

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## Relazione Illustrativa

### Regione Toscana Comune di S. Godenzo (FI)



<b>Regione</b>  Regione Toscana – Settore Sismica	<b>Soggetto realizzatore:</b>  Comune di S.Godenzo /Servizio Assetto del Territorio/RUP Geom. Franco Pretolani  Professionisti incaricati: Dott. Geol. Eros Aiello Dott. Geol. Gabriele Grandini Dott. Geol. Cristian Pieroni Dott. Geol. Francesco Puccetti   <small>Via Andrea del Castagno, 8 - 50132 Firenze tel.055/671393, 055/675964, fax.055/6522329 E3 info@ggeocoprogetti.com</small>	<b>Data</b>  Aggiornamento Cartografico Dicembre 2021
---	---	--

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 SAN GODENZO**  
Maggio 2013



Veduta panoramica del centro storico di San Godenzo.

**a cura di:**

F. Vannini<sup>1</sup>, V. D'Intinosante<sup>1</sup>, V. Nencini<sup>1</sup>,

**con la collaborazione tecnica di:** M. Rossi<sup>2</sup>

### INDICE

<sup>1</sup> 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](http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica) -  
[sismica@regione.toscana.it](mailto:sismica@regione.toscana.it)

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

<b>1.0. Introduzione.....</b>	<b>Pag. 3</b>
<b>2.0. Definizione della pericolosità di base e degli eventi di riferimento.....</b>	<b>Pag. 11</b>
<b>3.0 Assetto geologico e geomorfologico dell'area.....</b>	<b>Pag.19</b>
<b>4.0 Dati geotecnici e geofisici.....</b>	<b>Pag.30</b>
<b>5.0 Modello del sottosuolo .....</b>	<b>Pag.32</b>
<b>6.0. Interpretazioni ed incertezze.....</b>	<b>Pag. 37</b>
<b>7.0 Metodologie di elaborazione e risultati .....</b>	<b>Pag.37</b>
<b>8.0 Elaborati cartografici .....</b>	<b>Pag.59</b>
<b>9.0 Bibliografia.....</b>	<b>Pag.65</b>

## 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-tecniche 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 San Godenzo, 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

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

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 geolito-logiche 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 paleovalvei, 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

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

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

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

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 San Godenzo, 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.

## 2.0. Corografia: Delimitazione delle aree di indagine

Il paese di San Godenzo si trova lungo la Strada Statale Tosco-Romagnola n.67 e sorge all'interno della stretta valle solcata dal Torrente S. Godenzo raggiungendo una quota media di 400 m sul livello del mare. L'area del capoluogo è collocata all'interno della biforcazione creata dai due affluenti (il Torrente Orsiano e lo stesso Torrente S. Godenzo) del Torrente S. Godenzo e delimitata verso Est dal rilievo denominato Poggio del Cavallino.

La frazione de "Il Castagno d'Andrea" si trova qualche chilometro più a sud, lungo la S.P. del Castagno (Via del Falterona).

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** – Delimitazione delle aree individuate per le indagini

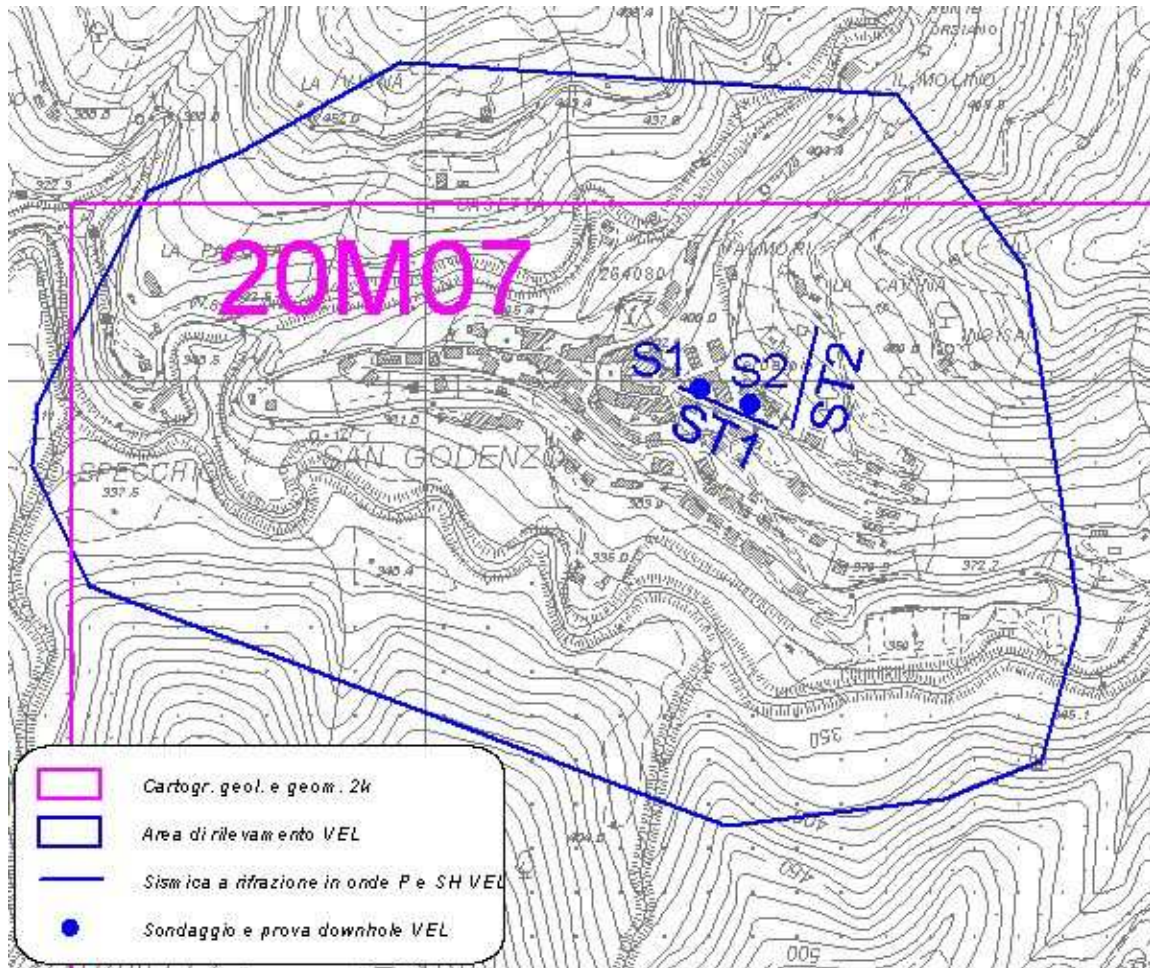
L'individuazione delle aree interessate dal progetto è stata effettuata in base alla localizzazione e alla distribuzione dei principali centri urbani, definiti sulla base delle informazioni fornite dall'Amministrazione Comunale e a seguito di esame di carte topografiche di base in scala 1:2.000 e 1:10.000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

