

COMUNE DI CASTELFRANCO EMILIA

Provincia di Modena

**P.U.A. IN PREVISIONE DI P.O.C., SUB AMBITO 81.6, TIPO AC.b, SITO
IN LOCALITÀ MANZOLINO, VIA MANZOLINO EST**

Proprietà: LOGO ESTENSE s.r.l.

Progettista: Dott. Arch. Giuseppe Marroccella

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA



Dicembre 2009



Dott. Geol. Carlo Mondani – *studio geologico* –

via Piave 44 – 41030 Bomporto (MO)
Albo Geologi Emilia Romagna n. 961

tel./fax 059.909919

Cod. Fisc. MND CRL 61A02 A959Y

e-mail: carmondani@alice.it

P.IVA 02573930365

COMUNE DI CASTELFRANCO EMILIA

Provincia di Modena

**P.U.A. IN PREVISIONE DI P.O.C., SUB AMBITO 81.6, TIPO AC.b, SITO IN LOCALITÀ MANZOLINO,
VIA MANZOLINO EST**

Proprietà: LOGO ESTENSE s.r.l.

Progettista: Dott. Arch. Giuseppe Marroccella

RELAZIONE GEOLOGICA E SISMICA

Indice

| | |
|--|-----------|
| Premessa | 2 |
| 1. Modellazione geologica del sito..... | 3 |
| 1.1. Inquadramento geografico e territoriale | 3 |
| 1.2. Inquadramento geologico..... | 5 |
| 1.3. Geomorfologia dell'area e stato di fatto del sito | 6 |
| 1.4. Inquadramento idrogeologico | 7 |
| 1.5. Condizioni idrogeologiche locali | 8 |
| 1.6. Analisi dei rischi geologici l.s. incidenti sul sito..... | 9 |
| 1.7. Indagine geognostica | 10 |
| 1.8. Interpretazione stratigrafica e parametri geotecnici dei terreni..... | 12 |
| 2. Sismica..... | 16 |
| 2.1. Introduzione | 16 |
| 2.2. Sismicità dell'area..... | 17 |
| 2.3. Indagine geofisica con metodo sismico MASW..... | 19 |
| 2.4. Valutazione della suscettibilità alla liquefazione..... | 24 |
| 2.5. Caratterizzazione sismica del sito | 26 |
| 3. Osservazioni conclusive | 27 |
| Opere consultate..... | 29 |

Allegati:

Certificati ed elaborati delle prove penetrometriche

Sismogramma ed elaborati grafici della prova sismica MASW

Parametri sismici del sito

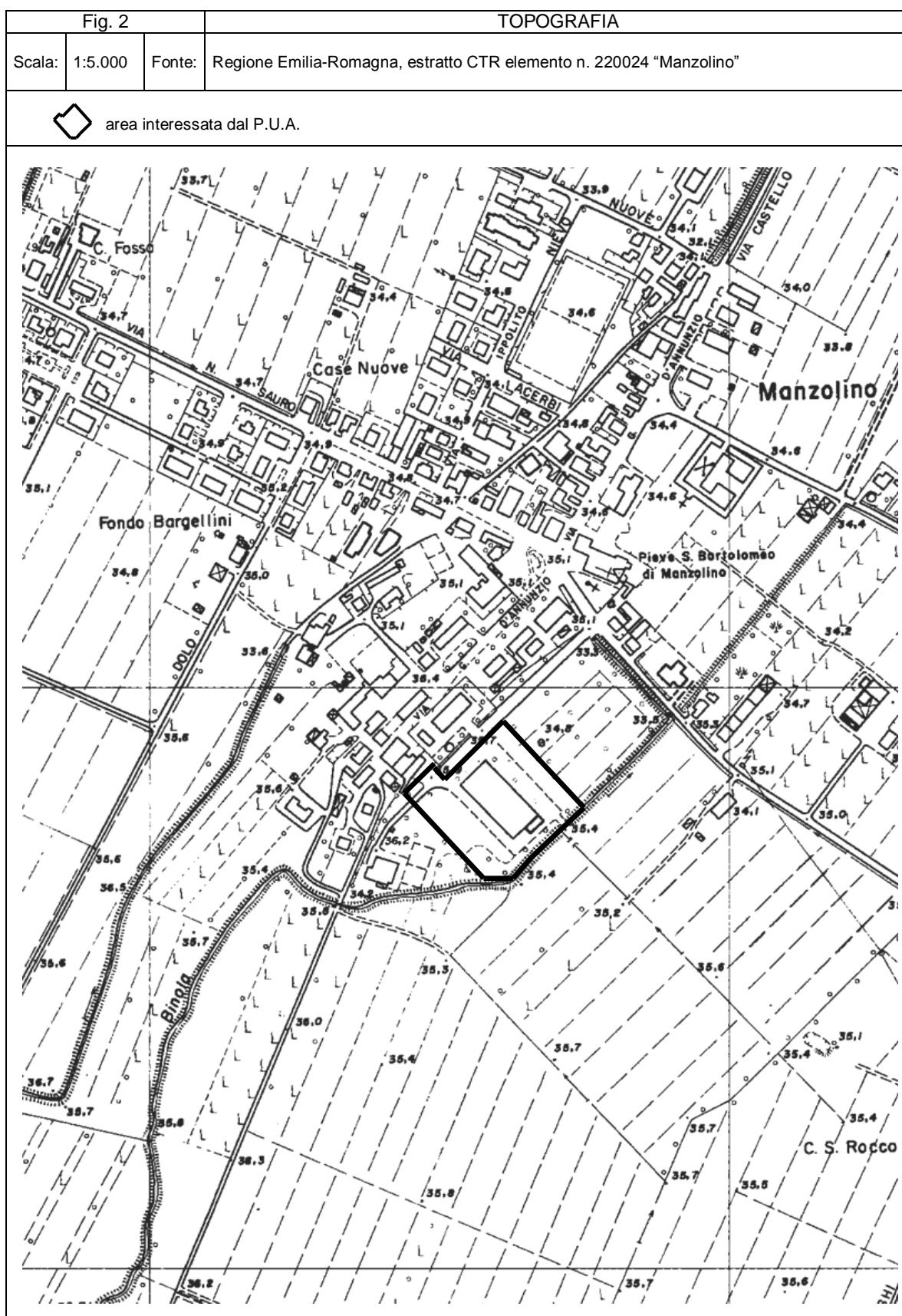
Premessa

Per incarico ricevuto dalla Proprietà, e d'intesa con il Progettista, è stata redatta la presente relazione geologica avente per oggetto la caratterizzazione litotecnica, idrogeologica e sismica di un terreno sito in frazione Manzolino del Comune di Castelfranco Emilia, corrispondente al Sub Ambito 81.6 del PSC, sul quale è in progetto un Piano Urbanistico Attuativo.

Lo studio si è articolato nella raccolta dei dati bibliografici – compresi quelli contenuti nelle tavole del PTCP della Provincia di Modena e del PSC del Comune di Castelfranco Emilia – e nell'esecuzione di una specifica campagna geognostica, finalizzata sia alla ricostruzione della stratigrafia locale sia all'acquisizione dei parametri geomeccanici e delle caratteristiche idrogeologiche e sismiche dei terreni presenti nell'area.

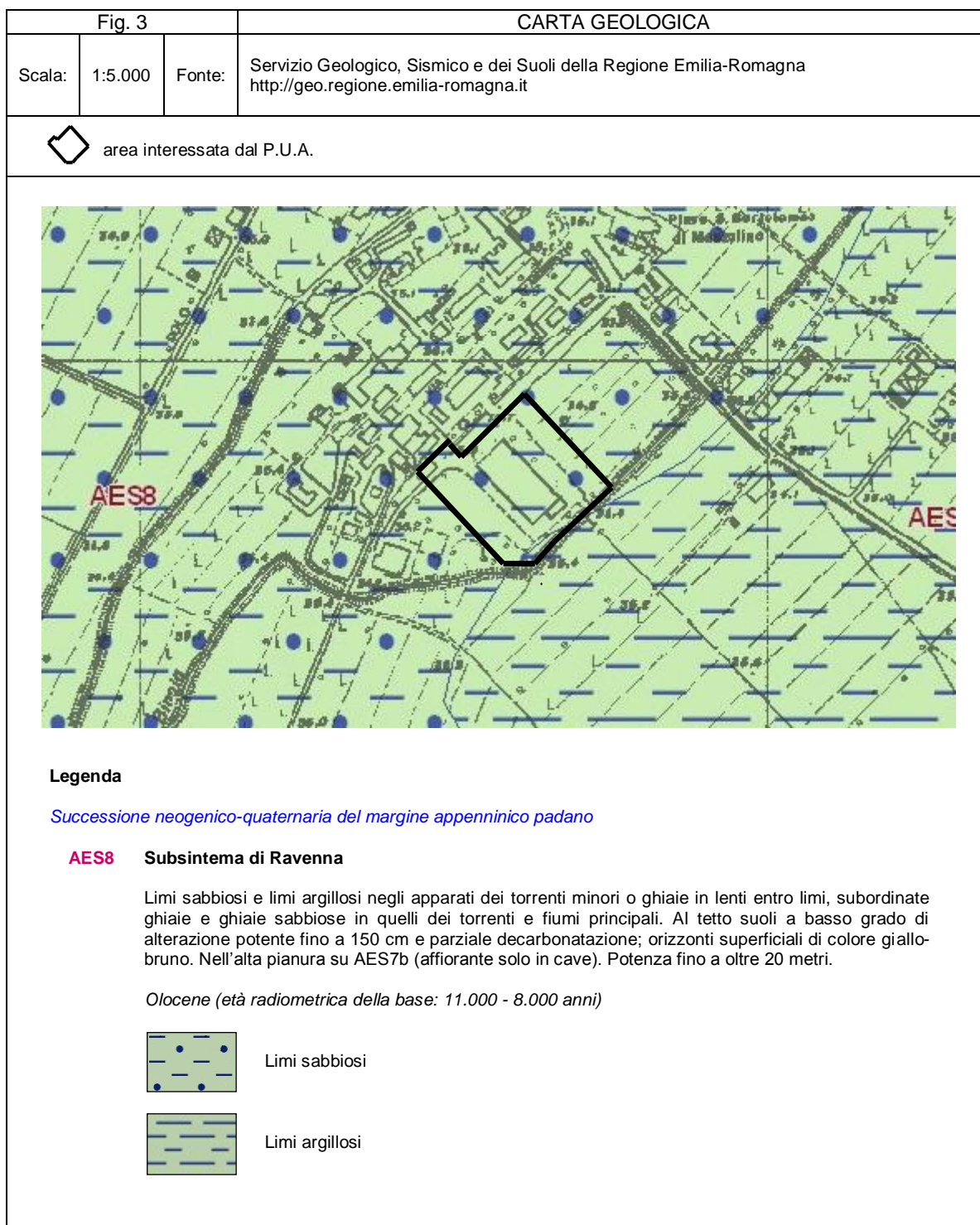
Normativa di riferimento:

- D.M. 14-1-2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni"
- Circolare applicativa del 2-2-2009, n. 617, C.S.LL.PP, "Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14-1-2008"
- Ordinanza PCM 3519 del 28-4-2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone"
- Ordinanza PCM 3274 del 20-3-2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zone sismiche"
- Delibera della Giunta della Regione Emilia-Romagna n. 1677/2005 "Prime indicazioni applicative in merito al D.M. 14-9-2005"
- Delibera dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna progr. n. 112, oggetto n. 3121 del 2-5-2007 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica"



1.2. Inquadramento geologico

Sulla recente cartografia geologica del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, che per il territorio di pianura utilizza la banca dati dei Fogli CARG (scala 1:25.000), il sito ricade nell'ambito dei terreni limoso-argillosi e limoso-sabbiosi del Subsistema di Ravenna, una delle suddivisioni del Sistema Emiliano-Romagnolo superiore (il sistema è l'unità strutturale fondamentale della stratigrafia e il tipo principale riconosciuto di unità a limiti inconformi, corpi rocciosi cartografabili delimitati alla base e alla sommità da discontinuità significative). Si tratta di depositi continentali quaternari attribuibili sia alla parte distale della conoide del fiume Panaro sia all'area interfluviale (fig. 3).



