



---

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**

---

## **ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE E MICROZONAZIONE SISMICA DEL TERRITORIO**

### **INTEGRAZIONE**

**ALLA RELAZIONE GEOLOGICA DEL 23-12-2009 IN CONFORMITÀ ALLA D.A.L. RER N. 112/2007**

---

#### **1. Premessa**

Con riferimento e rimando alla relazione geologica e sismica redatta dallo scrivente in data 23-12-2009, la presente integrazione ha per oggetto l'adeguamento della stessa alla Delibera dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 2-5-2007 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica".

In particolare, viene valutata la risposta sismica locale e la microzonazione sismica del territorio studiato in ottemperanza alle prescrizioni del PTCP vigente della Provincia di Modena (2009) e agli indirizzi della sopra citata D.A.L. RER n. 112/2007.

L'evoluzione del quadro normativo in materia di sismica ha visto frequenti aggiornamenti, a partire dalla promulgazione dell'Ordinanza n. 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 zona sismica*" e s.m.i., fino al decreto Ministeriale del 14-1-2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC08) e alla Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 617 del 2-2-2009. Si è passati da una definizione dell'azione sismica di progetto (e di verifica) che era basata sulla classificazione sismica dei comuni del territorio nazionale in quattro zone sismiche (zona 1, 2, 3 e 4 in ordine decrescente di severità: per esempio, il comune di Castelfranco Emilia è classificato nella zona sismica 3), ad una determinazione dell'input indipendente dalla classificazione (a cui si continua a fare riferimento solo per dirimere questioni amministrative di competenza delle regioni), che deriva dal recepimento dei risultati di uno studio di macrozonazione sismica del territorio nazionale condotto e costantemente aggiornato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Nel calcolo delle azioni sismiche di progetto le nuove norme tengono in ampia considerazione i fenomeni amplificativi dovuti alle caratteristiche stratigrafiche, geotecniche e topografiche del sito.

Contemporaneamente, alcune amministrazioni regionali hanno promosso studi di microzonazione sismica (MS), cioè studi per la valutazione degli effetti locali a scala territoriale finalizzati alla pianificazione del territorio e/o alla ricostruzione post-sismica di alcuni centri abitati. In Emilia-Romagna è stata anche avvertita la necessità di stabilire degli indirizzi e criteri generali per l'uniformazione delle procedure di valutazione e dei prodotti tecnico-scientifici (Delibera dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 2-5-2007 "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica").

Gli studi di MS (di cui alla DAL RER n. 112/2007) consistono nella identificazione e perimetrazione in un dato territorio di zone omogenee in relazione alla pericolosità sismica locale, e nella stima della risposta dei terreni delle diverse zone alle onde sismiche in arrivo al sito, in modo da stabilire gerarchie di pericolosità fra di esse e fornire elementi conoscitivi per la programmazione territoriale, la pianificazione urbanistica, la pianificazione dell'emergenza e del post-terremoto, la progettazione di opere a scala vasta. Gli studi di MS sono direttamente utilizzabili per la programmazione territoriale e urbanistica e per la programmazione dell'emergenza; per quanto riguarda la progettazione strutturale, gli studi di MS più approfonditi sono un importante riferimento che offre elementi di conoscenza per orientare il progettista sulla natura dei rischi del sito in cui il manufatto ricade, sugli approfondimenti da effettuare, sulle indagini sui terreni fondazione e nel sito, ecc., ma, salvo eccezioni, non sono direttamente utilizzabili per la progettazione.

Le NTC08 consistono invece nella valutazione delle azioni sismiche per il calcolo strutturale (costruzioni e opere geotecniche) tenendo conto della risposta dei terreni di fondazione e del sito (inteso come area vasta intorno alla costruzione); comprendono inoltre la valutazione della pericolosità locale legata a fenomeni di liquefazione, instabilità dei pendii, cedimenti.

Il confine tra gli studi di MS e le NTC va ricercato nella differente scala alla quale i due strumenti di prevenzione sismica operano. Infatti, la MS agisce in ambiti territoriali e subterritoriali mentre le NTC riguardano la progettazione di opere a scala di manufatto; perciò per la progettazione si richiedono informazioni molto più puntuali di quelle richieste da uno studio di MS.