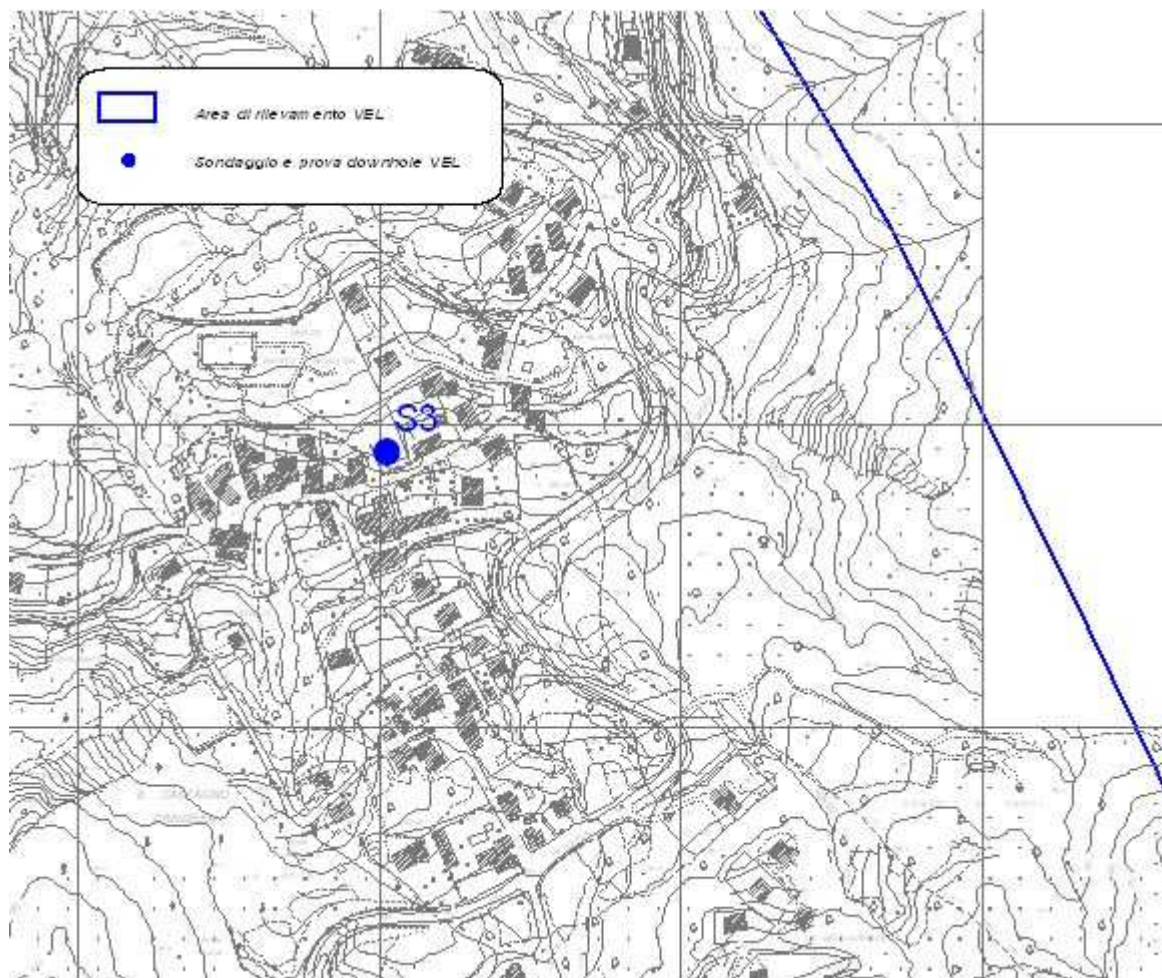
In altre parole se per esempio l'area delimitata è ubicata su un fondovalle, si cerca di delimitare l'area considerando tutti gli aspetti geomorfologici presenti: quindi anche i versanti della valle stessa. Nello stesso modo verranno evidenziati anche gli aspetti geologici e strutturali di tutta la valle.