La pianura alluvionale, detta anche piana a copertura alluvionale, è caratterizzata da una crescita di tipo verticale dovuta prevalentemente a processi di tracimazione e rotta fluviale che hanno portato alla deposizione di strati suborizzontali a geometria lenticolare probabilmente riferibili a singoli eventi alluvionali. Nei tempi che hanno preceduto i massicci interventi di regimazione idraulica che hanno portato alla costruzione degli argini artificiali, la dinamica di questa pianura era caratterizzata da canali fluviali che, non in grado di contenere la maggior parte delle piene stagionali, andavano soggetti a frequenti e ripetute tracimazioni della corrente alluvionale. Le acque fuoriuscite dagli argini depositavano i materiali in carico con una gradazione dei sedimenti decrescente a mano a mano che la capacità di trasporto del flusso diminuiva.

In questo modo il fiume costruiva i propri argini naturali all'interno dei quali scorreva pensile sulla piana. In conseguenza di eventi climatici eccezionali il fiume rompeva gli argini naturali e il flusso alluvionale defluiva verso le aree più depresse della pianura inondabile, costruendo un apparato distributore (delta) che, progredendo nella valle, la colmava e dava origine a un nuovo percorso e a nuovi argini naturali.

All'interno della pianura alluvionale sono state distinte, sulla base di sequenze litostratigrafiche tipiche riconosciute nelle stratigrafie dei pozzi, due macro-ambienti deposizionali: la Piana Pedemontana, contraddistinta da depositi a sequenze prevalentemente grossolane (ghiaie) e la Piana a Copertura Alluvionale, che è quella su cui insiste l'intorno significativo dell'area studiata, caratterizzata da sequenze generalmente fini (sabbie, limi, argille).

I principali elementi morfologici caratterizzanti la pianura alluvionale sono le conoidi di deposizione fluviale e i dossi che da esse si dipartono. I primi sono presenti con continuità a ridosso della fascia pedecollinare, allo sbocco delle valli. Il loro gradiente è di circa il 4‰, per le parti apicali e meno dell'1‰ per quelle distali. In tali situazioni le unghie delle conoidi tendono a confondersi con la morfologia della restante pianura. I dossi sono unità morfologiche topograficamente rialzate rispetto alla pianura adiacente e di forme allungate con direzioni prevalenti SSW-NNE e N-S. Traggono origine dai sedimenti abbandonati dai corsi d'acqua.

Il substrato profondo del bacino sedimentario non è regolare ma caratterizzato da numerose pieghe che ricalcano la struttura geologica della catena appenninica e che rappresentano la sua continuazione sepolta. L'area padana infatti è stretta in una grande morsa tettonica: le spinte provocate dall'innalzamento della catena alpina ed appenninica hanno determinato un ripiegamento dei sedimenti depositati nel Golfo Padano. Dove si ha un incurvamento degli strati verso il basso (sinclinale di Bologna-Bomporto-Reggio Emilia) si deposita un maggior spessore di sedimenti; dove si ha un incurvamento degli strati verso l'alto (anticlinale) si deposita un minor spessore di sedimenti. In particolare una di queste pieghe sepolte costituisce la Dorsale ferrarese, che in realtà non è costituita da un unico piegamento ma da una serie di pieghe associate a faglie il cui movimento è la causa dei terremoti che si registrano nella zona.

1.3. Geomorfologia dell'area e stato di fatto del sito

Il lotto di terreno studiato e il suo intorno significativo ricadono in una zona pianeggiante della media pianura modenese.

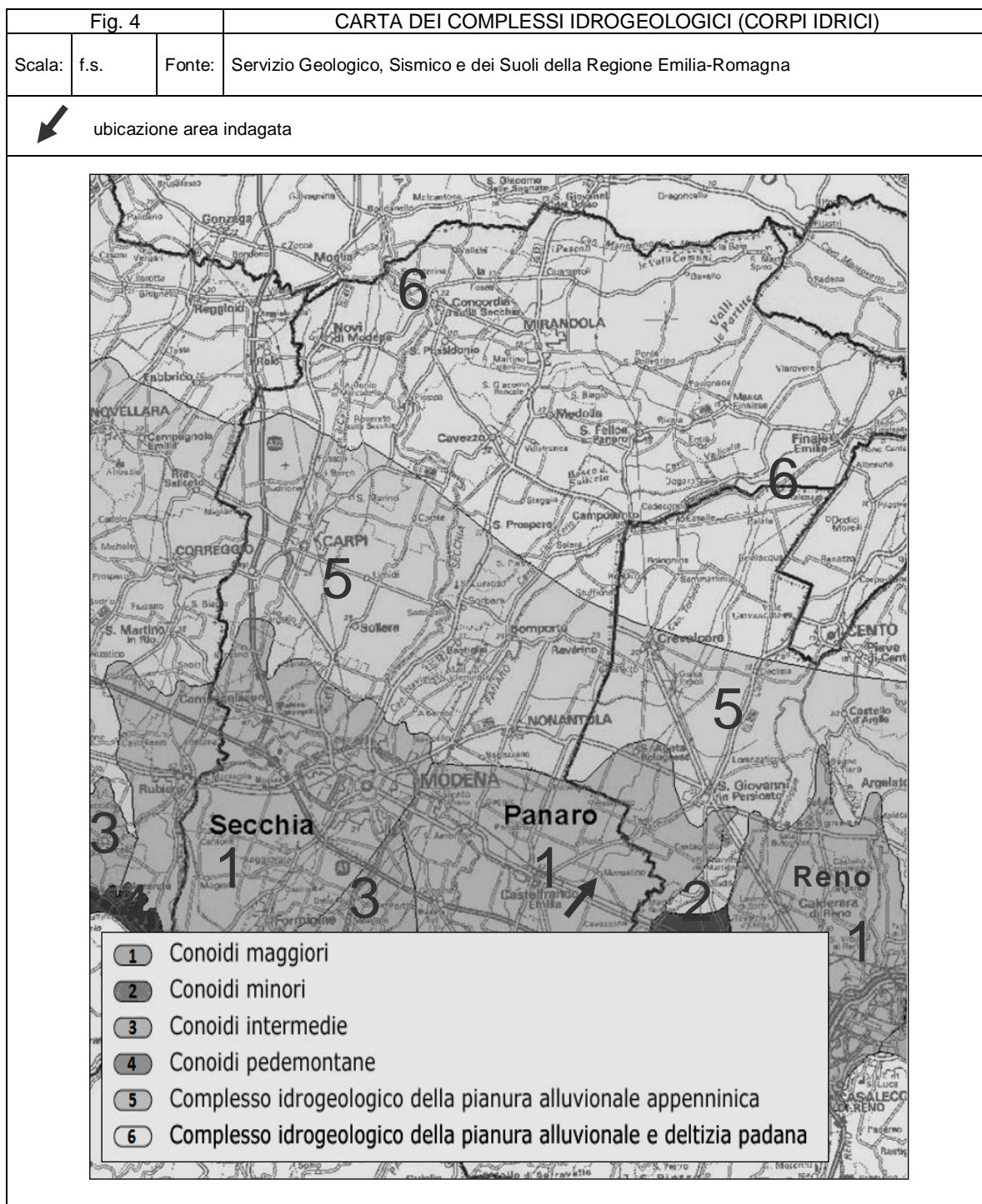
La quota altimetrica è compresa tra 35,4 e 35,9 m s.l.m., con impercettibili pendenze verso NNE. Nelle aree con quote inferiori a 50 m s.l.m. l'osservazione diretta delle forme è alquanto difficoltosa, mentre variazioni altimetriche anche lievi, ad esempio dovute a subsidenza differenziata, possono determinare marcate variazioni, ad esempio alla rete idrografica.

Il paesaggio della piana alluvionale presenta aree più elevate che corrispondono sia ad alvei fluviali attuali (alvei pensili) sia estinti (dossi fluviali), caratterizzati da terreni prevalentemente sabbiosi, ed aree altimetricamente più basse in corrispondenza di antichi bacini interfluviali ormai prosciugati (valli) caratterizzati da terreni prevalentemente limoso-argillosi.

Attualmente l'evoluzione geomorfologia dell'area è legata principalmente all'attività antropica e in particolar modo agli interventi edilizi ed infrastrutturali. Lo stato di fatto del sito è dato da un terreno incolto a sud, da un parco con alberi e ceto erboso a nord e da un capannone artigianale nella parte centrale.

1.4. Inquadramento idrogeologico

Negli ultimi anni le conoscenze disponibili sull'intero territorio della pianura emiliano-romagnola, sia per la superficie sia per il sottosuolo, sono notevolmente aumentate grazie alla realizzazione di studi e cartografie specifiche. Per quel che riguarda le nuove conoscenze geologiche, il pedeappennino e la pianura emiliano-romagnola sono stati oggetto di studi approfonditi che hanno portato all'individuazione di *"tre gruppi acquiferi denominati A, B e C"* come tre unità geologiche ben individuabili in affioramento e separati tra loro nel sottosuolo da barriere di permeabilità lateralmente molto continue.



