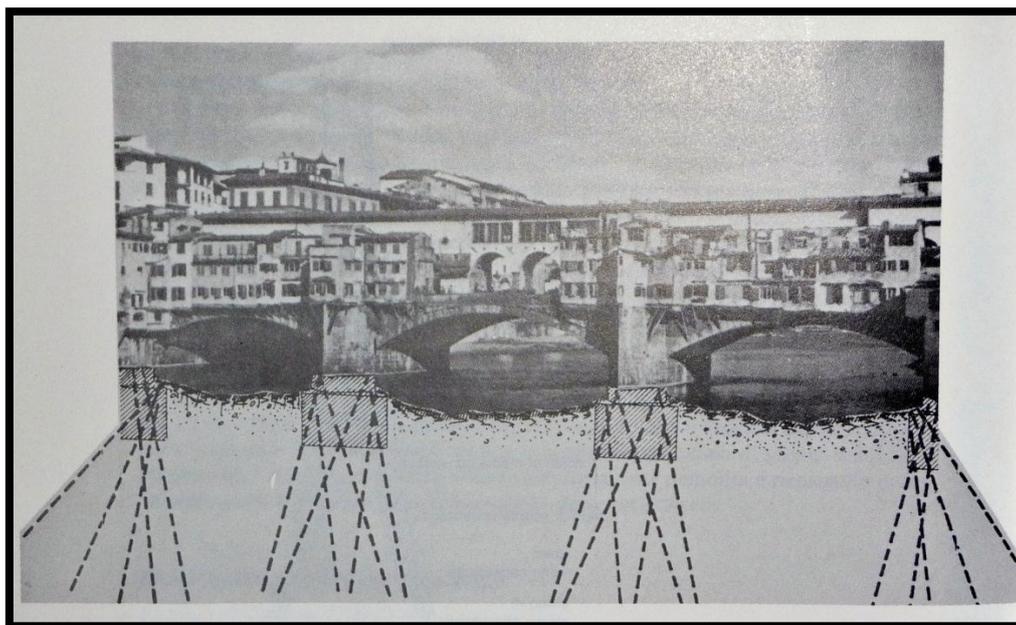


Figura 45. Ponte Vecchio (Firenze). Sottofondazione con pali radice (Fondedile).

Un altro esempio di sottofondazione con micropali è dato dal consolidamento della Chiesa di S. Andrea delle Fratte a Roma (Figura 46). Il lavoro fu eseguito dalla Fondedile nel 1960. La struttura originaria risale al XII secolo, ma l'attuale chiesa è quella ricostruita da Gaspare Guerra nel 1612 e completata da Francesco Borromini nel 1653. Il consolidamento richiese un intervento completo sia in fondazione che in elevazione. In questo, come del resto nei numerosissimi altri casi che lo seguirono, la sottofondazione venne infatti completata nelle strutture in elevazione con un rafforzamenti sistematico, ottenuto per mezzo di reticoli cementati.