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 geofisiche e geotecniche eseguite nel capoluogo.



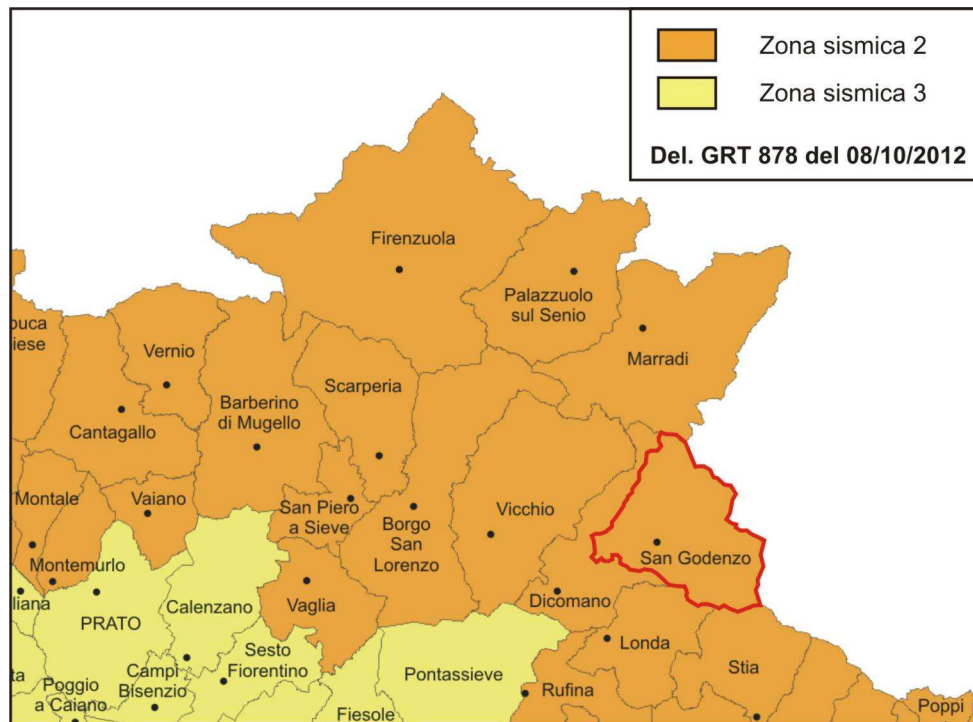
**Fig.1.3** – Ubicazione delle indagini geofisiche e geotecniche eseguite nell’abitato di Castagno d’Andrea.

Comune	località	Superficie (ha)	Superficie totale (ha)
S. Godenzo	capoluogo	79,05	207,74
	Castagno d'Andrea	128,69	

**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 San Godenzo, sono classificati in zona sismica 2 (Del GRT 878/2012). Del resto il comune di San Godenzo è stato tra i primi comuni classificati in zona sismica 2, ovvero a partire dal 1927.