Per quel che riguarda le nuove conoscenze geologiche, il pedeappennino e la pianura emiliano-romagnola sono stati oggetto di studi approfonditi che hanno portato all'individuazione di *"tre gruppi acquiferi denominati A, B e C"* come tre unità geologiche ben individuabili in affioramento e separati tra loro nel sottosuolo da barriere di permeabilità lateralmente molto continue.

In generale si osserva che ogni complesso acquifero è costituito da una porzione inferiore prevalentemente fine seguita da una superiore prevalentemente grossolana; lo spessore di ogni complesso acquifero è dell'ordine di alcune decine di metri. All'interno di ogni complesso acquifero la porzione grossolana viene denominata sistema acquifero, la porzione fine sistema acquitardo.

Questi livelli a bassa permeabilità (acquitardi o acquicludi) causano una ulteriore compartimentazione all'interno dei tre gruppi acquiferi e fanno sì che i diversi complessi acquiferi siano tra loro isolati idraulicamente, ad esclusione delle zone in cui avviene la ricarica diretta di queste unità.

Dal punto di vista genetico, la ciclicità espressa dai complessi acquiferi viene messa in relazione ad eventi climatici che causano l'alternarsi di attivazioni e disattivazioni dei sistemi fluviali e deltizi.

Alla luce di quanto sopra, l'intero acquifero regionale è pertanto costituito da un complesso sistema multifalda, caratterizzato dalla gerarchizzazione degli acquiferi e degli acquitardi più sopra descritta. Questa suddivisione del bacino idrogeologico regionale in tre unità idrogeologiche, sostituisce la concezione di acquifero monostrato (1977) che fungeva da modello di riferimento in tutti gli studi precedenti sull'argomento.

Tutte le falde presenti sono in condizioni confinate, ad esclusione delle zone in cui avviene la ricarica diretta degli acquiferi. Generalmente, le zone di ricarica sono ubicate sul margine appenninico e proseguono per alcuni chilometri verso la pianura in modo variamente articolato a seconda della distribuzione dei depositi grossolani presenti nel sottosuolo.

La circolazione idrica si muove dall'alta alla medio-bassa pianura: le acque che si infiltrano nelle zone di conoide con chimismo di tipo bicarbonato-calcico, ricche in solfati ed in diversi casi in nitrati, subiscono un processo di "riduzione chimica" tanto più evidente quanto più si confinano dalla superficie per la presenza di coperture argillose che le mantengono in pressione.

Il complesso idrogeologico cui appartiene l'area studiata, intendendo con ciò un'area con ben definite caratteristiche idrogeologiche distinguibili da quelle adiacenti, è quello delle conoidi maggiori (F. Panaro) (fig. 4). Esso è caratterizzato in superficie da terreni costituiti dalle alluvioni più fini depositate dai fiumi appenninici.

In questa fascia della pianura i valori di soggiacenza della falda sono prossimi al piano di campagna; in superficie è frequente riscontrare livelli acquiferi sospesi, di natura freatica, completamente separati dall'acquifero principale e dotati di acque scadenti che traggono alimentazione principalmente dalle infiltrazioni delle precipitazioni meteoriche.

1.5. Condizioni idrogeologiche locali

I dati geognostici e quelli di letteratura concordano nell'individuare un acquifero freatico formato da una successione di orizzonti litologici con struttura lentiforme. Tali alternanze di strati e/o banchi a diversa granulometria caratterizzano un acquifero a falda libera e cioè delimitato solo inferiormente da un substrato impermeabile. Detto livello idrogeologico può anche presentarsi localmente confinato, in modo più o meno parziale, ma risulta comunque in diretta comunicazione con l'infiltrazione superficiale.

Nei fori delle prove penetrometriche CPT, eseguite il 14-12-2009, il freatimetro ha rilevato la presenza di acqua il cui livello statico si è stabilizzato tra -2,40 m e -1,20 m dal piano di campagna attuale. La falda freatica è caratterizzata da bassi valori di trasmissività e da variabilità nel livello piezometrico che è in stretta relazione con gli apporti meteorici. Il suo livello potrebbe raggiungere e superare il piano di fondazione, tuttavia, dato il modesto carico idraulico, essa non eserciterà spinte idrostatiche significative alla base dello stesso.

Sulla scorta dei dati bibliografici e di campagna la fluttuazione stagionale della falda superficiale in questa zona è compresa tra -0,50 m dal p.c. in inverno (periodo di ricarica) e -4,50 m dal p.c. in estate (periodo di magra).

1.6. Analisi dei rischi geologici I.s. incidenti sul sito

Premessa terminologica

1. Pericolosità ambientale

Si intende la probabilità che un certo fenomeno – naturale o indotto più o meno direttamente dall'antropizzazione – si verifichi in un certo qual territorio, in un determinato intervallo di tempo.

2. Valore degli elementi esposti a rischio

Si intende l'insieme complesso della popolazione, delle costruzioni, delle infrastrutture, delle attività economiche, dell'organizzazione sociale e degli eventuali programmi di espansione e di potenziamento di un certo territorio.

2. Rischio ambientale

Si intende la probabilità che le conseguenze economiche e sociali di un certo fenomeno di "pericolosità" (es. frana) superino una determinata soglia. Il rischio ambientale, pertanto, risulta uguale al prodotto della pericolosità per il valore degli elementi esposti al rischio:

$$R = P \times V.E.$$

L'unico rischio geologico incidente sull'area in esame, e che interessa gran parte della pianura modenese, è rappresentato dalla subsidenza.

La subsidenza, intesa come abbassamento del suolo, è un fenomeno geologico diffuso nelle pianure alluvionali che si manifesta con il progressivo costipamento dei terreni limo-argillosi con espulsione di acqua dai pori e diminuzione della porosità. In pratica: un abbassamento della superficie piezometrica (livello della falda) si traduce in una diminuzione della pressione idrostatica negli interstizi degli ammassi granulari. Ne consegue un aumento della pressione effettiva sui grani da cui dipende il processo di consolidamento. Può essere accelerato dal prelievo di acqua e fluidi dal sottosuolo.

Questo processo, che può avere cause sia naturali sia artificiali, diviene un vero e proprio fattore di rischio quando l'abbassamento del terreno è particolarmente marcato o quando la topografia è già depressa e vicina, o al di sotto, del livello del mare. Per una pianura alluvionale come quella dell'Emilia-Romagna i valori di subsidenza naturali attesi sono dell'ordine di 0,1-0,3 cm/anno mentre i valori effettivamente misurati nelle ultime decine d'anni sono quasi ovunque maggiori di 0,4 cm/anno e con punte di 5 cm/anno.

Nel periodo 1970/1993-1999, il territorio del Comune di Castelfranco Emilia ha subito un abbassamento di 0,8÷1,2 cm/anno.

Nel 2005 è stato realizzato da ARPA, per conto della Regione Emilia-Romagna, il rilievo di un sottoinsieme (circa il 50% dell'intera consistenza) della rete regionale di controllo della subsidenza, tramite livellazioni geometriche di alta precisione. I lavori di campagna sono iniziati il 30 maggio 2005 e sono terminati il 21 settembre. La successiva fase di compensazione della rete e calcolo delle quote ha permesso di procedere al confronto con le quote della campagna 1999 e, quindi, di pervenire all'analisi dei movimenti intervenuti nel periodo.

I recenti studi con l'utilizzo dell'interferometria satellitare supportata dalla livellazione hanno evidenziato, per il periodo 1999-2005, un sostanziale miglioramento degli abbassamenti rispetto al periodo precedente.

Nella Tav. 1.4 "Sistema Ambientale" del Piano Strutturale vigente del Comune di Castelfranco Emilia, il Sub Ambito 81.6 e il suo immediato intorno risultano esenti da rischi naturali

Per quanto sopra, il rischio geologico analizzato è accettabile e non pregiudica la fattibilità dell'intervento in progetto.

1.7. Indagine geognostica

Per determinare le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni del primo sottosuolo ed effettuare una valutazione litologica di massima degli stessi, in data 14-12-2009 sono state eseguite n. 6 prove penetrometriche meccaniche ad infissione statica CPT.

La prova CPT (Cone Penetration Test) viene normalmente eseguita in tutti i tipi di terreno compresi tra le argille e le sabbie a grana grossa, per la misura diretta di alcune grandezze fisiche (pressioni) e la ricostruzione indiretta del profilo stratigrafico dei terreni attraversati. Essa consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta conica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa a velocità costante nel terreno (2 cm/sec) indipendentemente dalla resistenza opposta da quest'ultimo. Lo sforzo per la penetrazione viene applicato per mezzo di un dispositivo di spinta, che agisce alternativamente sulla batteria di aste interne e su quella di aste cave esterne, della lunghezza di un metro, alla cui estremità è collegata la punta. La prova è pertanto discontinua e le misure di resistenza vengono di norma lette sui manometri della cella di misura ogni 20 cm di avanzamento nel terreno.

L'indagine geognostica è stata condotta per mezzo di un penetrometro olandese Gouda in assetto statico con dispositivo idraulico di spinta da 10 tonnellate, automontato, attrezzato con punta meccanica conica Begemann, avente un'area di 10 cm² e un angolo di 60°, con manicotto mobile, che ogni 20 cm rileva:

q_c (1^a lettura) = resistenza all'avanzamento della sola punta in kg/cm²

$q_c + f_s$ (2^a lettura) = resistenza alla punta + resistenza per attrito laterale locale sul manicotto in kg/cm²

con:

q_c (kg/cm²) = 1^a lettura eseguita in campagna

f_s (kg/cm²) = (2^a lettura eseguita in campagna - 1^a lettura eseguita in campagna) / 15

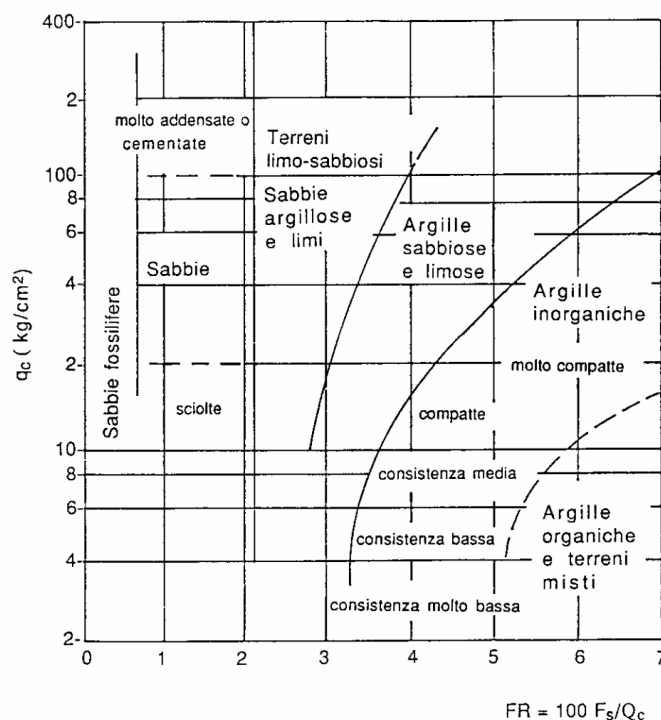
Per un riconoscimento di massima dei terreni attraversati si utilizza il seguente rapporto (Begemann, 1965; Raccomandazioni A.G.I., 1977) come parametro indicativo delle variazioni litologiche:

$$F = q_c / f_s$$

che, come ha dimostrato l'esperienza, dipende dalla composizione granulometrica dei terreni stessi.

| F | TERRENO | PROPRIETA' |
|------------------|-------------------------------|------------|
| $F \leq 15$ | Torbe e argille organiche | Coesive |
| $15 < F \leq 30$ | Limi e argille | Coesive |
| $30 < F \leq 60$ | Limi sabbiosi e sabbie limose | Granulari |
| $F > 60$ | Sabbie e sabbie con ghiaia | Granulari |

Pure utili risultano le valutazioni litologiche fornite da Schmertmann, ricavabili in base ai valori di q_c e di $FR = (q_c / f_s) \cdot 100$.