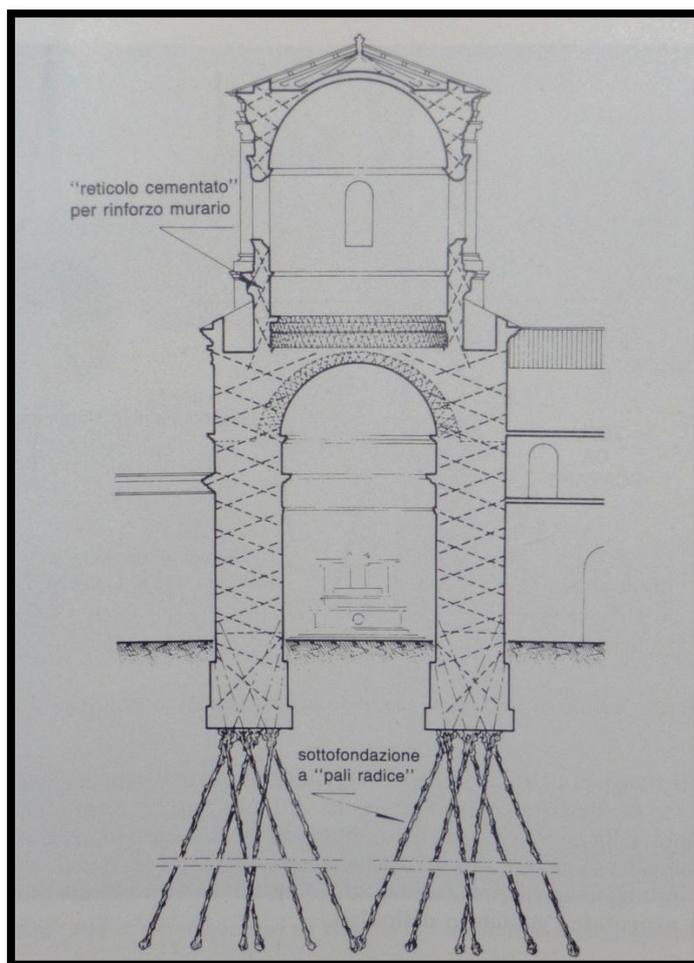


Figura 46. Schema del consolidamento e della sottofondazione della Chiesa di S. Andrea delle fratte a Roma (Fondedile).

Un'altra sottofondazione con micropali, che nello stesso tempo ha costituito una protezione da eventuali fenomeni di decompressione causati dagli scavi della galleria nelle immediate vicinanze, è stato il lavoro eseguito a Milano, per la realizzazione della linea 1 della metropolitana, nel tratto di via Mercanti. Il tracciato passava quasi in aderenza al portico del Palazzo della Regione che risale ai primi del XIII secolo. I lavori furono eseguiti dalla Fondedile nel 1959. Le murature furono ingabbiate in un reticolo di pali radice, eseguito attraverso le murature stesse e spinto a profondità inferiore al piano finale di scavo. In tal modo il reticolo assolveva la duplice funzione di sottofondazione dell'edificio e di contenimento della parete scavata: il complesso del reticolo e del terreno in esso ingabbiato è assimilabile, grosso modo, ad un muro a gravità di cui i pali radice costituiscono l'orditura resistente. Il complesso è quindi in grado di sopportare spinte orizzontali e sforzi verticali (Figura 47).

