

REGIONE
TOSCANA



Direzione Generale delle Politiche
Territoriali e Ambientali e per la Mobilità
Prevenzione Sismica



PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile



CONFERENZA DELLE REGIONI E
DELLE PROVINCE AUTONOME

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione illustrativa
COMUNE DI PALAZZUOLO SUL SENIO
Dicembre 2012



Veduta panoramica del centro storico di Palazzuolo sul Senio.

a cura di:

M. Baglione¹, V. D'Intinosante¹, V. Nencini¹,

con la collaborazione tecnica di: M. Rossi²

¹ Regione Toscana – Direzione Generale Politiche Territoriali e Ambientali – Settore Prevenzione Sismica Regionale;
Via S. Gallo 34a, 50134 Firenze – Tel. 055/4389055 Fax 055/4389072 – www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica -
sismica@regione.toscana.it

² Regione Toscana – Direzione Generale Politiche Territoriali e Ambientali e per la Mobilità – Ufficio tecnico del genio civile di Area Vasta di Siena e Grosseto

INDICE

1.0. Introduzione.....	Pag. 3
2.0. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento.....	Pag. 13
3.0 Assetto geologico e geomorfologico dell'area.....	Pag.19
4.0 Dati geotecnici e geofisici.....	Pag.30
5.0 Modello del sottosuolo	Pag.32
6.0. Interpretazioni ed incertezze.....	Pag. 39
7.0 Metodologie di elaborazione e risultati	Pag.39
8.0 Elaborati cartografici	Pag.55
9.0 Bibliografia.....	Pag.65

1.0. Introduzione

Premessa

L'attività di valutazione su un territorio (alla scala comunale) delle modificazioni apportate allo scuotimento del suolo dalle condizioni geologico-tecniche locali e dalle condizioni topografiche locali viene chiamata **microzonazione sismica (MS)**.

Tale attività rientra in un quadro più generale nei programmi di prevenzione e di mitigazione degli effetti di un terremoto, in cui è necessario individuare in via preliminare con criteri speditivi le zone a più elevato rischio sismico da sottoporre a studi particolareggiati.

Si definiscono “**condizioni locali di sito**”:

- la geologia e la geomorfologia locale;
- condizioni geotecniche e stratigrafiche locali;
- prossimità ad una faglia sismicamente attiva.

Le condizioni locali di sito sono responsabili degli effetti locali di sito che possono schematicamente essere così riassunti:

- modifica delle caratteristiche dello scuotimento rispetto a quanto definito in termini di pericolosità di base;
- fenomeni di instabilità del terreno.

Per ciò che attiene alla modifica del moto sismico, si tratta di definire la **pericolosità sismica locale**. Ciò comporta in generale un'amplificazione del moto sismico, la cui causa è riconducibile a motivi stratigrafici (presenza di depositi soffici poggianti su substrato roccioso), topografici (amplificazione del moto sismico lungo pendii o alla sommità di scarpate o pendii) oppure riferibile alla presenza di particolari geometrie sepolte, in grado di modificare le caratteristiche del moto sismico sia in termini di intensità sia per quanto concerne il contenuto spettrale.

Per ciò che attiene ai fenomeni di instabilità dei terreni e delle rocce gli aspetti rilevanti sono quelli che riguardano:

- liquefazione e/o densificazione dei depositi sabbiosi;
- eccessivi cedimenti e deformazioni permanenti del suolo;
- instabilità di pendio in terreni e roccia;
- attività di faglia.

Danni consistenti possono ricorrere quando la frequenza di risonanza di un terreno (depositi alluvionali, falde di detrito) raggiunta durante un evento sismico corrisponde a quella propria dell'edificio (fenomeno della doppia risonanza).

La pericolosità di base è di norma definita mediante approccio di tipo probabilistico. In generale, per la determinazione della pericolosità di base è necessario definire:

- la sismicità storica;
- le zone sismogenetiche;
- le relazioni di attenuazione;
- le leggi di ricorrenza.

A tal fine è necessario raccogliere e interpretare dati e informazioni riguardanti la sismicità regionale, la sismo-tettonica, dati e registrazioni ottenuti da reti sismiche nazionali e locali.

Per quanto riguarda la stima della pericolosità sismica locale, essa è da ricondurre ad una serie di caratteri geologico-tecnici di un'area più o meno ampia che viene presa in esame. Tali caratteri geologico tecnici come è noto riguardano: la morfologia di superficie, la morfologia sepolta, le litologie, le caratteristiche fisico meccaniche, le condizioni idrogeologiche s.l. Queste condizioni infatti oltre ad essere causa di possibile amplificazione degli effetti sismici possono provocare i

cosiddetti fenomeni indotti, quali: attivazione e rimobilizzazione di fenomeni gravitativi, liquefazione in terreni granulari saturi, deformazioni permanenti in terreni di fondazione.

La **valutazione degli effetti locali** di amplificazione del moto sismico e quindi la pericolosità sismica locale sono di norma valutati attraverso analisi di risposta sismica locale dei depositi di terreno.

Tutti i dati così acquisiti saranno organizzati in banche dati geografiche (GIS) al fine di omogeneizzare le procedure di acquisizione, archiviazione e gestione oltre che per la rappresentazione cartografica.

A riguardo la normativa di riferimento (D.M. 14.09.2008) consente di valutare gli effetti locali di amplificazione del moto sismico sia in modo semplificato, sia con modalità analitiche più rigorose.

Uno degli aspetti più importanti di queste normative è quello di definire e di valutare l'amplificazione sismica dei terreni sulla base della definizione del parametro V_s , cioè della velocità delle onde di taglio.

Metodologia di lavoro e obiettivi

Nell'ambito delle attività di microzonazione sismica previste per l'Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77 e finanziate dall'OPCM 3907/2010, il Settore Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica è stato incaricato dal Comune di Palazzuolo sul Senio, mediante la stipula di apposita convenzione di collaborazione tecnica, per la predisposizione degli studi di Microzonazione Sismica Comunale (di seguito MS) nel rispetto degli "Indirizzi e Criteri di Microzonazione Sismica Nazionale" (di seguito ICMS) e delle specifiche tecniche regionali per la microzonazione sismica approvate con Deliberazione di G.R.T. n. 261/2011.

Nei citati ICMS vengono definite le procedure, le metodologie di analisi al fine di individuare e caratterizzare le zone stabili, le zone stabili suscettibili di amplificazione locale del moto sismico e le zone suscettibili di instabilità.

La realizzazione di uno studio di MS, secondo quanto esplicitato nei suddetti ICMS, è uno strumento conoscitivo dalle diverse potenzialità, che ha costi differenziati in funzione del livello di approfondimento.

Al momento di decidere l'esecuzione e il livello dello studio, occorre tener presente l'utilità che da esso può derivare, in modo da compararla con i costi da affrontare. Il miglioramento della conoscenza prodotto dagli studi di MS può contribuire concretamente, insieme a studi di vulnerabilità ed esposizione, all'ottimizzazione delle risorse rese disponibili per interventi mirati alla mitigazione del rischio sismico.

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità ed impegno crescenti, passando dal livello 1 fino al livello 3. Il livello 1 è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, esecuzione di nuove indagini in situ e realizzazione di elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee. Il livello 2 introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee, utilizzando ulteriori e mirate indagini, ove necessarie, e definisce una vera carta di MS. Infine il livello 3 restituisce una carta di MS con approfondimenti su tematiche o aree particolari.

Nello specifico la MS individua e caratterizza:

- Le **Zone Stabili**, sono zone nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura (litotipi assimilabili al substrato sismico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata) e pertanto gli scuotimenti attesi sono equivalenti a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;

- Le **Zone stabili suscettibili di amplificazione sismica**, sono le zone in cui il moto sismico viene modificato a causa delle caratteristiche litostratigrafiche e/o geomorfologiche del territorio;
- Le **Zone suscettibili di instabilità**, sono le zone suscettibili di attivazione dei fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazioni superficiale).

Per la definizione delle zone e della loro perimetrazione si rimanda a quanto definito al par. 1.6.3.1.2 degli ICMS.

Gli studi di MS rivestono una notevole importanza nella pianificazione territoriale, fornendo una base conoscitiva della pericolosità sismica locale, al fine di stabilire gerarchie di pericolosità utili per la programmazione di interventi di riduzione del rischio sismico a varie scale, orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti, definire gli interventi ammissibili in una determinata area, programmare le indagini e i livelli di approfondimento, stabilire orientamenti, modalità e priorità di intervento nelle aree urbanizzate.

In generale la realizzazione di uno studio di MS può essere affrontata con diversi livelli di approfondimento che vengono dettati dalle finalità (pianificazione territoriale, pianificazione per l'emergenza, progettazione delle opere), dalle necessità intrinseche del sito (caratteristiche geomorfologiche, importanza delle opere da realizzare) e dei livelli di pericolosità.

In relazione ai diversi contesti geologico-tecnici, alla pericolosità sismica di base ed in funzione dei diversi obiettivi degli studi di MS, possono essere effettuati n. 3 livelli di approfondimento, con complessità e impegno economico crescente.

In particolare possono essere predisposti i seguenti livelli:

- il **livello 1** è un livello propedeutico ai successivi studi di MS, che consiste esclusivamente in una raccolta organica e ragionata di dati di natura geologica, geofisica e geotecnica e delle informazioni preesistenti e/o acquisite appositamente al fine di suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico. Tale approfondimento è finalizzato alla realizzazione della carta delle "Microzone Omogenee in prospettiva sismica (MOPS)";
- il **livello 2** è un livello successivo in cui si introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee mediante metodologie di analisi numerica di tipo semplificato (abachi regionalizzati, modellazione 1D, leggi empiriche) e l'esecuzione di ulteriori e più mirate indagini. Tale approfondimento è finalizzato alla realizzazione della "Carta di Microzonazione Sismica";
- il **livello 3** rappresenta il livello più approfondito che permette di giungere ad una microzonazione approfondita del territorio basata su metodologie analitiche di analisi di tipo quantitativo. Tale approfondimento è finalizzato alla realizzazione della "Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti".

Va sottolineato che i livelli 1 e 2 di MS servono solo per la pianificazione territoriale, mentre il livello 3 di MS può fornire utili indicazioni per la progettazione delle opere.

Per una maggiore definizione dei livelli di approfondimento sismico si rimanda al par.1.6.3 degli ICMS.

Per ognuno dei livelli di approfondimento individuati è obbligatorio:

- la realizzazione di opportune indagini geologiche, geofisiche e geotecniche al fine di definire il quadro conoscitivo;
- l'effettuazione di opportune analisi ed elaborazioni;
- la predisposizione di risultati finali.

Le tabelle riepilogative sottostanti forniscono un quadro di sintesi del quadro conoscitivo minimo che deve essere raggiunto per ogni livello sulla scorta delle indicazioni contenute al par.1.6.3 degli ICMS.

LIVELLO 1

INDAGINI OBBLIGATORIE	<ol style="list-style-type: none"> 1) <u>Raccolta di tutti i dati pregressi esistenti nell'area</u>: rilievi geologici, geomorfologici, geologico-tecnici, indagini geofisiche, sondaggi e stratigrafie desunte da pozzi; 2) <u>Rilevamenti geologici di controllo sul terreno</u>; 3) <u>Nuove indagini: Esecuzione di ulteriori indagini geofisiche e geotecniche</u>, qualora la raccolta dei dati pregressi non consenta la ricostruzione di un quadro conoscitivo sufficientemente attendibile rispetto agli obiettivi del livello 1; 4) <u>Misura passive del rumore ambientale</u>, mediante tecnica a stazione singola;
ANALISI ED ELABORAZIONI	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Sintesi dei dati e delle cartografie disponibili</u>; • <u>Rilettura, sintesi dei dati ed eventuali nuovi rilievi geologici</u>.
PRODOTTI OBBLIGATORI	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Carta delle indagini</u> (sia esistenti che di nuova realizzazione); • <u>Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica</u> almeno alla scala 1:5.000-1.10.000; • <u>Carta delle Microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)</u> almeno alla scala 1:5.000-1.10.000; • <u>Relazione tecnica illustrativa</u> della carta MOPS; • <u>Carta delle frequenze fondamentali</u> dei depositi.

Il principale elaborato previsto in questo livello è la ***Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS)***. Questa carta individua le microzone ove, sulla base di osservazioni geologiche e geomorfologiche e in relazione all'acquisizione, valutazione ed analisi dei dati geognostici e di alcune tipologie di dati geofisici, è prevedibile l'occorrenza di diverse tipologie di effetti prodotti dall'azione sismica (amplificazioni, instabilità di versante, liquefazione, ecc.). Di particolare importanza a questo scopo risulta la ricostruzione del modello geologico-tecnico dell'area, l'individuazione dei litotipi che possono costituire il substrato rigido (ovvero dei materiali caratterizzati da valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio S significativamente maggiori di quelli relativi alle coperture localmente presenti) accompagnata da una stima approssimativa della loro profondità rispetto al piano di campagna (del tipo: "qualche metro", "una decina di metri", "alcune decine di metri", "oltre i 100 metri"), una stima di massima del contrasto di impedenza sismica atteso (del tipo: "alto" o "basso"). Di particolare importanza sarà l'individuazione di eventuali discontinuità e morfologie sepolte potenzialmente in grado di causare inversioni della velocità di propagazione delle onde di taglio ed effetti di RSL bi- e tri-dimensionali.

Pertanto, per acquisire tali informazioni di tipo semiquantitativo al fine di consentire la predisposizione della cartografia delle *Microzone Omogenee in prospettiva sismica (MOPS)* si ritiene che sia necessaria l'acquisizione, oltre alle informazioni già previste al par. 1.6.3.1.2 degli ICMS, dei risultati di indagini geofisiche utili alla ricostruzione geometrica dei corpi sepolti (sismica a rifrazione, ERT, gravimetria, ecc.) e alla individuazione di eventuali contrasti di impedenza sismica e possibili fenomeni di risonanza (campagne di misura delle frequenze naturali di sito da vibrazioni ambientali o da terremoti).

Per meglio rappresentare queste caratteristiche la carta dovrà essere corredata da sezioni geolitologiche rappresentative della situazione lito-stratigrafica e strutturale presente.

Attraverso questo livello, quindi, sarà possibile:

- la definizione delle caratteristiche litologiche e geometriche delle unità geologiche del sottosuolo;
- l'individuazione delle aree a minore pericolosità locale (zone stabili);
- l'individuazione delle aree per le quali sono necessari ulteriori livelli di approfondimento;
- definire il livello di approfondimento richiesto nelle aree che necessitano di approfondimenti;
- la programmazione di indagini di approfondimento, sulla base delle diverse tipologie di effetti attesi.

Nell'ambito di questo livello di approfondimento, potrà anche essere possibile fornire una preliminare indicazione sulle situazioni geologiche e morfologiche complesse per le quali può essere presumibile

che l'approccio semplificato previsto dalle NTC (2008) non sia da ritenersi idoneo per una stima corretta della RSL. Si precisa però che tale indicazione rientra nell'ambito della raccolta di informazioni e non può essere direttamente applicabile in questa prima fase; al contrario dovrà comunque essere approfondita nei successivi livelli di MS al fine di un suo possibile utilizzo diretto in fase di pianificazione territoriale e di progettazione edilizia.

Un elenco delle possibili situazioni geologiche e morfologiche complesse viene sinteticamente proposto sotto:

- geometria articolata del substrato rigido sepolto alla scala di interesse (presenza di paleoalvei, substrato rigido deformato da strutture tettoniche, andamento del substrato a *Horst* e *Graben*, ...);
- zona di raccordo tra rilievo e pianura (zona di unghia con substrato rigido sepolto in approfondimento sotto la pianura, in maniera continua o discontinua);
- geometria del substrato rigido che crea una valle stretta colmata di sedimenti soffici ($C > 0.25$, dove C è il coefficiente di forma, $C = h/l$, dove h è lo spessore della coltre alluvionale e l è la sua semi-ampiezza)
- successione litostratigrafica che preveda terreni rigidi su terreni soffici (possibile profilo di V_s con inversioni di velocità);
- substrato rigido profondo alcune decine di metri;
- presenza di marcati contrasti di impedenza sismica;
- presenza di possibili cavità sepolte;
- eventuale presenza di aree soggette a instabilità.

Per la predisposizione della **cartografia delle indagini** e delle **cartografia delle Microzonazione Omogenee in prospettiva sismica (MOPS)** si rimanda ai par. 2.2 e 2.3 degli ICMS in cui vengono presentate le procedure di riferimento per la realizzazione delle suddette carte.

Per una stima del livello di qualità raggiunto per la redazione delle cartografie del livello 1 si deve fare riferimento alla procedura semi-quantitativa definita dal Gruppo di Lavoro MS (rapporto interno del DPC – 2011) e meglio definita in Appendice 1.

Tale procedura deve essere utilizzata in due differenti fasi:

- in fase di predisposizione dello studio di MS di livello 1 dal soggetto realizzatore, al fine di poter valutare se il quadro conoscitivo desunto sia sufficiente per la redazione dello studio di MS di livello 1 o se al contrario debbano essere effettuati approfondimenti di indagine, anche in relazione alla complessità geologico-tecnica dell'area;
- in fase di controllo sui risultati prodotti, da parte del soggetto validatore, come strumento di ausilio e supporto in fase istruttoria.

Per la redazione delle **cartografie geologico-tecniche per la microzonazione sismica** si dovrà fare riferimento ai criteri di cui al par. 3.4.2 degli ICMS e dovranno essere rispettate le legende previste all'interno degli "Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica" redatti dal DPC (versione 2.0beta –II, Giugno 2012).

Per la redazione delle **relazioni tecniche illustrative** si rimanda alle indicazioni contenute al par. 1.6.4 degli ICMS.

LIVELLO 2

INDAGINI MINIME OBBLIGATORIE	5) <u>Programmazione ed esecuzione di nuove indagini</u> : indagini geofisiche attive di superficie, prove geofisiche in foro, sondaggi geognostici, prove geotecniche in situ e in laboratorio
ANALISI ED ELABORAZIONI	<ul style="list-style-type: none">• <u>Correlazioni e confronto con i risultati del livello 1.</u>• <u>Definizione del modello geologico-tecnico di sottosuolo.</u>• <u>Predisposizione di abachi per i fattori di amplificazione, abachi e formule empiriche per le instabilità di versante e per la liquefazione.</u>
PRODOTTI FINALI OBBLIGATORI	<ul style="list-style-type: none">• <u>Carta delle indagini</u>, implementata rispetto a quella del livello 1 con le nuove indagini;• <u>Carta di Microzonazione Sismica</u> almeno alla scala 1:5.000-1.10.000;• <u>Relazione tecnica illustrativa</u> della Carta di Microzonazione Sismica.

Per la predisposizione delle **cartografie di Microzonazione Sismica** si rimanda al par. 2.4 degli ICMS in cui viene presentata la procedura di riferimento per la realizzazione delle suddette cartografie.

Per la redazione delle **relazioni tecniche illustrative** si rimanda alle indicazioni contenute al par. 1.6.4 degli ICMS.

LIVELLO 3

INDAGINI MINIME OBBLIGATORIE	6) <u>Programmazione ed esecuzione di nuove indagini</u> : integrazioni ed approfondimenti delle medesime indagini rispetto al livello 2; analisi dinamiche di laboratorio
ANALISI ED ELABORAZIONI	<ul style="list-style-type: none">• <u>Analisi numeriche di risposta sismica locale</u> almeno 1D e/o 2D per amplificazioni sismiche e/o deformazioni permanenti
PRODOTTI FINALI OBBLIGATORI	<ul style="list-style-type: none">• <u>Carta delle indagini</u>, implementata rispetto a quella del livello 1 e/o 2 con le nuove indagini;• <u>Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti</u> almeno alla scala 1:5.000-1.10.000;• <u>Relazione tecnica illustrativa</u> della Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti.

Per la predisposizione delle **cartografie di Microzonazione Sismica con approfondimenti** si rimanda al par. 2.4 degli ICMS in cui viene presentata la procedura di riferimento per la realizzazione delle suddette cartografie.

Per la redazione delle **relazioni tecniche illustrative** si rimanda alle indicazioni contenute al par. 1.6.4 degli ICMS.

Per quanto concerne i dati di base raccolti, le nuove indagini e i rilievi effettuati nel corso dei vari livelli di approfondimento degli studi di MS si dovrà rispettare le indicazioni generali riportate nel par. 1.6.2 degli ICMS e si dovrà tener conto delle procedure per la predisposizione delle indagini riportate al par. 2.1 degli stessi ICMS.

Per quanto riguarda la modalità di realizzazione, acquisizione dati e presentazione dei risultati inerenti le indagini e i rilievi geologici, le indagini geofisiche e geotecniche si deve fare riferimento a quanto contenuto al par. 3.4 degli ICMS e per quanto non specificato alle I.T. del Programma VEL.

Per quanto attiene gli aspetti tecnici, il Settore Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica ha realizzato, nell'ambito dei centri urbani significativi del Comune di Palazzuolo sul Senio, uno studio di MS di livello 1 ed in aggiunta per il solo capoluogo anche lo studio di MS di livello 3 secondo le indicazioni previste dagli ICMS. Per quanto concerne la metodologia di lavoro per la redazione degli studi di MS di livello 3, oltre alle indicazioni degli ICMS, ci si è attenuti anche alla metodologia prevista dal Programma Regionale VEL.

Per quanto concerne le modalità di rappresentazione e archiviazione informativa dei risultati prodotti, è stato utilizzato il documento approvato dalla Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica (Versione 2 – Giugno 2012).

Programma Regionale VEL

Il Programma regionale di valutazione degli effetti locali (**Programma VEL**) si colloca nell'ambito della L.R. 30.07.1997 n. 56 relativa agli interventi sperimentali per la riduzione del rischio sismico. La suddetta legge è stata successivamente aggiornata ed integrata con la L.R. n. 58 del 16.10.2009 inerente le norme regionali in materia di prevenzione e riduzione del rischio sismico.

La fase sperimentale del progetto ha interessato i principali centri urbani della Lunigiana, Garfagnana e Media Valle del Serchio. In queste aree è stata messa a punto la metodologia operativa che è stata poi adottata anche in altre zone classificate sismiche della Toscana quali il Mugello, la Valtiberina, il Casentino e l'Amiata.

L'obiettivo prioritario del Programma VEL è quello di valutare ed individuare all'interno di ambiti territoriali a scala subcomunale (frazioni e centri), le aree a comportamento omogeneo sotto il profilo della risposta sismica locale in corrispondenza di un terremoto atteso, definendo così i possibili effetti sui principali centri urbani e sui singoli edifici strategici e rilevanti in modo da poter fornire agli enti locali informazioni e parametri utili alla progettazione edilizia e pianificazione urbanistica.

In particolare, in questo progetto, per ognuno dei centri urbani individuati, è previsto l'avvio di una serie di attività e di indagini volte alla conoscenza delle caratteristiche geologiche, geotecniche, geofisiche e strutturali dei terreni in funzione dei possibili effetti di amplificazione e di instabilità connessi con un evento sismico.

Gli obiettivi delle singole attività sono nello specifico quelli di:

- concentrare le indagini ed i rilievi nei centri urbani più significativi in termini di esposizione al rischio sismico;
- mettere a confronto più metodologie di indagini per valutare le differenze non solo in termini di risultati e di attendibilità in relazione alle varie situazioni stratigrafiche incontrate ma anche sotto il profilo delle difficoltà di attuazione di tipo logistico e dei costi;
- mettere a confronto più approcci di modellazione numerica per valutare diversi aspetti dell'amplificazione locale (non-linearità, amplificazione stratigrafica, effetti 2D);
- valutare più approcci per la determinazione dell'input sismico (probabilistico, deterministico ed energetico);
- sperimentare nuove metodologie di indagine sia in ambito geofisico che geotecnico e verificarne l'applicabilità in relazione alle diverse problematiche geologico- strutturali.

I dati geologici, geotecnici e geofisici ad oggi acquisiti, hanno permesso di:

- verificare e approfondire le conoscenze geologiche del sottosuolo (con cartografie, sezioni geologiche, logs stratigrafici, sezioni sismostratigrafiche);
- caratterizzare per i siti investigati le unità geologiche in termini di velocità delle onde sismiche di taglio (V_{sh}) e il coefficiente di Poisson dinamico;
- determinare per le unità geologiche campionabili i parametri geotecnici dinamici (curva di decadimento del modulo di taglio, l'incremento dello smorzamento a crescere della deformazione, il coefficiente di Poisson dinamico).

Tali parametri permetteranno la caratterizzazione sismica dei terreni secondo quanto previsto dal D.M. 14/09/2008 (Le Norme Tecniche sulle Costruzioni).

Il programma delle attività è improntato su una filosofia operativa di tipo multidisciplinare ed analitica, assimilabile al livello 3 come meglio definito dagli I&C di Microzonazione Sismica, che

prede come riferimento i criteri e le metodologie operative definite ed illustrate nelle Istruzioni Tecniche Regionali e si articola nelle seguenti fasi:

FASE 0. Individuazione delle aree oggetto di indagine

Per ognuno dei Comuni sono definite le aree oggetto delle indagini sulla base di alcuni criteri morfologici, geologici e antropici di interesse ai fini della valutazione degli effetti locali;

FASE 1. Redazione e aggiornamento delle Istruzioni tecniche regionali con l'obiettivo di fissare i criteri e gli standard previsti per l'esecuzione dei rilievi superficiali e delle indagini geofisiche e geotecniche di esplorazione del sottosuolo;

FASE 2. Realizzazione di cartografia geologica e geomorfologica in scala 1:2.000 o 1:5.000 ed individuazione della sezione geologica significativa, al fine di acquisire strumenti cartografici di dettaglio alla scala del centro urbano, in relazione soprattutto alla ricostruzione delle geometrie delle unità geologiche presenti, con particolare riferimento agli spessori delle coperture.

FASE 3. Campagna di indagini di sismica a rifrazione con onde P e SH, in grado di fornire una parametrizzazione geometrica e fisico-meccanica, in assetto bidimensionale, finalizzata all'estensione nel sottosuolo delle conoscenze di superficie, nei limiti intrinseci della metodologia e connessi alla logistica delle aree indagate;

FASE 4. Approfondimento delle indagini: Sulla base dei risultati delle indagini sismiche di superficie, vengono realizzate indagini di dettaglio, quali sondaggi geognostici (con prelievo di campioni per l'esecuzione di prove geotecniche di laboratorio in campo statico e dinamico) e prove Down-hole, per una migliore e puntuale definizione del profilo sismostratigrafico;

FASE 5. Definizione del modello geologico-tecnico, dell'input sismico ed esecuzione dell'analisi di amplificazione: a seguito della realizzazione di sezioni litostratigrafiche e della parallela definizione di un input sismico significativo (eseguito su base deterministica, probabilistica o energetica) vengono realizzate analisi numeriche in campo mono e bidimensionale, al fine di fornire una stima quantitativa della risposta sismica locale;

FASE 6. Definizione dei parametri (spettri di risposta e fattori di amplificazione) da fornire ai comuni per la progettazione di nuovi edifici e per gli interventi di adeguamento e miglioramento sugli edifici esistenti;

FASE 7. Realizzazione di un banca dati geografica (GIS) dei dati acquisiti mediante le indagini geologiche, geotecniche e geofisiche: Lo scopo principale è quello di poter gestire un quantitativo ingente di informazioni provenienti da diverse discipline e di integrare tali dati in modo oggettivo e dinamico, in modo da poterli modificare e aggiornare nel corso del progetto ed utilizzarli per scopi diversi, quali la semplice rappresentazione cartografica, l'estrazione dei dati sulla base di specifiche richieste dell'utente (comuni e singoli professionisti) o l'analisi con diversi metodi.

FASE 8 - Redazione di cartografie di microzonazione sismica da fornire agli Enti Locali ed ai professionisti al fine di integrare lo strumento conoscitivo del territorio e costituire la base conoscitiva da utilizzare anche ai fini urbanistici.

Corografia: Delimitazione delle aree di indagine

La città di Palazzuolo sul Senio sorge lungo la valle del Fiume Senio raggiungendo una quota media di 430 m sul livello del mare. L'area del capoluogo è caratterizzata da un centro storico ubicato lungo i depositi alluvionali del Senio e dei suoi affluenti e l'area è situata sul versante adriatico rispetto allo spartiacque appenninico.

Più a nord rispetto al centro storico e sempre lungo il corso d'acqua principale si individua un' area produttiva di limitata estensione.