Classificazione litologica di Schmertmann

L'interpretazione dei risultati viene eseguita distinguendo fra terreni granulari con prevalenza di sabbia, per i quali possono essere ricavati tramite questa prova, con correlazioni empiriche di vari autori, l'angolo d'attrito, la compressibilità drenata e la densità relativa, ed i terreni coesivi con prevalenza di argilla, per i quali è possibile valutare la resistenza al taglio non drenata, la compressibilità, la sensitività ed il grado di sovraconsolidazione.

Nei tabulati di calcolo in allegato sono stati riportati, oltre ai valori misurati in sito ogni 20 cm d'avanzamento della punta, i valori, calcolati mediante elaborazione automatica, della *resistenza penetrometrica alla punta* q_c , espressi in kg/cm^2 , i valori della *resistenza laterale locale* f_s , sempre espressi in kg/cm^2 , nonché i valori del *rapporto fra la resistenza alla punta e la resistenza laterale locale* q_c / f_s .

Nel diagramma penetrometrico, invece, per semplicità di lettura, sono state riportate solamente due curve e precisamente:

- a sinistra, la curva della *resistenza penetrometrica alla punta* (q_c : pressione di rottura del terreno), espressa in kg/cm^2 ;
- a destra, la curva del rapporto fra la resistenza alla punta e la resistenza laterale locale (q_c / f_s : *rapporto di Begemann*).

Accanto alle due curve è stata riportata l'interpretazione stratigrafica (Schmertmann, 1978).

Il numero, l'ubicazione (fig. 5) e la profondità delle prove sono stati ritenuti sufficienti - in relazione alla tipologia del progetto, al D.M. 14-1-2008 e alla Delibera Regione Emilia-Romagna progr. n. 112 - oggetto n. 3121 del 2-5-2007 - a descrivere in maniera sufficientemente esaustiva l'intera area oggetto dell'intervento. Resta inteso, tuttavia, che l'indagine ha carattere puntuale.

Per ciascun punto di prova si è discretizzato il terreno indagato in livelli caratterizzati da valori di q_c e f_s relativamente costanti per tutto lo spessore dello strato. Successivamente si è stimata la litologia attraverso i metodi sopra riportati. Infine, sono stati calcolati i principali parametri geotecnici medi associati agli strati utilizzando le correlazioni empiriche proposte da vari autori.



1.8. Interpretazione stratigrafica e parametri geotecnici dei terreni

L'interpretazione litologica dei terreni di fondazione e i loro parametri geotecnici sono stati ottenuti con il programma di calcolo automatico GeoStru – Static Probing secondo l'approccio di Schmertmann (vedi certificati delle prove penetrometriche in allegato). Nelle tabelle sottostanti, che compendiano sia i caratteri litologici sia i principali parametri geotecnici della stratigrafia del sito, l'interpretazione stratigrafica è stata affinata integrando l'approccio di Searle con l'esperienza dello scrivente sui terreni della pianura modenese e bolognese. Questi parametri rappresentano i “parametri geotecnici appropriati ai fini progettuali” di cui al paragrafo C6.2.2 della Circolare Ministeriale 617/2009.

La caratterizzazione stratigrafico-geotecnica dei terreni di fondazione, desunta dalle n. 6 prove penetrometriche ad infissione statica CPT, ha sostanzialmente confermato i dati bibliografici. Nello spessore indagato sono risultati prevalenti i terreni a comportamento geotecnico coesivo su quelli a comportamento granulare.

Comparando i profili litostratigrafici e i parametri geotecnici, si può notare che i terreni di fondazione dell'area indagata sono caratterizzati da una discreta continuità laterale e presentano una buona omogeneità d'insieme, sia nel carico di rottura del terreno (q_c), e quindi nella portanza, sia nel rapporto di Begemann (q_c/f_s), e quindi nella litologia.

Legenda:

- Y' (t/m³) Peso dell'unità di volume efficace del terreno. Sono state adottate le correlazioni standard, opportunamente adattate in base alla natura litologica, di Terzaghi-Peck (1967) e di Bowles (1982). Definito Y_{sat} il peso specifico naturale per il terreno sotto falda e Y_w il peso specifico dell'acqua, è stata applicata la seguente relazione: $Y' = Y_{sat} - Y_w$ che tiene conto della spinta di Archimede dovuta all'elemento liquido. Per il terreno sopra falda è stato adottato il valore di $Y' = 1,85$ t/m³ indipendentemente dalla natura litologica.
- C_u (kg/cm²) Coesione non drenata nei terreni coesivi. Per la valutazione approssimata della resistenza al taglio in condizioni non drenate si è utilizzata la relazione:
 $C_u = q_c / \beta$ (AGI, 1977) con $15 \leq \beta \leq 25$.
- Φ° Angolo di attrito interno efficace per terreni granulari. E' stata considerata la correlazione (Schmertmann, 1978) fra la densità relativa D_r , la resistenza alla punta q_c e la tensione efficace σ'_{vo} .
- M_o (kg/cm²) Modulo di deformazione edometrico per terreni coesivi/granulari. Si fa riferimento alla relazione $M_o = \alpha q_c$ (Sanglerat, 1965 e AA.VV.). Il modulo di compressibilità volumetrica risulta l'inverso di M_o ($M_v = 1/M_o$).

CPT n. 1

| Prof. superf. inf. strato (m) | q_c medio (kg/cm ²) | f_s medio (kg/cm ²) | q_c / f_s | Litologia (sec. Searle con mod.) | Y (t/m ³) | C_u (kg/cm ²) | Φ° | M_o (kg/cm ²) |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| 0,40 | -- | -- | -- | Terreno vegetale | 1,85 | -- | -- | -- |
| 1,00 | 22,8 | 0,89 | 25,61 | Limo argilloso-sabbioso | 1,99 | 1,14 | -- | 45,61 |
| 7,00 | 11,3 | 0,59 | 19,15 | Limo argilloso plastico | 1,87 | 0,56 | -- | 45,87 |
| 10,20 | 7,8 | 0,28 | 27,85 | Limo argilloso-sabbioso | 1,79 | 0,39 | -- | 37,71 |
| 12,60 | 9,5 | 0,44 | 21,59 | Limo argilloso soffice | 1,83 | 0,47 | -- | 42,39 |
| 16,80 | 19,5 | 0,98 | 19,89 | Limo argilloso plastico | 1,95 | 0,98 | -- | 43,07 |
| 18,80 | 11,7 | 0,48 | 24,37 | Limo argilloso-sabbioso | 1,86 | 0,59 | -- | 46,49 |
| 19,20 | 302,7 | 0,67 | 451,79 | Ghiaia mediamente addensata | 2,00 | -- | 45 | 105,59 |

Falda: -1,50 m dal piano di campagna attuale

CPT n. 2

| Prof. superf. inf. strato (m) | q_c medio (kg/cm ²) | f_s medio (kg/cm ²) | q_c / f_s | Litologia (sec. Searle con mod.) | Y (t/m ³) | C_u (kg/cm ²) | Φ° | M_o (kg/cm ²) |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| 0,40 | -- | -- | -- | Terreno vegetale | 1,85 | -- | -- | -- |
| 2,20 | 15,6 | 0,92 | 16,95 | Argilla limosa plastica | 1,92 | 0,78 | -- | 48,23 |
| 7,00 | 11,4 | 0,53 | 21,50 | Limo argilloso soffice | 1,86 | 0,57 | -- | 45,99 |
| 12,60 | 8,6 | 0,36 | 23,88 | Limo argilloso-sabbioso | 1,80 | 0,43 | -- | 40,07 |
| 15,00 | 16,6 | 0,78 | 21,28 | Limo argilloso plastico | 1,91 | 0,83 | -- | 47,54 |

Falda: -2,40 m dal piano di campagna attuale

CPT n. 3

| Prof. superf. inf. strato (m) | q _c medio (kg/cm ²) | f _s medio (kg/cm ²) | q _c / f _s | Litologia (sec. Searle con mod.) | Y (t/m ³) | Cu (kg/cm ²) | Φ° | Mo (kg/cm ²) |
|--|--|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|----|--------------------------|
| 0,40 | -- | -- | -- | Terreno vegetale | 1,85 | -- | -- | -- |
| 1,40 | 12,6 | 0,77 | 16,36 | Argilla limosa plastica | 1,89 | 0,63 | -- | 47,47 |
| 6,80 | 11,3 | 0,56 | 20,17 | Limo argilloso soffice | 1,87 | 0,57 | -- | 45,89 |
| 12,60 | 13,4 | 0,40 | 33,50 | Limo argilloso-sabbioso | 1,85 | 0,67 | -- | 48,08 |
| 15,00 | 25,6 | 1,28 | 20,0 | Limo argilloso consistente | 1,99 | 1,28 | -- | 51,27 |
| Falda: -1,40 m dal piano di campagna attuale | | | | | | | | |