## 2. Risposta sismica locale e microzonazione sismica

### 2.1. Metodologia

Considerata la finalità dello studio e l'estensione dell'area di indagine, per accertare la variabilità spaziale delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei terreni e valutare la risposta sismica locale e la microzonazione sismica, è stato ritenuto adeguato e sufficiente il ricorso a n. 6 prove penetrometriche meccaniche ad infissione statica CPT e n. 1 prova sismica con metodo MASW.

Si è proceduto poi a definire gli scenari di pericolosità sismica locale, cioè ad identificare le parti di territorio suscettibili di effetti locali in accordo con l'atto di indirizzo e coordinamento di cui alla DAL RER n. 112/2007, al PTCP della Provincia di Modena e al PSC del Comune di Castelfranco Emilia.

Gli studi di risposta sismica locale e microzonazione sismica vanno condotti (v. DAL RER n. 112/2007), a diversi livelli di approfondimento a seconda delle finalità e delle applicazioni nonché degli scenari di pericolosità locale. Si identificano due fasi di analisi con diversi livelli di approfondimento.

La prima fase è diretta 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 versanti, fenomeni di liquefazione, rotture del terreno, ecc.). Tale analisi viene svolta - soprattutto mediante elaborazione dei dati disponibili - in sede di elaborazione del PTCP e del PSC e concorre alla definizione delle scelte di piano, fornendo prime indicazioni sui limiti e le condizioni per la pianificazione nelle suddette aree.

La seconda fase ha come obiettivo la microzonazione sismica del territorio indagato. Sulla base degli scenari individuati dalle analisi svolte nel corso della prima fase, nella seconda fase si attuano due diversi livelli di approfondimento:

**a)** nelle aree pianeggianti e sub-pianeggianti, incluse le zone di fondovalle appenniniche, con stratificazione orizzontale e sub-orizzontale, e sui versanti stabili con acclività  $\leq 15^\circ$  in cui il deposito ha spessore costante si ritiene sufficiente un'**analisi semplificata** (secondo livello di approfondimento), cioè l'analisi della pericolosità locale può essere basata, oltre che sull'acquisizione di dati geologici e geomorfologici più dettagliati di quelli rilevati nel primo livello, su prove geofisiche in sito e su prove geotecniche di tipo standard. Il numero delle verticali indagate deve essere tale da consentire un'adeguata caratterizzazione geotecnica spaziale dei terreni e delle formazioni presenti nell'area di studio;

**b)** un'**analisi più approfondita** (terzo livello di approfondimento) è invece richiesta nei seguenti casi:

- aree soggette a liquefazione e densificazione;
- aree instabili e potenzialmente instabili;

- aree in cui le coperture hanno spessore fortemente variabile, come ad esempio nelle aree pedemontane e di fondovalle a ridosso dei versanti;
- aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico.