- Il capoluogo si sviluppa lungo l'alveo del F. Senio alla confluenza con il Fosso Visano, affluente di sinistra, ed il Fosso Salecchio affluente di destra ed è delimitato a sud dalla Località Quadalto e a nord dal cimitero.
- L'area produttiva Capoluogo è situata a NE del capoluogo, lungo la stretta valle del fiume Senio, ha un perimetro subcircolare e include sia la zona di fondovalle (con quota media di 420m s.l.m.) che quella relativa agli acclivi versanti, in particolare comprende per intero la zona nella quale sono concentrate le attività produttive di Palazzuolo sul Senio. Essa ha come confini la Sorgente della Maestà a NW, il Depuratore a Nord e la località Vaiorsoli ad Est. L'area è tagliata circa a metà dalla Strada Statale Casolana-Riolese e dal corso del fiume Senio.

Di seguito si riporta una tabella con l'estensione delle aree di indagine su cui sono stati effettuati i rilievi geologici di cui alla fase 2 e realizzate le indagini di cui alla fase 3 e 4 ed una cartografia con la delimitazione delle aree di indagine (Fig. 1.1; 1.2; 1.3; Tab. 1).



Fig.1.1 – Delimitazione delle aree individuate per le indagini

L'individuazione delle aree interessate dal progetto è stata effettuata in base alla localizzazione e alla distribuzione dei principali centri urbani, definiti sulla base delle informazioni fornite dall'Amministrazione Comunale e a seguito di esame di carte topografiche di base in scala 1:2.000 e 1:10.000 e sopralluoghi specifici effettuati dai tecnici regionali.

Una volta individuate le aree, la delimitazione delle stesse viene effettuata allargandone il perimetro ad un "congruo intorno" scelto in considerazione non solo degli aspetti urbanistici, ma anche sulla base degli aspetti geomorfologici, geologici e geometrico-strutturali che possono produrre fenomeni di amplificazione sismica locale.

In altre parole se per esempio l'area delimitata è ubicata su un fondovalle, si cerca di delimitare l'area considerando tutti gli aspetti geomorfologici presenti: quindi anche i versanti della valle stessa. Nello stesso modo verranno evidenziati anche gli aspetti geologici e strutturali di tutta la valle.

Ne risulta che in certi casi l'area su cui avviare le indagini può risultare anche più estesa rispetto a quella in cui sono distribuiti i centri abitati. Ciò risulta utile e necessario al fine di una corretta ed adeguata definizione del modello geologico-geofisico-geotecnico finalizzato all'analisi di amplificazione nelle aree previste.

La scelta delle aree deve essere effettuata anche tenendo presente che in queste si devono scegliere le sezioni significative per la modellazione.

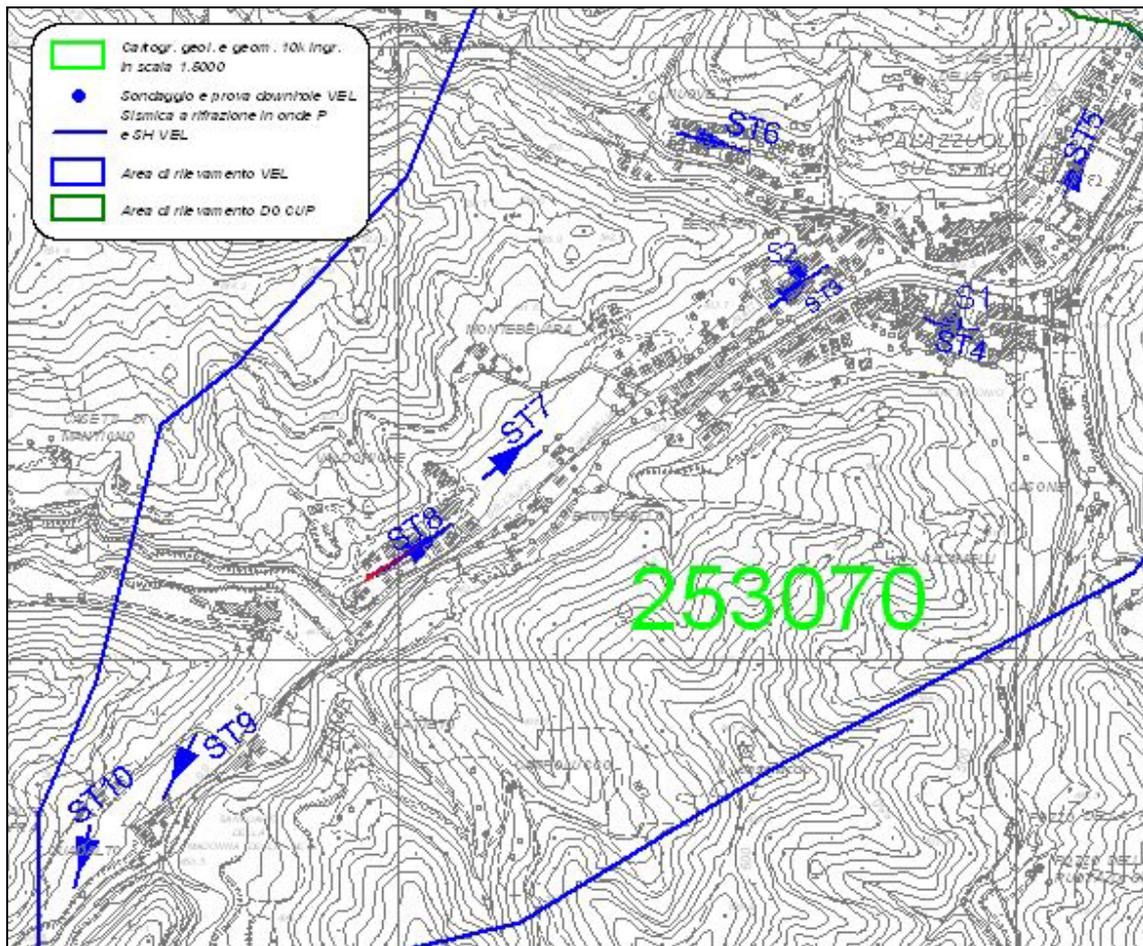


Fig.1.2 – Ubicazione delle indagini geognostiche eseguite nell'area di Palazuolo sul Senio.

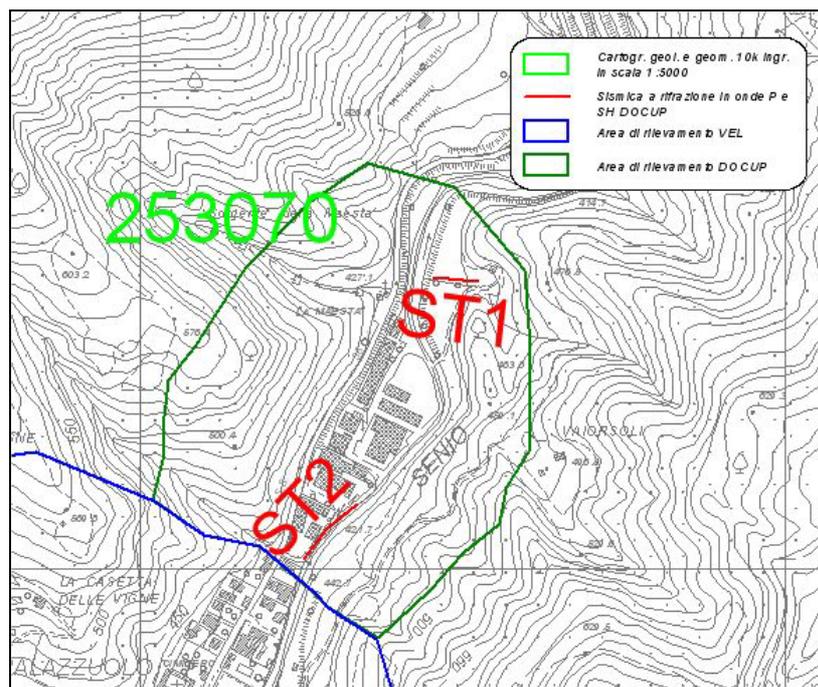


Fig.1.3 – Ubicazione delle indagini geofisiche eseguite nell’area industriale di Palazzo sul Senio.

Comune	località	Superficie (ha)	Superficie totale (ha)
Palazzo sul Senio	capoluogo	228.13	257.13
	area produttiva	29.00	

Tab.1 – Delimitazione aree oggetto dei rilievi geologici, geomorfologici e delle indagini geofisiche e geotecniche

2.0. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento

L’area del Mugello è caratterizzata da una sismicità medio-elevata e si posiziona tra le zone a maggior pericolosità sismica della Toscana. Infatti, i comuni afferenti all’area dell’alto Mugello (Fig. 2.1), compreso il territorio di Palazzo sul Senio, sono classificati in zona sismica 2 (Del GRT 878/2012). Del resto il comune di Palazzo sul Senio è stato tra i primi comuni classificati in zona sismica 2, ovvero a partire dal 1927.

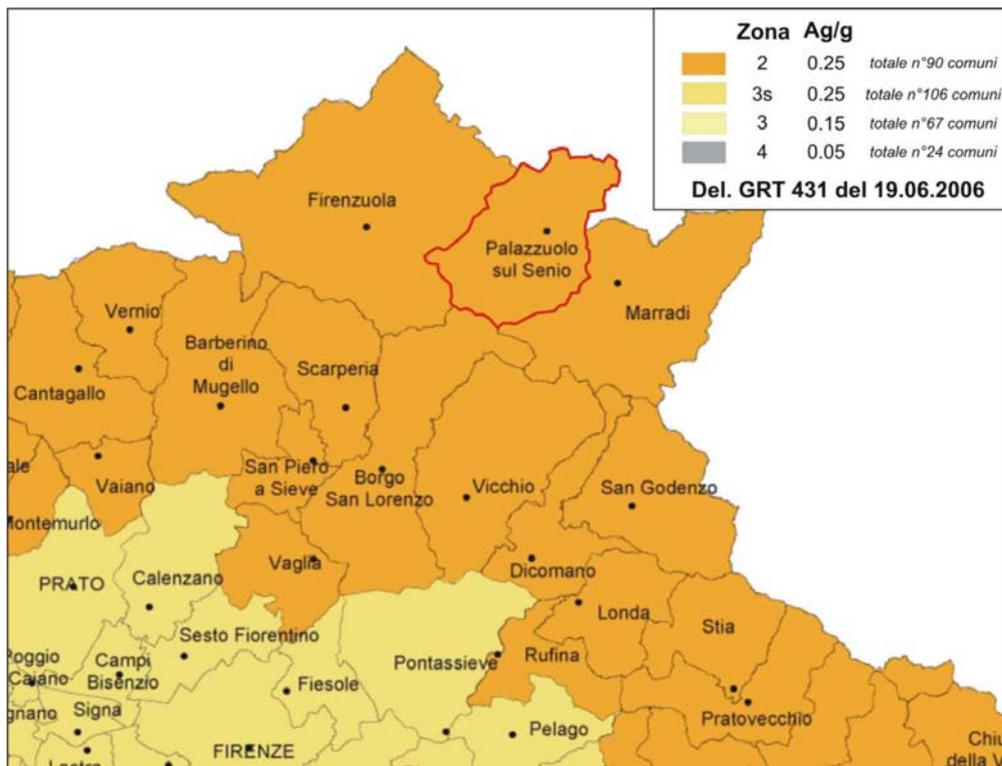


Fig.2.1 – Classificazione sismica dell’area del Mugello; in rosso è evidenziato il territorio comunale di Palazzuolo sul Senio

L’attività sismica di questa zona (Fig.2.3 e Tab.2.1) è imputabile alle deformazioni che si sviluppano all’interno e all’esterno del sistema oroclinale sollecitato dal regime compressivo parallelo alla catena che ha agito nella parte settentrionale del cuneo Romagna-Marche-Umbria (Mantovani et al., 2012).

In figura 2.3 è rappresentata la Mappa di Pericolosità Sismica (O.P.C.M. 3519/2006) relativa al territorio di Palazzuolo sul Senio. La Mappa è relativa alla distribuzione dei valori stimati di accelerazione (ag) su bedrock sismico in condizioni di topografia pianeggiante per un periodo di ritorno di 475 anni e relativi al valore mediano (50mo percentile). La mappa illustra, per il territorio di Palazzuolo sul Senio, valori di accelerazione sismica (normalizzata rispetto all’accelerazione di gravità g) pressoché costanti e relativi ad un range compatibile con l’ascrizione del comune in zona sismica 2.

Inoltre, nell’area del Mugello sono presenti reti di monitoraggio dello scuotimento sismico (sismometrico ed accelerometrico) e dei parametri ad esso connessi per le quali la Regione Toscana ha provveduto nel corso degli ultimi decenni alla realizzazione e/o al cofinanziamento mediante la stipula di convenzioni ed Accordi di collaborazione scientifica. Maggiori informazioni sull’argomento sono reperibili al link regionale:

<http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/02rischio/monitoraggio/reti/index.htm>

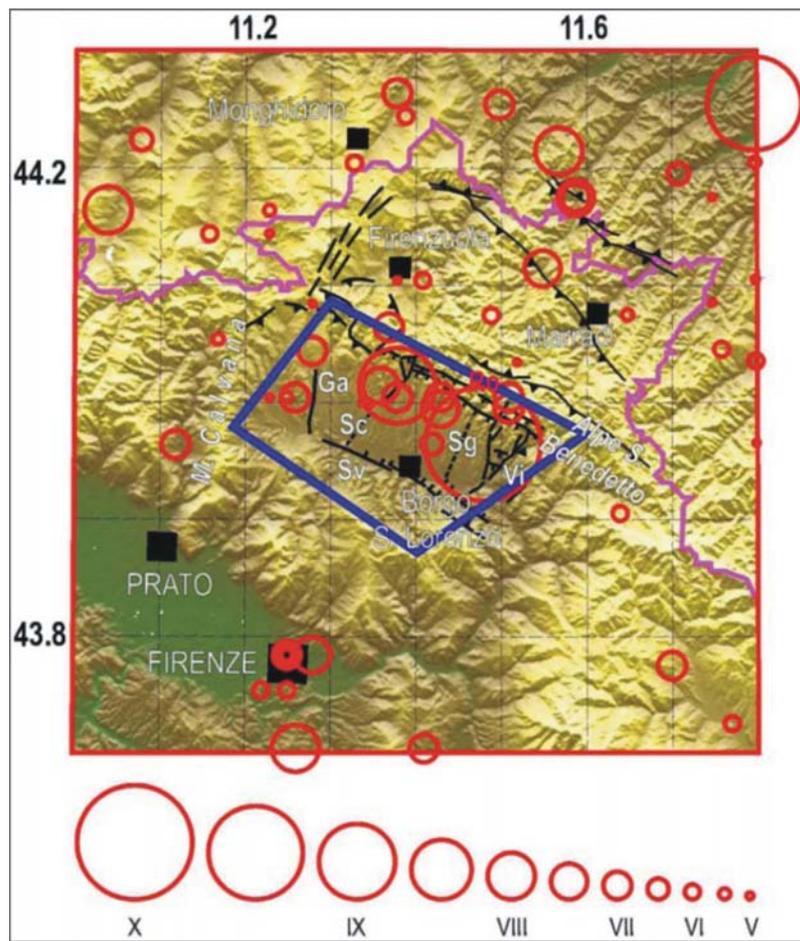


Fig.2.2 – Sismicità storica dell’area del Mugello. I cerchi rossi indicano i terremoti avvenuti dopo il 1000. I principali elementi tettonici, riportati anche sullo schema geologico (Fig.1.3.4), sono in nero. Si può notare che le scosse storiche principali di questa zona hanno interessato segmenti diversi delle faglie presenti: Ga=Galliano, Sc=Scarperia, Sg=Sagginale, Sv=Sieve, Vi= Vicchio. Da Mantovani et al., 2012

Tab. 2.1 – Lista dei terremoti con $I_{max} \geq 7$ avvenuti dopo il 1000 nella zona contornata in figura 2.2. Ad essi vanno aggiunti gli eventi sismici che hanno interessato storicamente l’area appenninica emiliano-romagnola, prossima al comune di Palazzuolo sul Senio. In grassetto i terremoti con $I_{max} \geq 8/9$ o $M \geq 5.5$. Mw = Magnitudo momento riportata nel catalogo CPTI11 (Rovida et alii, 2011). Io e Imax sono rispettivamente l’intensità epicentrale e quella massima osservata (riportate entrambe quando non coincidenti). T indica l’intervallo di tempo trascorso rispetto al terremoto precedente. Da Mantovani et al., 2012

Anno	Mese	Giorno	Zona epicentrale	Latitudine (°N)	Longitudine (°E)	Magnitudo Mw)	Intensità Io (Imax)	T (anni)
1542	6	13	Mugello	44.01	11.39	5.9	9	
1597	8	3	Mugello	43.99	11.43	5.2	7.5	55
1611	9	8	Scarperia	44.01	11.36	5.1	7 (7.5)	14
1762	4	15	Mugello	44	11.51	5.1	7	151
1843	10	25	Mugello	44.01	11.26	5.1	6.5 (7)	82
1864	12	11	Mugello	44.04	11.28	5.1	7	21
1919	6	29	Mugello	43.96	11.48	6.3	10	55
1929	7	18	Mugello	43.99	11.51	5.0	6.5 (7)	10
1931	9	5	Mugello	44.06	11.37	4.8	6 (7)	2
1939	2	11	Marradi	44	11.43	5.0	7	7
1960	10	29	Mugello	44	11.39	5.0	7	22

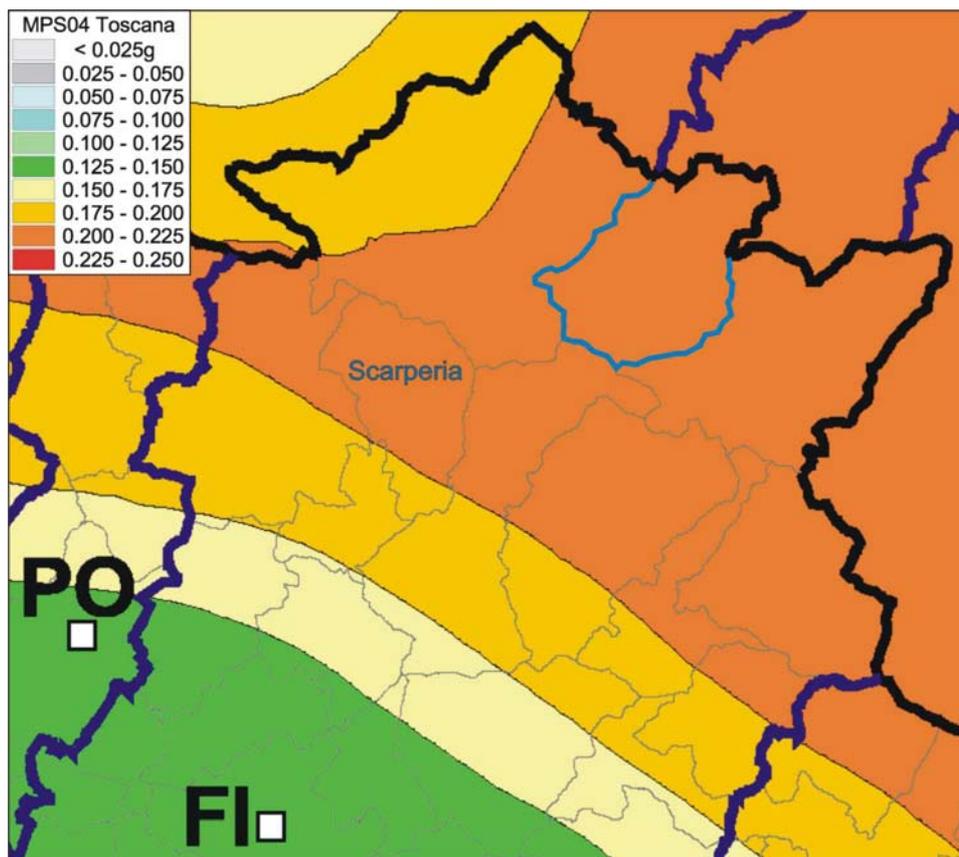


Fig.2.3 – Mappa di Pericolosità Sismica relativa all’area del Mugello realizzata dall’INGV nel 2004 (Allegato 1B dell’O.P.C.M. 3519/2006)

La scelta di realizzare per il centro abitato di Palazzuolo sul Senio e per l’attigua area industriale un’analisi parametrica finalizzata alla redazione di una cartografia di microzonazione sismica di livello 3, impone la preliminare definizione di un input sismico, costituito da un set di accelerogrammi naturali sismocompatibili con le caratteristiche tettoniche dell’area e spettrocompatibili con quanto prescritto dalle vigenti NTC 2008.

In particolare, per l’area di Palazzuolo sul Senio, l’input sismico è stato definito mediante la procedura messa a punto da EUCENTRE mediante una convenzione con la Regione Toscana, finalizzata alla “Definizione del terremoto di progetto nei territori toscani della Garfagnana, Lunigiana, Mugello, Val di Sieve e Montagna Fiorentina”.

A tal proposito è stato sviluppato un codice di calcolo di semplice utilizzo che fornisce, in funzione del sito e del periodo di ritorno considerati, l’input sismico compatibile con le NTC08 sia in termini spettrali che di accelerogrammi spettro-compatibili. Il codice, scritto in Fortran90, è chiamato SCALCONA (SCALing of COmpatible Natural Accelerograms).

Si è optato per gli accelerogrammi naturali selezionati da banche dati accelerometriche “strong-motion” accreditate. Essi sono da preferire, secondo la normativa e la letteratura internazionale più avanzata per le analisi geotecniche e di risposta sismica locale, a fronte degli accelerogrammi artificiali.

Ai fini della selezione degli accelerogrammi è stata effettuata una mesozonazione del territorio che ha consentito di identificare “aree” omogenee dal punto di vista degli spettri di risposta prescritti dalle NTC08. Per ciascun gruppo di spettri di risposta e ciascun periodo di ritorno è stato quindi definito uno spettro di risposta di riferimento, utilizzato per la selezione degli accelerogrammi.

SCALCONA utilizza e scala opportunamente i risultati della selezione degli accelerogrammi, consentendo di restituire, per il sito e periodo di ritorno di interesse, un gruppo di 7 accelerogrammi che soddisfano i requisiti di spettro-compatibilità prescritti dalle NTC08 e dalla Circolare NTC (2009). Gli accelerogrammi possono essere selezionati per ciascun punto interno ai territori di studio e per ciascuno dei 9 periodi di ritorno considerati nelle NTC08 (ossia 30, 50, 72, 101, 140, 201, 475, 975 e 2475 anni).

Le analisi di risposta sismica locale realizzate per la microzonazione sismica di livello 3 oggetto del presente lavoro fanno riferimento ad un input sismico relativo ad un periodo di ritorno di 475 anni.

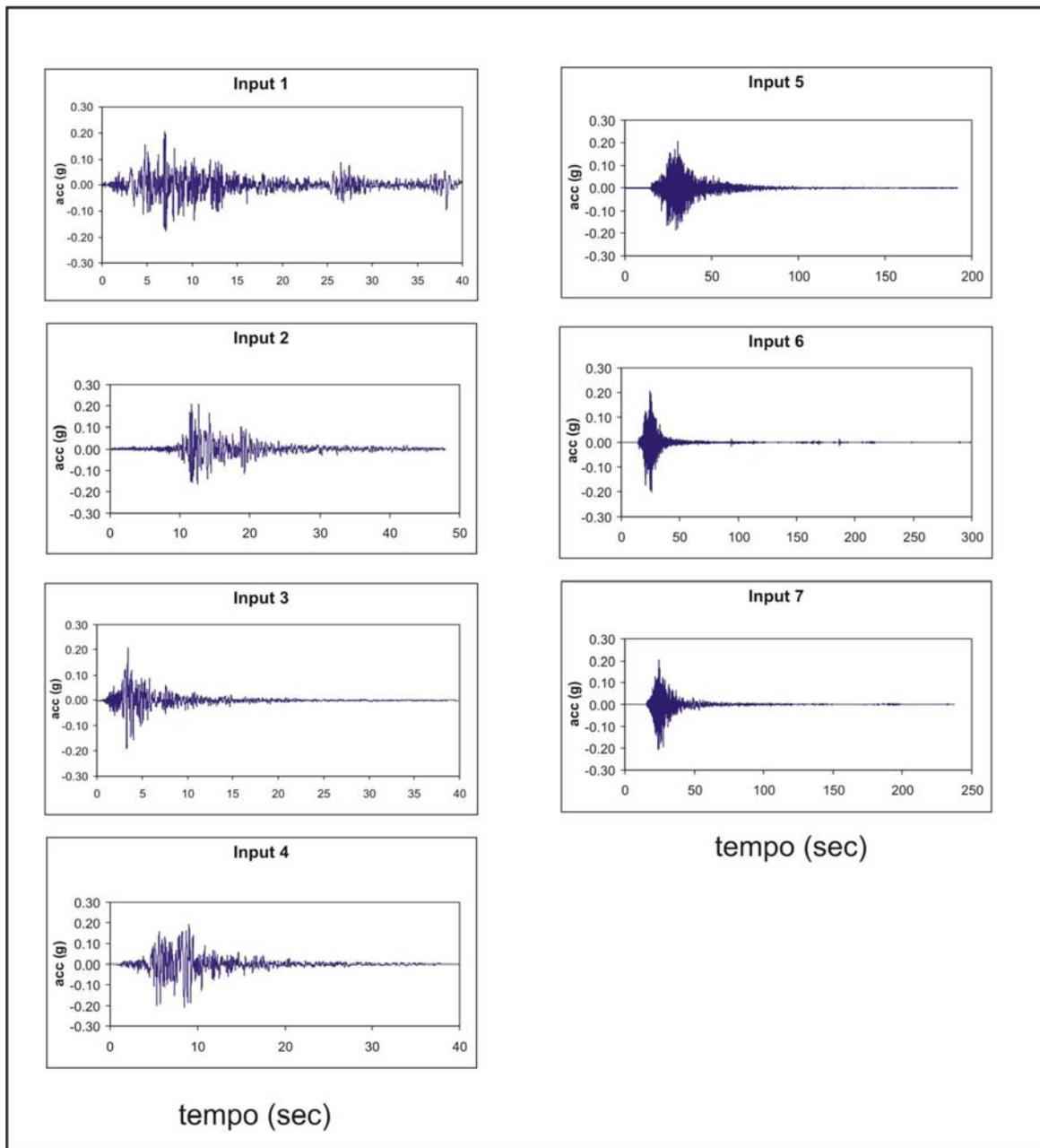


Fig.2.4 – Storie temporali dei 7 accelerogrammi utilizzati come input sismico

In figura 2.4 è possibile visualizzare le storie temporali dei 7 accelerogrammi utilizzati nelle analisi di risposta sismica locale come input sismico. La figura 2.5, invece, illustra gli spettri di risposta elastici dei medesimi accelerogrammi a confronto con lo spettro di cat. A (bedrock sismico) previsto dalle NTC 2008 per il centro comunale di Palazzuolo sul Senio (il valore è riferito convenzionalmente alla

sede comunale). Dal grafico è possibile notare la spettro-compatibilità della media dei 7 input a confronto con lo spettro target di normativa.