CPT n. 4

| Prof. superf. inf. strato (m) | q _c medio (kg/cm ²) | f _s medio (kg/cm ²) | q _c / f _s | Litologia (sec. Searle con mod.) | Y (t/m ³) | Cu (kg/cm ²) | Φ° | Mo (kg/cm ²) |
|--|--|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|----|--------------------------|
| 0,80 | -- | -- | -- | Riporto | 1,85 | -- | -- | -- |
| 2,00 | 18,6 | 1,22 | 15,24 | Argilla limosa consistente | 1,96 | 0,93 | -- | 44,94 |
| 3,00 | 11,6 | 0,61 | 19,01 | Limo argilloso plastico | 1,87 | 0,58 | -- | 46,34 |
| 4,20 | 21,2 | 0,49 | 43,26 | Sabbia argilloso-limosa | 1,94 | 1,06 | 26 | 42,48 |
| 7,00 | 13,1 | 0,64 | 20,46 | Limo argilloso plastico | 1,89 | 0,66 | -- | 47,90 |
| 12,00 | 9,6 | 0,37 | 25,94 | Limo argilloso-sabbioso | 1,83 | 0,48 | -- | 42,71 |
| 13,80 | 15,9 | 0,77 | 20,64 | Limo argilloso plastico | 1,92 | 0,79 | -- | 48,10 |
| 16,00 | 33,0 | 1,71 | 19,29 | Limo argilloso consistente | 2,05 | 1,65 | -- | 66,06 |
| 17,00 | 149,1 | 0,40 | 372,50 | Ghiaia sciolta | 1,93 | -- | 45 | 80,72 |
| Falda: -1,40 m dal piano di campagna attuale | | | | | | | | |

CPT n. 5

| Prof. superf. inf. strato (m) | q _c medio (kg/cm ²) | f _s medio (kg/cm ²) | q _c / f _s | Litologia (sec. Searle con mod.) | Y (t/m ³) | Cu (kg/cm ²) | Φ° | Mo (kg/cm ²) |
|--|--|--|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|----|--------------------------|
| 2,00 | 28,2 | 0,85 | 33,17 | Riporto e terreno vegetale | 1,85 | 1,41 | -- | 56,36 |
| 3,60 | 11,0 | 0,55 | 20,0 | Limo argilloso plastico | 1,87 | 0,55 | -- | 45,36 |
| 5,20 | 8,9 | 0,37 | 24,05 | Limo argilloso-sabbioso | 1,83 | 0,45 | -- | 41,02 |
| 7,20 | 14,5 | 0,73 | 19,86 | Limo argilloso plastico | 1,91 | 0,73 | -- | 48,42 |
| 9,20 | 11,4 | 0,44 | 25,90 | Limo argilloso-sabbioso | 1,87 | 0,57 | -- | 46,04 |
| 12,20 | 10,1 | 0,40 | 25,25 | Limo argilloso-sabbioso | 1,82 | 0,50 | -- | 43,71 |
| 15,00 | 20,7 | 0,86 | 24,06 | Limo argilloso-sabbioso | 1,95 | 1,03 | -- | 41,31 |
| Falda: -1,20 m dal piano di campagna attuale | | | | | | | | |

CPT n. 6

| Prof. superf. inf. strato (m) | q_c medio (kg/cm ²) | f_s medio (kg/cm ²) | q_c / f_s | Litologia (sec. Searle con mod.) | γ (t/m ³) | C_u (kg/cm ²) | Φ° | M_o (kg/cm ²) |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1,00 | -- | -- | -- | Riporto | 1,85 | -- | -- | -- |
| 1,80 | 17,8 | 1,00 | 17,80 | Limo argilloso plastico | 1,95 | 0,89 | -- | 46,23 |
| 5,60 | 10,2 | 0,41 | 24,87 | Limo argilloso-sabbioso | 1,85 | 0,51 | -- | 43,87 |
| 7,00 | 16,1 | 0,72 | 22,36 | Limo argilloso plastico | 1,93 | 0,80 | -- | 47,97 |
| 11,00 | 10,6 | 0,43 | 24,65 | Limo argilloso-sabbioso | 1,84 | 0,53 | -- | 44,74 |
| 12,80 | 12,4 | 0,61 | 20,32 | Limo argilloso plastico | 1,88 | 0,62 | -- | 47,27 |
| 15,00 | 27,4 | 1,38 | 19,85 | Limo argilloso consistente | 2,00 | 1,37 | -- | 54,87 |
| Falda: -1,40 m dal piano di campagna attuale | | | | | | | | |

La successione stratigrafica presente nel sito indagato è rappresentata da intercalazioni di limi argillosi, argille limose e limi argilloso-sabbiosi sovrastanti depositi ghiaiosi, con le seguenti caratteristiche geomeccaniche:

- da buone a molto buone fino a 7 m di profondità dal piano campagna attuale ($q_c = 11 \div 22$ kg/cm²); si tratta soprattutto di alternanze di limi argillosi e limi argilloso-sabbiosi interessati da una marcata sovraconsolidazione, derivante principalmente da processi di essiccazione e subordinatamente da oscillazioni di falda accompagnate dall'azione dell'evaporazione e della capillarità. Questi strati possiedono parametri geomeccanici elevati che tenderanno a ridimensionarsi all'aumentare del livello di falda.
- scadenti da 7 m fino a ca. 12 m di profondità dal piano campagna attuale ($q_{c \text{ medio}}$ compreso tra 8 e 10 kg/cm²); si tratta di limi argillosi plastici e soffici con presenza di argille organiche.
- da buone a ottime da 12 m fino al tetto delle ghiaie posto ad una profondità compresa tra -19,20 m (prova 1) e -17,0 m (prova 4); in questo intervallo sono stati riscontrati limi argillosi plastici, limi argilloso-sabbiosi e limi argillosi consistenti con valori di resistenza alla punta penetrometrica q_c compresi tra 11 e 33 kg/cm².

Nei fori delle prove penetrometriche CPT, il freatimetro ha rilevato la presenza di acqua il cui livello statico si è stabilizzato tra -2,40 m e -1,20 m dal piano di campagna attuale. La falda freatica è caratterizzata da bassi valori di trasmissività e da variabilità nel livello piezometrico che è in stretta relazione con gli apporti meteorici. Il suo livello potrebbe raggiungere e superare il piano di fondazione, tuttavia, dato il modesto carico idraulico, essa non eserciterà spinte idrostatiche significative alla base dello stesso.

Sulla scorta dei dati bibliografici e di campagna la fluttuazione stagionale della falda superficiale in questa zona è compresa tra -0,50 m dal p.c. in inverno (periodo di ricarica) e -4,50 m dal p.c. in estate (periodo di magra).

A titolo puramente esemplificativo, considerata la stratigrafia e la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione, la **portanza del terreno** per fondazioni superficiali continue può essere stimata in questa sede in **0,80 ÷ 0,90 kg/cm²**.

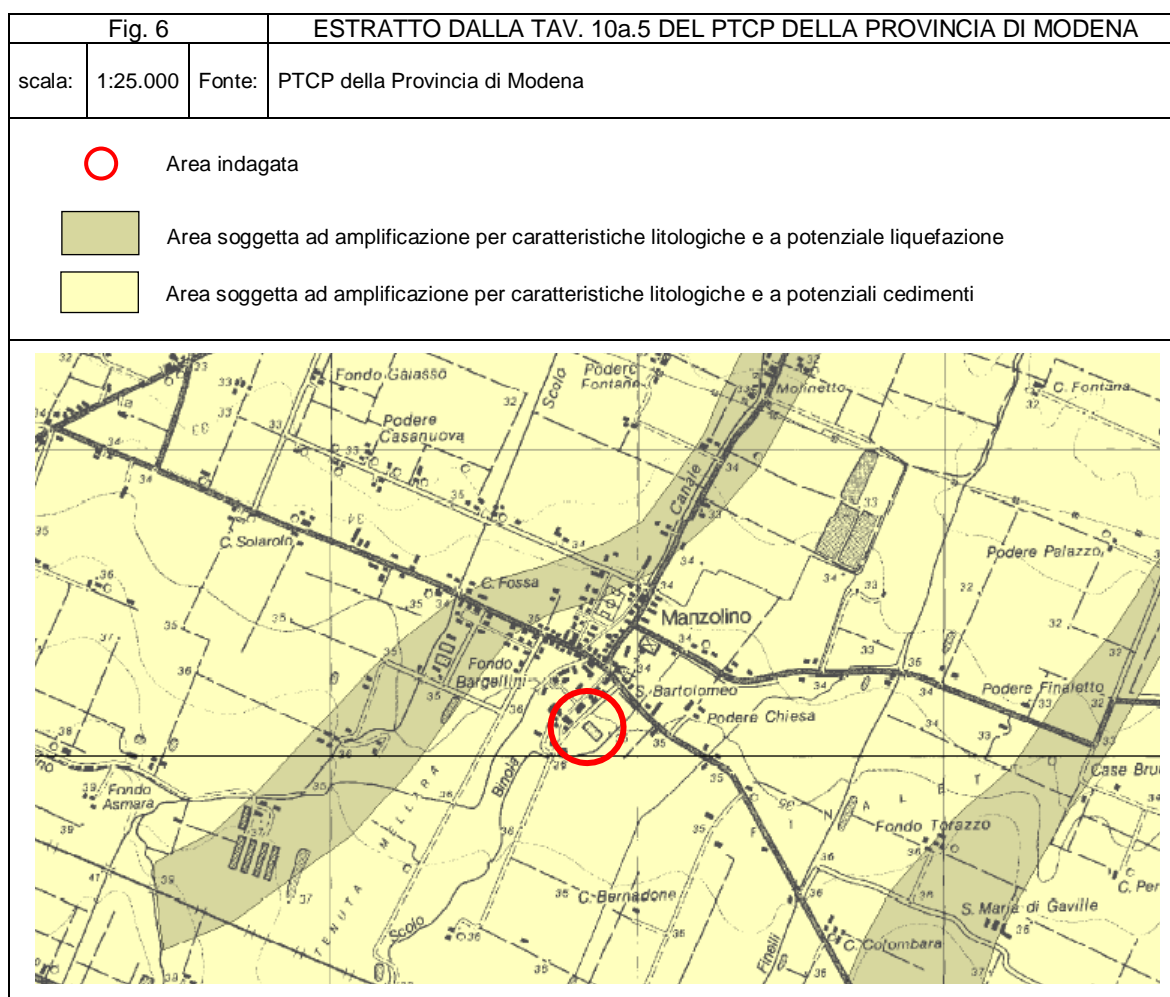
2. SISMICA

2.1. Introduzione

Considerato il tipo di progetto e l'estensione dell'area di indagine, per accertare la variabilità spaziale delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei terreni di fondazione è stato ritenuto adeguato e sufficiente il ricorso a n. 6 prove penetrometriche meccaniche ad infissione statica CPT e ad una indagine geofisica con metodo sismico MASW.

Inoltre, si è proceduto a definire gli scenari di pericolosità sismica locale, cioè ad identificare le parti di territorio suscettibili di effetti locali (amplificazione del segnale sismico, cedimenti, instabilità dei terreni, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ecc.), in accordo con l'atto di indirizzo e coordinamento di cui alla Delibera dell'Assemblea legislativa della Regione Emilia-Romagna progr. n. 112 – oggetto n. 3121 del 2-5-2007: "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", e con la Tav. 10a.5 del PTCP della provincia di Modena: "Rischio sismico: carta provinciale delle aree suscettibili di effetti locali" (fig. 6).