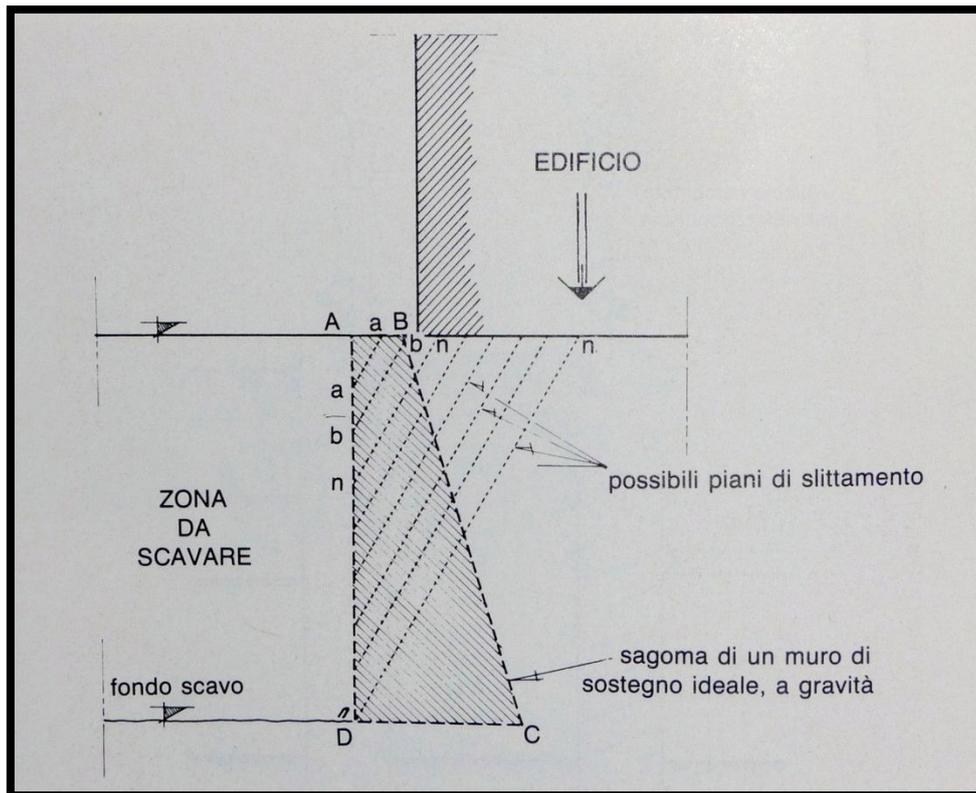


Figura 47. Schema di stabilità di uno scavo in vicinanza di un fabbricato (Lizzi).

Tra i lavori della Fondedile è utile ricordare quello, molto interessante del raddrizzamento di un fabbricato a Santos (Brasile). Furono eseguiti pali radice di eccezionale lunghezza (50 m) per poter raggiungere strati di sabbia compatta dopo aver attraversato limi argillosi molto plastici. Il fabbricato venne solo parzialmente sottofondato nella zona sotto pendenza in modo da costituire un punto fermo che permettesse il lento raddrizzamento della struttura. Una volta raggiunto questo scopo la sottofondazione è stata estesa a tutta l'area per assicurare l'equilibrio definitivo.

Torre Ghirlandina

Dai casi reali sopra descritti, è facile notare come una tecnica non troppo invasiva come quella dei pali radici sia una tecnica interessante da poter applicare al caso della torre Ghirlandina. Tendendo conto che l'inclinazione della torre sta subendo un'accelerazione in direzione nord-est, che a sua volta sta portando a cedimenti differenziali del terreno sotto la torre, lo scrivente suggerisce l'applicazione, inizialmente localizzata, di sottofondazioni con micropali che vanno a raggiungere lo strato di ghiaia (presente tra i 20 m e i 25 m dal p.c.) che garantisce maggior stabilità all'opera. Le fondazioni attuali

poggiano su un terreno fine e compressibile, con strati di torba, materiale soffice e facilmente comprimibile di certo non adatto per una costruzione di tale fattura. Una volta stabilizzata la struttura, la sottofondazione dovrà essere estesa a tutta l'opera per garantire omogeneità di equilibrio.

8.2 Regolazione del livello di falda

Da quanto illustrato sopra riguardo la forte variazione del livello piezometrico che la falda superficiale ha subito nel corso degli anni, lo scrivente suggerisce di regolamentare il livello di questa per avere condizioni più stabili, che non vadano a variare nel tempo le caratteristiche geotecniche dei terreni interessati.

Sono presenti numerosi sistemi drenanti per la riduzione/stabilizzazione del livello piezometrico.

Riferendoci al caso della torre Ghirlandina sarebbe necessario considerare esclusivamente sistemi di drenaggio passivo ma si deve tener presente che:

- ✓ Tali interventi devono essere integrati, come per altro solitamente avviene, con una regimentazione delle acque meteoriche;
- ✓ La fase di emungimento passivo non è facilmente controllabile e modulabile nel tempo;
- ✓ L'abbattimento della falda può comportare fenomeni di subsidenza nel terreno di entità tale da risultare controproducenti per la staticità di eventuali fabbricati sovrastanti.

Tenendo conto del bulbo delle pressioni della torre Ghirlandina, non è possibile suggerire soluzioni poco invasive. Difatti, se la profondità di drenaggio supera i 15 m (come è da considerare nel nostro caso), si può ricorrere a pozzi di grande diametro provvisti di un sistema drenante diffuso di microdreni disposti a raggiera. I pozzi hanno dimensione interna minima superiore in genere a 3,50 m, in modo da potervi introdurre l'attrezzatura di perforazione per la realizzazione dei microdreni (è da tener presente che generalmente, per consentire lo scavo dei pozzi, viene realizzato un intervento di pre-sostegno delle pareti mediante una cortina perimetrale di pali, diaframmi, micropali

o colonne consolidate mediante jet-grouting, che viene integrata con centinature in acciaio durante la fase di approfondimento dello scavo). I microdreni hanno lunghezze variabili fra i 30 e i 60 m, sono alloggiati in fori sub-orizzontali del diametro interno di 80-100 mm e sono attrezzati con tubi in PVC microfessurati del diametro di 1"1/2-2", protetti da tessuto non tessuto filtrante nel tratto drenante (Figura 48).