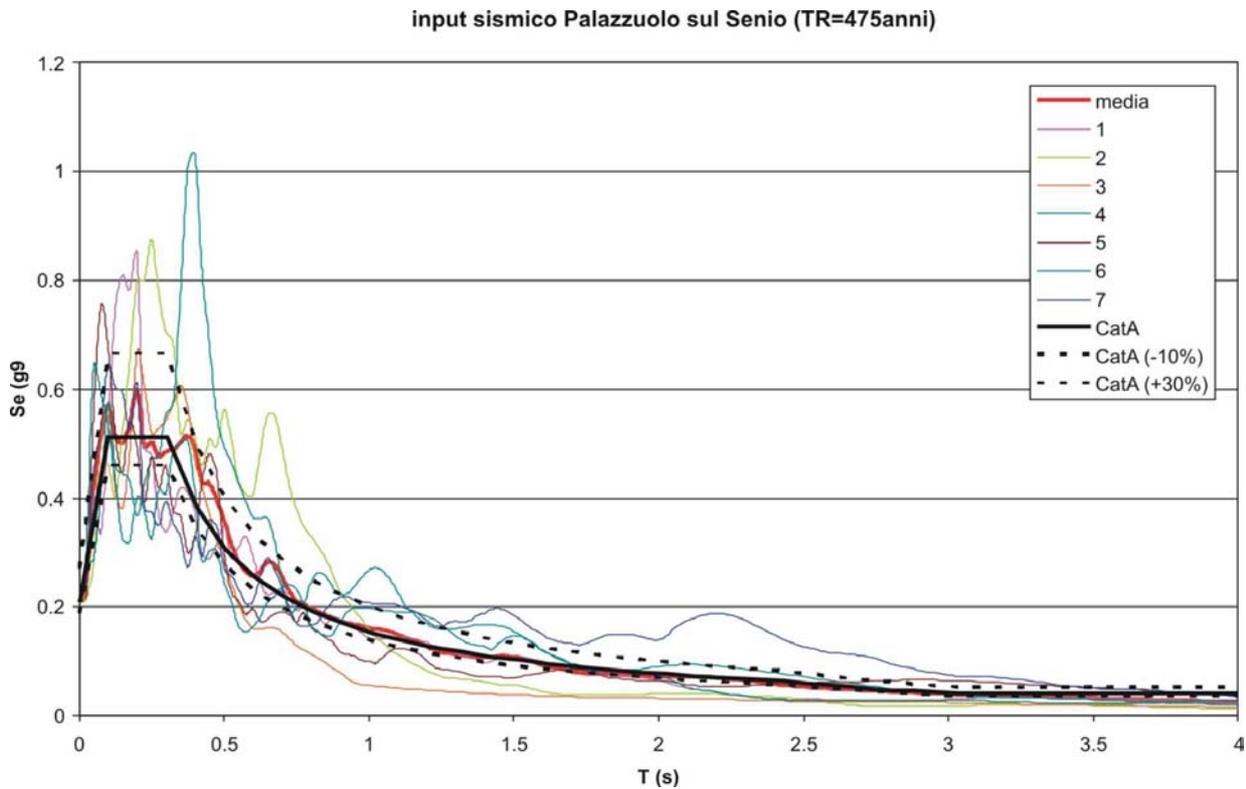


Fig.2.5 – Rappresentazione in termini di spettro di risposta elastico (damping factor=5%) dei 7 accelerogrammi utilizzati come input sismico per le analisi di risposta sismica locale nel territorio comunale di Palazuolo sul Senio.

Tab.2.2 – Informazioni relative ai 7 accelerogrammi spettro-compatibili utilizzati come input sismico: Magnitude Mw = magnitudo momento associata, Epicentral Distance = distanza epicentrale in km, Scaling Factor = fattore di scala, Source file name = indicazione del nome del record e del codice della banca dati di provenienza.

n°	Magnitude (Mw)	Epic. Distance (km)	Scaling Factor	Source File Name
1	6.87	11	0.62	ESMD 000182xa.cor
2	6.68	65	0.92	ESMD 000200xa.cor
3	6.93	28.64	0.51	NGA 0765x.txt
4	6.69	38.07	1.38	NGA 1091x.txt
5	7	50.5	1.15	KNET2 IWT0100305261824.EW
6	6.6	36.18	1.66	KNET1 SAG0010503201053.NS
7	6.9	23.05	0.74	KNET2 IWT0100806140843.EW

La tabella 2.2 riporta le informazioni relative ai predetti accelerogrammi. Essi si riferiscono a registrazioni di eventi naturali e relative a stazioni poste sulla superficie terrestre.

Pertanto, prima di utilizzarli come input per le analisi di risposta sismica, i 7 accelerogrammi sono stati deconvolti mediante l'utilizzo del software STRATA (Kottke & Rathje, 2008), al fine di ricondurli alle caratteristiche che avrebbero avuto all'interfaccia di passaggio tra il bedrock sismico e le sovrastanti coperture, che corrisponde al punto di imposizione dell'input sismico.

3.0. Inquadramento geologico – geomorfologico e tettonico dell'area

Geologia dell'area

L'area in oggetto presenta un'esigua estensione di alluvioni terrazzate di modesto spessore. Il substrato del terrazzo alluvionale ed il resto della valle sono caratterizzati dalla presenza della Formazione Marnoso-Arenacea (FMA) suddivisa nei suoi vari membri. Questa formazione, nella zona indagata, presenta generalmente strati rovesciati con direzioni appenniniche ed immersioni di circa 45-80° verso i quadranti sud-occidentali per passare, poco più a NE, a giaciture diritte ed immersioni di circa 15° verso i quadranti sud-occidentali. Se ne evince una struttura sinclinale con asse a direzione appenninica che appare inoltre interessata da fenomeni di deformazione fragile riconducibili a geometrie normali-trascorrenti (a prevalenti direzioni antiappenniniche). Non meno importanti risultano i già citati depositi ascrivibili a frane attive (a1a) e quiescenti (a1q), depositi eluvio-colluviali (b8) e detriti di versante (a) presenti in particolare sui versanti vallivi.

Dal punto di vista geologico il substrato pre-quadernario affiora prevalentemente lungo i pendii che bordano il F. Senio e presso l'alveo del fiume stesso nei tratti in cui l'erosione ha intensità maggiore.

Il substrato è costituito dai vari membri della Formazione Marnoso-Arenacea separati tra loro prevalentemente con contatti di tipo stratigrafico ad esclusione di un *thrust* passante per il centro del paese con direzione NW-SE ed immergente verso SW che separa il Membro di Biserno (**FMA1**, Burdigaliano Medio-Sup. – Langhiano Inferiore) dal sottostante Membro di Collina (**FMA5**, Serravalliano Inferiore). Andando più a Nord verso l'area produttiva si ha alternanza tra il Membro di Nespoli (**FMA8**, Serravalliano Superiore) e la Litofacies di Toncone (**FMA8a**, Serravalliano Superiore). A Sud del capoluogo invece sono presenti affioramenti del Membro di Premilcuore (**FMA3**, Langhiano – Serravalliano Inferiore) alternato al Membro di Corniolo (**FMA2**, Langhiano).

Per quanto riguarda i depositi di copertura, questi sono prevalentemente costituiti da depositi alluvionali (attuali e olocenici), detrito di versante e corpi di frana. I depositi alluvionali attuali (**b**), prevalentemente ciottolosi e ghiaiosi, sono ubicati sul fondo della stretta valle e in prossimità del F. Sieve. Al di sopra, separati dai depositi attuali da una scarpata di pochi metri di altezza, sono presenti i depositi alluvionali terrazzati (**b₃** e **b₂**, Pleistocene Medio-Olocene) con ciottolami in matrice limoso-sabbiosa.

Il detrito di versante (**a**), riferibile al Pleistocene Medio finale - Olocene, è costituito da matrice generalmente sabbiosa e da frammenti eterometrici prevalentemente grossolani: trovandosi generalmente alla base dei versanti, la composizione dei detriti, è determinata dal substrato pre-quadernario che costituisce il rilievo. Pertanto nell'area di studio il detrito di versante presente è generalmente costituito da clasti angolosi di natura arenitica e siltitica immersi in una matrice sabbioso-limosa. Il detrito quindi crea delle fasce che si estendono lungo il raccordo tra i pendii e il fondovalle.

I depositi franosi presenti (**a1**, Pleistocene Medio/Superiore – Olocene) sono di limitata estensione ma molto frequenti su entrambi i versanti e sono caratterizzati dalla presenza caotica ed eterogenea di materiali litoidi (prevalentemente di natura arenacea) in matrice limoso-sabbiosa e limo-argillosa.

Si descrivono qui le unità geologiche affioranti, dalle più recenti alle più antiche, suddividendole in depositi Plio-Quadernari e substrato pre-Plioceno.

I depositi Plio-Quadernari sono stati distinti in: depositi alluvio-colluviali recenti, depositi fluviali depositi dal Pleistocene inf. all'Olocene entro il Bacino del Mugello, e depositi fluvio-lacustri di riempimento del bacino, accumulati tra il Pliocene sup. ed il Pleistocene inferiore. Quest'ultimi sono stati distinti in tre unità sulla base delle superfici di discordanza principali riconosciute a scala bacinale nella cartografia geologica nazionale (CARG).

In quest'area sono stati riconosciuti in campagna esclusivamente i depositi alluvio-colluviali recenti.

Le formazioni, i membri e le litofacies, appartenenti al substrato pre-pliocenico, sono raggruppate in unità tettoniche, a loro volta inserite in “domini”.

Per quanto riguarda la nomenclatura e l’età delle varie unità stratigrafiche ci siamo riferiti alle classificazioni adottate dalla “*Legenda per la realizzazione della cartografia geologica, geomorfologica e litologico-tecnica per le aree del Mugello – PROGRAMMA VEL MUGELLO – VOLUME 5*”.

Per quanto concerne l’inquadramento stratigrafico dell’area del Comune di Palazzuolo sul Senio, questo è costituita dall’alto verso il basso dalle seguenti formazioni:

DEPOSITI QUATERNARI

DEPOSITI ALLUVIO-COLLUVIALI

Depositi di frana (a₁)

I depositi franosi in quest’area sono molto frequenti, costituiti da sabbie, argille e frammenti arenacei in relazione al substrato pre-quadernario su cui si sono impostati. In particolar modo i corpi di frana posti lungo i versanti della valle all’interno della quale si trova l’abitato di Palazzuolo sul Senio, sono costituiti da sabbie e frammenti eterometrici provenienti dalla Formazione marnoso-arenacea romagnola.

Depositi alluvionali attuali (b)

Si tratta di depositi fluviali costituiti da ciottolami eterometrici e poligenici in matrice limoso-sabbiosa con tessitura da clasto- a matrice-sostenuta, e subordinatamente ghiaie, sabbie e limi. I ciottoli, da subarrotondati ad arrotondati, hanno sfericità bassa. Sono depositi di pianura alluvionale in evoluzione, depositi dal Torrente Senio e dai corsi d’acqua secondari.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura”* –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questa unità è riferibile all’U.L.T. E1.a3/4.t2 (materiale granulare non cementato o poco cementato a granulometria grossolana dominante, da poco addensato a sciolto, con presenza di frazione limoso-sabbiosa).

Olocene

Detrito di versante (a)

Deposito di versante costituito da elementi eterometrici, prevalentemente grossolani, in abbondante matrice sabbiosa-limosa, derivante da processi di degradazione superficiale e accumulato lungo i versanti o al piede degli stessi principalmente per gravità. Nelle aree indagate questi depositi si ritrovano principalmente al raccordo tra la pianura e le aree collinari. Nella zona in esame possono arrivare a spessori massimi di circa 7-8m.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura”* –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questi depositi sono attribuibili all’U.L.T. E1.a3/4.t2 (materiale granulare poco cementato a granulometria grossolana dominante, da poco addensato a sciolto, con presenza di frazione limoso-sabbiosa).

Pleistocene medio finale-Olocene

Depositi di conoide alluvionale (m)

Ciottolami ad elementi eterometrici e poligenici dispersi in matrice limoso-sabbiosa, con tessitura da clasto- a matrice-sostenuta, e subordinatamente ghiaie, sabbie e limi. Si formano lungo il corso di un torrente nel punto in cui il gradiente diminuisce, in questo caso al raccordo fra versante e pianura

alluvionale. Affiorano esclusivamente in destra idrografica del Fiume Senio, a S-SW del centro storico di Palazzuolo e sono associati ai depositi di piana alluvionale terrazzati corrispondenti all'unità bIII .

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel "substrato" e nella "copertura" – Regione Toscana* (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questi depositi sono attribuibili all'U.L.T. E.a3-4 (materiale granulare non cementato o poco cementato, a granulometria grossolana dominante con presenza di frazione sabbioso- limoso, da poco addensato a sciolto).

Pleistocene inferiore?-Olocene

Depositi alluvionali antichi terrazzati e recenti (bI-n)

Si tratta di depositi fluviali di ambiente di piana alluvionale, deposti dal Torrente Senio e dai corsi d'acqua secondari, costituiti da ciottolami eterometrici e poligenici in matrice limoso-sabbiosa con tessitura da clasto- a matrice-sostenuta, e subordinatamente ghiaie, sabbie e limi, talora variamente pedogenizzati. I ciottoli, da subarrotondati ad arrotondati, hanno sfericità bassa. Sono depositi numerati a partire dal terrazzo morfologicamente più alto, fino alla pianura alluvionale recente. Quest'ultima può essere localmente soggetta ad esondazioni. Nell'area in esame sono stati riconosciuti due ordini di terrazzi (bII – bIII).

Nelle aree indagate questi depositi hanno spessori massimi di circa 6-7 m (vedi Fig.3.1; 3.2; 3.3; 3.4).



Fig. 3.1 - Depositi alluvionali terrazzati – Unità b_{II} – affioranti in località Sorgente della Maestà.



Fig. 3.2 – Depositi alluvionali terrazzati – Unità b_{II} –affioranti in località Sorgente della Maestà (dettaglio dell'immagine precedente).



Fig. 3.3 - Depositi alluvionali terrazzati – Unità b_I –affioranti in località Sorgente della Maestà.



Fig. 3.4 – Depositi alluvionali terrazzati – Unità b_1 – affioranti a NNW del centro abitato.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura”* – Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questa unità è riferibile all’U.L.T. E1.a3/4.t2 (materiale granulare non cementato o poco cementato a granulometria grossolana dominante, da poco addensato a sciolto, con presenza di frazione limoso-sabbiosa).

Pleistocene medio-Olocene

SUBSTRATO PRE-PLIOCENICO

Nell’area di interesse il substrato è costituito da terreni riferibili alla Formazione Marnoso-Arenacea (Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo). La Formazione Marnoso-Arenacea è una successione torbidity miocenica con potenza superiore a 3.000 metri, costituita da alternanze arenite-pelite e subordinate emipelagiti marnose. Le impronte di fondo indicano apporti prevalenti da nord-ovest e subordinatamente da sud-est. A scala regionale questa formazione è stata suddivisa in 14 membri sovrapposti ed in parte eteropici tra loro.

In quest’area affiorano estesamente il membro di Nespoli (FMA8, insieme alla Litofacies di Toncone, FMA8a), il membro di Collina (FMA5), il membro di Premilcuore (FMA3), il membro di Corniolo (FMA2) ed il membro di Biserno (FMA1).

Formazione Marnoso-Arenacea

Membro di Nespoli (FMA8)

Membro prevalentemente arenaceo, con letti arenacei da sottili a banchi, perlopiù spessi; il rapporto arenite/pelite è quasi sempre maggiore di 1, per lo più compreso tra $\frac{1}{2}$ e 2. Gli affioramenti migliori si possono osservare lungo la S.S. n°477 (Fig. 3.5). Localmente questo membro è rappresentato quasi esclusivamente dalla litofacies di Toncone (FMA8a), alternanza di peliti e subordinate arenarie, con rapporto arenite/pelite compreso tra $\frac{1}{3}$ e 1; sono presenti sottili emipelagiti (Fig. 3.6). Buoni affioramenti si trovano sul versante in destra del F. Senio a nord di loc. Vaiorsoli. Il contatto stratigrafico inferiore è con FMA5. Questa litofacies presenta rapporti eteropici con FMA8.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura” –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questo membro è riferibile all’U.L.T. B4.r1/4.d4/5.c4/5.
Serravalliano Superiore



Fig. 3.5 – Formazione Marnoso-Arenacea, Membro FMA8, lungo la S.S. n°477.



Fig. 3.6 – Formazione Marnoso-Arenacea, Membro FMA8a, lungo la S.S. n°477.

Membro di Collina (FMA5)

Si tratta di alternanze pelitico-arenacee, con frequenti livelli emipelagitici, in strati generalmente medio-sottili, talvolta molto spessi, a granulometria medio-fine (Fig. 3.7). Il rapporto arenaria/pelite è compreso tra 1/5 e 1/3. Gli affioramenti di questo membro, generalmente di modeste dimensioni, si ritrovano esclusivamente nella porzione settentrionale dell'area rilevata.



Fig. 3.7 – Formazione Marnoso-Arenacea, Membro FMA5.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura”* –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questo membro è riferibile all'U.L.T. B4.r1/4.d4/5.c4/5. *Serravalliano inf.*

Membro di Premilcuore (FMA3)

Torbiditi arenaco-pelitiche alternate a rare emipelagiti e calcareniti; il rapporto arenaria/pelite è da poco inferiore a 1 a circa 2. Gli affioramenti di questo membro sono ampiamente diffusi in tutta la porzione meridionale dell'area studiata.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura”* –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questo membro è riferibile all'U.L.T. B4.r1/4.d4/5.c4/5. *Langhiano -Serravalliano inf. – MNN5a-MNN6a*

All'interno di questo membro è presente un orizzonte caotico noto come **Slump di Quadalto (qa)**. Questo rappresenta un corpo di frana sottomarino ad elementi intraformazionali, caratterizzato nell'area in esame dalla presenza di porzioni caoticizzate di successione e strutture di flusso (Fig. 3.8) tipiche di sedimenti inconsolidati.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura”* –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questo membro è riferibile all'U.L.T. B4.r1/4.d4/5.c4/5.



Fig. 3.8– Slump di Quadalto (qa). Terminazione di piega isoclinala riconducibile al franamento sindeposizionale.

Membro di Corniolo (FMA2)

Si tratta di alternanze arenaceo-pelitiche con livelli arenitici da sottili a spessi, subordinatamente molto spessi, con un rapporto arenaria/pelite 1/3 ed 1/2; sono presenti subordinate emipelagiti sottili. Nell'area in esame questo membro risulta intercalato all'interno del membro di Premilcuore (FMA3).

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel "substrato" e nella "copertura"* –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questo membro è riferibile all'U.L.T. B4.r1/4.d4/5.c4/5.

Langhiano – MNN5a

Membro di Biserno (FMA1)

Torbiditi arenaco-pelitiche con intercalate sottili emipelagiti; il rapporto arenaria/pelite è compreso tra 1/3 ed 1/5 e talora anche inferiore. I letti arenitici sono generalmente da sottili a medi e talora spessi. Gli affioramenti più estesi si ritrovano poco sopra la S.S. Casolana a Sud di Località La Valle (Fig. 3.9).



Fig. 3.9 – Formazione Marnoso-Arenacea, Membro FMA1 lungo la S.S. Casolana.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecniche (U.L.T.) nel “substrato” e nella “copertura”* –Regione Toscana (Ferrini & Calosi ed., 2000; Ferrini ed., 2002), questo membro è riferibile all’U.L.T. B4.r1/4.d4/5.c4/5.
Langhiano – MNN4b-MNN5a

Geomorfologia dell’area

L’ area urbana studiata è ubicata in una modesta area pianeggiante allungata lungo la direzione del torrente Senio e incassata nei monti appenninici. Vengono individuate tre superfici alluvionali terrazzate (i due ordini di terrazzi più bassi seguono il corso del Fiume Senio, un lembo del terrazzo dell’ordine più vecchio e più alto si trova presso la località Casetti di Mantigno) e fasce più o meno continue di detrito di falda e di versante ubicate alla base dei pendii. Le frane cartografate (Fig. 3.10; 3.11) possono essere classificate come scivolamenti rotazionali, traslativi e colate, interessano la coltre superficiale alterata litoide e lo stato di attività è quiescente o stabilizzato naturalmente. In zona Gatteto si trova una modesta conoide alluvionale.



Fig. 3.10 - Frana presso "Casone"



Fig. 3.11 - Frana presso il Santuario della Madonna della Neve

Dal punto di vista geomorfologico, l'area produttiva è situata su un esiguo deposito alluvionale terrazzato (costituito da terrazzi del secondo ordine) allungato in direzione del fiume Senio e spesso qualche metro. Questo ricopre membri litoidi della Formazione Marnoso-Arenacea che, in

corrispondenza delle zone più acclivi, danno luogo ad accumuli poco estesi e di spessore di qualche metro di depositi eluvio-colluviali e depositi detritici di versante.

Nell'area produttiva è stata riconosciuto e cartografato un solo movimento franoso, classificato come uno scivolamento rotazionale quiescente, presso la località Vaiorsoli.

Inquadramento Tettonico

L'area in esame è caratterizzata dalla presenza di un importante thrust a carattere regionale (De Jager, 1979; Sani, 1991; Bendkik et al., 1994) che attraversa l'abitato di Palazzuolo sul Senio all'altezza della confluenza con il Fosso di Visano. Questa struttura è individuabile, in località La Valle, per la presenza di una fascia d'intensa deformazione in corrispondenza della quale avviene la progressiva verticalizzazione della stratificazione (Fig. 3.12).



Fig. 3.12 – Strati verticalizzati e deformati all'interno della Formazione Marnoso-Arenacea, (Membro FMA1), in Loc. La Valle.

Come avviene tipicamente in questo settore di catena, questa struttura è caratterizzata dalla mancanza in affioramento dell'anticlinale di rampa, probabilmente a causa sia dei successivi fenomeni erosivi che del meccanismo stesso di deformazione (De Donatis e Mazzoli, 1994). Al thrust è associata una sinclinale rovesciata (con superficie assiale immergente a SO e vergenza a NE) affiorante poco a NE dell'area rilevata, come evidenziato negli studi eseguiti nell'ambito del progetto DOCUP.

La struttura principale che interessa la zona produttiva è una sinclinale rovesciata con superficie assiale immergente a SW e vergenza a NE. Questa struttura rappresenta la sinclinale di muro del sovrascorrimento affiorante nel paese di Palazzuolo sul Senio, poco a SW dell'area rilevata.

La superficie assiale della sinclinale interseca la topografia tra le località La Maestà e Vaiorsoli dove gli strati mostrano un brusco cambiamento di giacitura passando da rovesci a diritti. Non si esclude la possibilità della presenza di strutture con rigetto inverso in corrispondenza del nucleo della piega.

4.0. Dati geotecnici e geofisici

Dal rilievo geologico e geomorfologico eseguito nell'area di Palazzuolo sul Senio in località capoluogo e nelle frazioni principali erano emerse alcune problematiche e diversi aspetti da definire con l'obiettivo di ricostruire in maniera dettagliata il modello geologico di sottosuolo attraverso la parametrizzazione dei terreni investigati e la ricostruzione delle geometrie sepolte.

In primo luogo si è cercato di definire i depositi di copertura superficiali (detrito di versante, depositi alluvionali) e di fornire la geometria dei corpi assieme ad una necessaria parametrizzazione geofisica.

In base alle indagini eseguite si è potuto definire la morfologia e i rapporti dei vari bacini di sedimentazione analizzando in particolare i fenomeni di amplificazione sismica sia di natura stratigrafica che dovuta a morfologie sepolte.

Inoltre un'ulteriore problematica che è stata affrontata è connessa alla conoscenza della profondità del bedrock sismico e alla determinazione dello spessore e dei parametri dinamici (soprattutto V_{SH}) delle coperture alluvionali e dei depositi detritici di versante presenti al di sopra. Ciò è particolarmente importante nell'area di bordo della valle dove lo spessore della copertura tende a rastremarsi ed assottigliarsi e pertanto poteva contribuire a provocare importanti fenomeni di amplificazione sismica sia di natura stratigrafica che dovuta a morfologie sepolte.

Infine risulta necessario comprendere anche le complesse strutture tettoniche (anche sepolte) presenti nell'area. Dai rilievi geologici eseguiti erano infatti stati individuati vari passaggi tra Unità tettoniche diverse e tra aree nelle quali il substrato si presentava talora a giacitura diritta e talora rovescia.

Sono stati così individuati alcuni contatti tettonici mediante faglia diretta o sovrascorrimento generalmente con direzione prevalente NW-SE

Per approfondire tali problematiche e soprattutto per determinare spessori, geometrie e parametri dinamici (in particolare le velocità V_{SH}) sono state quindi svolte successive campagne di indagini geofisiche di sismica a rifrazione in onde P e SH, indagini geotecniche e geofisiche in foro di tipo down-hole con onde P e SH e prove di laboratorio sui campioni indisturbati prelevati nel corso dei sondaggi geotecnici.

Nello specifico le campagne di indagini sono riassunte nella tabella allegata (Tab.4a,b,c) e sono state le seguenti:

- a) campagna di indagini di sismica a rifrazione per il *Programma di Valutazione della Vulnerabilità sismica delle aree produttive (Programma DOCUP Toscana 2000-2006 – Prog. d'area Prov. di Firenze)*, eseguita nel Novembre del 2004 (n.2 linee di sismica a rifrazione);
- b) campagna di indagini di sismica a rifrazione per il *Programma di Valutazione della Vulnerabilità sismica degli Edifici Strategici e rilevanti, Ordinanza n.3362 del 08/07/04 (Palazzo Municipale e Scuola Materna "San Francesco")*, eseguita nel Novembre del 2006 (n.2 linee di sismica a rifrazione);
- c) campagna di indagini geotecniche e geofisiche in foro per il *Programma di Valutazione della Vulnerabilità sismica degli Edifici Strategici e rilevanti, Ordinanza n.3362 del 08/07/04 (Palazzo Municipale e Scuola Elementare e Media "D. Campana")*, eseguita nel Marzo del 2007 (n.2 sondaggi + DH + analisi di laboratorio);

Infine per la predisposizione del presente di *studio di Microzonazione Sismica dei centri urbani* è stato necessario realizzare ulteriori n.6 linee sismiche a rifrazione (ST5-6-7-8-9-10). Tali indagini sono state realizzate nelle località Quadalto e nell'area del capoluogo.

I risultati di tutte le indagini geofisiche, geotecniche e geofisiche in foro sono riportati nel DVD Allegato.

Tab.4a – Elenco delle linee sismiche realizzate

LOCALITA'	SIGLA	LUNGHEZZA	DATA ESECUZIONE	DATA CONSEGNA	IMPRESA	PROGRAMMA	SIGLA BANCA DATI
Capoluogo	ST1	72	set-04	23/11/2004	Igetecma.	DOCUP	PSpsh1_DOCUP_ST1
Capoluogo	ST2	120	set-04	23/11/2004	Igetecma.	DOCUP	PSpsh2_DOCUP_ST2
Capoluogo	ST3	120	ott-06	10/01/2007	Geof. Tosc.	VEL	PSpsh3_VEL_ST3
Capoluogo	ST4	96	ott-06	10/01/2007	Geof. Tosc.	VEL	PSpsh4_VEL_ST4
Capoluogo	ST5	96	lug-12	27/07/2012	Igea sas	VEL	PSpsh5_VEL_ST5
Capoluogo	ST6	120	lug-12	27/07/2012	Igea sas	VEL	PSpsh6_VEL_ST6
Quadalto	ST7	120	lug-12	27/07/2012	Igea sas	VEL	PSpsh7_VEL_ST7
Quadalto	ST8	120	lug-12	27/07/2012	Igea sas	VEL	PSpsh8_VEL_ST8
Quadalto	ST9	120	lug-12	27/07/2012	Igea sas	VEL	PSpsh9_VEL_ST9
Quadalto	ST10	120	lug-12	27/07/2012	Igea sas	VEL	PSpsh10_VEL_ST10

Tab.4b – Elenco dei sondaggi e delle prove down-hole realizzate

LOCALITA'	SIGLA	PROF.	D.L.	IMPRESA	DATA ESECUZIONE	DATA CONSEGNA	PROGRAMMA	SIGLA BANCA DATI	DATA ESECUZIONE DH	IMPRESA DH
Capoluogo	S1	15	Calderini	Geotecnica Lav.	29/03/2007	31/08/2007	VEL	Sg1_VEL_S1	29/06/2007	Geofisica Tosc.
Capoluogo	S2	15	Calderini	Geotecnica Lav.	28/03/2007	31/08/2007	VEL	Sg2_VEL_S2	giu-07	Geofisica Tosc.