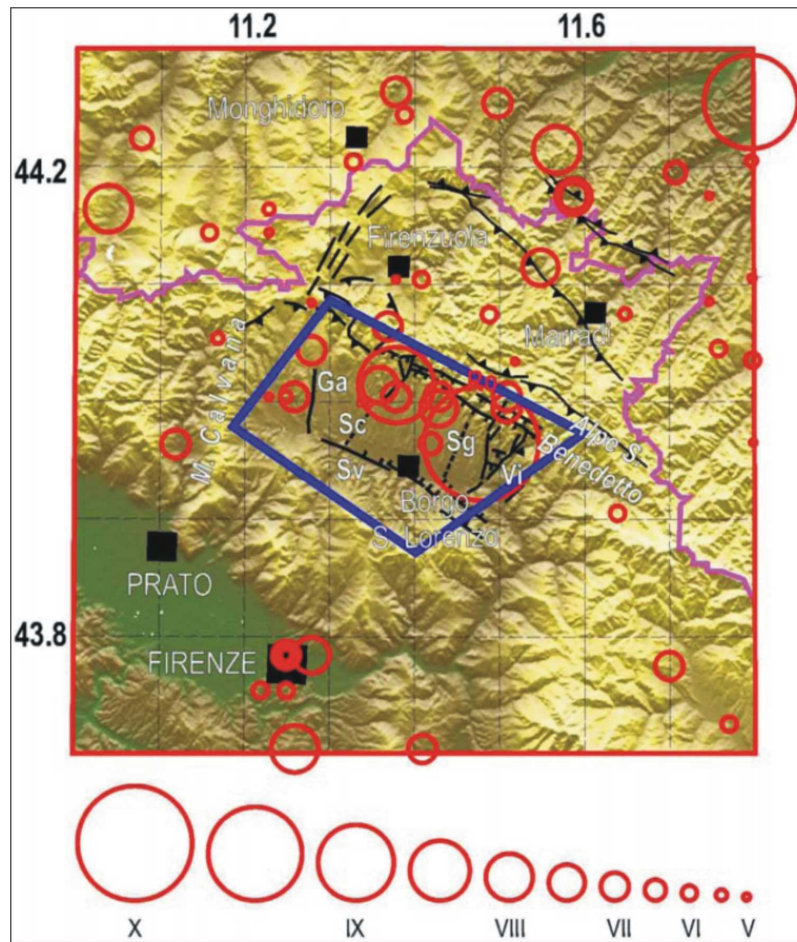


**Fig.2.1** – Classificazione sismica dell’area del Mugello; in rosso è evidenziato il territorio comunale di San Godenzo

L’attività sismica di questa zona (Fig.2.2 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 San Godenzo. La Mappa è relativa alla distribuzione dei valori stimati di accelerazione ( $a_g$ ) 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 San Godenzo, 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>

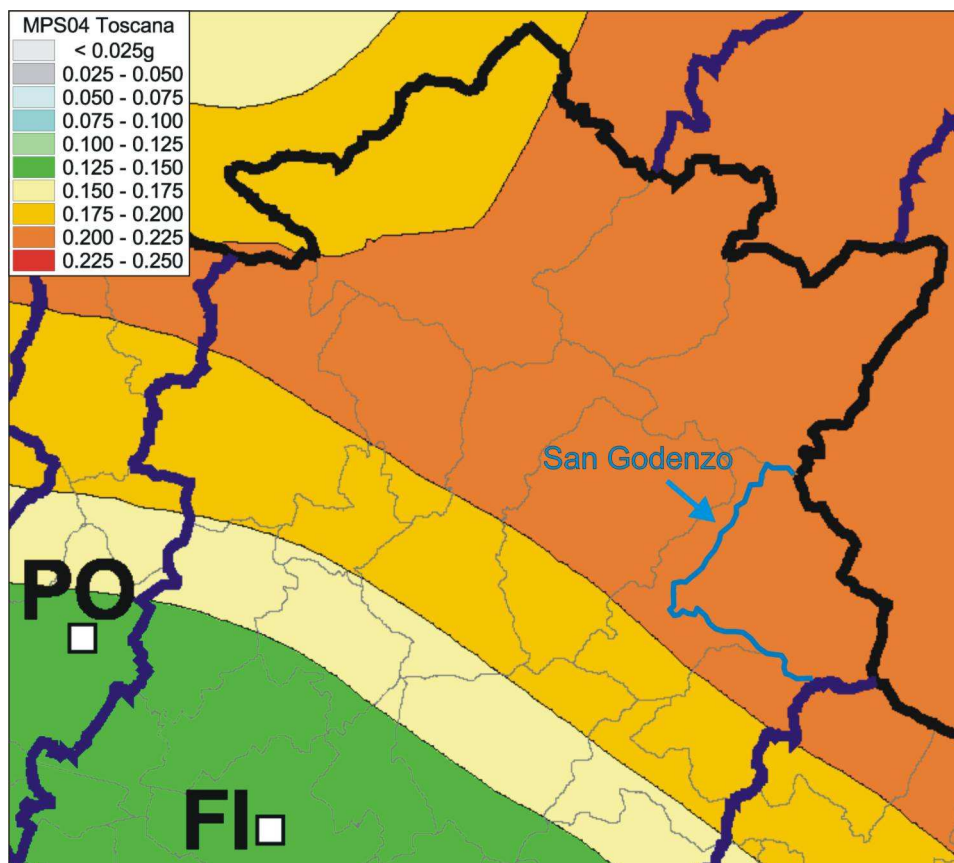


**Fig.2.2** – Sismicità storica dell’area del Mugello. I cerchi rossi indicano i terremoti avvenuti dopo il 1000. I principali elementi tettonici, riportati anche sullo schema geologico (Fig.1.3.4), sono in nero. Si può notare che le scosse storiche principali di questa zona hanno interessato segmenti 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 San Godenzo. In grassetto i terremoti con  $I_{max} \geq 8/9$  o  $M \geq 5.5$ .  $M_w$  = Magnitudo momento riportata nel catalogo CPTI11 (Rovida et alii, 2011).  $I_0$  e  $I_{max}$  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 $M_w$	Intensità $I_0$ ( $I_{max}$ )	T (anni)
<b>1542</b>	<b>6</b>	<b>13</b>	<b>Mugello</b>	<b>44.01</b>	<b>11.39</b>	<b>5.9</b>	<b>9</b>	
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
<b>1919</b>	<b>6</b>	<b>29</b>	<b>Mugello</b>	<b>43.96</b>	<b>11.48</b>	<b>6.3</b>	<b>10</b>	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 San Godenzo e per la frazione di Castagno D’Andrea 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.