Per l'area studiata, sono stati riconosciuti i seguenti aspetti geologici in grado di determinare effetti locali:



- depositi (spessore ≥ 5 m) di terreni coesivi poco consistenti, caratterizzati da valori di $c_u < 70$ kPa nei primi 10 m di profondità dal piano campagna
- eventuale presenza di strati sabbiosi potenzialmente liquefacibili in occasione di eventi sismici

Nei paragrafi seguenti, oltre all'inquadramento sulla sismicità regionale, sarà descritta l'indagine geofisica effettuata, verrà verificata la suscettibilità alla liquefazione degli eventuali strati sabbiosi e infine verranno esposte le considerazioni sulla fattibilità sismica del progetto.

2.2. Sismicità dell'area

L'Emilia-Romagna è interessata da una sismicità che può essere definita media relativamente alla sismicità nazionale, con terremoti storici di magnitudo massima compresa tra 5,5 e 6 della scala Richter e intensità del IX-X grado della scala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS).

Il D.M. 14-1-2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" disciplina la progettazione e la costruzione di nuovi edifici soggetti ad azioni sismiche, nonché la valutazione della sicurezza e gli interventi di adeguamento e miglioramento su edifici esistenti soggetti al medesimo tipo di azioni. Il sito di costruzione ed i terreni in esso presenti dovranno in generale essere esenti da rischi di instabilità di pendii e di cedimenti permanenti causati da fenomeni di liquefazione o eccessivo addensamento in caso di terremoto. L'occorrenza di tali fenomeni andrà valutata con opportune indagini geognostiche il cui scopo sarà anche quello di classificare il terreno di fondazione nelle seguenti categorie di sottosuolo:

- A - *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
- B - *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
- C - *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
- D - *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
- E - *Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m*, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).
- S1 - Depositi di terreni caratterizzati da valori di V_{s30} inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
- S2 - Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente $V_{s,30}$ di propagazione delle onde di taglio (definita successivamente) entro i primi 30 m di profondità. Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

La misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio è fortemente raccomandata. Nei casi in cui tale determinazione non sia disponibile, la classificazione può essere effettuata in base ai valori del numero equivalente di colpi della prova penetrometrica dinamica (*Standard Penetration Test*) $N_{SPT,30}$ (definito successivamente) nei terreni prevalentemente a grana grossa e della resistenza non drenata equivalente $c_{u,30}$ (definita successivamente) nei terreni prevalentemente a grana fina.

La velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,30}$ è definita dall'espressione:

$$V_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{s,i}}} \text{ [m/s]}.$$

La resistenza penetrometrica dinamica equivalente $N_{SPT,30}$ è definita dall'espressione:

$$N_{SPT,30} = \frac{\sum_{i=1,M} h_i}{\sum_{i=1,M} \frac{h_i}{N_{SPT,i}}}.$$

La resistenza non drenata equivalente $c_{u,30}$ è definita dall'espressione:

$$c_{u,30} = \frac{\sum_{i=1,K} h_i}{\sum_{i=1,K} \frac{h_i}{c_{u,i}}}.$$

Nelle precedenti espressioni si indica con:

| | |
|-------------|---|
| h_i | spessore (in metri) dell'i-esimo strato compreso nei primi 30 m di profondità; |
| $V_{s,i}$ | velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato; |
| $N_{SPT,i}$ | numero di colpi N_{SPT} nell'i-esimo strato; |
| $c_{u,i}$ | resistenza non drenata nell'i-esimo strato; |
| N | numero di strati compresi nei primi 30 m di profondità; |
| M | numero di strati di terreni a grana grossa compresi nei primi 30 m di profondità; |
| K | numero di strati di terreni a grana fina compresi nei primi 30 m di profondità. |

Come definito nel testo unico allegato al D.M. del 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni", "le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si

definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g ...”.

Secondo la nuova classificazione sismica del territorio nazionale, il Comune di Castelfranco Emilia è classificato in **zona sismica 3**.

La delibera dell'Assemblea legislativa della Regione Emilia-Romagna progr. n. 112 – oggetto n. 3121 del 2-5-2007: “Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica” assegna al comune di Castelfranco Emilia un valore di accelerazione massima orizzontale di picco al suolo $a/g = 0,163$.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare anche l'effetto della risposta sismica locale che, in assenza di specifiche analisi, può essere ricavata mediante un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento.

L'identificazione di questa categoria va di norma eseguita in base ai valori della V_{s30} , cioè la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità, che in caso di terreni coesivi può essere effettuata in base alla resistenza non drenata equivalente $c_{u,30}$ definita dall'espressione vista prima.

2.3. Indagine geofisica con metodo sismico MASW

Il giorno 18 dicembre 2009, è stata eseguita sul lotto di terreno in esame una campagna sismica con metodo MASW di tipo attivo. Il metodo MASW (*Multichannel Acquisition Surf Wave*) ha come obiettivo quello di ricostruire il profilo sismostratigrafico di un sito, valutando in particolare la distribuzione della velocità delle onde “S” sia per la ricostruzione del profilo del sottosuolo sia per la definizione *in situ* della V_{s30} .

Al fine di migliorare il rapporto segnale disturbo per ogni punto di offset vengo eseguiti, in modalità iterativa, tre shots. Il metodo MASW prevede la costruzione di una curva di dispersione per le onde di superficie, attraverso l'elaborazione di un'immagine di dispersione derivata dall'analisi della propagazione delle onde di Rayleigh.

La tecnica di prospezione MASW utilizza quindi un'immagine rappresentativa delle frequenze delle onde superficiali, espressa in funzione della velocità di fase delle stesse. Nell'immagine di dispersione (*Over Tone Image*) viene inoltre enfatizzata cromaticamente l'ampiezza delle vibrazioni evidenziando così le aree corrispondenti al miglior rapporto segnale/disturbo.

Una volta individuata la sequenza di frequenze e velocità di fase corrispondenti alla più probabile distribuzione della dispersione nel sottosuolo esaminato (analisi della curva di dispersione) si procede alla ricostruzione delle stratigrafia rappresentativa della distribuzione delle velocità delle onde S tramite l'utilizzo di un algoritmo di inversione.

La tecnica di prospezione MASW può essere così schematizzata:

1. acquisizione delle onde superficiali;
2. costruzione delle curve di dispersione (grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza);
3. inversione delle curve di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V.

MODALITÀ ESECUTIVE

Le indagini MASW vengono eseguite disponendo sul terreno almeno 24 sensori (geofoni), posti ad intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare. Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente vibrazioni impulsive ad alta frequenza in corrispondenza di un punto prestabilito lungo il profilo (*punto di scoppio*): nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (*trigger*). Da questo istante

inizia l'acquisizione digitale, con intervallo di campionamento pari a 0.25 ms e tempo di registrazione pari ad almeno 1 secondo.

Lo scoppio e la registrazione se necessario vengono ripetuti tre volte. Lo strumento utilizzato è il sismografo digitale A6000-S di produzione M.A.E. s.r.l. caratterizzato da 24 canali di acquisizione digitale con dinamica a 24 bit. Gli impulsi sismici sono stati generati con l'utilizzo di una massa battente da 6.0 Kg. Nel caso specifico la geometria dell'array di indagine è riassunta nella seguente tabella:

| Sezione | n° geofoni | Spacing (m) | Offset (m) | Lunghezza array (m) |
|---------|------------|-------------|------------|---------------------|
| L1 | 24 | 1.00 | 7.00 | 30.00 |

Tabella n° 1 - Array dello stendimento MASW.

Le caratteristiche del sismografo e dei geofoni utilizzati sono di seguito sinteticamente riassunte:

| SISMOGRAFO M.A.E. - A6000S | |
|--|--|
| CPU NS Geode GXLV 233MHz | |
| Memoria RAM 128 Mb PC100 Mhz | |
| Hard Disk 512 Mb on Compact Flash Disk Udma/33 | |
| Batteria di riserva al Litio | |
| Monitoraggio Hardware Winbond W83781D | |
| Display LCD 10,5" Tft Transflective a colori, touch screen | |
| Controller Fast Ethernet Intel 82559ER 10/100 Base-T | |
| Alimentazione con alimentatore Switching 12 Volt 2Ah | |
| Valigia in copolimeri di polypropylene antischiacciamento | |
| Temperatura di funzionamento da 0 a 60°C | |
| Dimensioni e peso L280 X H220 X P170 mm, 3 Kg | |

| GEOFONI GEOSPACE GS-11D | |
|--|----------------------|
| Natural Frequency | 4,5 ± 0,75 Hz |
| Coil Resistance @ 25°C ± 5% | 380 Ohms |
| Intrinsic Voltage Sensitivity with 380 Ohm Coil ± 10% | 0,32 V/cm/s |
| Normalized Transduction Constant (V/in/sec) | 0,42 (sq.root of Rc) |
| Open Circuit Damping | 0,34 ± 20% |
| Damping Constant with 380 Ohm Coil | 762 |
| Optional Coil Resistances ± 5% | 56,16 Ohms |
| Moving Mass ± 5% | 23,6 g |
| Typical Case to Coil Motion P-P | 0,18 cm |
| Harmonic Distortion with Driving Velocity of 0.7 in/sec (1.8 cm/sec) P-P | N/S |

Dimensioni

| | |
|--------------------------|---------|
| Height (less terminals*) | 3,35 cm |
| Diameter | 3,18 cm |
| Weight | 111 g |

* terminal height is 0,3429 cm

Tabella n° 2 - Tabella delle caratteristiche del sismografo e dei geofoni utilizzati.

ANALISI DELLE IMMAGINI DI DISPERSIONE

Le immagini di dispersione rappresentano, in forma grafica, lo spettro di dispersione delle onde di Rayleigh che si propagano nel sottosuolo dell'area indagata.

Le immagini illustrano la dispersione vera e propria intesa come variazione della velocità di fase in funzione delle frequenze dello spettro. Evidenziano inoltre l'ampiezza delle vibrazioni (energia associata) utilizzando variazioni di toni di colori. L'obiettivo dell'analisi dell'immagine di dispersione è l'individuazione del "tono fondamentale" della vibrazione (fundamental mode), distinguendolo da tutti gli ipertoni associati (higher tone) e dai rumori di fondo (noise).

L'individuazione del "tono fondamentale" permette di giungere alla principale chiave di lettura della prospezione cioè all'individuazione della "curva di dispersione" e quindi, tramite inversione, alla ricostruzione della sequenza sismostratigrafica del sito indagato.