Tab.4c -Elenco delle analisi di laboratorio statiche e dinamiche eseguite sui campioni indisturbati prelevati

CANTIERE	Sondaggio	Campione	Profondità	Apertura	W	γ	G _s	GR Vaghiatura	GR Sedimentazione	LL/LP	RIC	EDO/CRS	DS/RS	CIU	CID	RC/TS	VTL	Ciclica	LOCALI
PALAZZUOLO SUL SENIO	S2	SH1	2.30-2.65	1	1	1	1	1	1										
TOTALE PROVE				1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

LEGENDA

DC	Apertura e descrizione campione
W	Contenuto in acqua
γ_u	Peso di volume
G _s	Peso specifico dei granuli
GR_vaglio	Caratterizzazione granulometrica per vagliatura
GR_sedim	Caratterizzazione granulometrica per sedimentazione
LLP	Limiti di liquidità e plasticità
EDO	Edon edro ad incremento di carico (LL) e a velocità di deformazione costante (CRS)
CRS	Edon edro a velocità di deformazione costante (CRS)
DS/RS	Taglio diretto (DS) o taglio anulare (RS)
UU	Triassiale non consolidata e rottura non drenata
CIU-CRDU	Prova triassiale consolidata isotropica/ente/anisotropica e rottura non drenata
CID-CRCD	Prova triassiale consolidata isotropica/ente/anisotropica e rottura drenata
RC	Colonna risonante
TS	Taglio torsionale ciclico
TI-CICLICA	Prova triassiale ciclica
VTL	Misura del tempo di propagazione delle onde di taglio V _s
PR-LOCALI	Prova triassiale consolidata isotropica/ente/anisotropica, rottura drenata/non drenata con n _v variabile

Parallelamente all'esecuzione della campagna geofisica di superficie è stata condotta monitoraggio sismometrico (Vedi risultati in DVD allegato) a cura del DST dell'Università di Firenze. L'analisi è stata realizzata mediante l'utilizzo di sette stazioni sismiche triassiali appartenenti alle rete mobile del Laboratorio di Geofisica Sperimentale del Dip.to di Scienze della Terra, che sono state installate in 11 diversi siti di indagine distribuiti uniformemente sul territorio ed in accordo con le condizioni geologiche del territorio (vedi carta delle indagini per la relativa ubicazione). I siti sono stati scelti mediante sopralluoghi congiunti con i tecnici del Coordinamento Regionale Prevenzione Sismica della Regione Toscana.

Ogni stazione sismica utilizzata è costituita da un digitalizzatore Guralp a 24 bits e un sismometro triassiale Lennartz 3D/5sec con sensibilità di 400 V/m/s e frequenza di oscillazione propria di 0.2 Hz.

Mediante tali stazioni è stato possibile valutare il rapporto spettrale tra la componente orizzontale e quella verticale del rumore sismico registrato (HVSR); ciò al fine di poter valutare qualitativamente l'amplificazione delle onde sismiche nella coltre sedimentaria, nell'ipotesi che la componente verticale del rumore non subisca significative variazioni.

Tutte le indagini eseguite, come risulta dalle tabelle riepilogative sono state realizzate da imprese specializzate nel settore attraverso procedure di appalto pubblico coordinate dal Comune di Palazzuolo sul Senio oppure dalla Regione Toscana; sono state successivamente validate da apposita Commissione di Collaudo costituita da rappresentanti della comunità scientifica nazionale sia per gli aspetti di natura geologico-stratigrafica, sia per gli aspetti di natura geofisica e geotecnica e sono disponibili in formato .pdf sul seguente sito web:

<http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/indagini/mugello/palazzuolo/palazzuolo.htm>

Inoltre, in aggiunta a tutte le suddette indagini geognostiche realizzate nell'ambito del Programma VEL che forniscono le principali informazioni per la caratterizzazione del modello geologico di sottosuolo, è stata effettuata un'operazione di recupero dei dati geognostici pregressi mediante la consultazione di tutti gli archivi esistenti.

Nello specifico sono stati consultati e acquisiti i seguenti dati:

- n.3 pozzi ad uso idropotabile con stratigrafia reperiti dall'archivio pozzi della Provincia di Firenze (sono presenti ulteriori n.2 pozzi, ma ubicati al di fuori dell'area di indagine);
- n.1 pozzo profondo a scopo petrolifero reperito dall'archivio della Banca Dati Regione Toscana (ma scartato in quanto ubicato al di fuori dell'area di indagine).

5.0. Modello del sottosuolo

A seguito di tutte le indagini geologiche, geofisiche e geotecniche svolte nell'area di indagine del Comune di Palazzuolo sul Senio, sono stati ricostruiti per ciascuna area dei modelli geologici, geofisici e geotecnici di sottosuolo; definendo altresì la/e sezione/i geologica/che rappresentativa/e dell'area e fornendo una parametrizzazione geofisica e geotecnica di riferimento. Naturalmente è opportuno sottolineare che tale parametrizzazione poiché deriva dalle indagini eseguite risulta indicativa e non deve quindi essere utilizzata a scala di progettazione.

Come indicato nel capitolo precedente le indagini sono state effettuate tutte nell'area del capoluogo di Palazzuolo, nella frazione Quadalto e nell'area industriale a nord-est del capoluogo.

I sondaggi geognostici (S1 e S2) e metà delle stese di sismica a rifrazione (ST3 e ST4) svolte hanno riguardato il **centro abitato di Palazzuolo**. Dalle indagini svolte opportunamente integrate tra loro e con l'ausilio dei rilievi geologici eseguiti nell'area emerge la presenza di coperture caratterizzate principalmente da depositi alluvionali attuali (**b**) antichi terrazzati e recenti (**b_{1-n}**) con spessori massimi intorno ai 10m e, nelle vicinanze, da detrito di versante (**a**), da depositi di conoide alluvionale (**m**) e da depositi di frana (**a1**).

Le indagini non hanno interessato i **depositi alluvionali attuali (b)** in quanto presenti esclusivamente all'interno dell'alveo del F. Senio. I **depositi alluvionali antichi terrazzati e recenti (b_{1-n})** sono costituiti da tre ordini di terrazzo: gli ordini 2 e 3, compresi tra le alluvioni attuali e il detrito alla base dei versanti, sono ubicati lungo il corso del fiume, il primo ordine, a quote più elevate, è presente in un piccolo lembo all'interno della biforcazione tra il Fiume Senio e il Fosso Visano. Tali depositi costituiti da clasti angolosi arenacei in matrice limoso-sabbiosa, e subordinatamente ghiaie, sabbie e limi, presentano spessori di 5-6 metri presso il centro storico e spessori variabili tra 5 m e 10 m verso l'area produttiva più a Nord. Le velocità delle onde SH per questi depositi alluvionali si attestano tra 200-460 m/s e i valori medi di SPT oscillano tra 14 a 36 colpi.

Vedi sezioni geologiche AA' e BB' in fig. 5.2 e 5.3 e relativa ubicazione in fig. 5.1.

Per quanto concerne il **detrito di versante (a)**, che costituisce delle ampie fasce di raccordo tra i pendii e il fondovalle e che si deposita anche all'interno degli impluvi, questo è caratterizzato da matrice con granulometria da sabbia limosa a sabbia grossolana con abbondanti inclusi di natura siltitica ed arenitica.

La particolare situazione geologica e geomorfologica favorisce la formazione di movimenti gravitativi, alcuni stabilizzati naturalmente e altri ritenuti quiescenti, molto frequenti sui entrambi i versanti all'interno dell'area del Comune di Palazzuolo sul Senio. Infatti, tra i fattori in grado di favorire l'innescio di movimenti franosi si possono considerare: la stretta valle generata dal Fiume Senio, caratterizzata da versanti con pendenze di 20-30°; la natura litologica dei membri appartenenti alla Formazione Marnoso-Arenacea, costituita dall'alternanza di strati competenti di arenaria e di strati plastici e meno competenti di argilliti e siltiti. I movimenti franosi più frequenti nell'area sono gli scivolamenti traslazionali (data la stratificazione tipica dei litotipi presenti), scivolamenti rotazionali e colamenti, che interessano in particolare le coperture o le porzioni più superficiali dei terreni. Tuttavia, poiché i fenomeni gravitativi non interessano direttamente aree urbanizzate, non sono state programmate ed eseguite indagini che ci permettano di fornire parametri geotecnica e geofisici dei corpi di frana.

Il substrato roccioso è costituito dalla **Formazione della Marnoso-Arenacea** e più dettagliatamente dal **Membro di Corniolo (FMA2)** e dal **Membro di Premilcuore (FMA3)** nella porzione meridionale dell'area indagata, nella porzione settentrionale affiora il **Membro di Biserno (FMA1)** che presenta una V_s media intorno agli 800m/sec e che poggia tramite un *thrust*, indicato anche nella relativa sezione geologica BB' in fig. 5.3, sul sottostante **Membro di Collina (FMA5)**. Affioramenti del *bedrock* sono ben visibili lungo gli acclivi pendii anche lungo l'alveo del Torrente Moscia a testimonianza degli esigui spessori dei depositi alluvionali e dell'alta energia, che comporta fasi di erosione, del corso d'acqua. Le velocità delle onde SH misurate per il substrato sano oscillano intorno ai 1200 m/s per la formazione FMA5, e quindi è possibile definirlo *bedrock* sismico.

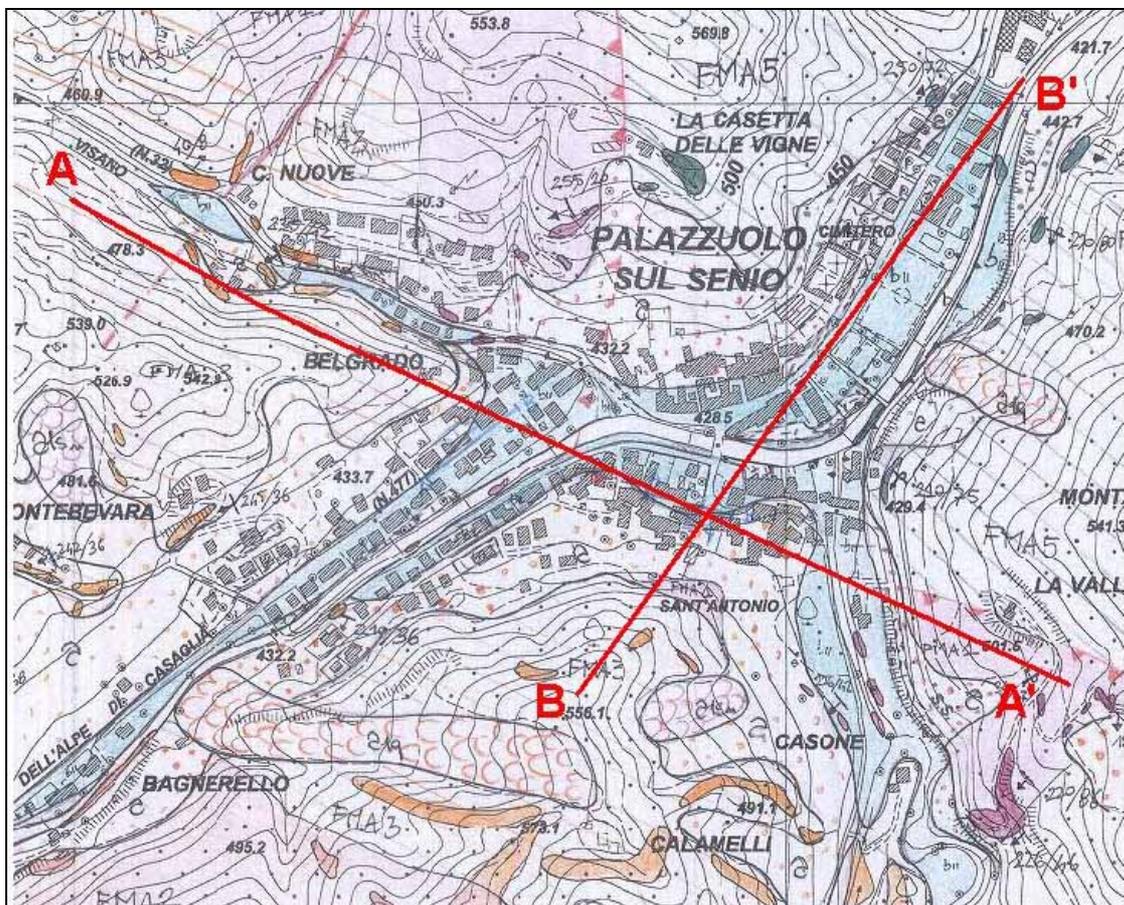


Fig. 5.1: Ubicazione delle sezioni geologiche nel centro abitato di Palazzuolo sul Senio.

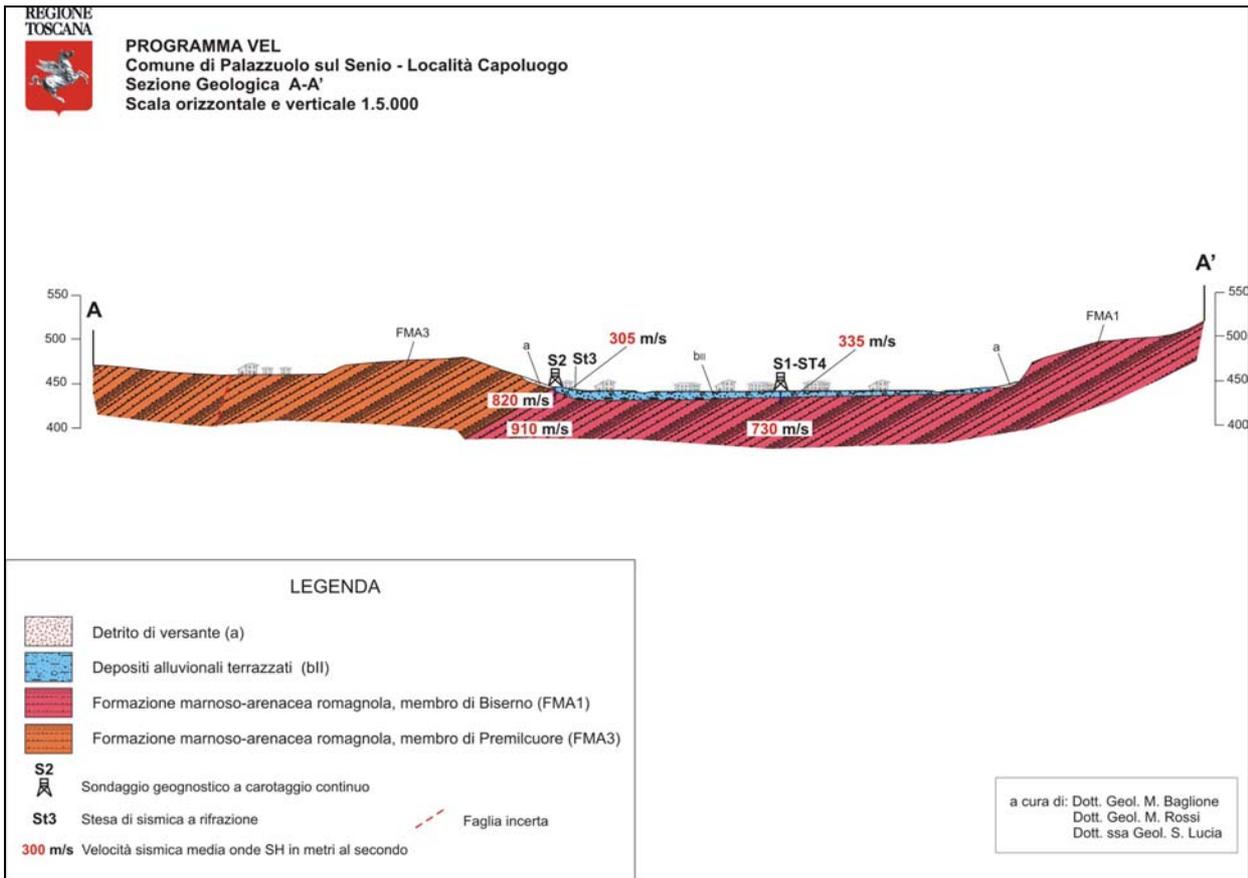


Fig. 5.2: Sezione geologica AA¹ trasversale alla valle del Fiume Senio presso il Capoluogo.

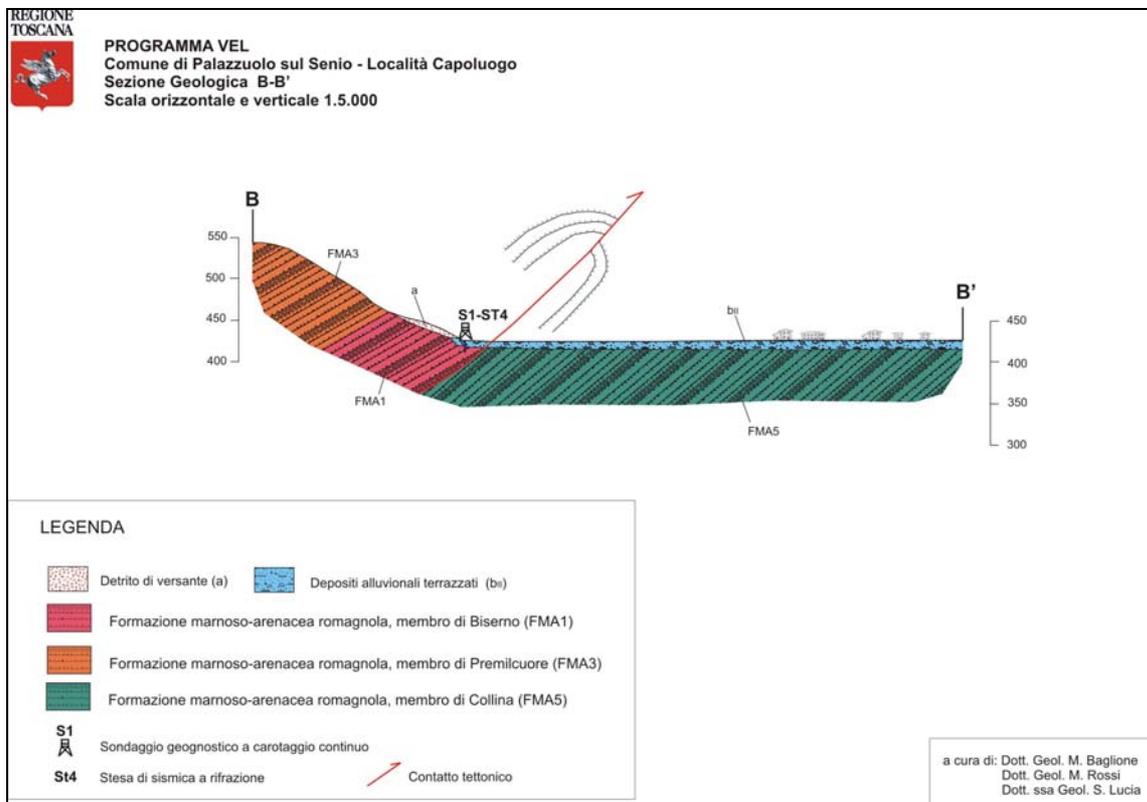


Fig. 5.3: Sezione geologica BB¹ longitudinale alla valle del Fiume Senio presso il Capoluogo.

L'area produttiva di Palazzuolo sul Senio, ubicata a Nord del centro storico e all'interno delle medesima valle del Fiume Senio, presenta una situazione geologica e strutturale molto simile a quella esaminata in precedenza. In questa zona sono state eseguite 2 stese di sismica a rifrazione (ST1 e ST2) che, unite al rilevamento geologico e geomorfologico effettuato dall'Università di Firenze, hanno permesso di fare delle ipotesi sull'andamento del substrato. La zona industriale si sviluppa in prevalenza lungo la pianura alluvionale caratterizzata dai **depositi fluviali antichi terrazzati e recenti (b_{1-n})**. Più precisamente nell'area in esame affiora il terrazzo intermedio del secondo ordine, caratterizzato da ciottoli in matrice limoso-sabbiosa, ghiaie, sabbie e limi. Lo spessore è compreso tra 5 e 10 metri e le Vs oscillano intorno ai 350 m/sec.

Inferiormente ai depositi alluvionali è stato individuato il substrato roccioso ad una profondità variabile dai 5 ai 10m dal piano di campagna e costituito alternativamente da membri della **Formazione marnoso-arenacea romagnola (FMA)**. A Sud, presso il cimitero e la località "Casetta delle Vigne", affiora il **Membro di Collina (FMA5)**, più a Nord, presso località "La Maestà" e "Vaiorsoli", sono presenti due fasce della **Litofacies di Toncone (FMA8a)**, immergenti verso SW, e separate da una fascia intermedia del **Membro di Nespoli (FMA8)**. A Nord è stata riconosciuta una sinforme rovesciata con vergenza verso NE e con superficie di piano assiale immergente a SW (vedi sezione geologica in fig. 5.5 e relativa ubicazione cartografica in Fig. 5.4).

Le due stese acquisite hanno permesso di fornire informazioni sulle velocità delle onde SH nel substrato, costituito in entrambi i casi dalla **Litofacies di Toncone (FMA8a)**, che si attestano intorno ai 1400 m/sec e rappresenta quindi un evidente *bedrock* sismico.

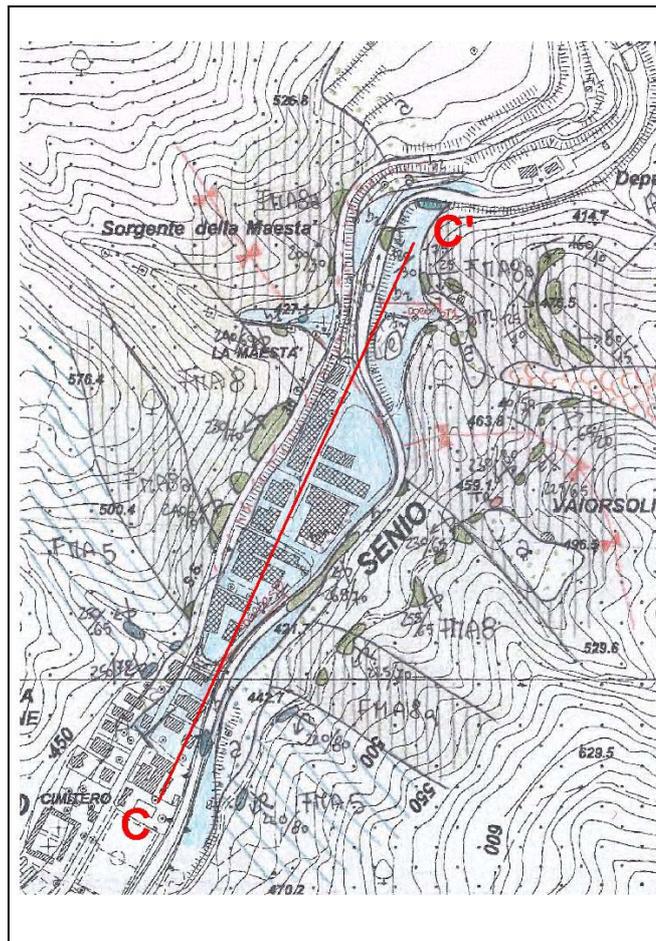


Fig. 5.4: Ubicazione della sezione geologica CC' presso l'area produttiva di Palazzuolo sul Senio.

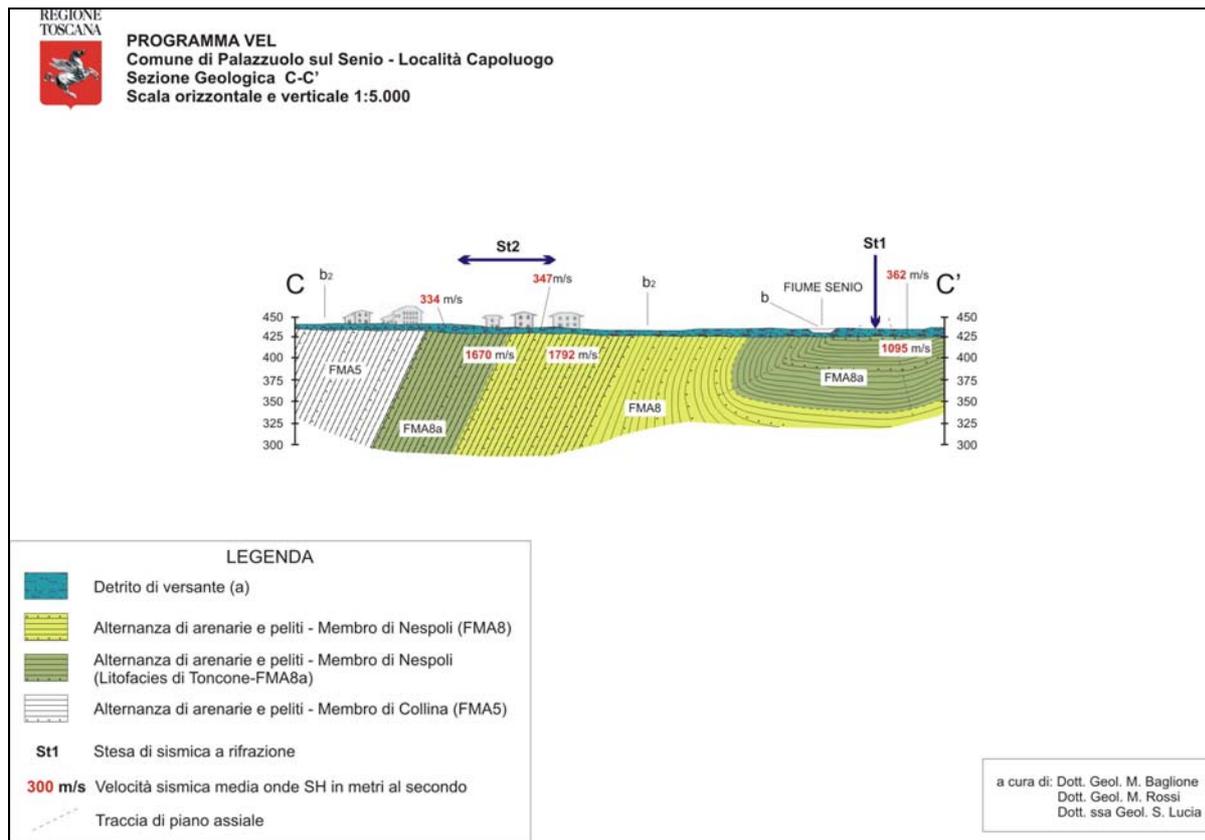


Fig. 5.5: Sezione geologica CC¹ longitudinale alla valle del Fiume Senio presso l'area produttiva.

Per quanto riguarda infine la località di **Quadalto**, sono state eseguite n.4 linee sismiche (ST7-8-9-10), ubicate sia in corrispondenza dei depositi detritici di bordo valle, sia sui depositi alluvionali. Tali indagini hanno evidenziato una piana alluvionale caratterizzata dai **depositi fluviali antichi terrazzati e recenti (b_{1-n})** con spessori intorno ai 7-10m e Vs che oscillano intorno ai 350 m/sec. In corrispondenza della base del versante ubicato a nord-ovest dell'area è presente una estesa **copertura detritica di versante (a=dt)**, come è possibile vedere nella sezione DD' in fig. 5.7 e ubicata in fig. 5.6, con spessori che variano tra i 3m e i 10m e con Vs medie intorno ai 330m/sec. Per quanto concerne il substrato roccioso, questo è costituito dalla **Formazione della Marnoso-Arenacea** e più dettagliatamente dal **Membro di Corniolo (FMA2)** e dal **Membro di Premilcuore (FMA3)** nella porzione meridionale dell'area indagata. Il primo presenta una Vs media intorno ai 110m/sec, mentre il secondo (FMA3) presenta una Vs media superiore che arriva addirittura fino a circa 2000-2200m/sec nell'area del "Santuario della Madonna della Neve" in cui sono stati individuati forti contrasti di impedenza sismica tra copertura alluvionale e substrato roccioso.