L’input sismico è stato definito mediante la procedura messa a punto dall’Università di Pavia nell’ambito di un Accordo di Collaborazione Scientifica con la Regione Toscana, finalizzata alla “Definizione di input sismici sismocompatibili e spettro-compatibili per i comuni della regione Toscana”.

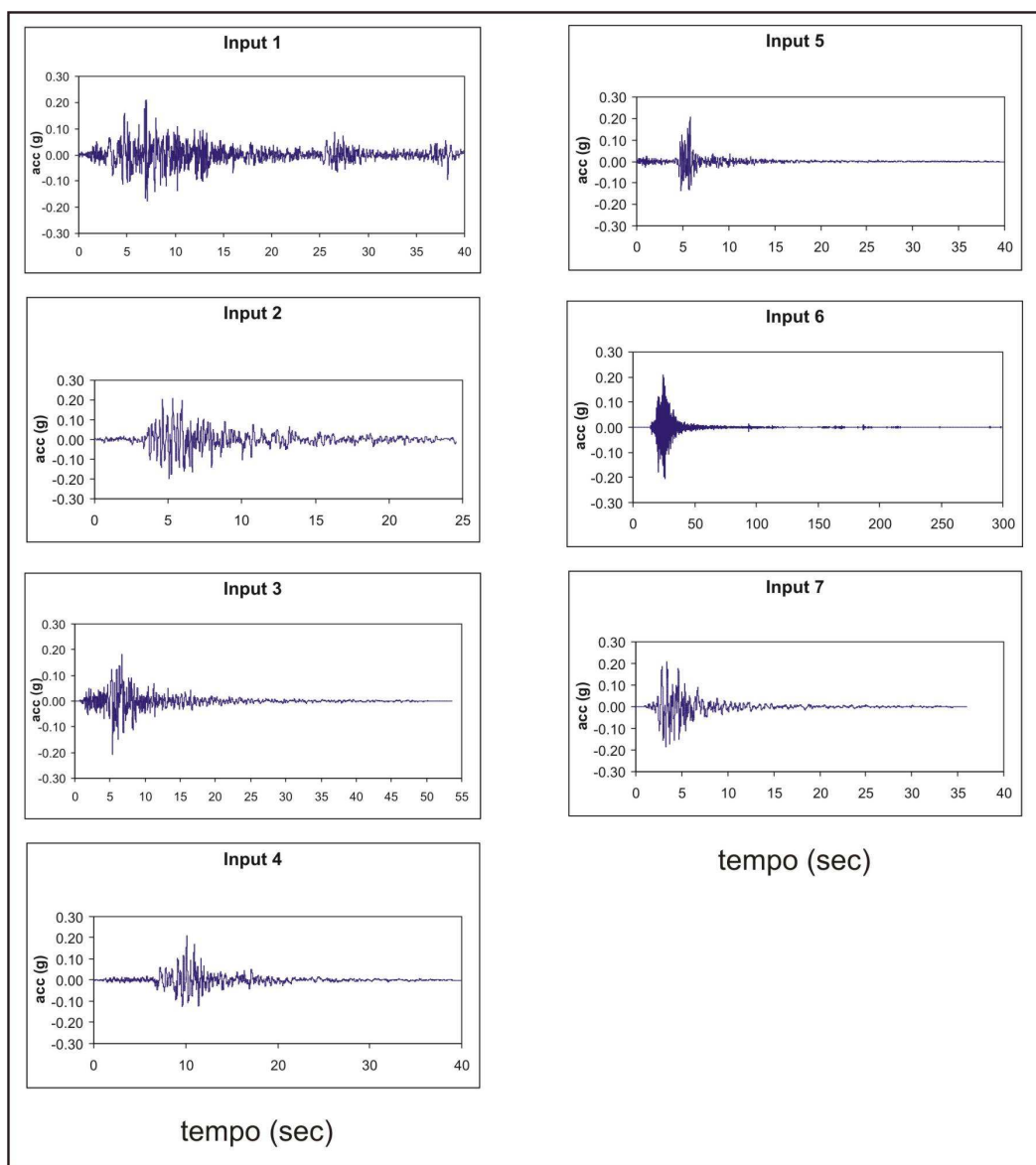
A tal proposito è stato sviluppato un codice di calcolo di semplice utilizzo che fornisce, in funzione del sito e del periodo di ritorno considerati, l’input sismico compatibile con le NTC08 sia in termini spettrali che di accelerogrammi spettro-compatibili. Il codice, scritto in Fortran90, è chiamato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