INTERPRETAZIONE

Il profilo delle Vs è determinato sulla base di un algoritmo iterativo di inversione che utilizza i dati ottenuti dallo studio della curva di dispersione. L'algoritmo si basa sulle seguenti considerazioni:

- 1) la frequenza è direttamente legata alla profondità di indagine (basse frequenze alte profondità);
- 2) la velocità di fase dipende essenzialmente dalle proprietà elastiche dei materiali interessati dal propagarsi della perturbazione.

L'algoritmo di inversione tiene inoltre conto della necessità di soddisfare la seguente relazione:

$$zf = a \lambda f$$

dove:

zf = profondità di propagazione della frequenza f;

a = coefficiente adimensionale;

λf = lunghezza d'onda corrispondente alla frequenza f.

Le iterazioni necessarie per l'elaborazione in precedenza descritta avvengono tramite l'utilizzo di un programma di calcolo specifico (*Surfseis 2.0* del *Kansas Geological Survey*).

Negli allegati sono riportate sia l'immagine di dispersione (*Over Tone Image*) che la relativa curva di dispersione.

Per quanto concerne il calcolo dei parametri elastici sono state utilizzate le seguenti formule:

Densità Dinamica:

$$\gamma = 0.51V_p^{0.19}$$

dove:

γ = densità del mezzo attraversato;

V_p = velocità onde di compressione;

Modulo di taglio:

$$G = \gamma V_s^2$$

dove:

γ = densità del mezzo attraversato;

V_s = velocità onde di taglio;

Modulo di Young:

$$E = 2\gamma V_s^2 (1 + \nu)$$

dove:

ν = coefficiente di Poisson

Coefficiente di Poisson:

Il coefficiente di Poisson è un valore di input per il calcolo dei parametri elastici, in assenza di prove Down Hole o Cross Hole di taratura esso viene definito utilizzando la seguente tabella:

| Litologia | Vs | Poisson |
|-------------------|----------|---------|
| Limi | 80/100 | 0.50 |
| Limi argillosi | 100/150 | 0.45 |
| Limi sabbiosi | 80/150 | 0.50 |
| Argilla | 200/500 | 0.45 |
| Sabbia | 100/200 | 0.40 |
| Ghiaia | 250/500 | 0.35 |
| Roccia fratturata | 300/800 | 0.30 |
| Roccia compatta | 500/1500 | 0.20 |

Tabella n° 3 – Valori caratteristici del coefficiente di Poisson

DETERMINAZIONE DELLA VELOCITÀ DELLE ONDE SISMICHE NEI PRIMI 30 m (V_{s30})

Utilizzando le metodologie e le formule di cui al paragrafo relativo alla metodologia MASW, è possibile individuare la seguente sezione sismica di sintesi:

| Strato | Spessore medio (m) | V_s (m/s) |
|--------|--------------------|-------------|
| 1 | 1.54 | 114.88 |
| 2 | 1.93 | 148.16 |
| 3 | 2.41 | 110.84 |
| 4 | 3.02 | 149.93 |
| 5 | 3.77 | 222.98 |
| 6 | 4.71 | 270.99 |
| 7 | 5.89 | 308.28 |
| 8 | 6.72 | 357.07 |

Tabella n° 4 – Stratigrafia da prova sismica e velocità di propagazione dell'onda sismica geofono 1012

Seguendo le prescrizioni dell'OPCM 3274/2003 e del D.M. 14-1-2008 la determinazione della V_{s30} è stata ottenuta utilizzando la formula:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{\Delta n} \frac{h_i}{V_{si}}}$$

dove:

h_i = spessore dello strato i -esimo

V_{si} = Velocità orizzontale dello strato i -esimo

La V_{s30} , senza specifiche indicazioni dei progettisti, è calcolata a partire dal piano di campagna.

Sulla base di quanto esposto è pertanto possibile affermare quanto segue:

V_{s30} Shot 1

| | |
|-----------|--------|
| V_{s30} | 213.39 |
|-----------|--------|

Tabella n° 5 – Valori calcolati di V_{s30}

Utilizzando la tabella di seguito riportata, si è proceduto alla determinazione della categoria di appartenenza dei terreni:

Categorie di suolo di fondazione:

| | |
|-----------|--|
| A | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di V_{s30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m. |
| B | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s. |
| C | <i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |
| D | <i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} inferiori a 180 m/s. |
| E | <i>Terreni dei sottosuoli di tipo C e D e con spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_{s30} > 800$ m/s) |
| S1 | Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s30} < 100$, che includono uno strato spesso almeno 8 m di terreni a grana fine di bassa consistenza di bassa consistenza oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche |
| S2 | Depositi di terreno suscettibili di liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti. |

Tabella n° 6 – Definizione dei profili stratigrafici

Pertanto, i terreni del sito appartengono alla categoria **C**.

2.4. Valutazione della suscettibilità alla liquefazione

Per liquefazione si intende un processo di accumulazione della pressione del fluido interstiziale che causa in un terreno non coesivo (sabbia, sabbie limose non plastiche) saturo diminuzione della resistenza e/o rigidità al taglio a seguito dello scuotimento sismico, potendo dar luogo a deformazioni permanenti significative. La liquefazione consiste quindi in una diminuzione della resistenza del terreno, a seguito del raggiungimento della condizione di fluidità. La perdita totale della resistenza viene raggiunta quando la pressione dell'acqua che riempie gli interstizi arriva a uguagliare la pressione di confinamento, rendendo nulle le tensioni efficaci trasmesse attraverso le particelle solide. Una volta che il terremoto ha innescato il processo di liquefazione, la massa del suolo resta in movimento fino a che non raggiunge una nuova condizione di stabilità.

Il meccanismo della liquefazione dipende sia dalle caratteristiche relative al sisma (magnitudo, durata, distanza dall'epicentro, accelerazione massima al sito) che da quelle del terreno (distribuzione granulometrica, uniformità, saturazione, densità relativa, pressioni efficaci di confinamento, stato tensionale in situ iniziale, etc.). La previsione della pericolosità di liquefazione si basa, oltre che sui parametri del sisma atteso, sulla stima di un "potenziale di liquefazione" del terreno, il quale dipende da una serie di parametri geotecnici quali ad esempio:

- distribuzione granulometrica: sono suscettibili di liquefazione i terreni con diametro mediano dei grani D_{50} compreso fra 0.075 mm e 2 mm e coefficiente di uniformità compreso fra 2 e 5 (sabbie e sabbie limose);
- indice di plasticità: il fenomeno è possibile in terreni caratterizzati da un indice di plasticità inferiore al 10%;

c) densità relativa: sono suscettibili di liquefazione i terreni sciolti con densità relativa $Dr < 50\%$ o nei quali $N < 2z$, dove N è il numero di colpi della prova penetrometrica standard (SPT) e z la profondità in metri;

d) saturazione: sono suscettibili di liquefazione i terreni in cui la falda è prossima al piano di campagna (profondità $< 7\text{m}$);

e) profondità: in genere il fenomeno di liquefazione si può verificare entro i primi 15 m di terreno o comunque per pressioni verticali di confinamento inferiori a 200kPa.

Il metodo di verifica di seguito riportato permette di esprimere la suscettibilità alla liquefazione del deposito attraverso un coefficiente di sicurezza F_s , dato dal rapporto fra la resistenza al taglio mobilitabile (R) nello strato e lo sforzo tagliente (T) indotto dal sisma. È bene chiarire che si tratta di stime basate spesso su correlazioni empiriche.

$$F_s = R / T$$

dove T è così determinato:

$$T = 0,65 \cdot \frac{a_{\max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot rd \cdot \frac{1}{MSF}$$

dove

a_{\max} rappresenta l' accelerazione sismica massima

g accelerazione di gravità

σ_{vo} pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.

σ'_{vo} pressione verticale efficace alla profondità z dal p.c.

rd coefficiente in funzione della profondità

MSF coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma

$$\text{per } z \leq 9,15 \text{ m} \quad \rightarrow \quad rd = 1 - 0.00765 \cdot z$$

$$\text{per } 9,15 < z \leq 23 \text{ m} \quad \rightarrow \quad rd = 1,174 - 0.0267 \cdot z$$

$$\text{per } 23 < z \leq 30 \text{ m} \quad \rightarrow \quad rd = 0.774 - 0.008 \cdot z$$

$$\text{per } z > 30 \text{ m} \quad \rightarrow \quad rd = 0.5$$

$$\text{se } M \text{ (magnitudo)} \leq 7.5 \quad \rightarrow \quad MSF = \left(\frac{M}{7.5} \right)^{-3.3}$$

$$\text{se } M \text{ (magnitudo)} > 7.5 \quad \rightarrow \quad MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}}$$

Metodo di Robertson e Wride (1997)

Per una valutazione di massima da prove CPT della suscettività alla liquefazione dei terreni sabbiosi in falda, è stato utilizzato un programma di calcolo automatico (GeoStru) che applica la correlazione di Robertson e Wride (1997).

| Verifica alla liquefazione (Robertson e Wride, 1997) | |
|--|------------------------------|
| $F_s \geq 1,25$ | Liquefazione assente |
| $F_s = 1,0 \div 1,25$ | Liquefazione possibile |
| $F_s < 1$ | Liquefazione molto probabile |

Nei primi 15 m di terreno, solo in corrispondenza della prova penetrometrica n. 4 è stato individuato uno strato sabbioso, non suscettibile a liquefazione in occasione di sollecitazioni sismiche.

| Prova | Strato | Litologia | F_s | Liquefazione |
|-------|--------------------|-------------------------|-------|--------------|
| 4 | da 3,00 m a 4,20 m | Sabbia argilloso-limosa | 1,797 | assente |

2.5. Caratterizzazione sismica del sito

I dati acquisiti con le indagini geognostiche in sito, definiscono i caratteri sismici riferibili all'intera area indagata:

- zona sismica 3
- $a/g = 0,163$ accelerazione massima orizzontale di picco al suolo (delibera regionale 112/2007)
- categoria del terreno di fondazione: C - *Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza*, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{s30} compresi tra 180 e 360 m/s ($15 < N_{SPT} < 50$, $70 < c_u < 250$ kPa)
- $V_{s30} = 213$ m/sec
- Assenza di strati sabbiosi liquefacibili secondo il metodo di Robertson e Wride (1997).

In conformità con il D.M. 14-1-2008 "Norme tecniche per le costruzioni", sono stati determinati i parametri sismici del sito associati ad un punto rappresentativo dell'area studiata (centro) definito dalle coordinate geografiche, utilizzando il programma di calcolo Geostru PS Parametri Sismici. I dati completi sono riportati negli allegati.