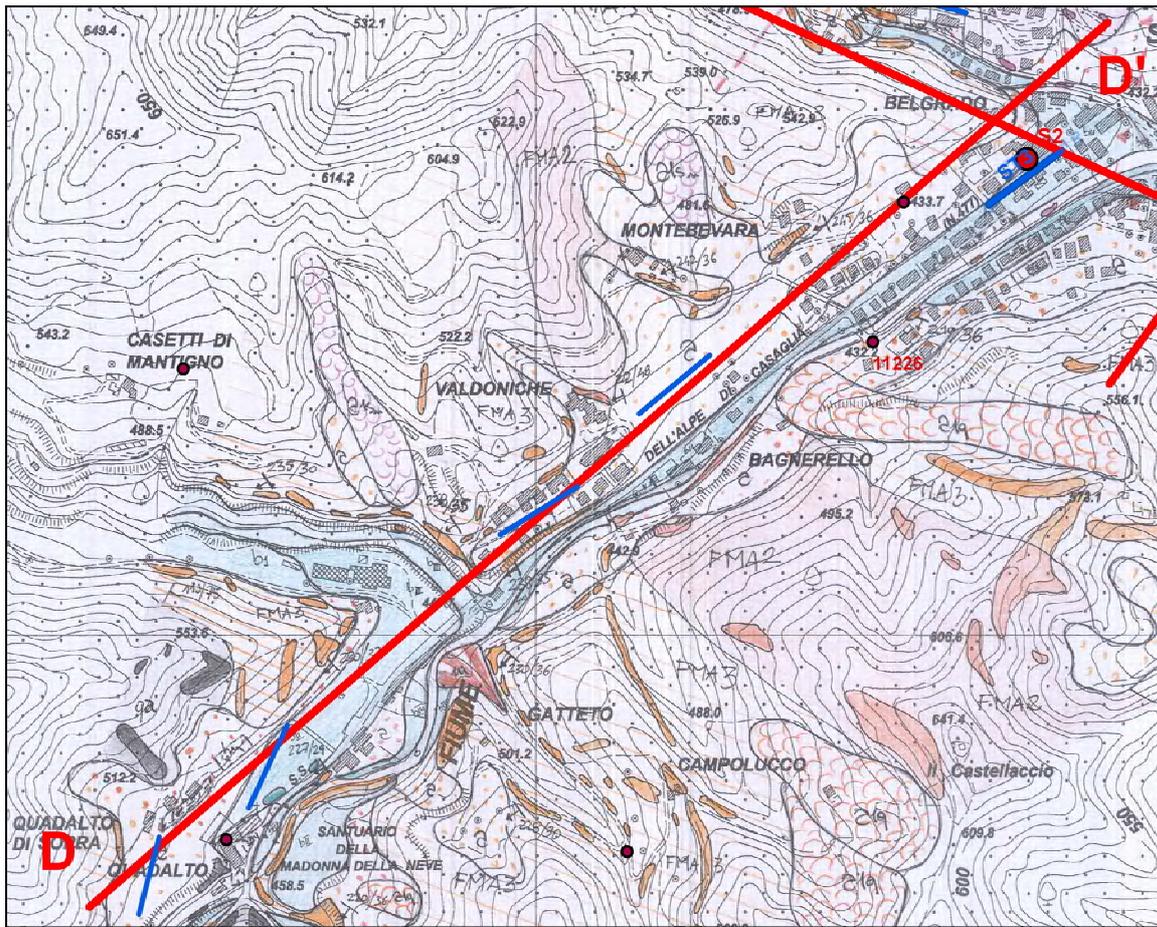


Fig. 5.6: Ubicazione della sezione geologica DD' di Quadalto.

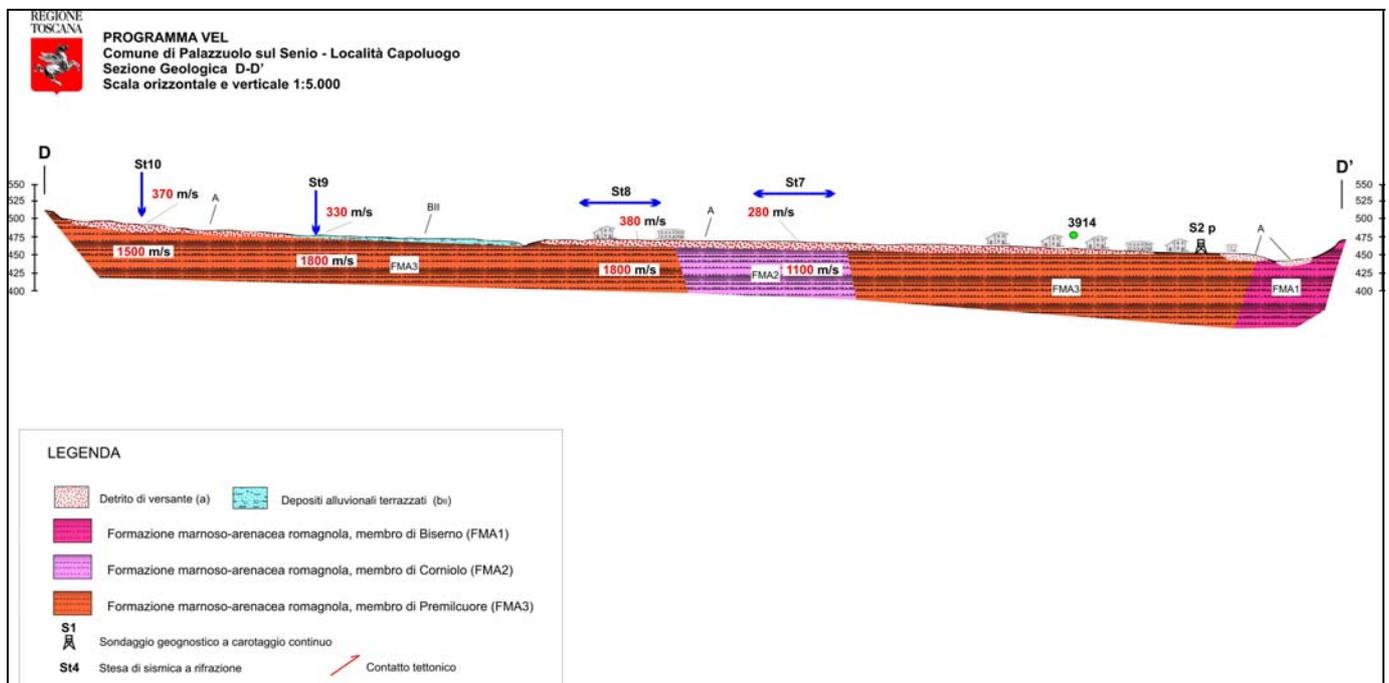


Fig. 5.7: Sezione geologica DD' presso la località Quadalto.

Le sezioni geologiche AA'-BB'-CC'-DD', le cui ubicazioni sono riportate in figg. 5.1-5.4-5.6, sono riportate integralmente nel DVD Allegato.

Al modello geologico di sottosuolo definito sulla base dei rilievi geologici realizzati e delle indagini geognostiche e rappresentato sulla base delle n. 4 sezioni geologiche rappresentative, è stata associata una parametrizzazione geofisica media suddivisa per le varie formazioni geologiche e distinta nelle fig. 5.8 e 5.9 tra i parametri desunti dalle indagini geofisiche di superficie da quelli ricavati dalle indagini geofisiche in foro.

Questi parametri sono stati usati per le analisi di modellazione bidimensionali.

E' importante precisare che tali parametri sono valori mediati tra tutti quelli disponibili all'interno del Comune. Nelle sezioni geologiche rappresentative i valori geofisici riportati sono invece desunti dalle prove geofisiche eseguite in corrispondenza delle verticali stesse.

Velocità sismiche medie (desunte dalle sole prove down-hole) per la varie formazioni geologiche				
litologia	formazione	sigla	Vp	Vs
Depositi alluvionali quaternari costituiti da ciottolami e sabbie con spessori variabili fino a 8-10m	Depositi alluvionali terrazzati	bn	735	370
Formazione torbiditico-arenacea con rapporto A/P generalmente tra 1/3 e 1/5.	Formazione Marnoso-Arenacea - Membro del Biserno	FMA1	1710	775

Fig. 5.8 – Velocità geofisiche medie delle diverse formazioni geologiche, desunte dalle prove down-hole eseguite

Velocità sismiche medie (desunte dalle stese sismiche di superficie) per la varie formazioni geologiche				
litologia	formazione	sigla	Vp	Vs
Depositi granulari di versante, prevalentemente di natura grossolana e spessore intorno ai 10m	Depositi detritici di versante	a	540	330
Depositi alluvionali quaternari costituiti da ciottolami e sabbie con spessori variabili fino a 8-10m	Depositi alluvionali terrazzati	bn	750	350
Formazione torbiditico-arenacea con rapporto A/P generalmente tra 1/3 e 1/5.	Formazione Marnoso-Arenacea - Membro del Biserno	FMA1	2530	900
Formazione torbiditico-arenacea con rapporto A/P generalmente tra 1/3 e 1/2.	Formazione Marnoso-Arenacea - Membro di Corniolo	FMA2	2800	1110
Formazione torbiditico-arenacea con rapporto A/P generalmente inferiore a 1 fino a circa 2.	Formazione Marnoso-Arenacea - Membro del Premilcuore	FMA3	2990	1460
Formazione torbiditico-arenacea con rapporto A/P generalmente inferiore a 1/3 e 1/5. Il membro è prevalentemente pelitico con areniti in livelli sottili, più rari spessi.	Formazione Marnoso-Arenacea - Membro di Collina	FMA5	2110	1185
Formazione torbiditico-arenacea, prevalentemente arenacea con rapporto A/P quasi sempre maggiore di 1. La Litofacies di Toncone è costituita da una alternanza di peliti e subrodinate arenarie.	Formazione Marnoso-Arenacea - Membro di Nespoli, litofacies di Toncone	FMA8a	3210	1400

Fig. 5.9 – Velocità geofisiche medie delle diverse formazioni geologiche, desunte dalle stese di sismica a rifrazione realizzate

6.0. Interpretazioni ed incertezze

Nell'ambito di uno studio di microzonazione sismica particolare attenzione deve essere posta alla numerosità e qualità dei dati geognostici che si hanno a disposizione. Tale aspetto influisce certamente sia sulle interpretazioni geologiche che verranno effettuate nelle fasi di analisi e di sintesi dei dati, sia nella gestione delle eventuali incertezze.

Sulla base dei molteplici dati a disposizione nell'ambito del presente studio e in relazione alla buona qualità di molte indagini (in quanto perlopiù desunte dal Programma VEL), si ritiene che il grado di dettaglio dello studio sia sufficientemente affidabile e che le interpretazioni e le incertezze siano comunque contenute in funzione al grado di approfondimento dello studio che si intende perseguire.

Fermo restando quanto evidenziato, naturalmente vi sono alcuni aspetti critici che potrebbero essere approfonditi in fasi successive e che si riassumono nei seguenti punti:

- maggiore precisione nella ricostruzione e perimetrazione della formazione dello “Slump di Quadalto” che, rispetto ai rilievi geologici preliminari, pare di estensione più contenuta arealmente.
- Identificazione in modo più dettagliato del contatto tettonico per sovrascorrimento tra la formazione FMA1 e FMA5, nell'area del centro storico di Palazzuolo, mediante ulteriori indagini (es. geoelettrica, sismica a riflessione...).

7.0 Metodologie di elaborazione e risultati

I dati acquisiti con il rilevamento geologico e con le indagini geofisiche e geotecniche in sito e di laboratorio vengono raccolti ed organizzati in una **banca dati geografica (Geographic Information System, "GIS")**.

Lo scopo è quello di poter gestire un quantitativo ingente di informazioni provenienti da diverse discipline e di integrare tali dati in modo oggettivo e dinamico, in modo da poterli modificare e aggiornare nel corso del progetto ed utilizzarli per scopi diversi, quali la semplice rappresentazione cartografica, l'estrazione dei dati sulla base di specifiche richieste dell'utente o l'analisi con diversi metodi.

La banca dati si sviluppa secondo due filoni strettamente dipendenti:

- 1) la banca dati geografica delle cartografia, geologica, geomorfologica e litotecnica ;
- 2) la banca dati delle indagini geognostiche, geotecniche e geofisiche.

Per strutturare la banca dati è stato preso come riferimento lo “*Standard di rappresentazione e archiviazione informatica*” (versione 2.0 – Giugno 2012) del Dip.to della Protezione Civile Nazionale prodotto dalla “Commissione Tecnica per la Microzonazione Sismica” costituita ai sensi dell'art.5 comma 7 dell'OPCM 3907/2010.

Le entità cartografate vengono ricondotte a tre tipi di elementi geometrici: punti, linee, poligoni. Uno strato informativo è costituito da una tipologia di elementi geometrici (solo punti, solo linee, solo poligoni) connessi ad elementi descrittivi (tabelle). La digitalizzazione viene fatta con ArcGIS 9.2 View, la correzione geometrica e topologica viene effettuata con ArcInfo.

La banca dati geotecnica e geofisica è stata organizzata in un DBMS unico per le due tipologie di indagini: quelle riconducibili in un piano ad elementi puntuali (sondaggi geotecnici, prove down-hole, prove penetrometriche) ed ad elementi lineari (sismica a rifrazione). La banca dati è stata

strutturata in modo da permettere l' estrazione e l' utilizzo delle informazioni inserite per l' analisi integrative attraverso sistemi GIS. Per ogni punto di indagine vengono inserite le coordinate geografiche nel sistema Gauss-Boaga, in modo di legare le informazioni descrittive a forme geometriche georeferenziate attraverso specifiche operazioni di conversione.

Di seguito si riporta lo schema logico (Fig.7.1) delle relazioni che devono essere implementate tra le tabelle di tipo alfanumerico che servono per archiviare i dati dei siti relativi alle indagini (puntuali e lineari) ed ai parametri ad esse collegate. La relazione con gli shapefile è stabilita attraverso i campi ID_SLN (Tabella Sito_Lineare) e ID_SPU (Tabella Sito_Puntuale). Ogni tabella è definita in maniera univoca secondo le specifiche tecniche nazionali riportate nel suddetto documento.

La banca dati completa di tutte le indagini (sia pregresse che di nuova acquisizione), le cartografie tematiche prodotte, i layout predisposti e le basi dati sono archiviate secondo una struttura di archiviazione dei file in cartelle in maniera standard seguendo lo schema indicato in fig. 7.2

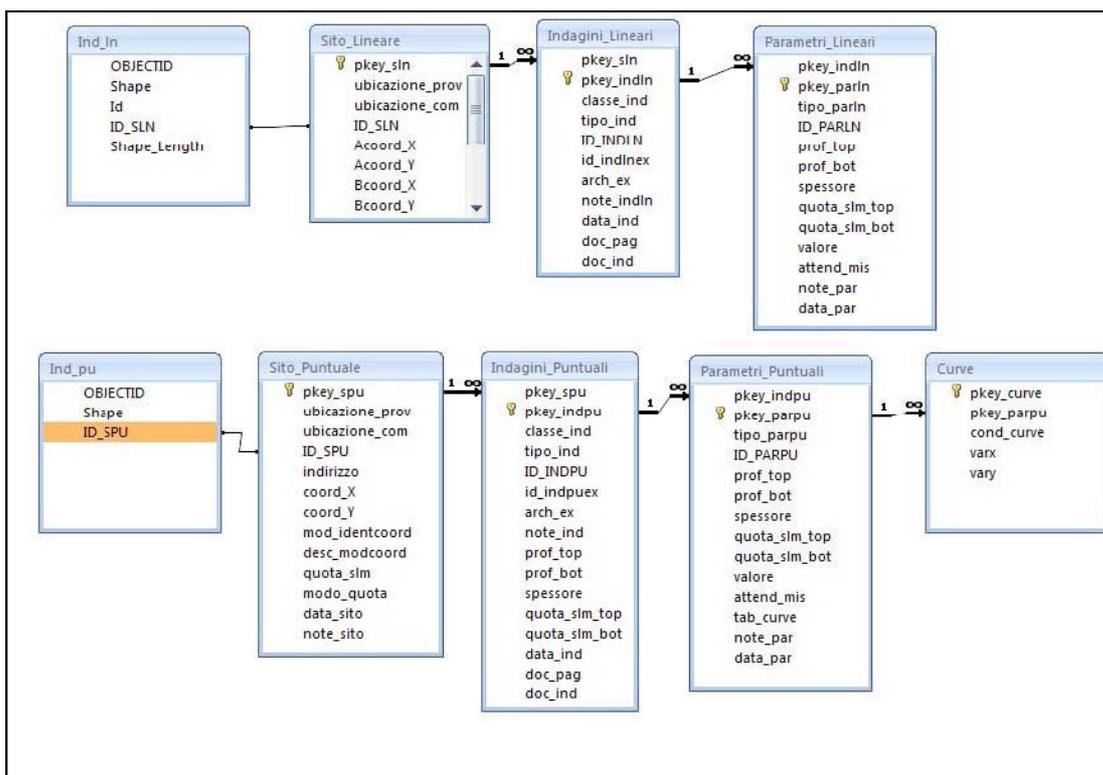


Fig. 7.1 – Relazione tra tabelle e shapefile

Nome cartella	Descrizione sintetica dei contenuti
<i>Nomecomune_S20</i>	Cartella principale contenente tutte le cartelle funzionali agli studi di microzonazione sismica. Questa cartella deve essere rinominata con il nome del Comune per il quale si sta eseguendo lo studio.
<i>BasiDati</i>	Nella cartella BasiDati andranno inserite le carte di base utilizzate (es. CTR) in formato <i>raster</i> o vettoriale georeferenziate.
<i>CLE</i>	Cartella contenente: <ul style="list-style-type: none"> • Gli <i>shapefile</i> per l'analisi cella CLE <ul style="list-style-type: none"> ○ CL_AC ○ CL_AE ○ CL_AS ○ CL_ES ○ CL_US • Il <i>database</i> CLE_db.mdb che contiene le tabelle relative alle schede: <ul style="list-style-type: none"> ○ scheda_ES ○ scheda_AE ○ scheda_AC ○ scheda_AS ○ scheda_US
<i>GeoTec</i>	Cartella contenente gli <i>shapefile</i> riferiti ad elementi geologici e idrogeologici: Epuntuali Elineari Forme Geoidr Geotec Cartella nella quale inserire il <i>raster</i> georeferenziato della Carta geologico – tecnica prodotta e il file "Legenda".
<i>Indagini</i>	Cartella contenente <ul style="list-style-type: none"> • gli <i>shapefile</i> delle indagini: <ul style="list-style-type: none"> ○ Ind_pu ○ Ind_ln • il database "CdI_tabelle" con le tabelle per l'archiviazione delle indagini • la cartella Documenti per inserire i documenti pdf delle Indagini_puntuali e delle Indagini_lineari
<i>MS1</i>	Contiene i seguenti <i>shapefile</i> Isosub Instab Stab
<i>MS2</i>	Identico contenuto della cartella MS1. Viene utilizzata per l'inserimento della Carta della microzonazione sismica di livello 2.
<i>MS3</i>	Identico contenuto della cartella MS1. Viene utilizzata per l'inserimento della Carta della microzonazione sismica di livello 3.
<i>Plot</i>	Cartella nella quale inserire file di stampa delle carte realizzate e la Relazione illustrativa.

<i>Progetti</i>	Cartella per eventuali progetti (per esempio .mxd realizzati in EsriArcGis®).
<i>Tools</i>	Cartella principale contenente la cartella “SoftCLE” nella quale è presente il pacchetto di installazione per il software di inserimento dati “softCLE”
<i>Vestiture</i>	Cartella per le vestiture realizzate (librerie e simboli). Al momento contiene “MS_CartaIndagini_20.style” utile alla rappresentazione cartografica dei simboli corrispondenti alle indagini. (Per utilizzare i file .style in ArcGis® selezionare lo StyleManager) Sono inoltre presenti i loghi della Conferenza delle regioni e delle Province Autonome e del Dipartimento della Protezione Civile, per il layout delle carte

Fig. 7.2 – Modalità di archiviazione dei file nelle cartelle all’interno della Banca Dati

Dall'insieme dei dati immagazzinati sono stati redatti ulteriori elaborati per la definizione della risposta sismica locale quali la cartografia delle Microzone Omogenee in prospettiva sismica a partire dagli elaborati di base (MOPS), la Carta delle Frequenze fondamentali dei depositi, la Cartografia geologico-tecnica per la Microzonazione Sismica e la Carta delle indagini. Tali cartografie sono state informatizzate seguendo le indicazioni, i criteri, le legende tipo e le colorazioni previste dagli “Standard di rappresentazione e archiviazione informatica” (versione 2.0 – Giugno 2012).

Tutte le indagini geognostiche eseguite nel Comune di Palazzuolo sul Senio, sono disponibili in formato .pdf sul seguente sito web:

<http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/indagini/mugello/palazzuolo/palazzuolo.htm>

dove è possibile scaricare gratuitamente le cartografie geologiche e geomorfologiche in scala 1:10.000 e 1:2.000 in formato raster georeferenziato (.ecw); le stese sismiche a rifrazione con onde P e SH (sia le sezioni sismostratigrafiche originali della ditta, sia quelle reinterpretate, sia le sezioni litostratigrafiche), i log-stratigrafici dei sondaggi geotecnici e i diagrammi delle dromocrone delle prove down-hole eseguite e i certificati delle prove statiche e dinamiche di laboratorio sui campioni indisturbati prelevati.

Tutti i dati geofisici ricavati dalle indagini geofisiche a rifrazione e geofisiche in foro di tipo down-hole sono stati diagrammati attraverso una serie di grafici al fine di verificarne la loro variabilità in relazione ai litotipi di riferimento.

I parametri elasto-dinamici presi in considerazione sono Vp, Vs e rapporto Vp/Vs.

A titolo esemplificativo si riporta in Fig. 7.3 e Fig. 7.4 la distribuzione per litotipi delle velocità delle onde di taglio in funzione delle velocità delle onde compressionali. In Fig. 7.3 è riportata la distribuzione delle velocità ricavate dalle indagini di sismica a rifrazione, in Fig. 7.4 le velocità ricavate dalle down-hole.

Osservando la distribuzione delle velocità ricavate dalle stese di sismica a rifrazione in onde P e SH (Fig. 7.3) si nota la presenza di gruppi di punti separati che contraddistinguono formazioni e litologie differenti sia dal punto di vista composizionale che dal punto di vista geofisico.

Infatti si notano depositi detritici (a), depositi di riporto (hr) e depositi alluvionali (bn) che presentano velocità delle onde di taglio sempre inferiori ai 400-450m/sec e che si contraddistinguono essenzialmente per le velocità delle onde di compressione Vp.

Il substrato roccioso presenta invece velocità delle onde di taglio nettamente superiori e sempre (tranne che per una singola misura) superiori alla soglia del bedrock sismico (800m/sec). Nello specifico la formazione Marnoso-Arenacea, Membro del Biserno (FMA1) è quella che possiede le velocità più basse tra i vari bedrock presenti (intorno ai 900m/sec), mentre altri membri (FMA2 e

FMA5) possiedono velocità Vsh appena superiori ed intorno ai 1100-1200m/sec. I due membri FMA8a e FMA3 presentano infine le velocità più elevate, come è facilmente visibile in fig. 7.3.

Distribuzione Vp - Vsh ricavate dalle stese di sismica a rifrazione in onde P e SH

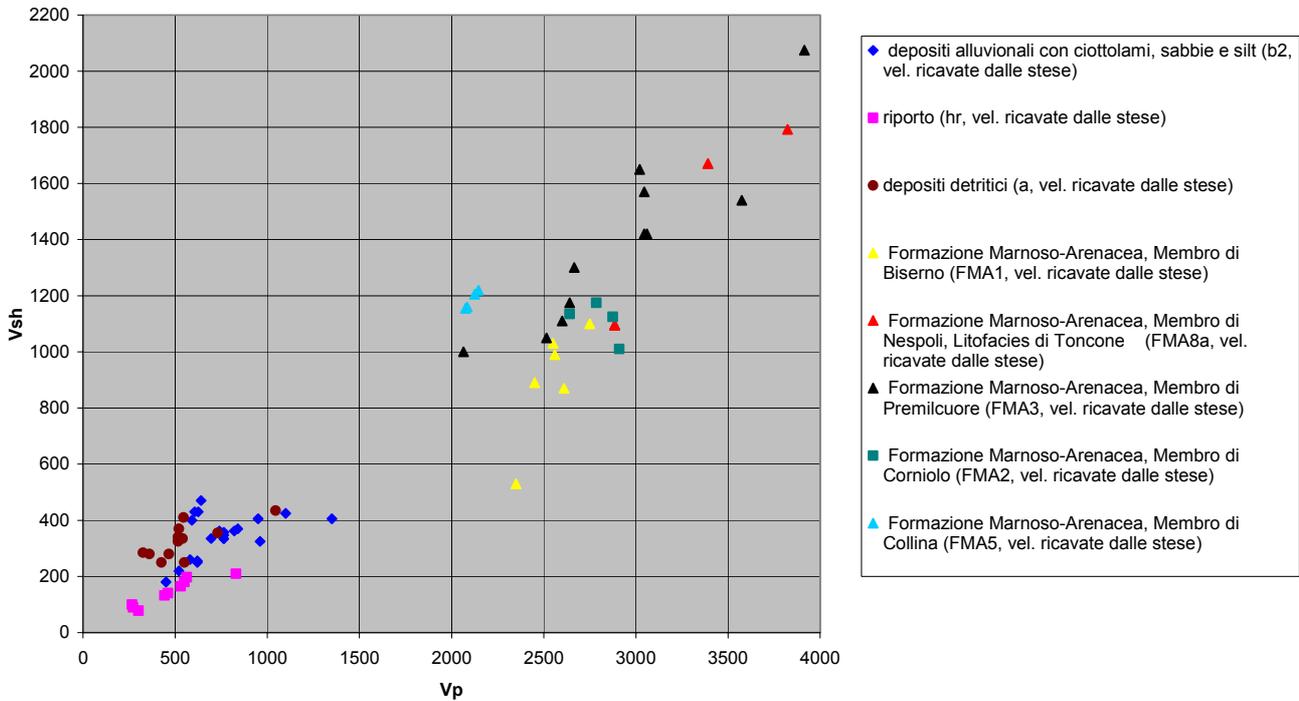


Fig.7.3– Distribuzione areale delle Vp e delle Vsh, ricavate dalle indagini di sismica a rifrazione in onde P e SH, in funzione delle litologie.

Relativamente alla distribuzione delle velocità ricavate dalle indagini di down-hole (vedi Fig. 7.4) si osserva come, analogamente al caso precedente, esiste una netta distinzione tra vari raggruppamenti di punti. Si distinguono un punto con bassi valori di velocità (valori appartenenti ai depositi di riporto) e due gruppi caratterizzato da velocità maggiori. Il gruppo dei depositi alluvionali occupa una posizione intermedia ma sempre con Vsh inferiore agli 800 m/s, mentre i punti appartenenti al substrato roccioso (FMA1, Membro di Biserno) presentano valori di velocità maggiori. Tuttavia, come accade anche nel grafico relativo ai valori ricavati dalle stese di sismica a rifrazione, alcuni valori appartenenti al substrato roccioso presentano valori inferiori a 800 m/s tipici di un substrato alterato. Tali valori sono da riferirsi alle due down-hole eseguite presso edifici nel centro storico di Palazzuolo sul Senio, entrambe in prossimità del sovrascorrimento cartografato.

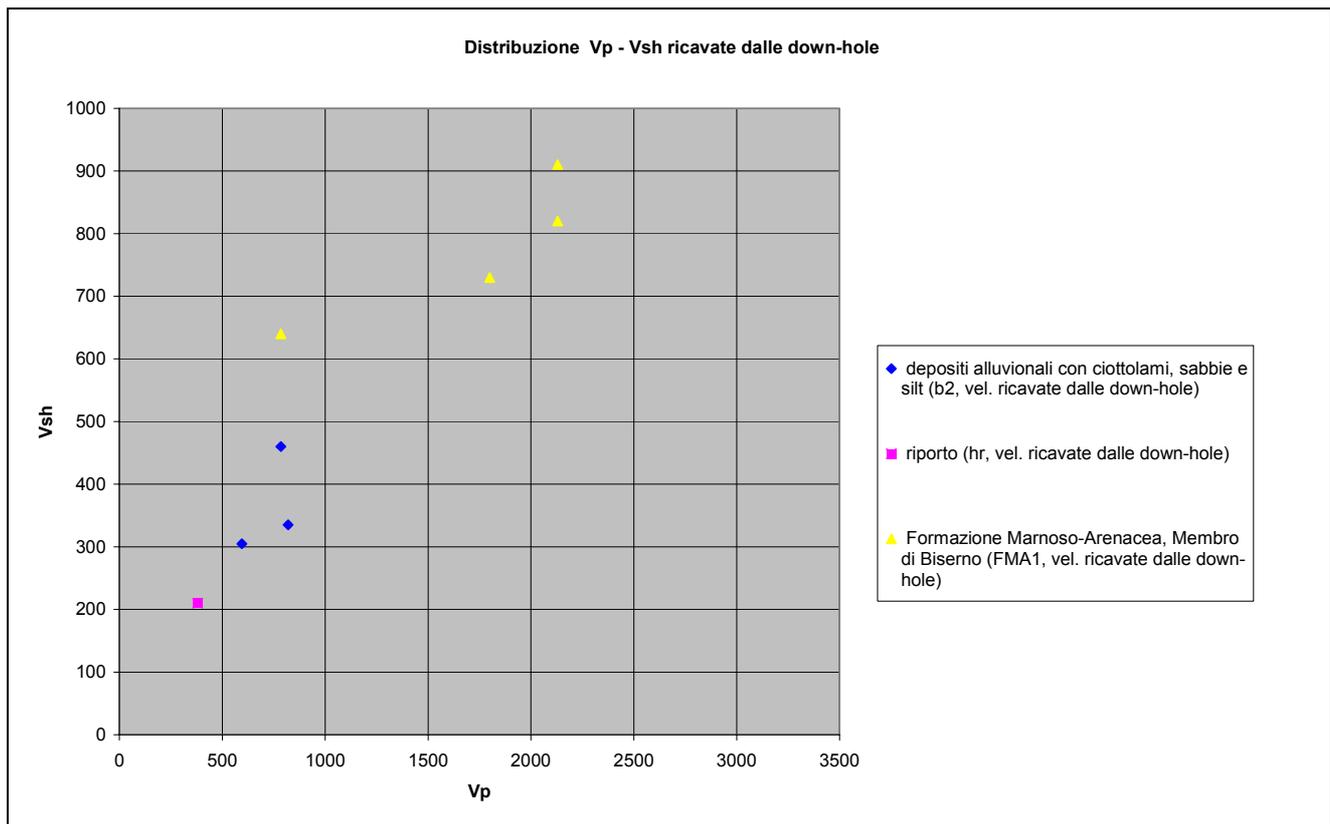


Fig.7.4 - Distribuzione areale delle Vp e delle Vsh, ricavate dalle indagini di *down-hole*, in funzione delle litologie.