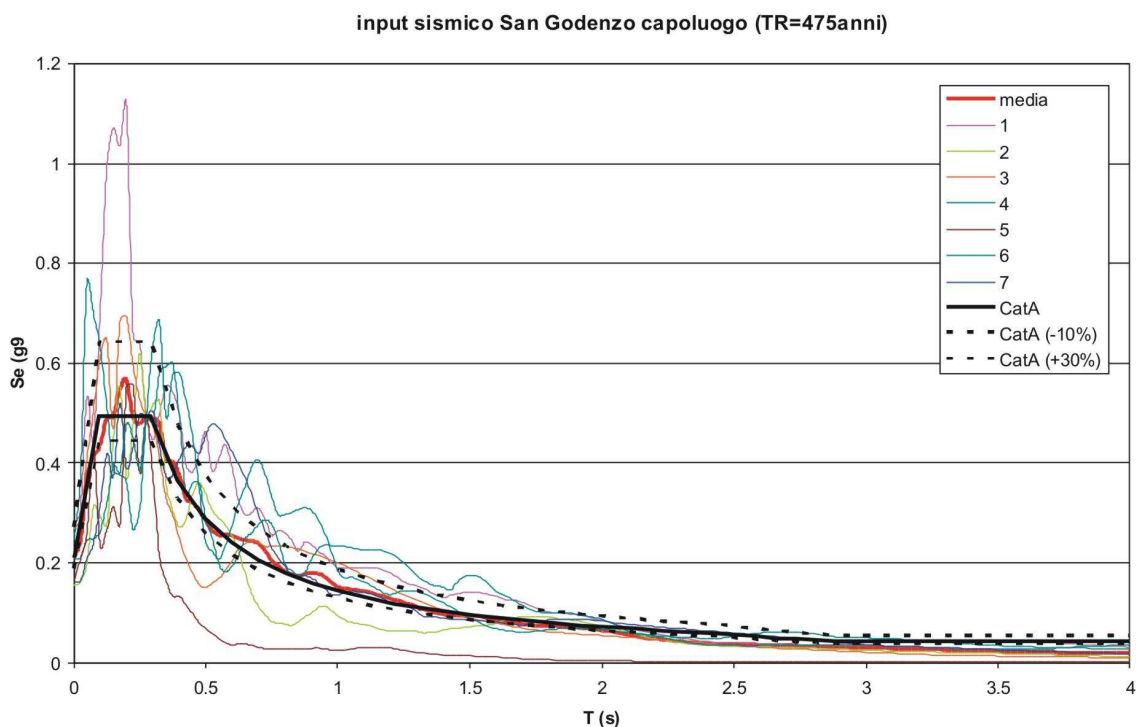
Le analisi di risposta sismica locale realizzate per la microzonazione sismica di livello 3 oggetto del presente lavoro fanno riferimento ad un input sismico relativo ad un periodo di ritorno di 475 anni.



**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 San Godenzo (il valore è riferito convenzionalmente alla sede comunale, per la quale è previsto un valore di  $a_g$  pari a  $0.210g$  per un tempo di ritorno di 475 anni). Dal grafico è possibile notare la spettro-compatibilità della media dei

7 input a confronto con lo spettro target di normativa. Per l'area di Castagno d'Andrea sono stati estratti i medesimi input sismici, normalizzati al valore di  $a_g$  del sito (0.207g), leggermente differente dal valore del capoluogo.



**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 centro abitato di San Godenzo.

**Tab.2.2** – Informazioni relative ai 7 accelerogrammi spettro-compatibili utilizzati come input sismico: Magnitude  $M_w$  = 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 ( $M_w$ )	Epic.Distance(km)	Scaling Factor	Source File Name
1	6.87	11	0.82	ESD 000182xa.cor
2	6.2	32	2.01	ESD 000234ya.cor
3	5.74	12.56	2.03	NGA 0146y.txt
4	6.93	83.53	1.98	NGA 0804y.txt
5	5.61	39.6	1.69	NGA 1649y.txt
6	6.6	36.18	1.97	KNET1 SAG0010503201053.NS
7	5.6	22	2.56	ITACA 19971014_152309ITDPC_CSC__WEC.DAT

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 deconvoluti mediante l'utilizzo del software STRATA (Kottke & Rathje, 2008), al fine di ricondurli alle caratteristiche medie 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

Dal punto di vista geologico il substrato pre-quadernario, costituito dalla Formazione Marnoso-Arenacea romagnola e dell'Unità Tettonica di M. Castel Guerrino, affiora prevalentemente presso Località Capoluogo lungo i versanti che circondano il Torrente S. Lorenzo.

Di seguito, data la diversa situazione geologica e geomorfologica dell'abitato di S. Godenzo e della Località Castagno d'Andrea, si analizzano separatamente le caratteristiche di ciascuna località.

#### *Località Capoluogo*

Per quanto riguarda il Capoluogo, dal punto di vista geologico nell'area di studio sono presenti numerosi affioramenti di substrato pre-quadernario.