3. OSSERVAZIONI CONCLUSIVE

Lo scopo della presente relazione è stato quello di caratterizzare - dal punto di vista geolitologico, litotecnico, idrogeologico e sismico - un terreno sito in frazione Manzolino del Comune di Castelfranco Emilia, corrispondente al Sub Ambito 81.6 del PSC, sul quale è in progetto un Piano Urbanistico Attuativo.

Lo studio si è articolato nella raccolta dei dati bibliografici – compresi quelli contenuti nelle tavole del PTCP della Provincia di Modena e del PSC del Comune di Castelfranco Emilia – e nell'esecuzione di una specifica campagna geognostica, finalizzata sia alla ricostruzione della stratigrafia locale sia all'acquisizione dei parametri geomeccanici e delle caratteristiche idrogeologiche e sismiche dei terreni presenti nell'area.

MODELLAZIONE GEOLOGICA DEL SITO.

Dalla letteratura e dalla cartografia geologica disponibile risulta che il primo sottosuolo del sito indagato il sito insiste sui terreni limoso-argillosi e limoso-sabbiosi del Subintema di Ravenna, una delle suddivisioni del Sintema Emiliano-Romagnolo superiore (il sintema è l'unità strutturale fondamentale della stratigrafia e il tipo principale riconosciuto di unità a limiti inconformi, corpi rocciosi cartografabili delimitati alla base e alla sommità da discontinuità significative). Si tratta di depositi continentali quaternari attribuibili sia alla parte distale della conoide del fiume Panaro sia all'area interfluviale.

Attualmente l'evoluzione geomorfologica dell'area è relativamente conservativa essendo legata principalmente all'attività antropica e in particolar modo agli interventi edilizi ed infrastrutturali.

Il complesso idrogeologico cui appartiene l'area studiata, intendendo con ciò un'area con ben definite caratteristiche idrogeologiche distinguibili da quelle adiacenti, è quello delle conoidi maggiori (F. Panaro), caratterizzato in superficie da terreni costituiti dalle alluvioni più fini depositate dai fiumi appenninici.

In questa fascia della pianura le falde hanno valori di soggiacenza prossimi al piano di campagna; in superficie è frequente riscontrare livelli acquiferi sospesi, di natura freatica, completamente separati dall'acquifero principale e dotati di acque scadenti che traggono alimentazione principalmente dalle infiltrazioni delle precipitazioni meteoriche.

Nei fori delle prove penetrometriche CPT, eseguite il 14-12-2009, il freatimetro ha rilevato la presenza di acqua il cui livello statico si è stabilizzato tra -2,40 m e -1,20 m dal piano di campagna attuale. La falda freatica è caratterizzata da bassi valori di trasmissività e da variabilità nel livello piezometrico che è in stretta relazione con gli apporti meteorici. Il suo livello potrebbe raggiungere e superare il piano di fondazione, tuttavia, dato il modesto carico idraulico, essa non eserciterà spinte idrostatiche significative alla base dello stesso. Sulla scorta dei dati bibliografici e di campagna la fluttuazione stagionale della falda superficiale in questa zona è compresa tra -0,50 m dal p.c. in inverno (periodo di ricarica) e -4,50 m dal p.c. in estate (periodo di magra).

La caratterizzazione stratigrafico-geotecnica dei terreni di fondazione, desunta dalle n. 6 prove penetrometriche ad infissione statica CPT, ha sostanzialmente confermato i dati bibliografici. Nello spessore indagato sono tuttavia risultati prevalenti i terreni a comportamento geotecnico coesivo su quelli a comportamento granulare.

Comparando i profili litostratigrafici e i parametri geotecnici, si può notare che i terreni di fondazione dell'area indagata sono caratterizzati da una buona continuità e presentano una discreta omogeneità d'insieme, sia nel carico di rottura del terreno (q_c), e quindi nella portanza, sia nel rapporto di Begemann (q_c / f_s), e quindi nella litologia.

La successione stratigrafica presente nel sito indagato è rappresentata da intercalazioni di limi argillosi, argille limose e limi argilloso-sabbiosi sovrastanti depositi ghiaiosi, con le seguenti caratteristiche geomeccaniche:

- da buone a molto buone fino a 7 m di profondità dal piano campagna attuale ($q_c = 11 \div 22 \text{ kg/cm}^2$); si tratta soprattutto di alternanze di limi argillosi e limi argilloso-sabbiosi interessati da una marcata sovraconsolidazione, derivante principalmente da processi di essiccazione e subordinatamente da oscillazioni di falda accompagnate dall'azione dell'evaporazione e della capillarità. Questi strati possiedono parametri geomeccanici elevati che tenderanno a ridimensionarsi all'aumentare del livello di falda.

- scadenti da 7 m fino a ca. 12 m di profondità dal piano campagna attuale ($q_{c \text{ medio}}$ compreso tra 8 e 10 kg/cm²); si tratta di limi argillosi plastici e soffici con presenza di argille organiche.
- da buone a ottime da 12 m fino al tetto delle ghiaie posto ad una profondità compresa tra -19,20 m (prova 1) e -17,0 m (prova 4); in questo intervallo sono stati riscontrati limi argillosi plastici, limi argilloso-sabbiosi e limi argillosi consistenti con valori di resistenza alla punta penetrometrica q_c compresi tra 11 e 33 kg/cm².

A titolo puramente esemplificativo, considerata la stratigrafia e la caratterizzazione geotecnica dei terreni di fondazione, la **portanza del terreno** per fondazioni superficiali continue, poste a 1÷1,40 m dal p.c. attuale, può essere stimata in questa sede in **0,80 ÷ 0,90 kg/cm²**.

SISMICA

Secondo la nuova classificazione sismica del territorio nazionale, il comune di Castelfranco Emilia è classificato in zona sismica 3.

La delibera dell'Assemblea legislativa della Regione Emilia-Romagna progr. n. 112 – oggetto n. 3121 del 2-5-2007: "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica" assegna al comune di Castelfranco Emilia un valore di accelerazione massima orizzontale di picco al suolo $a/g = 0,163$.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare anche l'effetto della risposta sismica locale che, in assenza di specifiche analisi, può essere ricavata mediante un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento.

L'identificazione di questa categoria va di norma eseguita in base ai valori della V_{s30} , cioè la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità.

Dall'indagine geofisica (metodo sismico MASW) eseguita, si è ricavato che la categoria di profilo stratigrafico del suolo di fondazione in cui rientra il terreno studiato è quella C: *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 180 e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina). Il valore di V_{s30} è risultato di 213 m/sec.

Per una valutazione di massima da prove CPT della suscettibilità alla liquefazione dei terreni sabbiosi in falda, è stato utilizzato un programma di calcolo automatico (GeoStru) che applica la correlazione di Robertson e Wride (1997). Nei primi 15 m di terreno, solo in corrispondenza della prova penetrometrica n. 4 è stato individuato uno strato sabbioso, ma è risultato non liquefacibile in occasione di sollecitazioni sismiche.

Sulla scorta dei dati emersi dalla ricerca bibliografica, dal rilevamento diretto e dall'indagine geognostica in sito, si conferma l'idoneità geologica, idrogeologica, geotecnica e sismica dei terreni studiati all'edificabilità alle condizioni precedentemente specificate.

Bomporto, 23 dicembre 2009

dott. geol. Carlo Mondani

Opere consultate:

Geologia e Geomorfologia

- AA. VV., *Le pianure. Conoscenza e salvaguardia*, Atti del Convegno, Università di Ferrara, 1999.
- Arpa Emilia-Romagna, Sezione provinciale di Modena, *Bilancio ambientale dell'unione dei comuni modenesi area nord*, 2004.
- Baraldi F., *Proposta di un nuovo tipo di rilevamento geologico applicativo in zone di pianura: un esempio della pianura modenese-mantovana*, Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, vol. 101, 1970.
- Gasperi G. & Pellegrini M., *Strutture geologiche e idrografia della bassa pianura modenese*, Deputazione di Storia Patria per le Antiche Province Modenesi, Biblioteca - Nuova serie N. 76, Anno 1984.
- Pellegrini M., *La pianura del Secchia e del Panaro*, Atti Soc. Nat. Mat. di Modena, vol. C, 1969.
- Pellegrini M., *Caratteri morfologici della pianura interna*, in: AA.VV., *Il mondo della natura in Emilia Romagna. La pianura e la costa*, Federazione delle Casse di Risparmio e delle Banche del Monte dell'Emilia Romagna, Milano, 1990.
- Porta E., *La bonifica di Burana*, Modena, Ed. Bèrben, 1949.
- Provincia di Modena, *2ª Relazione sullo stato dell'ambiente nella provincia di Modena*, 1997.
- Regione Emilia-Romagna, *Carta geologica di pianura dell'Emilia-Romagna a scala 1:250.00*, 1999.
- Regione Emilia-Romagna, *Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna a scala 1:250.000*, 2004.

Geotecnica e Idrogeologia

- A.G.I., *Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*, 1977.
- A.G.I., *Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio*, 1994.
- Arpa Emilia-Romagna, *Rapporto sulla qualità delle acque superficiali e sotterranee della provincia di Modena*, anni 2001-2002.
- Belfiore S., *Cedimenti e meccanica delle rocce*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2002.
- Bowles J. E., *Fondazioni. Progetto e analisi*, McGraw-Hill, Milano, 1991.
- Caputo V., *Interazione fondazione terreno. Modelli matematici e metodi numerici*, Hevelius, Benevento, 1995.
- Casadio M. & Elmi C., *Il Manuale del Geologo*, Pitagora, Bologna, 1995.
- Castany G., *Idrogeologia*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 1985.
- Cestari F., *Prove geotecniche in sito*, Ed. Geo-Graph s.n.c., Segrate, 1990.
- Colombo P. & Colleselli F., *Elementi di geotecnica*, Seconda Edizione, Zanichelli, Bologna, 1996.
- Desio A., *Geologia applicata all'ingegneria*, Terza Edizione, Hoepli, Milano, 1985.
- Flora A., *Introduzione alle indagini geotecniche. Dalle norme alle esperienze*, Hevelius, Benevento, 1996.
- Lancellotta R., *Geotecnica*, Zanichelli, Bologna, 1987.
- Marsan P. & Romeo R., *La relazione geologica e geotecnica*, NIS, Roma, 1994.
- Provincia di Modena, *Conoscere l'acqua. L'acqua in provincia di Modena*, 1984.
- Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*, 1998.
- Ricceri G., *Elementi di tecnica delle fondazioni*, seconda edizione, Libreria Universitaria Editrice Patron, Padova, 1977.
- Sanglerat G., *Le pénétromètre et la reconnaissance des sols*, Dunod, Paris, 1965.
- Tanzini M., *L'indagine geotecnica*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2002.