7.1 – Analisi di risposta sismica locale

L'area del centro abitato di Palazzuolo sul Senio è stata oggetto di analisi di risposta sismica locale in assetto mono e bidimensionale, finalizzate alla redazione della cartografia di microzonazione sismica di livello 3.

Il fine principale è stato quello di stimare, mediante una procedura analitica (possibile grazie alla buona campagna di esplorazione multidisciplinare del sottosuolo, descritta nei precedenti capitoli) il valore del fattore di amplificazione dei terreni oggetto di indagine, ascrivibile sia a condizioni stratigrafiche e/o topografiche sia al contesto geometrico sepolto dell'area.

Infatti, le suindicate analisi sono state successivamente confrontate con i risultati delle omologhe modellazioni monodimensionali, per una valutazione disaggregata del contributo all'amplificazione sismica del sito degli aspetti di natura bidimensionale rispetto a quelli dovuti al semplice assetto sismostratigrafico.

In particolare, le analisi di modellazione dinamica in assetto bidimensionale sono state condotte mediante software agli elementi finiti QUAKE/W della Geostudio 2012. Esso consente di definire il comportamento dinamico del terreno con un modello lineare equivalente, il quale si basa su parametri rappresentativi delle proprietà elastiche ed isteretiche dei terreni in funzione della deformazione di taglio. Nei modelli lineari equivalenti, pur attenendosi ad una formulazione lineare "a tratti", si considerano gli effetti di non linearità e di dissipazione.

Tale software permette la digitalizzazione di sezioni geologo-tecniche, l'inserimento dei parametri geotecnico-geofisici delle formazioni geologiche presenti e la discretizzazione dei livelli individuati in elementi (mesh), le cui dimensioni sono stimate sulla base dei valori di velocità delle onde di taglio nello strato in esame, della massima frequenza che si vuole propagare e di un coefficiente di stabilità.

La sezione geologico-tecnica viene sottoposta, quindi, alla sollecitazione dinamica relativa ad ognuno dei 7 accelerogrammi spettro-compatibili ricavati con le procedure descritte nel capitolo 2.0.

La dimensione degli elementi finiti è stata stabilita (per ognuna delle sezioni analizzate) considerandola proporzionale alla minima lunghezza d'onda propagabile nel mezzo investigato (Kuhlemeyer & Lysimer, 1973). Pertanto, introducendo un coefficiente di stabilità k pari mediamente a 8 (Lanzo & Silvestri, 1999), possiamo indicare la dimensione massima di ogni elemento (D_{max}) come:

$$D_{max} = \lambda / 8 = 0.12 T V_s \quad (7.1)$$

Dove V_s viene ricavata dalle indagini geofisiche dirette illustrate per il sito in esame in tabella 7.1.1, mentre T è il periodo corrispondente alla minore onda sismica propagabile (si è ritenuto sufficiente il valore di frequenza pari a 20Hz), corrispondente a 0.05s che è quindi minor periodo per cui si può ritenere attendibile il dato di output.

Il parametro utilizzato nel presente lavoro ai fini della rappresentazione dei livelli amplificativi è il fattore di amplificazione di Housner (di seguito denominato FH) misurato come rapporto tra l'integrale dello spettro di accelerazione in output (PSA_{out}) ed l'omologo integrale dello spettro di accelerazione in input (PSA_{in}):

$$FH = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{in}(T) dT}$$

Considerate le caratteristiche medie dell'abitato di Palazzuolo sul Senio, si è ritenuto opportuno un intervallo di integrazione tra 0.1 e 0.5 secondi, corrispondente a valori in frequenza compresi tra 2 e 10 Hz.

Al fine di evitare l'occorrenza di fenomeni di bordo, le sezioni sottoposte ad analisi sono state estese nei loro estremi. Per una valutazione della distanza dai bordi in grado di garantire la stabilità della sezione in termini di spettri di risposta e relativi valori di FH sono stati eseguiti dei test preliminari, operando un confronto tra i risultati ottenuti sulla sezione C-C1 (l'unica sezione caratterizzata dall'assenza di substrato sismico affiorante sui due estremi) ponendo un'estensione dei bordi pari a 0m (utilizzo della sezione geologico-tecnica senza estensioni), 200m e 400m.

Il risultato in termini di FH è visibile in figura 7.5. Mentre il dato a 0m differisce dagli altri output per valori anche superiori al 10% (punto di output C2), le differenze tra il dato con estensione 200m e quello con estensione 400m è di fatto analogo, con differenze inferiori allo 0.3%. In parole povere, è possibile affermare che l'influenza esercitata dalla frontiera laterale, per i materiali costituenti gli strati di terreno appartenenti alla sezione in esame e per le geometrie in gioco, risulta trascurabile a partire da distanze superiori a 200 m.

Pertanto, si è ritenuto di utilizzare per le analisi bidimensionali nel comune di Palazzuolo sul Senio un'estensione dei bordi pari a 200m.

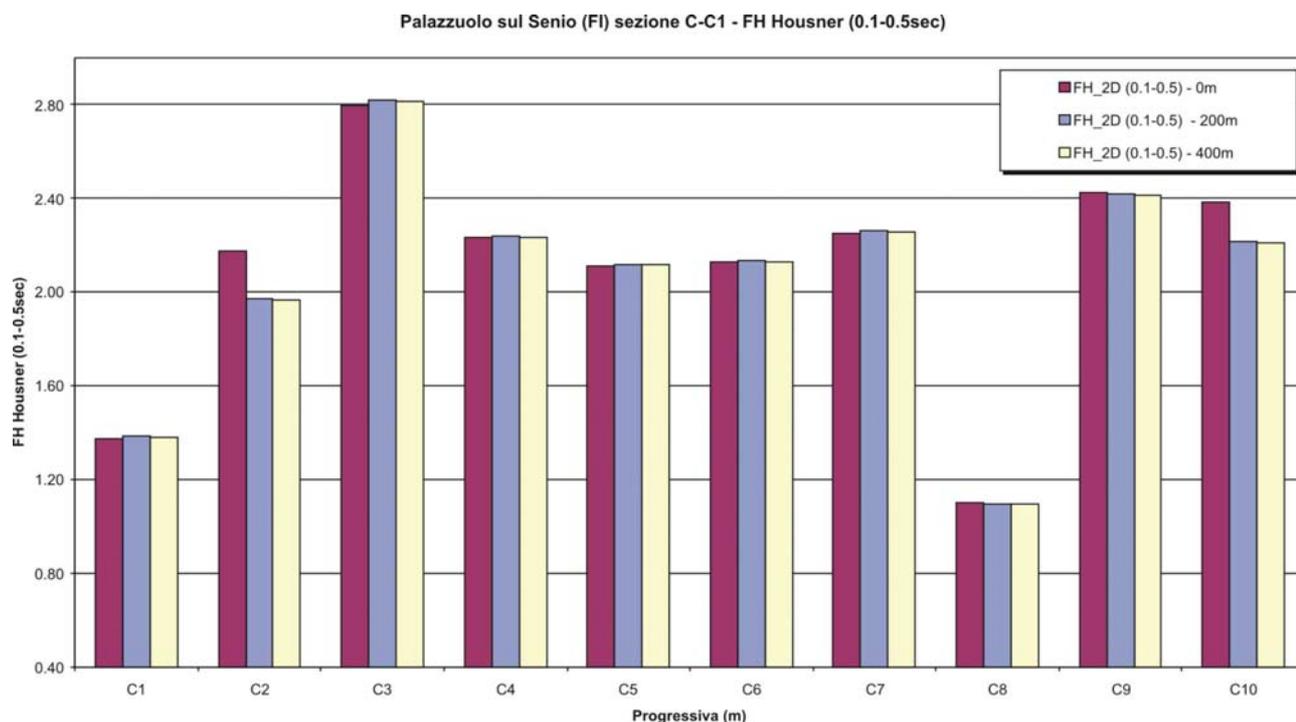


Fig.7.5 – Valori del fattore di amplificazione FH al variare della distanza dei bordi

Inoltre, è stata valutata mediante un test preliminare l'influenza sul risultato finale del numero di iterazioni eseguite.

Sono stati considerati i risultati in termini di FH relativi a 5, 10 e 15 iterazioni. Dalle analisi preliminari effettuate si è verificato come già con 5 iterazioni il risultato in termini di FH, messo a confronto con l'analogo valore per 15 iterazioni, risulta pressoché stabile, con differenze massime dell'ordine del 4%. Sulla base del predetto confronto, si è stabilito un numero massimo di iterazioni pari a 5.

I parametri utilizzati (coefficiente di poisson dinamico, peso di volume, modulo di taglio massimo) sono direttamente quelli ricavati dalle prospezioni dirette ed indirette effettuate nell'area. Invece, le curve dinamiche G/G_0 e Damping sono state desunte da bibliografia, a causa dell'impossibilità (dovuta alla natura litologica dei terreni) di prelevare campioni indisturbati da analizzare mediante prove di laboratorio in campo dinamico. In particolare, nelle figure 7.6 e 7.7 sono riportate rispettivamente le curve relative al decadimento del modulo di taglio normalizzato G/G_0 ed all'incremento percentuale del rapporto di smorzamento D , utilizzate per le coperture sismiche (tutte di natura ghiaiosa) e per la formazione FMA1 (considerata come substrato sismico deformabile).

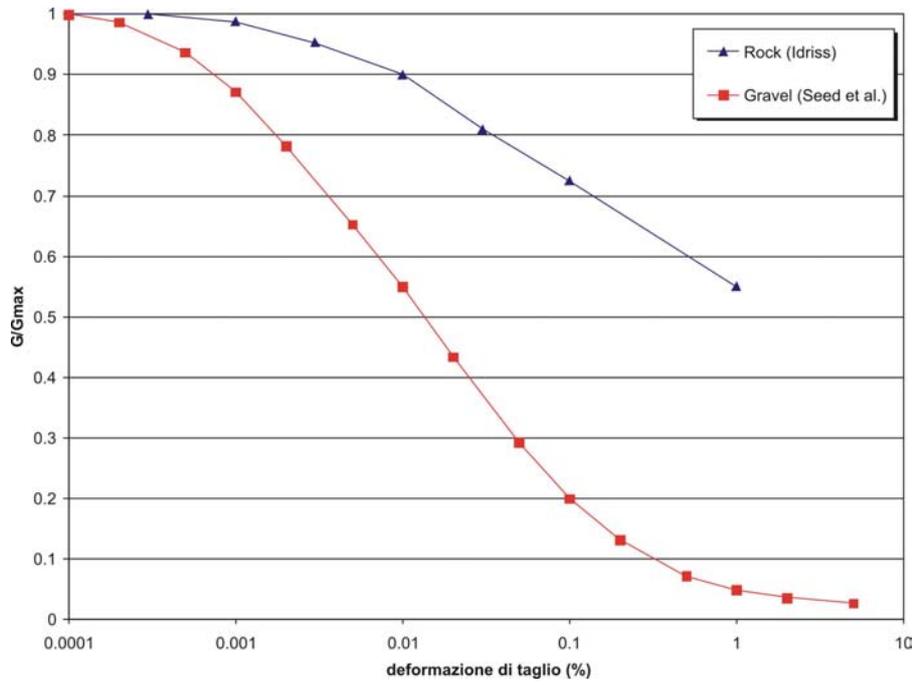


Fig.7.6 – Curve di degradazione del modulo di taglio “G” utilizzate nelle analisi illustrate nel presente capitolo

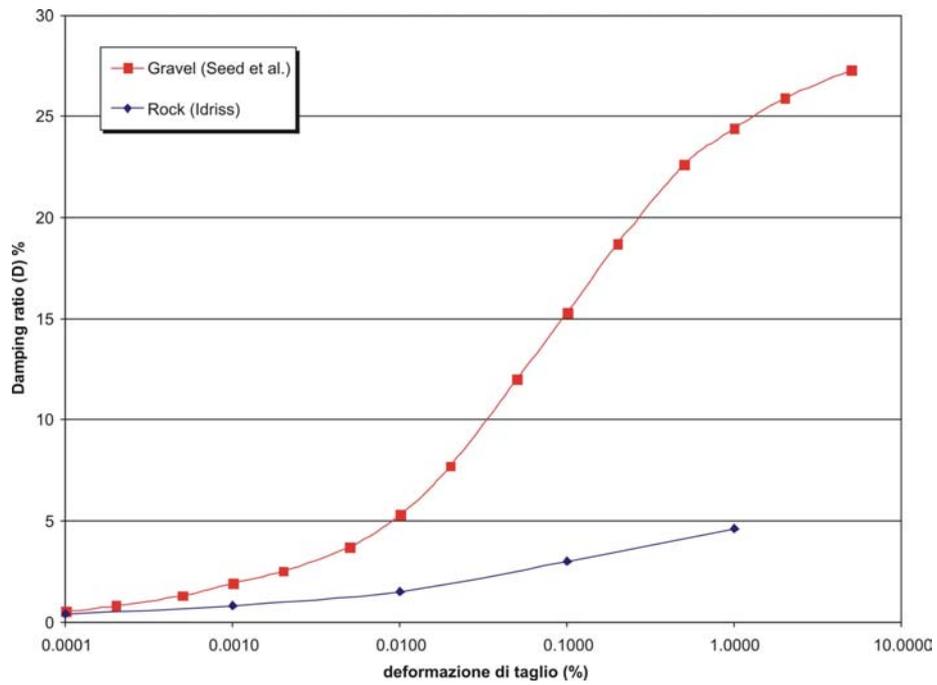


Fig.7.7 – Curve di smorzamento “D” utilizzate nelle analisi illustrate nel presente capitolo

Tab.7.1.1 – Dati sismostratigrafici utilizzati per le analisi di risposta sismica locale nel comune di Palazzuolo sul Senio

Tipologia terreno	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Rapporto di Poisson dinamico	Peso di volume (kN/m ³)	ambito di applicazione
Alluvioni_1	695	305	2.279	0.38	21.3	sezioni A-A', B-B'
Alluvioni_2	695	335	2.075	0.35	21.3	sezione A-A'
Alluvioni_3	820	340	2.412	0.40	21.3	sezioni B-B', C-C'
Alluvioni_4	795	360	2.208	0.37	21.3	sezione C-C'
Alluvioni_5	695	330	2.106	0.35	21.3	sezione D-D'
detrito di versante (a)_1	540	330	1.636	0.20	20.0	sezione B-B'
detrito di versante (a)_2	700	370	1.892	0.31	20.0	sezione D-D'
detrito di versante (a)_3	730	380	1.921	0.31	20.0	sezione D-D'
detrito di versante (a)_4	550	280	1.964	0.33	20.0	sezione D-D'
detrito di versante (a)_valore medio	670	330	2.030	0.34	20.0	sezioni A-A', D-D'
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Biserno (FMA1)	2585	900	2.872	0.43	23.0	sezioni A-A', B-B', D-D'
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Corniolo (FMA2)	2800	1100	2.545	0.41	25.0	sezione D-D'
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Premilcuore (FMA3)_1	3040	1500	2.027	0.34	25.0	sezioni A-A', B-B', D-D'
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Premilcuore (FMA3)_2	3880	1800	2.156	0.36	25.0	sezione D-D'
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Collina (FMA5)_1	2110	1200	1.758	0.26	25.0	sezione B-B'
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Collina (FMA5)_2	3535	1700	2.079	0.35	25.0	sezioni B-B', C-C'
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Nespoli (FMA8)	3825	1790	2.137	0.36	25.0	sezione C-C'
Formazione marnoso-arenacea - litofacies di Toncone (FMA8a)_1	3390	1670	2.030	0.34	2.55	sezione C-C'
Formazione marnoso-arenacea - litofacies di Toncone (FMA8a)_2	2885	1095	2.635	0.42	2.55	sezione C-C'

Inoltre, la tabella 7.1.1 illustra i parametri utilizzati per le analisi in oggetto. Si tenga presente che, laddove presenti, le differenziazioni nell'ambito della medesima formazione sono legate ai differenti punti di caratterizzazione dinamica della stessa (prove down-hole in onde P ed SH e subordinatamente indagini di sismica a rifrazione). Per l'attribuzione dei parametri si è fatto riferimento al criterio della vicinanza, ovvero laddove esistevano differenti parametrizzazioni per una stessa formazione geologica si sono utilizzati i parametri relativi al punto d'indagine più vicino (e pertinente) alla sezione geologico-tecnica in esame.

Nell'area di Palazzuolo sul Senio (centro abitato, attigua zona industriale e frazioni di Valdoniche e Bagnarello) sono state realizzate analisi bidimensionali su 4 sezioni geologico-tecniche.

I risultati, in termini di FH sono illustrati nelle figure dalla 7.8 alla 7.11.

Dall'osservazione dei risultati delle analisi bidimensionali in termini di FH è possibile evincere come l'assetto sismostratigrafico della valle alluvionale su cui sono poste le aree indagate induca amplificazioni sismiche mediamente molto elevate.

Infatti, dei 39 punti di misura effettuate ben il 77% mostra un valore di FH superiore a 1.5, mentre oltre il 54% raggiunge valori di FH superiore a 2.

Come visibile nelle figure dalla 7.8 alla 7.11 valori bassi del fattore FH si registrano invece per le misure sui bordi valle (caratterizzati prevalentemente dalla presenza di limitati spessori di depositi detritici) e nelle aree caratterizzate da spessori delle coperture alluvionali inferiori a 5m.

In questi contesti ed in generale per tutte le situazioni sismo-stratigrafiche individuate nelle 4 sezioni analizzate, si è deciso di confrontare i risultati delle analisi 2D con analoghe analisi monodimensionali, eseguite utilizzando i medesimi parametri gomeccanici e sismologici.

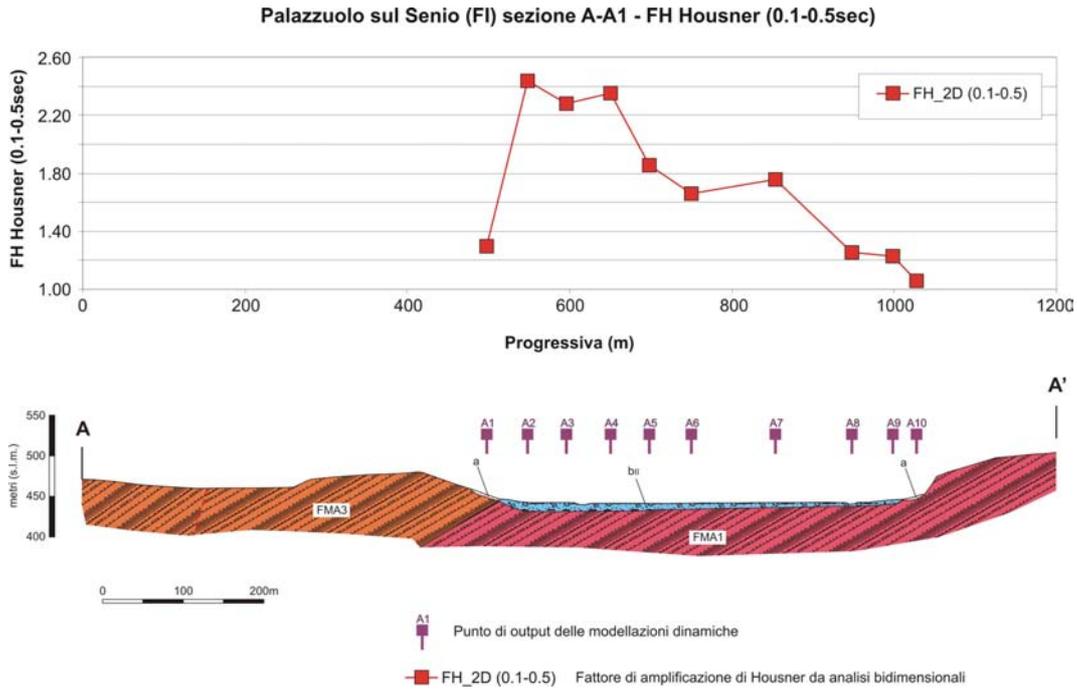


Fig.7.8 – Risultati in termini di FH (da analisi bidimensionale) per la sezione A-A'. Si tenga presente che, laddove al bordo della sezione sia presente substrato sismico non affiorante, si è operata un'estensione dei bordi di 200m, non riportata in sezione

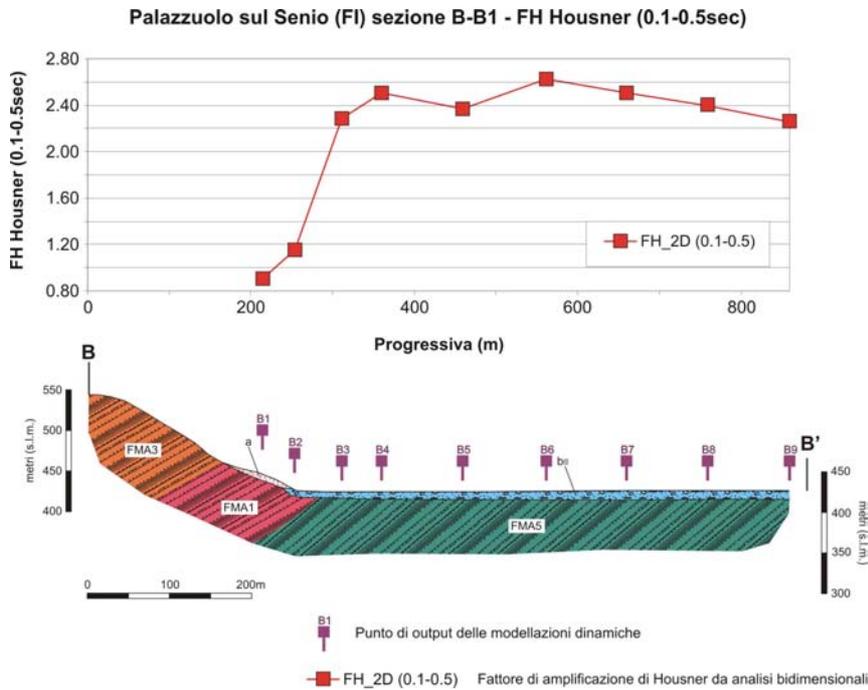


Fig.7.9 – Risultati in termini di FH (da analisi bidimensionale) per la sezione B-B'. Si tenga presente che, laddove al bordo della sezione sia presente substrato sismico non affiorante, si è operata un'estensione dei bordi di 200m, non riportata in sezione

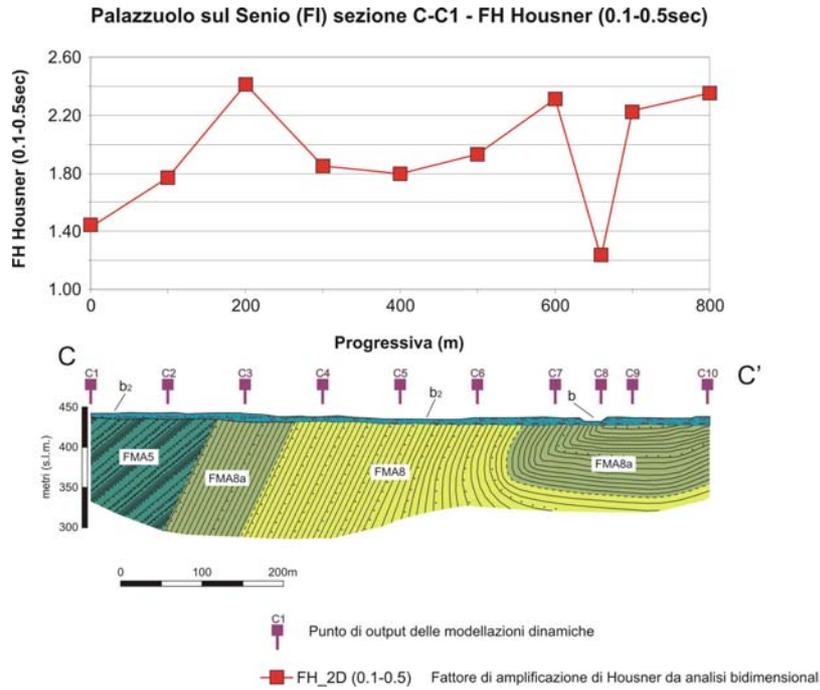


Fig.7.10 – Risultati in termini di FH (da analisi bidimensionale) per la sezione C-C'. Si tenga presente che, laddove al bordo della sezione sia presente substrato sismico non affiorante, si è operata un'estensione dei bordi di 200m, non riportata in sezione

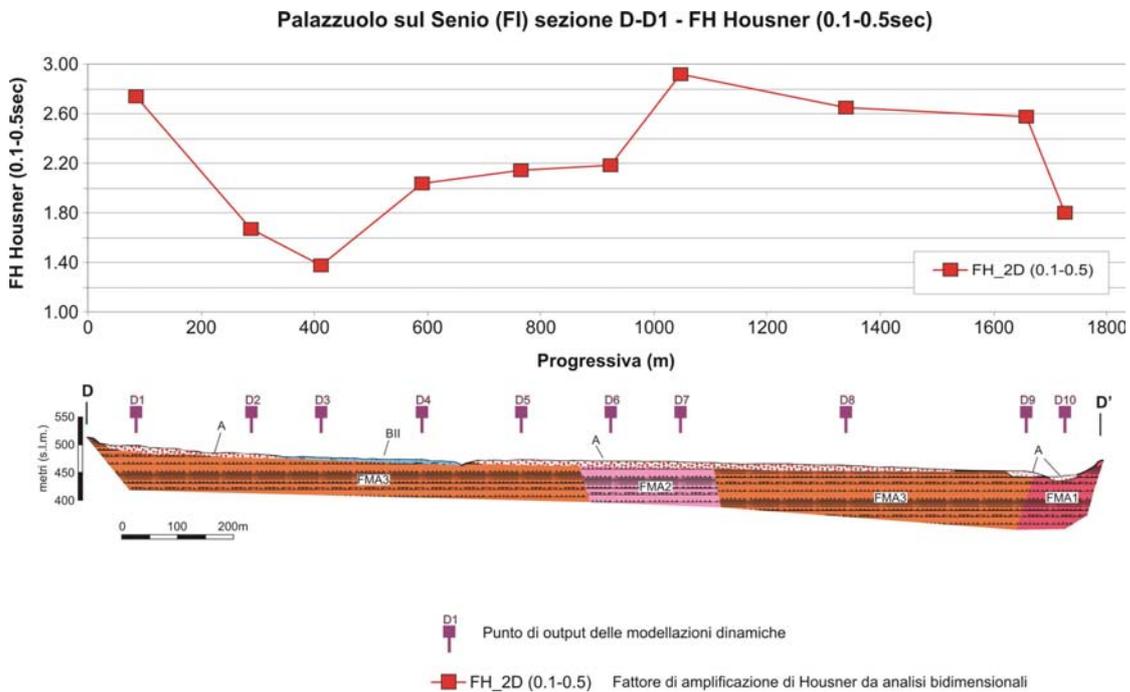


Fig.7.11 – Risultati in termini di FH (da analisi bidimensionale) per la sezione D-D'. Si tenga presente che, laddove al bordo della sezione sia presente substrato sismico non affiorante, si è operata un'estensione dei bordi di 200m, non riportata in sezione

Il codice di calcolo utilizzato per le analisi 1D è STRATA (Kottke & Rathje, 2008).