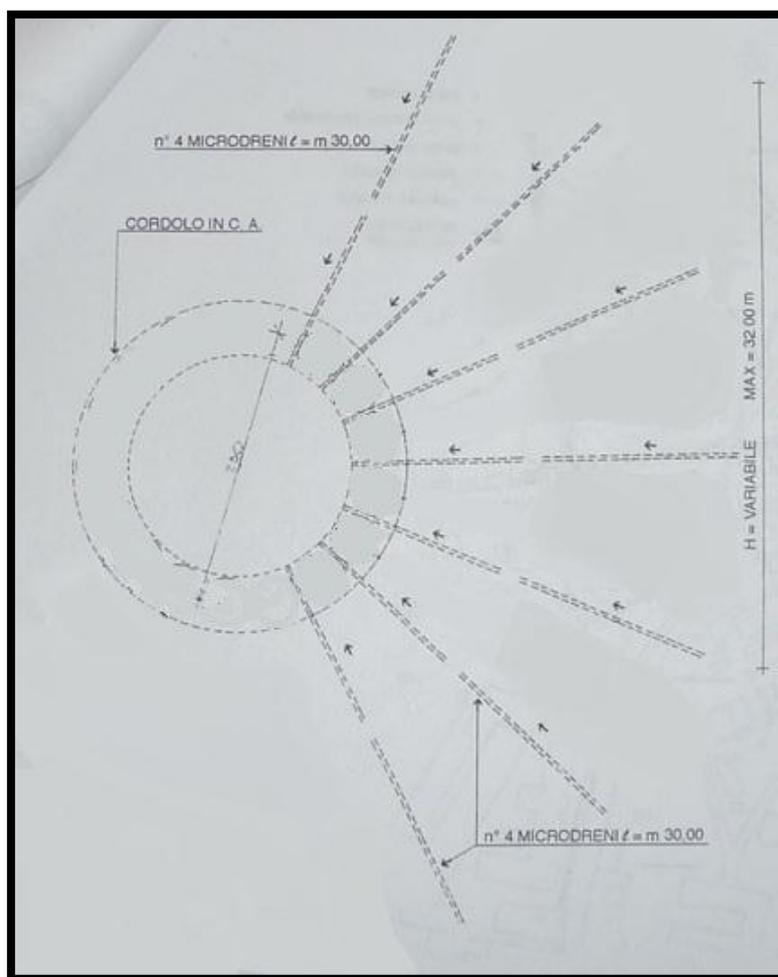


Figura 48. Pozzo di grande diametro con sistema drenante di microdreni a raggiera: pinata tipo. (Tambara)

La proposta è da prendere in considerazione solo se la soluzione con pali radice non dovesse produrre gli effetti sperati.

8.3 Monitoraggio

I sistemi di controllo nel tempo devono essere considerati strumenti di studio e di conoscenza da associare a tutto l'insieme delle informazioni che sono indispensabili per identificare il comportamento di un terreno (ma anche di una struttura) e, ancor più, per

prevederne eventuali modificazioni. Lo scenario che si pone è in genere alquanto complesso, a causa del concorso di molte componenti, e l'identificazione delle principali cause di fenomeni geotecnici richiede un attento programma di monitoraggio. È necessario che tale piano sia concepito con ridondanza, in modo da avere il conforto di più fonti per gli aspetti di maggiore criticità e l'esigenza di avere dati che coprano un significativo intervallo di tempo.

Considerando la mole di dati raccolti riguardanti la torre Ghirlandina, il Duomo e il sottosuolo del centro storico di Modena, si evince come sia necessario portare avanti una campagna di monitoraggio dei livelli di falda acquifera concentrandosi particolarmente su la falda superficiale (20-25 m p.c.).