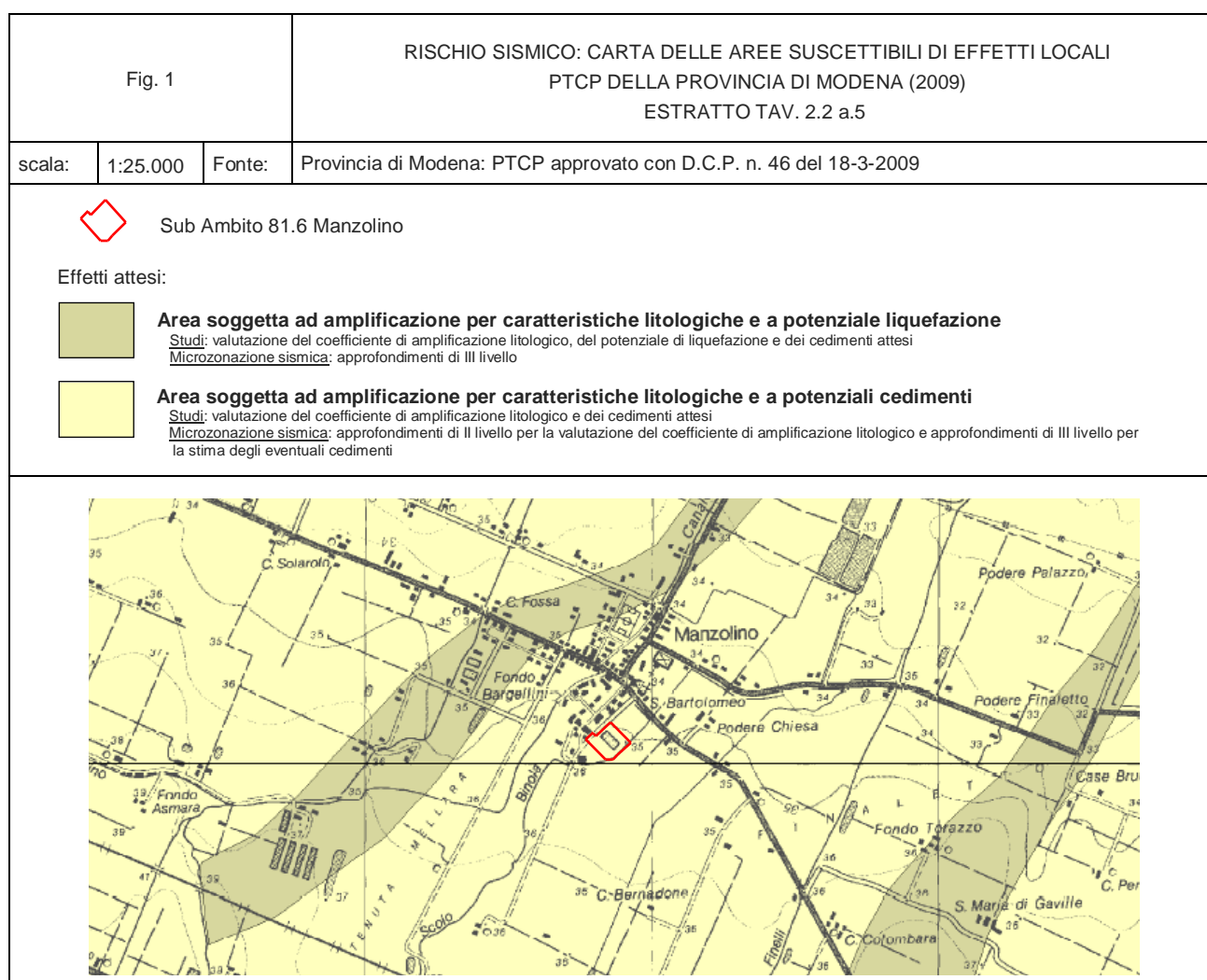
In queste parti del territorio la pericolosità potrebbe essere molto elevata e perciò deve essere attentamente valutata la possibilità di renderle suscettibili di trasformazione urbanistica.

Le indagini realizzate nella seconda fase possono fornire anche indicazioni per la scelta localizzativa degli edifici e per la progettazione preliminare degli interventi. Non si è tuttavia esentati dalle indagini e dagli studi integrativi richiesti per la progettazione e la realizzazione dell'opera.