Questo software (distribuito gratuitamente online) permette la realizzazione di analisi di risposta sismica locale 1D agendo in un contesto semplificato di tipo elastico-equivalente.

Il modello fisico consiste di N strati piani e paralleli, di estensione orizzontale infinita, su un semispazio (bedrock). Ogni strato, considerato omogeneo ed isotropo, è caratterizzato dallo spessore h , dalla densità ρ , dal modulo di taglio G , e dal fattore di smorzamento ξ .

Il processo di analisi, a seguito dell'inserimento dei dati di input (sismo-stratigrafia del sito ed input sismici) comporta i seguenti passaggi:

- Trasformazione del moto di input dal dominio del tempo al dominio delle frequenze (spettro di Fourier);
- Esecuzione dell'analisi: sulla base del modello sismostratigrafico e quindi della funzione di trasferimento tipica del sito, lo spettro di input sarà modificato nell'attraversare il profilo. Il modello è iterativo e ciò comporta che all'aumentare della deformazione indotta, i valori di G e ξ iniziali vengano progressivamente sostituiti con i valori degradati, sulla base delle curve dinamiche inserite per ogni strato;
- Alla fine dell'analisi sarà definito uno spettro di Fourier in output, relativo alla modifica dello spettro di input sulla base delle caratteristiche geologico-tecniche del sito. Dal rapporto tra spettro di output e spettro di input, sarà definibile la funzione di trasferimento peculiare del sito;
- Mediante antitrasformata di Fourier sarà definito l'accelerogramma di output, tramite il quale il programma calcolerà lo spettro di risposta di output.

Si è deciso di operare il confronto 1D-2D non su tutte le verticali di analisi, ma solo su 16 delle 39 eseguite in contesto bidimensionale, prendendo in considerazione tutte le situazioni sismo stratigrafiche presenti nell'area in esame e, comunque, tutti i punti in cui l'analisi 2D offre bassi valori di FH (10 punti di misura su 39 totali).

Il confronto tra i valori di FH mono e bidimensionali è riportato, per ogni sezione, nelle figura dalla 7.12 alla 7.15 e riassunte in tabella 7.1.2.

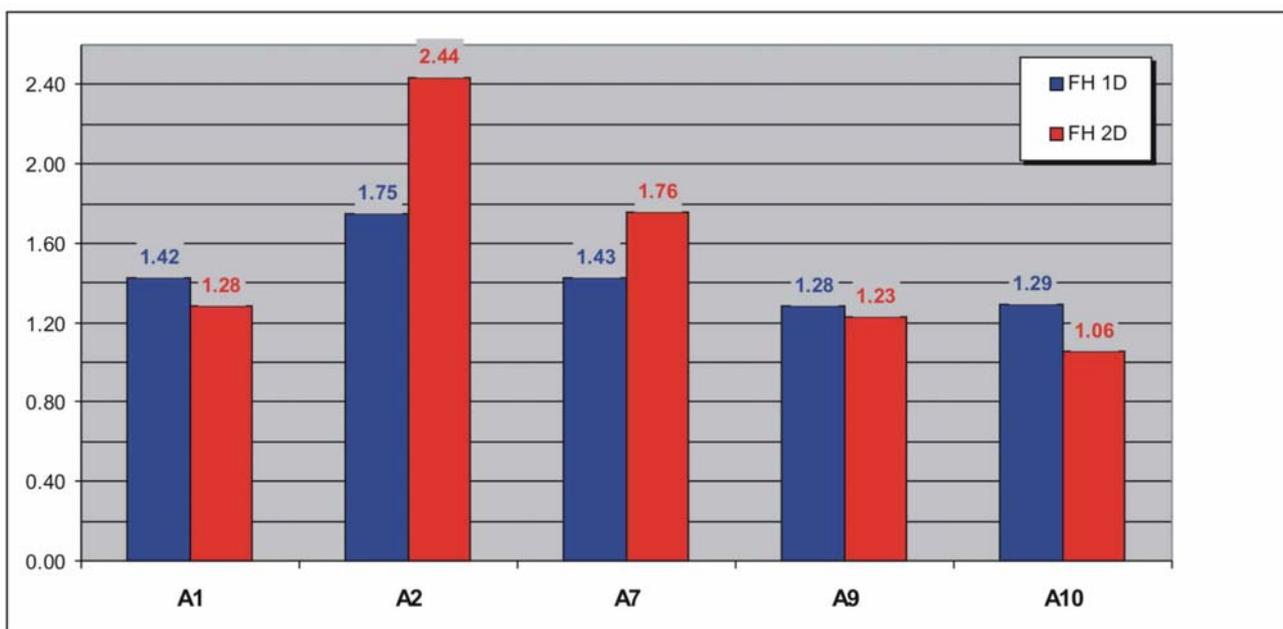


Fig.7.12 – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione A-A'

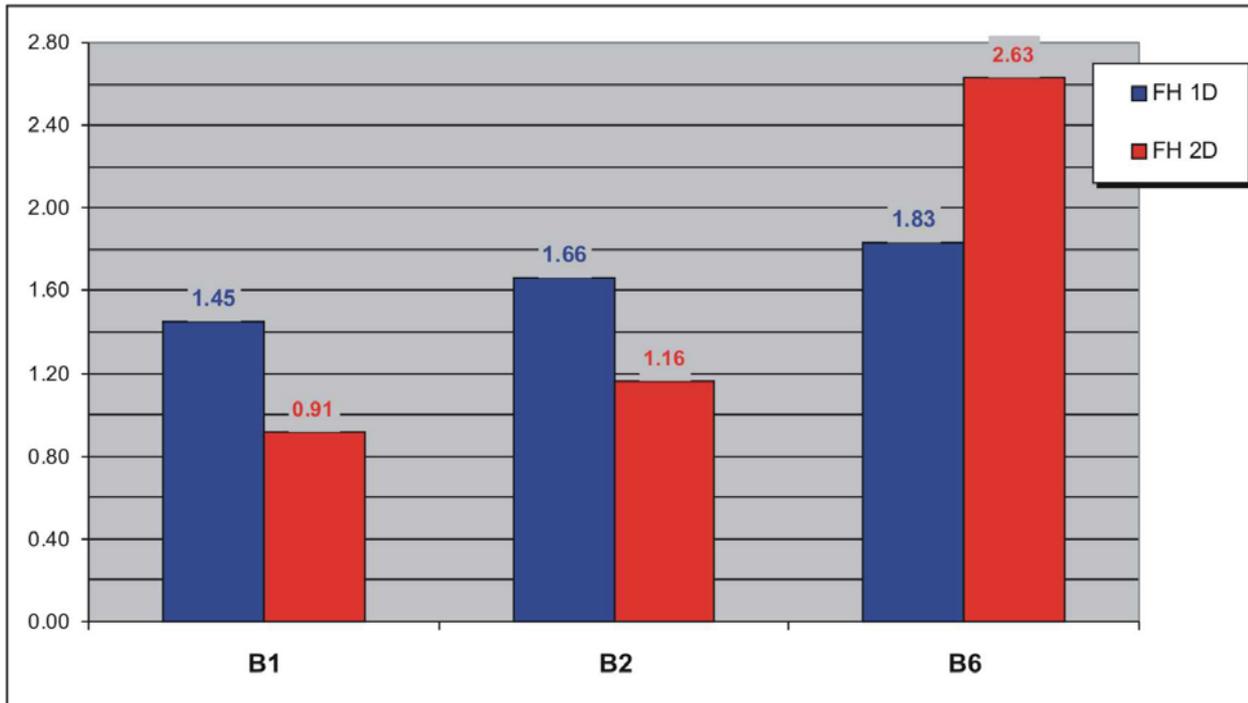


Fig.7.13 – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione B-B'

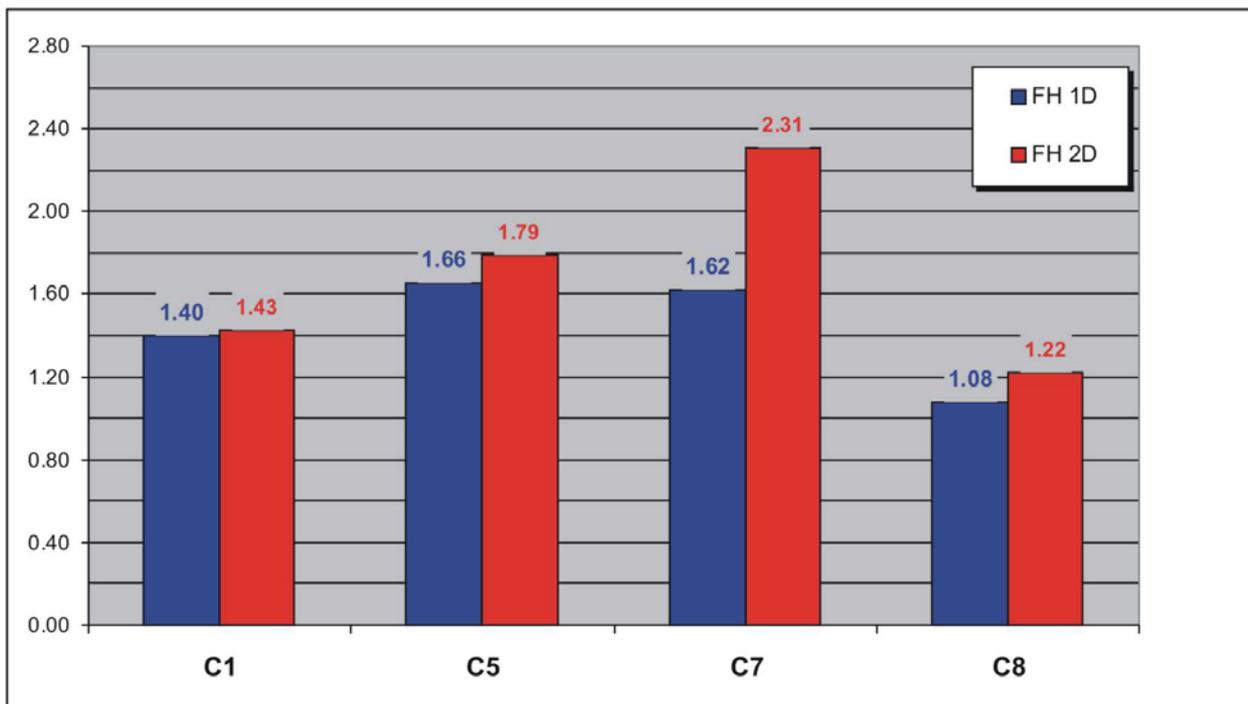


Fig.7.14 – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione C-C'

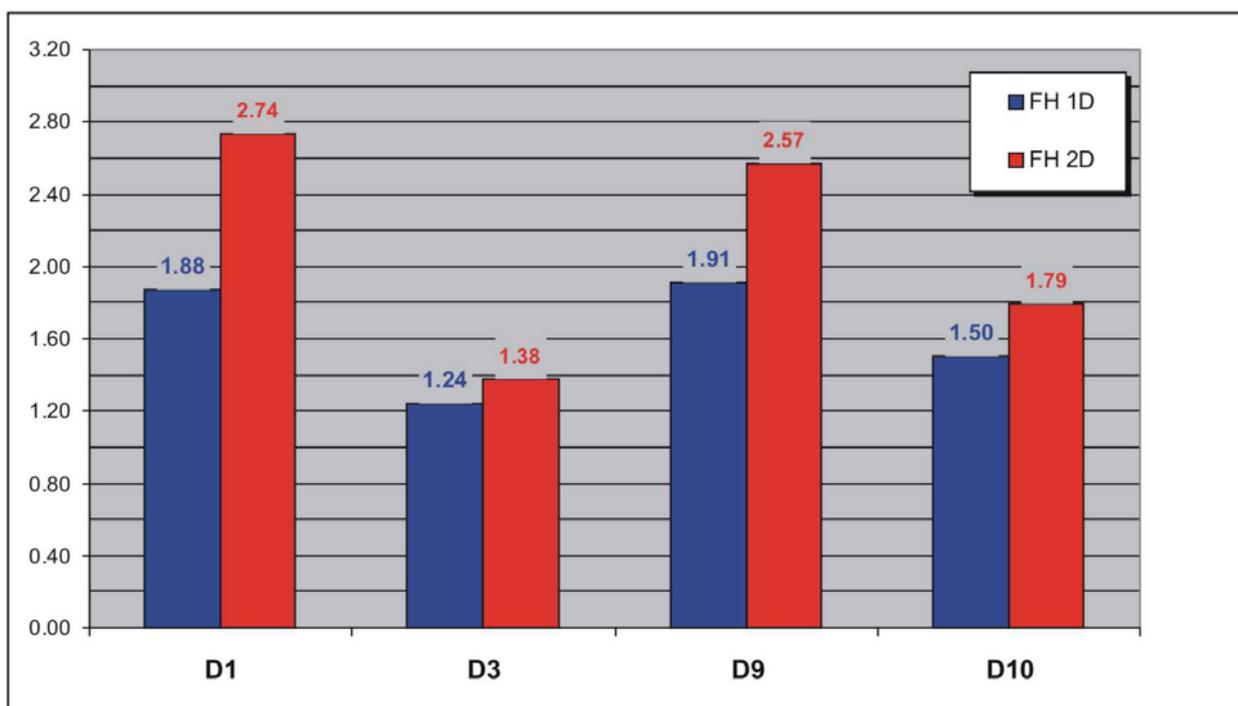


Fig.7.15 – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione D-D’

Come è possibile notare dal confronto, generalmente i risultati delle analisi 2D tendono ad essere, in linea con la teoria, più elevati dei corrispondenti FH monodimensionali, poiché tengono conto non solo dell’aspetto stratigrafico, ma anche del contesto geometrico sepolto.

Tuttavia, per i punti di misura ubicati ai bordi valle in corrispondenza delle sezioni A-A’ e B-B’ (punti di misura A1, A9, A10, B1 e B2) i valori di FH monodimensionale sono più elevati (talora sensibilmente) degli FH bidimensionali.

In queste zone, caratterizzate dalla presenza di ridotti spessori delle coperture sismiche (detritiche o alluvionali) poggianti su substrato sismico, la spiegazione di tali differenze potrebbe essere addotta bidimensionalmente a motivi legati alla focalizzazione dell’onda sismica nei differenti tratti delle sezioni, oppure al differente peso con cui i diversi software valutano la risposta sismica di contesti caratterizzati da spessori limitati (< 5m) delle coperture sismiche.

Un’ulteriore motivazione potrebbe essere ricercata nel delicato processo di deconvoluzione del moto di input, per portarlo dalle originali condizioni free-field in affioramento alle condizioni presunte all’interfaccia tra substrato sismico e coperture.

Infatti, mentre per analisi 1D il processo di deconvoluzione viene svolto automaticamente dal software singolarmente per ogni analisi, nel caso di modellazioni 2D il segnale da deconvolvere al bedrock viene riportato alla massima profondità a cui si trova l’interfaccia bedrock sismico-coperture. Ciò potrebbe comportare per i punti di misura ubicati in corrispondenza di minori spessori una sottovalutazione in termini di fattore di amplificazione.

Pertanto, a fini cautelativi, nella scelta del valore di FH più idoneo per la stesura della carta di microzonazione sismica e conseguente individuazione delle classi di pericolosità sismica, si ritiene opportuno utilizzare il valore di FH più elevato tra analisi mono e bidimensionale.

Tab.7.1.2 – Fattori di amplificazione di Housner FH (0.1s-0.5s) rilevate dalle analisi di risposta sismica bidimensionale e monodimensionale nel centro abitato di Palazuolo sul Senio

Punto di output delle analisi dinamiche	FH 2D	FH 1D
A1	1.28	1.42
A2	2.44	1.75
A3	2.28	-
A4	2.35	-
A5	1.85	-
A6	1.66	-
A7	1.76	1.43
A8	1.25	-
A9	1.23	1.28
A10	1.06	1.29
B1	0.91	1.45
B2	1.16	1.66
B3	2.29	-
B4	2.51	-
B5	2.37	-
B6	2.63	1.83
B7	2.51	-
B8	2.41	-
B9	2.24	-
C1	1.43	1.40
C2	1.77	-
C3	2.41	-
C4	1.85	-
C5	1.79	1.66
C6	1.93	-
C7	2.31	1.62
C8	1.22	1.08
C9	2.23	-
C10	2.35	-
D1	2.74	1.88
D2	1.67	-
D3	1.38	1.24
D4	2.03	-
D5	2.14	-
D6	2.18	-
D7	2.91	-
D8	2.65	-
D9	2.57	1.91
D10	1.79	1.50

8.0 Elaborati cartografici

Di seguito si riportano gli elaborati cartografici realizzati.

8.1 – Carta delle indagini

Per l'area oggetto della Microzonazione Sismica è stata realizzata la cartografia delle indagini in scala 1:5000 in cui si riportano tutte le informazioni pregresse in aggiunta a tutte le indagini geognostiche che sono state realizzate ad hoc nei siti di interesse (nel DVD allegato).

Tale cartografia costituisce il primo passo per la definizione del quadro conoscitivo del sottosuolo e deve essere predisposta in due successive fasi: nell'ambito delle attività del livello 1 di approfondimento, in cui devono essere rappresentate le indagini pregresse e di nuova realizzazione, e per i successivi livelli 2 e 3, in cui devono essere indicate anche eventuali nuove indagini realizzate ex-novo per lo studio di microzonazione sismica.

Per una maggiore completezza si è scelto di realizzare una unica cartografia delle indagini che comprenda sia le indagini pregresse, sia le indagini realizzate nell'ambito del livello 3.

Nella suddetta cartografia sono indicate le localizzazioni delle indagini suddivise per tipologie e per codice di riferimento all'indagine in oggetto.

La carta delle indagini, riportata integralmente nel DVD allegato, è stata realizzata sia in forma cartacea che digitale (in formato GIS) utilizzando la simbologia e le specifiche tecniche per l'informatizzazione previste dalla "Commissione Nazionale per la Microzonazione Sismica" del DPC.

8.2 – Carta geologica e geomorfologica

Per quanto concerne la carta geologica e geomorfologica dell'area si è fatto riferimento per tutta l'area alle cartografie geologiche e geomorfologiche in scala 1:2000 realizzate dal DST dell'Università di Firenze nell'ambito del Programma VEL mediante rilevamenti geologici ad hoc e fotointerpretazioni. Durante la fase di rilievo è stata posta particolare attenzione alla mappatura dei depositi di copertura (con particolare riferimento a quelli con spessore maggiore di 2m), ed alla ricostruzione dettagliata di tutte le forme geomorfologiche, dei fenomeni gravitativi di versante e/o delle aree instabili e nell'individuazione del substrato roccioso mediante l'identificazione degli affioramenti significativi. Tali affioramenti sono stati utili anche per l'individuazione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso. La cartografia è stata corredata da sezioni geologiche significative, in numero adeguato, orientate sia trasversalmente che longitudinalmente rispettato ai principali geologico-strutturali dell'area.

La carta geologica, riportata integralmente nel DVD allegato, è stata realizzata sia in forma cartacea che su supporto digitale utilizzando la simbologia prevista dalle Legende del Programma VEL.

8.3 – Carta geologico-tecnica per la microzonazione sismica

Tale cartografia (redatta in scala 1:5.000) deriva essenzialmente da una revisione a scala di dettaglio delle cartografie geologiche e geomorfologiche esistenti unitamente a tutti i dati litologici, stratigrafici e litotecnici acquisiti.

Nell'ambito di tale revisione, che ha comportato necessariamente anche rilevamenti di controllo in loco, particolare attenzione è stata posta alla mappatura dei depositi di copertura (con particolare riferimento a quelli con spessore maggiore di 3m), nella ricostruzione dettagliata di tutte le forme geomorfologiche, dei fenomeni gravitativi di versante e/o delle aree instabili e nell'individuazione del substrato roccioso mediante l'identificazione degli affioramenti significativi. Tali affioramenti sono stati utili anche per l'individuazione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso.

La carta geologico-tecnica, riportata integralmente nel DVD allegato, è stata realizzata sia in forma cartacea che in formato vettoriale (tramite tecnologia GIS) utilizzando la simbologia prevista dagli

“Standard di Rappresentazione e Archiviazione Informatica” redatti dal DPC (versione 2.0beta –II, Giugno 2012).

8.4 – Carta delle frequenze fondamentali

Sulla base delle misure di rumore sismico effettuate ed al fine di definire le principali caratteristiche della risposta sismica delle aree in esame, è stata effettuata l’interpolazione dei dati puntuali relative alle frequenze di risonanza al fine di poter ricostruire la carta delle frequenze fondamentali dei depositi presenti.

Tale cartografia oltre a illustrare la distribuzione di tali misure arealmente, permette, se pur con un certo margine di affidabilità, di poter fornire indicazioni di massima per le successive analisi di risposta sismica locale.

I rapporti spettrali HVSR calcolati sul solo rumore sismico suggeriscono un quadro piuttosto omogeneo per tutta l’area di indagine, caratterizzata da picchi del rapporto per alti valori di frequenza ($f_{pN} \sim 7-12$ Hz) e rapporti sostanzialmente piatti per frequenze inferiori (0.5-7 Hz). Questi rapporti suggeriscono la presenza di un contrasto di impedenza acustica superficiale, che può produrre fenomeni di amplificazione sismica prevalentemente ad alta frequenza. La presenza in tutti i rapporti spettrali, ad eccezioni delle stazioni *PRF*, *P04* e *P10*, di picchi di amplificazione ad alta frequenza è perfettamente compatibile con l’assetto geologico dell’area, caratterizzata da depositi alluvionali di esiguo spessore, sovrastanti un substrato marnoso/arenaceo.

Per definire le caratteristiche principali di risposta sismica delle aree di indagine si effettua l’interpolazione dei dati puntuali relativamente alle frequenze di risonanza (Fig.8.1) e al fattore di amplificazione sperimentale (Fig.8.2).

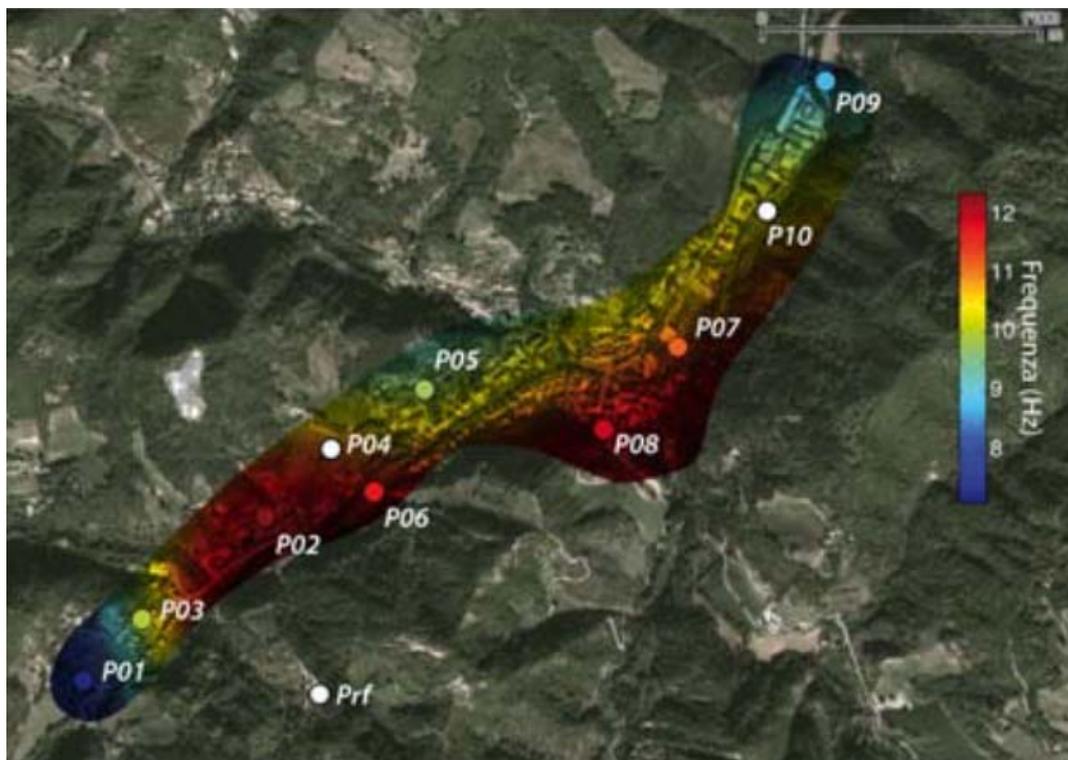


Fig.8.1 – Carta delle frequenze di risonanza fondamentali per l’area del capoluogo di Palazzuolo sul Senio calcolata come interpolazione dei picchi principali del rapporto HVSR del rumore sismico

I rapporti HVSR calcolati sul rumore sismico vengono poi utilizzati per ottenere il fattore di amplificazione del sito di indagine, come integrale del rapporto HVSR nell’intervallo di frequenza 1-10 Hz. Questo parametro, non deve essere considerato da un punto di vista strettamente quantitativo,

in quanto non è dimostrata la sua affidabilità assoluta, ma fornisce ugualmente delle indicazioni sulla criticità del sito di indagine in rapporto a possibili effetti di doppia risonanza per la tipologia costruttiva maggiormente diffusa sul territorio italiano.

In tutta l'area d'indagine, il fattore di amplificazione calcolato sul rumore sismico mostra valori superiori ad 1 (Figura 8.2) e indica una generale amplificazione sismica. I valori minimi sono calcolati in corrispondenza delle stazioni P04, P10 e PRF, caratterizzate da rapporti spettrali piatti, mentre il valori massimi si riscontrano in corrispondenza delle stazioni P01 e P09. In generale, il valore del fattore di amplificazione calcolato come integrale del rapporto HVSR è tendenzialmente inferiore rispetto alle ampiezze dei singoli picchi spettrali, perché nella maggior parte dei casi le frequenze di risonanza sono al di fuori dell'intervallo spettrale di integrazione del rapporto. Di conseguenza, il fattore di amplificazione calcolato potrebbe sottostimare la reale amplificazione sismica per la presenza di un contrasto di impedenza acustica molto superficiale.

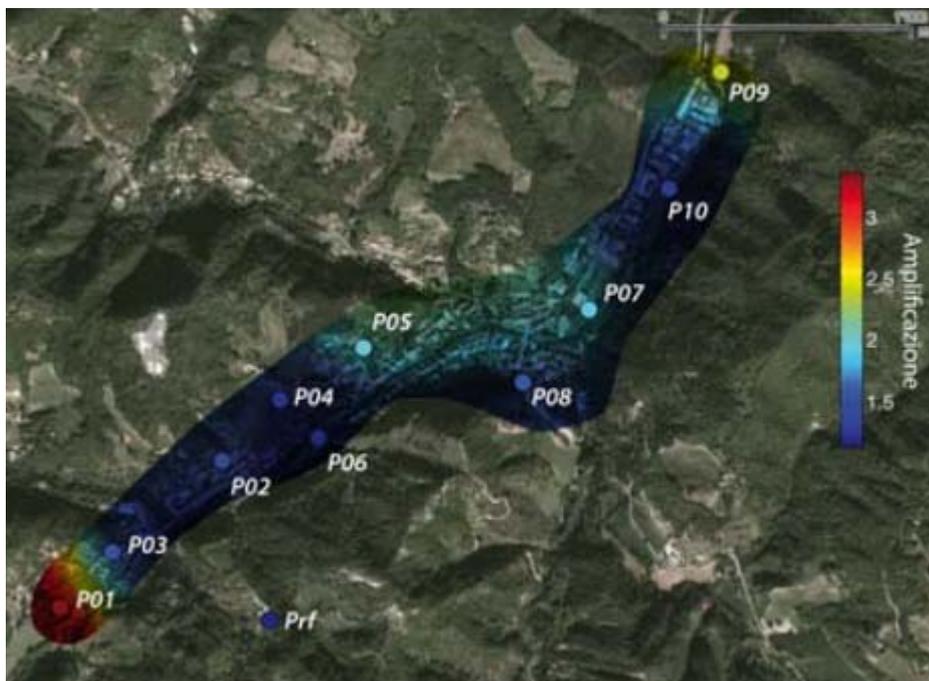


Fig.8.2 – Mappa de fattore di amplificazione sismica per l'area di indagine, calcolato come integrale dei rapporti spettrali HVSR nella banda di frequenza 1-10 Hz.