È stato possibile osservare come, se per la falda più profonda (30-35 m), è possibile risalire alle serie storiche dei livelli piezometrici tramite i dati raccolti dall'ente ARPA per il Comune di Modena, per quanto posizionati in aree remote rispetto alla Piazza Grande, per la falda superficiale non sono presenti serie storiche di alcun tipo. È quindi di fondamentale importanza portare avanti una campagna indagini, incentrata sulla registrazione in continuo o con letture periodiche (mensili) dei livelli di risalita delle acque di falda, al fine di poter ricavare le serie storiche di queste ultime. Dall'analisi di queste si potrà ottenere l'andamento del livello piezometrico stagionale, stabilire se la falda superficiale viene influenzata dal regime pluviometrico della zona e cosa più importante si potrà correlare la variazione della falda con eventuali cedimenti del terreno e quindi con le deformazioni della struttura della torre. La torre e il Duomo hanno già un sistema di monitoraggio delle deformazioni realizzato dalla ditta Agisco; comprende sensori di misura dei cedimenti (estensimetri), del comportamento delle lesioni (misuratori di giunti), della temperatura (termometri) e della velocità e direzione del vento (gonioanemometro), inoltre sono previste misure topografiche di precisione per stimare i movimenti differenziali del terreno nell'area.

Da queste analisi, che naturalmente dovranno esser prolungate nel tempo, si otterrà un quadro più chiaro dei rapporti tra Torre, Duomo e variazioni della falda superficiale.

9. Considerazioni finali

Il presente elaborato ha cercato di metter in evidenza le caratteristiche del sottosuolo Modenese e le problematiche ad esso associate e connesse anche alla storia evolutiva dei due monumenti simbolo di Modena, il Duomo e la Torre Ghirlandina. Sulla torre si sono concentrati gli sforzi maggiori dello scrivente per cercare di evidenziare e mettere in risalto le criticità riguardanti l'edificio con una propensione per l'aspetto prettamente geotecnico che strutturale.

Partendo da questo presupposto, gli aspetti su cui si è maggiormente lavorato e che hanno portato a suggerire degli eventuali interventi per la salvaguardia della torre sono:

- ✓ Geologia e geomorfologia;
- ✓ Idrogeologia in riferimento alle falde acquifere superficiali;
- ✓ Fenomeno della subsidenza;
- ✓ Lito-stratigrafia del terreno a scala locale;
- ✓ Storia dello sviluppo urbano e industriale della città di Modena.

Dalle conoscenze fin qui acquisite, è possibile affermare che le cause che hanno portato ad un accentuarsi dei fenomeni di cedimento della torre non sono ancora del tutto chiare. Se difatti è possibile escludere da questi il fenomeno della subsidenza regionale (come ampiamente analizzato in precedenza), variazioni del livello piezometrico della falda superficiale e caratteristiche geotecniche particolari del terreno, in funzione anche di queste variazioni, sono da tenere in considerazione.

I dati in questo ambito sono ancora troppo carenti e questo è un aspetto che lascia stupiti, considerando lo stanziamento ingente di fondi per il restauro della Torre Ghirlandina. Si ritiene che ci si sia concentrati troppo a lungo su alcuni aspetti, tralasciandone altri di pari importanza, come quelli geologici e geotecnici.

Lo scrivente suggerisce quindi una campagna di monitoraggio strutturata in modo tale da poter ottenere il massimo rendimento da risorse già stanziare, ma non sfruttate pienamente (molti sondaggi effettuati a cavallo tra anni '80 e '90 erano provvisti di

piezometri, adesso abbandonati) che porti alla condivisione di dati ed informazioni utili tra gli enti o gli studi che collaborano al progetto.

Questo elaborato, il database delle indagini e i modelli litostratigrafici 3D e 2D creati ad hoc possono essere intesi come punto di partenza per un ulteriore studio e modellizzazione dei cedimenti a carico delle strutture monumentali.