Numerosi affioramenti sono stati individuati e cartografati lungo i ripidi versanti che sormontano la valle e lungo il Torrente S. Godenzo che, molto frequentemente, scorre direttamente, erodendo, sul substrato roccioso.

Lo stesso centro storico, in particolare la porzione più orientale, poggia in buona parte direttamente su roccia.

Il substrato roccioso è costituito dai membri della Formazione Marnoso-Arenacea (**FMA**, caratterizzata dall'alternanza di arenarie e peliti) e dalla Formazione del Torrente Carigiola (**TCG**, alternanze arenaceo-pelitiche in strati gradati e con presenza di strati spessi) appartenente all'Unità Tettonica M. Castel Guerrino.

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 ovviamente presenti lungo il corso del Torrente S. Godenzo e del Torrente Orsiano. Lungo il corso di questi torrenti, separati dai depositi attuali da una scarpata di pochi metri di altezza, sono presenti lembi di depositi alluvionali terrazzati (**b<sub>3</sub>** Pleistocene Medio-Olocene) con ciottoli e ghiaie 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, ubicato attorno al centro storico di S. Godenzo, è generalmente costituito da clasti angolosi di natura arenitica.

I depositi franosi presenti a Nord del Torrente Orsiano (**a<sub>1</sub>**, Pleistocene Medio/Superiore – Olocene), sono caratterizzati dalla presenza caotica ed eterogenea di materiali litoidi (prevalentemente di natura arenacea) in matrice limoso-sabbiosa e limo-argillosa.

#### *Località Castagno d'Andrea*

L'abitato di Castagno d'Andrea è compreso tra le quote di 700 e 750 metri ed è interamente ubicato al di sopra di un deposito di accumulo (**a<sub>1</sub>**) di una paleofrana stabilizzata ben nota in letteratura. Un più recente fenomeno gravitativo di colamento di dimensioni ovviamente minori è presente a NE del paese presso la Località "Le Caselle".

L'area di studio, prevalentemente montuosa e in assenza di un corso d'acqua principale, è quindi caratterizzata dalla presenza di detrito di versante (**a**, con clasti arenitici in matrice sabbiosa) lungo i pendii e dall'assenza di depositi alluvionali.

Le Formazioni affioranti all'esterno del suddetto corpo di frana appartengono, muovendosi da Ovest verso Est, all'Unità Tettonica Acquerino (**AQR1** e **MVV**), all'Unità Tettonica M. Castel Guerrino (**TCG**) e alla Formazione marnoso-arenacea (**FMA1** e **FMA2**) del Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo.

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

I depositi Plio-Quaternari 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-pleioceno, 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 S. Godenzo, questa è costituita dall'alto verso il basso dalle seguenti formazioni:

## **DEPOSITI QUATERNARI**

### **DEPOSITI ALLUVIO-COLLUVIALI**

#### **Depositi di frana (a<sub>1</sub>)**

I depositi franosi, molto estesi presso la Località Castagno d'Andrea, sono costituiti da sabbie e frammenti arenacei in relazione al substrato pre-quaternario su cui si sono impostati. In particolare modo i depositi appartenenti alla paleofrana sono costituiti frequentemente da blocchi di dimensioni metriche di arenaria.

#### **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 Fiume Godenzo e dai corsi d'acqua secondari.

Descrizione litotecnica di campagna: attenendosi alla *Guida schematica alla definizione di unità litologico-tecnica (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. Sia nell'area di Castagno D'Andrea che di San Godenzo sono presenti estesissimi accumuli alla base dei versanti, in quest'ultimo sono anche estesi i corpi di detrito allo sbocco degli impluvi (Fig.3.1).

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*



**Fig. 3.1** – Cono di detrito allo sbocco degli impluvi in sinistra idrografica del Fiume Godenzo.

### **Depositi alluvionali antichi terrazzati e recenti (bI-n)**

Si tratta di depositi fluviali di ambiente di piana alluvionale, deposti dal Fiume Sieve 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 di Castagno D'Andrea hanno estensioni estremamente limitate e sono stati riconosciuti esclusivamente due ordini di terrazzi. In San Godenzo sono stati riconosciuti tre ordini di terrazzi, dei terrazzi di primo e secondo ordine si riconoscono esclusivamente dei lembi, poiché la maggior parte delle antiche superfici sono state erose.

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*

### **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. Nell'area in esame sono presenti nel centro del paese di San Godenzo e se ne hanno solo poco evidenti tracce morfologiche. Gli spessori sono variabili dai 2-9m.

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*

## **SUBSTRATO PRE-PLIOCENICO**

Nelle aree del Comune di S. Godenzo rilevate il substrato è costituito da terreni riferibili al Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo (Fm. Marnoso-Arenacea), e al Dominio Toscano (Unità tettonica M. Castel Guerrino e Unità tettonica Acquerino).

## **DOMINIO UMBRO-MARCHIGIANO-ROMAGNOLO**

### **Formazione Marnoso-Arenacea**

La Formazione Marnoso-Arenacea è una successione torbidityca 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, subordinatamente da sud-est. A scala regionale è stata suddivisa in 14 membri parzialmente eteropici. I limiti tra i vari membri, trattandosi spesso di contatti graduali sfumati, sono stati posti convenzionalmente in corrispondenza di orizzonti guida di importanza regionale.