### 3. Effetti locali attesi in occasione di eventi sismici secondo il PTCP

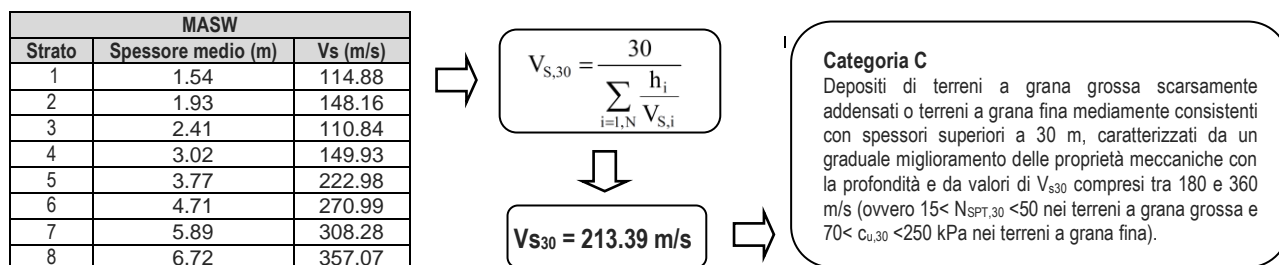
Nella fig. 1 è riportato un estratto della Tav. 2.2 a.5 "Carta delle aree suscettibili di effetti locali" del PTCP vigente della Provincia di Modena, dalla quale si rileva che l'area studiata - Sub Ambito 81.6 Manzolino del PSC del Comune di Castelfranco Emilia - ricade nel dominio delle aree soggette ad amplificazione sismica per caratteristiche litologiche e a potenziali cedimenti. Per questi ambiti viene richiesta un'analisi quantitativa degli effetti di sito (§ 4.1 della D.A.L. RER n. 112/2007 "Secondo livello di approfondimento – analisi semplificata"). Pertanto, lo studio della risposta sismica locale si articolerà nelle seguenti fasi:

- Acquisizione dei dati: 1) profili di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei primi 30 m di profondità dal p.c.; 2) valutazione della profondità del bedrock sismico
- Valutazione dei fattori di amplificazione sismica (approfondimenti di II livello)
- Stima dei cedimenti postsismici dei terreni coesivi (approfondimenti di III livello)
- Stima del potenziale di liquefazione



#### 4. Indagine geofisica con metodo sismico MASW

La prova sismica con metodo MASW (*Multichannel Acquisition Surf Wave*) ha permesso di ricostruire il profilo sismostratigrafico del sottosuolo – definendo *in situ* la distribuzione della velocità delle onde di taglio "S" – e di ricavare il valore di ( $V_{s30}$ ) necessario per attribuire il terreno di fondazione alla categoria appropriata.



#### 5. Stima della profondità del bedrock sismico

Non essendo stato raggiunto il bedrock con l'indagine geofisica MASW, il profilo di Vs è stato estrapolato in profondità fino a valori di Vs = 800 m/s mantenendo lo stesso gradiente dell'ultimo tratto della curva sperimentale. Il bedrock è stato pertanto collocato a -70 m circa dal piano di campagna, in accordo con le informazioni stratigrafiche generali, desunte sia dagli studi geologici ed idrogeologici sviluppati dalla Regione Emilia-Romagna sia dai dati stratigrafici ENI.

La stratigrafie dei pozzi seguenti possono essere assunte come rappresentative della stratigrafia dell'area (banca dati del Servizio geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia Romagna).

POZZO 220020P680					
Manzolino – Via Cimitero					
da m	0.00	a m	9.00	argilla	
"	9.00	"	14.00	ghiaia	
"	14.00	"	22.00	argilla	
"	22.00	"	40.00	ghiaia	
"	40.00	"	44.00	argilla	
"	44.00	"	70.00	ghiaia	

POZZO 220020P628					
Manzolino – Fondo Galasso					
da m	0.00	a m	33.30	argilla e ghiaia	
"	33.30	"	44.80	sabbia fine, arg. plastica, ghiaia	
"	44.80	"	81.50	argilla plastica, ghiaia	
"	81.50	"	90.00	argilla, ghiaia sabbiosa	
"	90.00	"	99.00	ghiaia limosa, argilla plastica, ghiaia sabbiosa	
"	99.00	"	120.50	ghiaia con argilla, argilla plastica	
"	120.50	"	135.00	sabbia, ghiaia con argilla	
"	135.00	"	142.00	ghiaia	

#### 6. Valutazione dei fattori di amplificazione sismica (approfondimenti di II livello)

Partendo dal valore di  $V_{s30}$ , la DAL RER n. 112/2007 definisce le amplificazioni locali sulla base dei valori tabellati in appendice al documento (allegato A2) e riferite a grandi situazioni morfologico-stratigrafiche ("secondo livello" di analisi). Le variabili, ricavabili dalle tabelle, utilizzate per la stima dell'amplificazione locale sono:

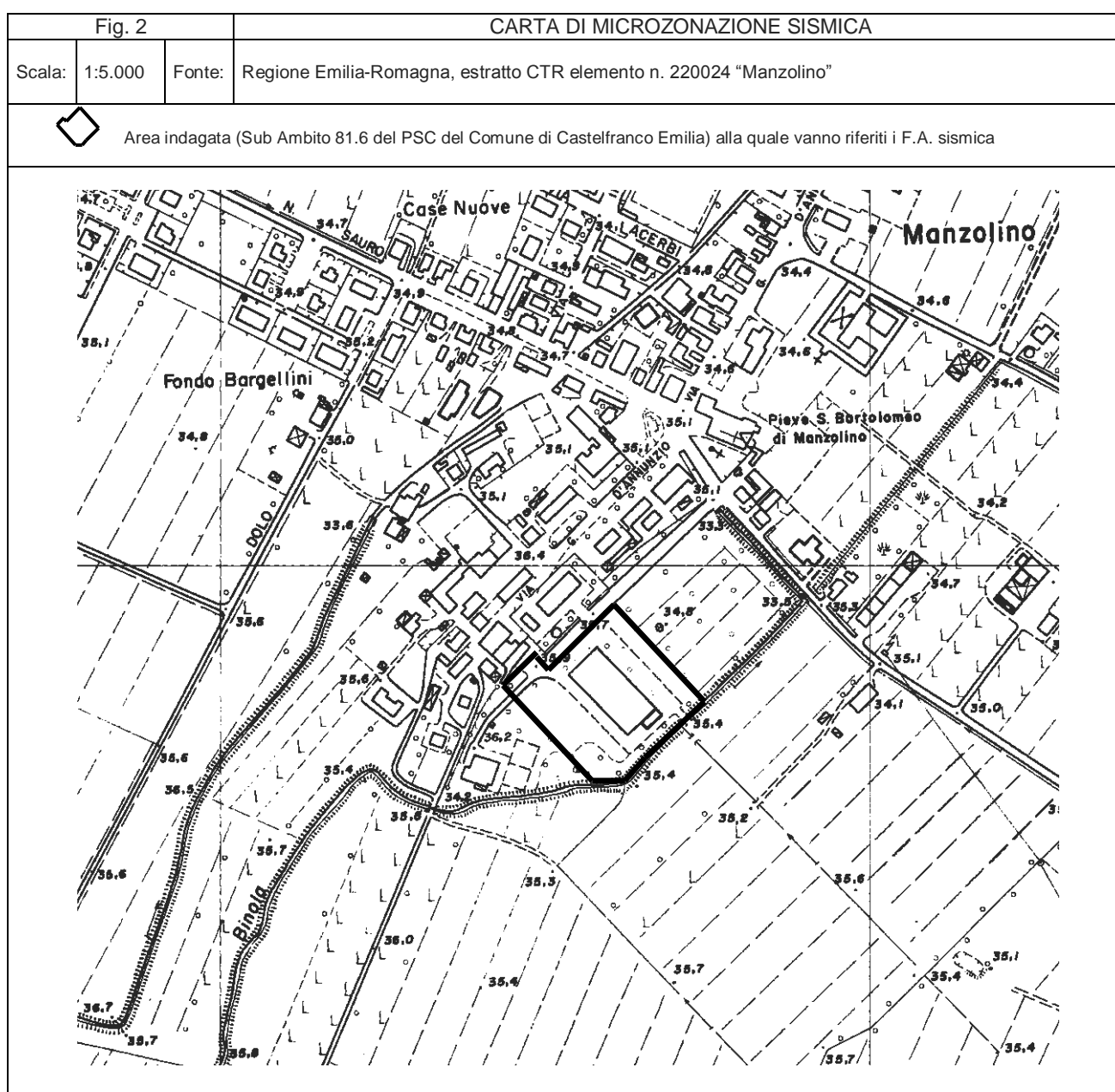
**F.A. P.G.A.** → rapporto tra la massima ampiezza dell'accelerazione su affioramento rigido ( $a_{max,r}$ ) e la massima ampiezza dell'accelerazione alla superficie del deposito ( $a_{max,s}$ ) alla frequenza  $f$ . Il fattore di amplificazione dipende dalla frequenza di eccitazione armonica, dal fattore di smorzamento  $D$  e dal rapporto tra l'impedenza sismica, prodotto tra densità-velocità, della roccia base e quella del deposito.