Bibliografia

- Lo stato qualitativo nelle acque sotterranee. (2006). *Variante al PTCP in attuazione del PTA - Conferenza di Pianificazione (L.R. 20/00)*.
- Dissesto idrogeologico. (2010, gennaio). *Geologia dell'Ambiente*.
- A.Cancelli, Guadagnini, R., & Pellegrini, M. (s.d.). *Friction-cone penetration testing in alluvial clays*.
- Barbero Serandrei, R. (1972). *Indagine sullo sfruttamento artesiano nel comune di Venezia 1846-1970*. Venezia: Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Barnaba, P. F. (1992). Gli abbassamenti del suolo e i riflessi sull'ambiente. *Geologi*.
- Bertoni, W., Brighenti, G., Gambolati, G., Gatto, P., Ricceri, G., & Vuillermin, F. (s.d.). *Risultati degli studi e delle ricerche sulla subsidenza di Ravenna*. Ravenna: Comune di Ravenna.
- Bondesan, M., Minarelli, A., & Russo, P. (1986). Studio dei movimenti verticali del suolo nella provincia di Ferrara. In *Studi idrogeologici sulla Pianura Padana 2*. Milano.
- Bondesan, M., Minarelli, A., & Russo, P. (1990). *Analisi dei movimenti verticali del suolo avvenuti nel periodo 1970-1978 lungo l'asta del Po a est di Polesella e nel delta*. Società editrice il Mulino.
- Bonsignore, F. (2007, Gennaio 03). Il monitoraggio della subsidenza a scala regionale in Emilia-Romagna. *La subsidenza in Emilia-Romagna: Il monitoraggio tramite interferometria satellitare*. Bologna: ARPA Emilia-Romagna.
- Cadignani, R. (2009). *La torre Ghirlandina – Un progetto per la conservazione*. Luca Dossella editore.
- Carbognin, L., Gatto, P., & Marabini, F. (1984). *Guidebook of the eastern Po plain (italy). A short illustration about environment and land subsidence*. Venezia: Ufficio stampa, comunicazione e informazione, Comune di Modena.

- Carbognin, L., Gatto, P., & Marabini, F. (1984). *The city and the lagoon of Venice. A guidebook on the environment and land subsidence*. Venezia.
- Carbognin, L., Gatto, P., & Mozzi, G. (s.d.). *La riduzione altimetrica del territorio veneziano e le sue cause*. Venezia: Tipografia I.T.E.
- Carbognin, L., Marabini, F., Taroni, G., Teatini, P., & Tosi, L. (1994). *Altimetria recente del comprensorio lagunare veneziano. Un'analisi critica*. Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- Chilingarian, G., Donaldson, E., & Yen, T. (1995). *Subsidence due to fluid withdrawal*. Developments in Petroleum Science.
- Claron, C. (1963). *The development of grouts for the injection of fine sands*. Londra: Butterworths.
- Comune di Como. (1980). *Relazione di sintesi della commissione per lo studio dei fenomeni di subsidenza*. Como: New Press.
- Dazzi, R., Gatto, G., Mozzi, G., & Zambon, G. (1994). *Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo. Andamento evolutivo delle pressioni di strato*. C.N.R.
- Dazzi, R., Gatto, G., Mozzi, G., & Zambon, G. (1994). *Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo. La rete di Monitoraggio delle pressioni di strato*. C.N.R.
- Dazzi, R., Gatto, G., Mozzi, G., & Zambon, G. (1994). *Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo. Relazione Generale*. C.N.R.
- Dazzi, R., Gatto, G., Rusconi, A., & Zambon, G. (1988). *Rete idrometrografica per il controllo delle pressioni di strato degli acquiferi sotterranei di Venezia e del suo entroterra*. Venezia: Consiglio Nazionale delle Ricerche.