8.5 – Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica

Tutte le informazioni acquisite nella fase di rilevamento e riportate nelle cartografie geologiche prodotte, unitamente ai dati di base pregressi reperiti e a tutte le indagini geologiche, geofisiche e geotecniche realizzate nell'ambito del Programma VEL, hanno permesso di realizzare l'elaborato relativo alle **cartografie delle “microzonazione omogenee in prospettiva sismica” (MOPS)**.

Tali cartografie sono state redatte in linea agli “*Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica*”, per cui sono state individuate delle microzone per le quali, sulla base delle osservazioni geolitologiche, geomorfologiche, litostratigrafiche e con i dati di base pregressi acquisiti, possano essere ipotizzati l'occorrenza di diversi tipi di effetti: amplificazione, instabilità di versante, liquefazione, ecc...

Le microzone della carta sono classificate in tre categorie:

- a) *Zone stabili*
- b) *Zone stabili suscettibili di amplificazione locali*
- c) *Zone suscettibili di instabilità*

La cartografia, quindi, corrisponde ad un approfondimento di *Livello 1* ed individua qualitativamente e grossolanamente la geometria delle aree potenzialmente caratterizzate da specifici effetti sismici locali. Ciò permette quindi di guidare i necessari approfondimenti di indagini nelle successive fasi di approfondimento identificabili con il livello 2 e/o 3.

Nel DVD allegato, si riporta la carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica redatta per la località capoluogo, Quadalto e per l'area produttiva del Comune di Palazzuolo sul Senio.

Tali cartografie sono state realizzate secondo la legenda riportata negli "*Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica*".

In linea di massima, come è possibile evincere dalla legenda alla cartografia riportata in fig. 8.3, sono riportate le seguenti microzone:

- **zona stabile**, caratterizzata dal substrato roccioso rigido in affioramento o subaffioramento con topografia orizzontale o con pendenza indicativamente inferiore ai 15°. Il substrato rigido è rappresentato nell'area dalla Formazione Marnoso-Arenacea (Membri FMA1-2-3-5-8-8a). Tuttavia in tutta l'area non sono state mappate alcune zone stabili in quanto tutti i versanti in cui sono affioranti questi substrati rigidi risultano sempre con pendenza superiore ai 15°. Inoltre in corrispondenza di tali aree è possibile la presenza di limitati porzioni di detrito di alterazione del substrato roccioso che andranno valutate nelle successive fasi attuative.
- **Zona stabili suscettibili di amplificazione locali**. Tali zone sono state differenziate in relazione alle possibili combinazioni tra le varie unità deposizionali distinguendo le aree in cui i depositi alluvionali quaternari poggiano direttamente al di sopra del substrato roccioso, dalle aree in cui sono presenti anche i depositi detritici di versante. Sono state anche fornite indicazioni preliminari circa gli spessori delle coperture e la granulometria prevalente e sono stati indicate anche le aree in cui sono presenti rocce deboli e/o scompagnate (Formazione dello Slump di Quadalto – Qa) che non sempre presentano le caratteristiche di un substrato rigido. La suddivisione delle aree si completa anche con l'indicazione degli eventuali riporti superiori a 2m (comprendenti anche discariche). Di seguito si riporta la successione delle zone:
 - **Zona 1**, caratterizzata da *substrato rigido lapideo stratificato S*, posto su un versante acclive (pendenza indicativamente superiore a 15°) e tale da non escludere fenomeni di amplificazione di tipo topografico.
 - **Zona 2**, caratterizzata dalla presenza di *substrato roccioso* (Formazione dello "Slump di Quadalto" - Qa) che non sempre presenta le caratteristiche di substrato rigido, ma che per sua natura (roccia debole) o per il suo grado di fratturazione/alterazione spesso non può essere assimilato ad un bedrock sismico. Tale substrato poggia sul substrato sismico costituito dal Membro FMA3. Pertanto, per tali motivazioni, si è preferito inserire queste aree all'interno delle zone stabili suscettibili di fenomeni di amplificazione di tipo stratigrafico.
 - **Zona 3**, caratterizzata dalla presenza di depositi quaternari di copertura alluvionale (b_I-b_{II}) con spessori massimi di 10m circa poggianti su un substrato rigido. Tale situazione generalmente può essere associata ad un alto contrasto di impedenza sismica atteso tra coperture e substrato rigido e quindi va valutata con attenzione in quanto potrebbe produrre elevati fenomeni di amplificazione di tipo stratigrafico.
 - **Zona 4**, caratterizzata dalla presenza di depositi detritici di versante (a=dt) poggianti su un substrato rigido. Tale situazione generalmente può essere associata ad un alto contrasto di impedenza sismica atteso tra coperture e substrato rigido e quindi va valutata con attenzione in quanto potrebbe produrre elevati fenomeni di amplificazione di tipo stratigrafico.

- **Zona 5**, caratterizzata dalla presenza di depositi quaternari di copertura alluvionale (b_I - b_{II}) con spessori massimi di 10m circa poggianti su un substrato rigido. Tale zona presenta la medesima stratigrafia della zona 3 con la unica differenza che le misure strumentali effettuata in tale area evidenziano ed accertano un alto contrasto di impedenza tra copertura e substrato rigido.

E' opportuno precisare che l'indicazione relativa allo spessore di copertura può essere suscettibile di variazioni in funzione dei dati di base esistenti nell'area, il cui numero è quantitativamente buono, ma la distribuzione può non essere sufficientemente omogenea.

- **Zone suscettibili di instabilità.** Sono state distinte esclusivamente le aree instabili connesse a fenomenologie gravitative di versante.

La carta è stata completata riportando le più significative *forme di superficie*: cresta e orli di scarpata morfologica.

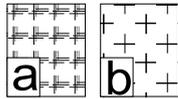
Si precisa che, laddove siano disponibili cartografie di microzonazione sismica di livelli superiori (livello 2 o 3), la stima della pericolosità sismica locale dovrà essere effettuata esclusivamente sulla base di tali cartografie, le quali forniscono una stima quantitativa del parametro amplificativo (fattore d'amplificazione di Housner nel presente lavoro).

Di contro, nei casi in cui tali cartografie di livello superiore non siano disponibili, si dovranno utilizzare, ai fini della predisposizione della carta di pericolosità sismica (ai sensi del Reg. 53R/2011), i dati qualitativi forniti dalle cartografie MOPS le quali, non fornendo alcuna stima inerente la pericolosità sismica, devono essere intese solo come guida per gli approfondimenti d'indagine/prescrizione successivi.

La cartografia MOPS per Palazzuolo sul Senio è riportata integralmente nel DVD allegato.

COMUNE DI PALAZZUOLO SUL SENIO - LEGENDA CARTA MOPS

INFORMAZIONI SUL SUBSTRATO

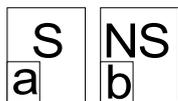


SUBSTRATO (comprese eventuali coperture di alterazione con spessore < 3 m):

- a) lapideo con $Vs_{medie} > 800$ m/s
- b) lapideo con $Vs_{medie} < 800$ m/s

FORMAZIONI DI RIFERIMENTO

- a) Formazione Marnoso-Arenacea (FMA1-2-3-5-8-8a)
(alternanza arenarie, peliti e marne in rapporti variabili)
- b) Slump di Quadalto (qa)
(corpo scompaginato intraformazionale alle FMA2)



SUBSTRATO:

- a) stratificato
- b) non stratificato

INFORMAZIONI SUI TERRENI DI COPERTURA

DEPOSITI DETRITICI DI VERSANTE

a = dt



Detrito di versante costituito da elementi eterometrici prevalentemente grossolani, dispersi in matrice sabbiosa. (a=dt).

DEPOSITI ALLUVIONALI ANTICHI TERRAZZATI E RECENTI

b₁-b₂

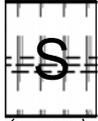


Ciottolami in matrice limoso-sabbiosa, ghiaie, sabbie e limi (b₁-b₂).

ZONE STABILI SUSCETTIBILI DI AMPLIFICAZIONI LOCALI



Zona 1



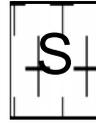
(Cod. 2001)

Substrato lapideo
con $V_{s_medie} > 800$ m/s
(FMA1-2-3-5-8-8a)

Substrato lapideo
con pendenza $> 15^\circ$

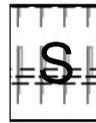


Zona 2



(Cod. 2002)

Substrato lapideo
con $V_{s_medie} < 800$ m/s
(Qa)
0-30m



Substrato lapideo
con $V_{s_medie} > 800$ m/s
(FMA3)



Zona3



Depositi Alluvionali
(b_1 - b_{11})
0-10 m



(Cod. 2003)

Substrato lapideo
con $V_{s_medie} > 800$ m/s
(FMA1-2-3-5-8-8a)

Zona caratterizzata da un contrasto di impedenza tra copertura e substrato rigido presumibilmente alto

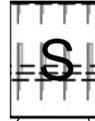


Zona4



Zona caratterizzata da un contrasto di impedenza tra copertura e substrato rigido presumibilmente alto

Depositi detritici di versante
(a=dt)
0-10 m



(Cod. 2004)

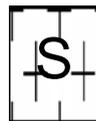
Substrato lapideo
con $V_{s_medie} > 800$ m/s
(FMA1-2-3-5-8-8a)



Zona5



Depositi Alluvionali (b_1 - b_{11})
0-10 m



(Cod. 2005)

Substrato lapideo
con $V_{s_medie} > 800$ m/s
(FMA1-2-3-5-8-8a)

Zona caratterizzata da un contrasto di impedenza tra copertura e substrato rigido alto accertato da misure sperimentali (misure di rumore ambientali).

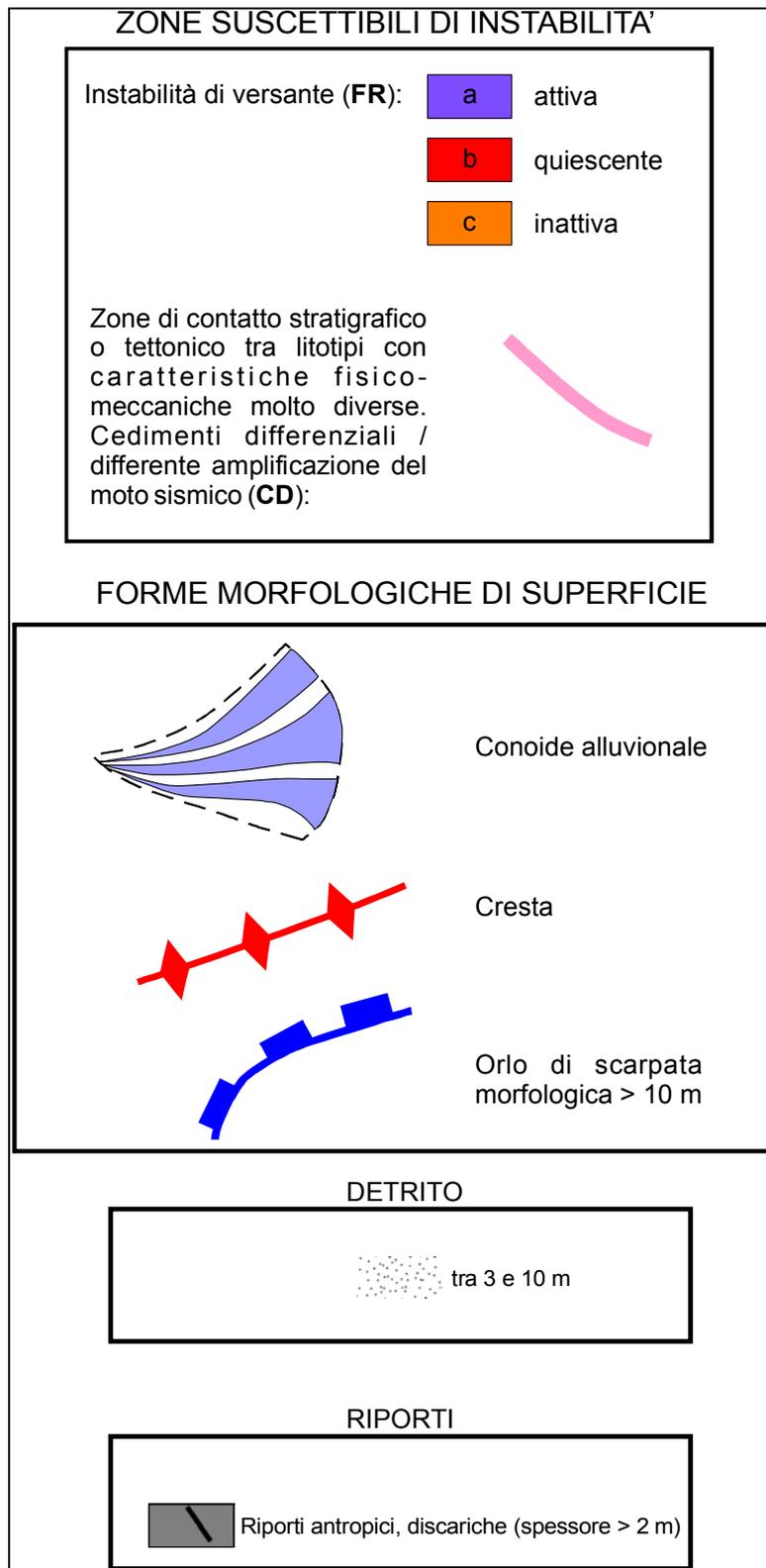


Fig. 8.3 – Legenda alla Cartografia di Microzonazione Sismica di livello 1 (MOPS)

8.6 – Carta di microzonazione sismica di livello 3

La realizzazione delle analisi di risposta sismica locale mono e bidimensionale, illustrata nei capitoli precedenti, ha permesso la redazione della cartografia di microzonazione sismica di livello 3, per quanto attiene al capoluogo ed alla limitrofa zona industriale.

I risultati in termini di FH, desunti dalle analisi 2D effettuate in corrispondenza delle 4 sezioni geologico-tecniche rappresentative del modello di sottosuolo ed opportunamente confrontate con le omologhe analisi in contesto monodimensionale, sono stati estesi arealmente mediante l'ausilio combinato della cartografia geologico-technica e della cartografia MOPS.

Il modello logico su cui si è basata l'estrapolazione areale dei dati di amplificazione è stato il seguente:

1. rappresentazione su mappa di tutti i punti di output delle modellazioni dinamiche effettuate, con il relativo valore di FH;
2. individuazione del modello geologico-technico alla base di ogni valore di FH desunto;
3. identificazione sulle cartografie tematiche esistenti (in particolare geologico-techniche e MOPS) di analoghe condizioni geologico-techniche su aree in cui non sono disponibili analisi di risposta sismica per assenza di dati di base;
4. Confronto con omologhi valori di FH da analisi monodimensionale e conseguente attribuzione del fattore FH nelle predette aree;
5. raggruppamento di situazioni tipologiche ed amplificative similari mediante la discretizzazione dell'area in classi distinte da differenti intervalli di FH;
6. rappresentazione della cartografia prodotta mediante software operante in ambiente GIS.

Sulla base di quanto illustrato precedentemente, si può discretizzare l'area in esame sulla base delle seguenti classi:

ZONA A (FH =1): include le aree di affioramento del substrato sismico caratterizzato in area dalla formazione della Marnoso-Arenacea (FMA). Si evidenzia che in quest'area il substrato roccioso presenta una pendenza sempre superiore a 15°, sebbene tutte le misure strumentali non presentino indizi di amplificazione;

ZONA B (1 < FH < 1.3): include le aree di affioramento dei depositi alluvionali del Fosso Casolana ed alcuni depositi detritici di versante ubicati in destra idrografica del fiume Senio, sia nell'area meridionale sia in corrispondenza del capoluogo;

ZONA C (1.3 ≤ FH < 1.8): individua aree di affioramento prevalentemente costituite da depositi detritici di versante (con particolare riferimento all'area del capoluogo) e limitatamente all'area di Quadalto (settore meridionale) depositi alluvionali del fiume Senio

ZONA D (1.8 ≤ FH < 2.5): comprende la maggior parte delle aree di affioramento dei depositi alluvionali di fondovalle del fiume Senio;

ZONA D (FH ≥ 2.5): riguarda i depositi detritici presenti estensivamente sul versante in sinistra idrografica del fiume Senio ed una porzione di affioramento di depositi alluvionali di fondovalle del fiume Senio, in corrispondenza del campo sportivo.

8.7 – Commenti finali e criticità

Il presente lavoro è stato presentato in questo volume in maniera organica con l'obiettivo di fornire, all'Amministrazione Comunale e anche ai professionisti che operano in tale Comune, una descrizione dettagliata e particolarmente approfondita del livello di conoscenza del terreno presente nel Comune di Palazzuolo sul Senio. Sono state così presentati, discussi ed interpretati in chiave geologica tutti i risultati dei rilievi geologici eseguiti nell'area, tutti i dati geofisici disponibili desunti sia dalle indagini geofisiche di superficie che dalle indagini in foro, tutti i dati geotecnici derivati dai sondaggi geotecnici, dalle prove in situ ed in laboratorio effettuate. Tali dati sono stati opportunamente incrociati al fine di permettere una attendibile ricostruzione del modello geologico-tecnico.

Sulla base del quadro conoscitivo ricostruito, le due località indagate nel Comune di Palazzuolo sul Senio (la località Capoluogo e la più settentrionale area produttiva) presentano una situazione geologica e stratigrafica simile essendosi sviluppate all'interno della valle del Fiume Senio al di sopra di depositi alluvionali che ricoprono il substrato roccioso sottostante.

Le indagini eseguite (10 stese di sismica a rifrazione insieme a 2 sondaggi geognostici con relative down-hole e analisi di laboratorio) hanno permesso di definire l'andamento del *bedrock* e gli spessori delle coperture costituite da depositi alluvionali e da depositi antropici superficiali, oltre ai corrispondenti parametri geofisici e geotecnici.

Poiché gli spessori delle coperture variano tra 5 e 10 metri, l'area del fondovalle risulta essere a rischio di amplificazione a causa del contrasto di impedenza sismica che si può venire a creare tra copertura e substrato roccioso e che risulta piuttosto elevato. Ulteriori casi di amplificazione stratigrafica e di focalizzazione delle onde sismiche si possono avere in situazioni di bordo valle e di raccordo col versante, spesso anche con presenza di coperture detritiche e/o eluvio-colluviali.

Anche l'area in corrispondenza del *thrust* regionale passante per il centro storico può costituire una zona di criticità in quanto rappresenta una potenziale zona di debolezza all'interno della quale si possono generare effetti di focalizzazione delle onde..

Infine, tutte le zone di frana, in minor parte quelle stabilizzate, sono suscettibili ad una accentuazione dei fenomeni di instabilità a causa degli effetti dinamici che si possono verificare in occasione di eventi sismici.

Tutte queste problematiche sono state riassunte nella cartografia delle Microzone Omogenee in Prospettiva Sismica (MOPS), la quale dovrà essere inserita, a cura dell'Amministrazione Comunale, all'interno del quadro conoscitivo del proprio strumento urbanistico generale e che costituirà la base fondamentale per una buona determinazione dei futuri programmi d'indagine sia da un punto di vista quantitativo sia in riferimento alle migliori tipologie in funzione del contesto da indagare.

Invece, la cartografia di microzonazione sismica di livello 3, meglio illustrata nei precedenti capitoli, deve rappresentare la cartografia di pericolosità sismica di cui al regolamento regionale 53R/2011, la quale permetterà di individuare le condizioni di fattibilità sismica nell'ambito della revisione dello strumento urbanistico comunale.

In via preliminare, rimandando la scelta definitiva al professionista che verrà incaricato della revisione dello strumento urbanistico comunale, si consigliano i seguenti abbinamenti per l'individuazione delle classi di pericolosità sismica (di cui al regolamento regionale 53R/2011) limitatamente alle aree in cui è stata redatta la cartografia di microzonazione sismica di livello 3:

ZONA A = classe di pericolosità sismica S1;

ZONA B = classe di pericolosità sismica S2;

ZONE C, D ed E = classe di pericolosità sismica S3

Inoltre, si fa presente che, in corrispondenza delle aree di instabilità di versante dovuta a fenomeni gravitativi quiescenti ed inattivi, dovranno essere perimetrate le classi di pericolosità S2 ed S3, secondo le indicazioni meglio definite dal regolamento regionale 53R/2011.

Nelle aree interessate dalla cartografia di livello 3 non si ritiene necessario nell'ambito del regolamento urbanistico un approfondimento in termini di nuove indagini se non limitatamente alle zone attualmente non ancora interessate dalla presenza di indagini geognostiche e dove il valore del fattore d'amplificazione (FH) è derivante da estrapolazione.

Infine, limitatamente alle zone C, D ed E (classe di pericolosità S3) si ritiene obbligatorio inserire, nell'ambito del regolamento urbanistico, che la progettazione di edifici strategici e/o rilevanti ricadenti in classe d'indagine 3 e 4 (di cui al reg. regionale 36R/2009) sia effettuata mediante l'ausilio di analisi di risposta sismica locale di sito, adottando le condizioni più cautelative tra quelle ricavate dall'analisi di sito e quelle ottenute mediante la definizione delle categorie di sottosuolo, di cui alle NTC 2008.

9.0. Bibliografia

AA.VV. (2007) – *Istruzioni tecniche per le indagini geologiche, geofisiche, geognostiche e geotecniche per la valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana. VOLUME 1B Criteri, metodologie, modalità di presentazione delle indagini e degli elaborati* “Programma VEL” e “Programma di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici pubblici e/o strategici in muratura o in cemento armato (VSM e VSCA)” in Garfagnana, Lunigiana, Valtiberina, Casentino, Mugello ed Amiata. Regione Toscana – Direzione Generale Politiche Territoriali ed Ambientali – Servizio Sismico Regionale.

AA.VV. (2007) – *Istruzioni tecniche per le indagini geologiche, geofisiche, geognostiche e geotecniche per la valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana. VOLUME 5 Legende per la realizzazione della cartografia geologica, geomorfologia e litologico-tecnica per le aree del Mugello* “Programma VEL” e “Programma di valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici pubblici e/o strategici in muratura o in cemento armato (VSM e VSCA)” in Garfagnana, Lunigiana, Valtiberina, Casentino, Mugello ed Amiata. Regione Toscana – Direzione Generale Politiche Territoriali ed Ambientali – Servizio Sismico Regionale.

BENVENUTI M. (1996) – *Carta Geologica del bacino Fluvio-Lacustre del Mugello (Firenze) Scala 1:50.000*. ARCA ed.

BENVENUTI M. (1997) – *Physical stratigraphy of the fluvio-lacustrine Mugello Basin (Plio-Pleistocene, Northern Apennines, Italy)* – *Giornale di Geologia*, ser.3°, vol. 59/1-2: 91-111.

BENVENUTI M. (2003) – *Facies Analysis and tectonic significance of lacustrine fan-deltaic successions in the Pliocene-Pleistocene Mugello Basin, Central Italy*, – *Sedimentary Geology*, Vol.157, pp.197-234, Elsevier, Amsterdam.

BENDKIK A., BOCCALETTI M., BONINI M., POCCIANI C. & SANI F. (1994) – *Structural evolution of the outer Apennine chain (Firenzuola-Città di Castello sector and Montefeltro area, Tuscan-Romagnan and Umbro-Marchean Apennine)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 48: 515-522.

BETTELLI G., BOCCALETTI M., CIBIN U., PANINI F., POCCIANI C. & ROSSELLI S. (2002) – *Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000. Foglio 252 "Barberino di Mugello"*. *Serv. Geol. d'Italia* – Regione Emilia-Romagna.

BULGARINI D'ELCI G., CERTINI L., GABBANI G. & NAPOLEONE G., (1977) – *Primi risultati della misura dell'attività sismica nel bacino del Mugello*. *Ateneo parmense*.

DE CASTRO C. & PILLOTTI C. (1993) - *I giacimenti di lignite della Toscana*. *Mem. Desc. Carta Geol. D'Italia*, 23, 3-23.

DELLE DONNE D. (2005) – *Tettonica Attiva dell'Appennino Settentrionale nel settore compreso tra l'Appennino Pistoiese e l'alta Val Tiberina*, Tesi di dottorato, Università di Firenze.

DE DONATIS M. E MAZZOLI S. (1994) – *Kinematic evolution of thrust-related structures in the Umbro-Romagnan parautochton (northern Apennine, Italy)*. *Geologica Ultraiectina*, 19, 1-98.

DE JAGER J. (1979) - *The relation between tectonics and sedimentation along the "Sillaro Line" (Northen Apennines, Italy)*. *Geologica Ultraiectina*, 19, 1-98.

FACCIORUSSO J., MADIAI C., PULITI A., VANNUCCHI G., BAGLIONE M., FABBRONI P. & D'INTINOSANTE V. (2012) – *Seismic microzonation of an urban settlement of central Italy: geological features and selection of a proper amplification factor*. Second International Conference on performance-based design in Earthquake Geotechnical Engineering. May 28-30, 2012 - Taormina (Italy).

GEMINA (1962) – *Il bacino del Mugello*. In: *Ligniti e torbe dell'Italia continentale*. Roma, 61-70.

GRUPPO DI LAVORO MS (2008) – *Indirizzi e Criteri Generali per la Microzonazione Sismica*, Conferenza delle Regioni e della Province Autonome – DPC, Roma

KOTTKE ALBERT R. & RATHJE ELLEN M. (2008) – *Technical Manual for Strata* - PEER 2008/10

KUHLEMEYER R.L. & LYSIMER J. (1973) – Finite element method accuracy for wave propagation problems. *J. Soil Mech. & Foundations*. Div. ASCE, 99 (SM5), pp 421-427

LANZO G. & SILVESTRI F. (1999) – *Risposta Sismica Locale*. Edizioni Hevelius.

MANTOVANI E., VITI M., BABBUCCI D., CENNI N., TAMBURELLI C., FIANCHISTI G., BAGLIONE M, D'INTINOSANTE V. & FABBRONI P. (2011) – *Quaternary Sismotettonica dell'Appennino settentrionale. Implicazioni per la pericolosità sismica della Toscana*. Stampa Centro stampa Giunta Regione Toscana.

MANTOVANI E., VITI M., BABBUCCI D., CENNI N., TAMBURELLI C., VANNUCCHI A., FALCIANI F., FIANCHISTI G., BAGLIONE M, D'INTINOSANTE V. & FABBRONI P. (2012) – *Potenzialità sismica della Toscana e definizione di criteri di priorità per interventi di prevenzione*. Stampa Centro stampa Giunta Regione Toscana

MARTINI I.P. & SAGRI M. (1993) – *Tectono-sedimentaries characteristics of Late Miocene-Quaternary extensional basins of the Northern Apennines, Italy*. *Earth Science Reviews*, 34. 197-233.

MARTELLI L., POCCIANTI C., BENINI A. & ROSSELLI S. – *Carta Geologica d'Italia a scala 1.50.000, Foglio 253, Marradi*. Servizio Geologico d'Italia – Regione Emilia-Romagna.

MINISTERO DELLA INFRASTRUTTURE (2008), D.M. 14/01/2008 (G.U. n.29 del 04/02/2008) – *Norme Tecniche per le Costruzioni*, Roma

PRINCIPI G. et alii (in prep.) - *Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000*. Foglio 263 "Prato". Serv. Geol. D'Italia.

RIPEPE M., MARCHETTI E. et alii (2008) – *La sequenza sismica del Mugello del 1 marzo 2008, registrata dalla rete sismica locale*, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze

ROVIDA A., CAMASSI R., GASPERINI P., STUCCHI M. (eds.), (2011) – *CPT111, the 2011 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Milano, Bologna (<http://emidius.mi.ingv.it/CPT1>).

SANI F., (1991) – *Rilevamento strutturale della catena appenninica nel settore Firenzuola-Bocca Trabaria*. Mem. Descr. Carta Geol. It., 46: 327-337.

VANNUCCI G. (1999) – *Individuazioni di strutture attive nell'Appennino centro-settentrionale sulla base di dati macrosismici storici*. Tesi di Dottorato di Ricerca in Tettonica e Geologia Strutturale, XII Ciclo. Univ. di Camerino, 249 pp.