**F.A. S.I.** - Intensità spettrale di Housner → indicatore della pericolosità sismica, è definito come l'area sottesa dello spettro di risposta di pseudovelocità, nel nostro caso per i due intervalli di frequenze, rispettivamente:  
da  $0.1 \text{ s} < T_0 < 0.5 \text{ s}$  e da  $0.5 \text{ s} < T_0 < 1 \text{ s}$

Per il terreno studiato, lo scenario di pericolosità risulta definito dall'ambito di pianura caratterizzato dal profilo stratigrafico < PIANURA 1 >, costituito dalla presenza di potenti orizzonti di ghiaie (anche decine di metri) e da alternanze di sabbie e peliti, con substrato poco profondo (<100 m dal p.c.).

AREA INDAGATA (SUB AMBITO 81.6 DEL PSC DEL COMUNE DI CASTELFRANCO EMILIA)				
FATTORI DI AMPLIFICAZIONE				
$V_{s30}$ (m/s)	PROFILO STRATIGRAFICO	F.A. P.G.A	INTENSITÀ SPETTRALE S.I.	F.A. S.I.
213	PIANURA 1	1.7	$0.1 \text{ s} < T_0 < 0.5 \text{ s}$	1.9
			$0.5 \text{ s} < T_0 < 1.0 \text{ s}$	2.6

I fattori di amplificazione sopra riportati sono riferiti all'intera area indagata, perimetrata in nero nella cartografia di Fig. 2.



## 7. Stima dei cedimenti postsismici dei terreni coesivi (approfondimenti di III livello)

Attraverso le indagini geognostiche, sono stati riscontrati terreni coesivi molto soffici ( $c_u \leq 70$  kPa) fino a circa 10 m dal piano di campagna.

I cedimenti postsismici nei terreni alluvionali della Pianura Padana non sono molto significativi in quanto trattasi di terreni già sovraconsolidati fino a profondità di 10-20 metri e inoltre già sottoposti, nei secoli, a diversi eventi sismici.

Nei depositi coesivi molto soffici ( $c_u \leq 70$  kPa) e plastici ( $I_p \geq 30\%$ ) in cui si prevede un incremento delle pressioni interstiziali  $\Delta u/\sigma'_0 \geq 0.3$  durante il terremoto di riferimento, l'entità dei cedimenti di riconsolidazione post-ciclica può essere valutata con la seguente espressione, dove H rappresenta lo spessore di un generico strato:

$\Delta H = \varepsilon_{vr} H$  dove H è l'altezza dello strato ed  $\varepsilon_{vr}$  (%) è la deformazione volumetrica post-ciclica

$$\varepsilon_{vr} = \frac{\alpha C_r}{1 + e_0} \log \left( \frac{1}{1 - \frac{\Delta u}{\sigma'_0}} \right)$$

in cui  $\alpha$  è una costante sperimentale compresa tra 1 e 1.5,  $e_0$  è l'indice dei vuoti iniziale,  $C_r$  è l'indice di riconsolidazione postciclica che in prima approssimazione può essere posto pari a  $C_r = 0.225 \cdot C_c$  dove:

$C_c$  è l'indice di compressione

$\frac{\Delta u}{\sigma'_0}$  è il rapporto di pressione interstiziale.

In prima approssimazione  $C_c$  può essere stimato con la relazione empirica:

$$C_c = 0.0348 + 0.0162 \cdot I_p$$

Attraverso le tabelle della D.A.L. RER n. 112/2007, di cui alle pagg. 42 e 43, e i dati di letteratura, è stato possibile stimare i seguenti valori del cedimento postsismico nei depositi dell'area indagata:

PROVE PENETROMETRICHE	DEPOSITI COESIVI MOLTO SOFFICI	SPESSORE TOTALE (m)	STIMA CEDIMENTI POSTSISMICI (cm)
CPT 1	1.00 – 12.60	11.60	1.36
CPT 2	2.20 – 12.60	10.40	1.18
CPT 3	1.40 – 12.60	11.20	1.30
CPT 4	2.00 – 3.00 4.20 – 12.00	8.80	0.88
CPT 5	2.00 – 5.20 7.20 – 12.20	8.20	0.82
CPT 6	1.80 – 5.60 7.00 – 12.80	9.60	0.97

## 8. 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:

- a) distribuzione granulometrica: sono suscettibili di liquefazione i terreni con diametro medio dei grani D<sub>50</sub> compreso fra 0.075mm e 2mm e coefficiente di uniformità compreso fra 2 e 5 (sabbie e sabbie limose);
- b) 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 <7m);
- 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 Fs, dato dal rapporto fra la resistenza al taglio mobilitabile (R) nello strato e lo sforzo tagliante (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<sub>max</sub>** rappresenta l' accelerazione sismica massima

**g** accelerazione di gravità

**σ<sub>vo</sub>** pressione verticale totale alla profondità z dal p.c.

**σ'<sub>vo</sub>** pressione verticale efficace alla profondità z dal p.c.

**rd** coefficiente in funzione della profondità

**MSF** coefficiente correttivo funzione della magnitudo del sisma

$$\begin{aligned} \text{per } z \leq 9,15 \text{ m} &\rightarrow rd = 1 - 0.00765 \cdot z \\ \text{per } 9,15 < z \leq 23 \text{ m} &\rightarrow rd = 1.174 - 0.0267 \cdot z \\ \text{per } 23 < z \leq 30 \text{ m} &\rightarrow rd = 0.774 - 0.008 \cdot z \\ \text{per } z > 30 \text{ m} &\rightarrow rd = 0.5 \\ \text{se } M (\text{magnitudo}) \leq 7.5 &\rightarrow MSF = \left( \frac{M}{7.5} \right)^{-3.3} \\ \text{se } M (\text{magnitudo}) > 7.5 &\rightarrow MSF = \frac{10^{2.24}}{M^{2.56}} \end{aligned}$$

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

Non essendo presenti strati sabbiosi in falda, di spessore significativo nei primi 15 m di terreno, non sussistono le condizioni litologiche per l'innescio di fenomeni di liquefazione in occasione di sollecitazioni sismiche.

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

PROVE PENETROMETRICHE	STRATO	LITOLOGIA	F <sub>s</sub>	LIQUEFAZIONE
CPT 4	da 3.00 m a 4.20 m	Sabbia argilloso-limosa	1.797	assente

## 9. Conclusioni

La risposta sismica locale dei terreni studiati – appartenenti al Sub Ambito 81.6 Manzolino del PSC del Comune di Castelfranco Emilia - effettuata con un'analisi semplificata (approfondimenti di II livello) in ottemperanza alla D.A.L. RER n. 112/2007, ha permesso di estendere all'intera area indagata, perimetrata in nero nella cartografia di fig. 2, i seguenti fattori di amplificazione:

AREA INDAGATA (SUB AMBITO 81.6 MANZOLINO DEL PSC DEL COMUNE DI CASTELFRANCO EMILIA)				
FATTORI DI AMPLIFICAZIONE				
V <sub>s30</sub> (m/s)	PROFILO STRATIGRAFICO	F.A. P.G.A	INTENSITÀ SPETTRALE S.I.	F.A. S.I.
213	PIANURA 1	1.7	0.1 s < T <sub>0</sub> < 0.5 s	1.9
			0.5 s < T <sub>0</sub> < 1.0 s	2.6

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). L'unico strato sabbioso riscontrato nei primi 15 m, rilevato con la prova penetrometrica n. 4, sottoposto a verifica ha dato un valore dell'indice di sicurezza  $F_s > 1,25$  e pertanto non è suscettibile a liquefazione in occasione di sollecitazioni sismiche.

La stima dei cedimenti di consolidazione postsismica (approfondimenti di III livello) degli strati argillosi soffici ( $c_u \leq 70$  kPa) ha dato valori trascurabili, compresi tra 0.82 e 1.36 cm.

Bomporto, 27 gennaio 2012

dott. geol. Carlo Mondani