- Dondesan, M., Gatti, M., & Russo, P. (1997). Movimenti verticali del suolo nella Pianura Padana orientale desumibili dai dati I.G.;. fino a tutto il 1900. In *Bollettino di Geodesia e Scienze affini* (p. 140-172). Istituto geografico militare.
- Gasperi, G., & Pizziolo, M. (2009). *Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50000 - Foglio 201 Modena*. Firenze: S.EL.CA. s.r.l.
- Gasperi, G., & Pizziolo, M. (2009). *Note illustrative della cartageologica d'Italia alla scala 1:50000. Foglio 201 Modena*. Firenze: S.EL.CA. srl.
- ingegneriasismica.net. (s.d.). *ingegneriasismica.net_Sismicità e Dinamica dei Terreni_LIQUEFAZIONE DEL TERRENO*. Tratto il giorno 2011 da ingegneriasismica.net: <http://www.ingegneriasismica.net/>
- Istituto Geografico Militare. (s.d.). *Catalogo Istituto Geografico Militare*. Tratto il giorno Febbraio 2011 da Istituto Geografico Militare - Ente Cartografico dello Stato: <http://www.igmi.org/ware/>
- Jefferies, M., & Been, K. (2006). *Soil Liquefaction*. Taylor & Francis.
- Lerici, F. I. (s.d.). <http://www.lerici.polimi.it/attivita/perforazioni.html>.
- Lugli, S., Dori, S. M., Fontana, D., & Panini, F. (17(2/1),2004). *Composizione dei sedimenti sabbiosi nelle perforazioni lungo il tracciamento ferroviario ad alta velocità: indicazioni preliminari sull'evoluzione sedimentaria della media pianura modenese*. Il Quaternario.
- Manzieri, A. M., & Bonini, P. (2007). *Report sulle acque sotterranee della provincia di Modena*. Modena: Arpa Emilia-Romagna.
- Marcaccio, M. (2008). *Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee*. Regione Emilia-Romagna.
- Marcaccio, M. (2008). *Rete Regionale di Monitoraggio delle Acque Sotterranee - Relazione annuale dati 2008 - Relazione triennale 2006.2008*. Arpa Direzione Tecnica.

- Mazzalai, P., Ricceri, G., & Schrefler, B. (1978). Studio della subsidenza nel delta padano. In *I problemi della subsidenza nella politica del territorio e della difesa del suolo* (p. 50-64). Pisa: Tip. Pacini - Pisa.
- Monaco, G. (s.d.). *Liquefazione dei terreni in condizioni sismiche*. EPC LIBRI.
- Montorsi, W. (1976). *La torre della Ghirlandina: Comacini e Campionesi a Modena*. Modena: Aedes Muratoriana.
- Petrucci, F., Careggio, M., Cavazzini, R., Conti, A., & Morestori, L. (1995). La subsidenza nell'area urbana di Parma. *Il Quaternario*.
- Purbrick, M., & Ayres, D. (1956). *Uses of aerated cement grout and mortar in stabilization of slips in embankments*. Londra: Annales IT.B.T.P.
- Sansoni, R. (s.d.). *Cedimenti e consolidamenti di fondazioni. Teoria - pratica - applicazioni*. Editore Ulrico Hoepli Milano 1989.
- Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, R. E.-R. (s.d.). *Sezioni geologiche e prove geognostiche della pianura emiliano romagnola*. Tratto da <http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/>
- Servizio Geologico Sismico e dei Suoli; Arpa. (s.d.). *Piezometrie e qualità delle acque sotterranee nella pianura emiliano-romagnola*. Tratto da http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/web-gis/piezometrie_rer.htm
- Simmers, I., Villarroya, F., & Rebollo, L. F. (1992). *Selected Papers on Acquifer Overexploitation*. Tenerife: Hydrogeology, HEISE.
- Simoni, G. (2004). *STRUMENTAZIONE GEOTECNICA DI CONTROLLO DELLE PRESSIONI E DEI MOVIMENTI*. Firenze.
- SRT - Servizio Risorse e Territorio. (s.d.). Valutazione della pericolosità sismica per la pianificazione territoriale ed urbanistica in Comune di Modena. *PRG 2003 Comune di Modena*. Modena: Comune di Modena Settore Ambiente e Protezione civile.
- Tambara, F. (s.d.). *Stabilizzazione dei pendii*. Hevelius Edizioni.

TRE sensing the planet. (2011). *InSAR::PSInSAR::SqueeSAR::Dati satellitari::Tele Rilevamento Europa*. Tratto da Società Treuropa: <http://www.treuropa.com/>