In quest'area affiorano: il membro di Premilcuore (FMA3), il membro di Corniolo (FMA2) e il membro di Biserno (FMA1).

### **Membro di Premilcuore (FMA3)**

Alternanze arenaceo-pelitiche di origine torbidityca, generalmente caratterizzate da un rapporto arenite/pelite da poco inferiore a 1 a circa 2. Gli strati hanno spessore generalmente da medio a molto spesso, talora banchi. Affiora nell'area ad est di San Godenzo.

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. B3.r1/4.d4/5.c4/5.

*Langhiano-Serravalliano inf. MNN5a-MNN6a*

### **Membro di Corniolo (FMA2)**

Alternanze pelitico-arenacee in cui il rapporto tra A/P è compreso tra 1/3 ed 1/2. Gli strati sono da sottili a spessi, subordinatamente molto spessi. Le arenite sono pressoché esclusivamente arcose e si presentano da mediate a poco cementate con frequenti strati a struttura caotica caratterizzati da una scarsa cementazione. Gli affioramenti migliori si trovano a nord del paese di San Godenzo e sul versante a nord di Castagno d'Andrea (Figg. 3.2 e 3.3).

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*



**Fig. 3.2** – Formazione Marnoso-Arenacea, membro di Corniolo FMA2, affiorante a NO di San Godenzo





**Fig. 3.3** - Formazione Marnoso-Arenacea, membro di Corniolo FMA2, affiorante a nord di Castagno d'Andrea.

### **Membro di Biserno (FMA1)**

In questo membro il rapporto tra arenaria e pelite è generalmente compreso tra 1/3 ed 1/5, talora anche inferiore, e vi si intercalano sottili emipelagiti dotate di una buona continuità laterale. I letti arenitici sono da molto sottili a medi (Fig. 3.4 e 3.5), talora spessi, raramente molto spessi, e si presentano mediamente cementati.

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.

*Burdigaliano medio-sup. MNN3b-Langhiano inf. MNN4b-MNN5a*



**Fig. 3.4** – Formazione Marnoso-Arenacea, membro di Biserno FMA1, affiorante presso il campo sportivo nel paese di San Godenzo.



**Fig. 3.5** – Formazione Marnoso-Arenacea, membro di Biserno FMA1, affiorante a NO di San Godenzo.

## UNITA' TETTONICA M. CASTEL GUERRINO

### Formazione del Torrente Carigiola (TCG)

A scala regionale la formazione è stata interamente suddivisa in 2 membri con tendenza fining and thinning upward. La potenza complessiva è di circa 1000 metri. Si tratta di depositi di un singolo sistema torbiditico contenente megatorbiditi silicoclastiche. Nell'area di San Godenzo affiora solo il membro inferiore (TCG1).

membro a megastrati arenacei (TCG1)

Alternanze arenaceo-pelitiche caratterizzate dalla presenza di potenti strati gradati (fino a 35 metri) con base da arenitica grossolana a microconglomeratica, spesso erosiva, seguita da uno potente intervallo arenitico, con gradazione spesso assente, strutture interne caotiche, scarsa cernita e con grossi inclusi pelitici. Questi strati si chiudono con un intervallo pelitico di spessore raffrontabile con la porzione arenitica. Questi megastrati si intercalano in una successione da arenaceo-pelitica a pelitico-arenacea, con strati da molto spessi (prevalenti) a sottili (subordinati) e con rapporto A/P da  $> 1$  a  $< 1$ . Affiora a sud e ad est di San Godenzo e a NO di Castagno d'Andrea (Fig. 3.6), tettonicamente interposto tra l'Unità tettonica Acquerino e la Formazione Marnoso-Arenacea.

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. B3.r1/4.d4/5.c4/5.

*Aquitaniense MNN1a-MNN1d*



**Fig. 3.6** – Formazione del T. Carigiola, membro TCG1, affiorante a NO di Castagno d'Andrea.

## UNITA' TETTONICA ACQUERINO

### Formazione dell'Acquerino

A scala regionale questa formazione, con una potenza complessiva di oltre 1.000 metri, rappresenta un singolo sistema deposizionale torbiditico ed è stata suddivisa in tre membri (AQR1, AQR2 e AQR3) che presentano una generale diminuzione del rapporto arenaria-pelite e dello spessore degli strati dal basso verso l'alto della formazione. Le impronte di fondo indicano una provenienza da O-NO. Nell'area di San Godenzo affiora solo il membro basale AQR1.

### Membro arenaceo-pelitico (AQR1) (Chattiano terminale-Aquitano MNN1a-MNN1indiff.)

Alternanze arenaceo-pelitiche in strati gradati da medi a molto spessi e banchi, con base arenitica a granulometria da fine a grossolana in relazione allo spessore dei livelli di arenite. Le arenarie sono di colore grigio al taglio e marrone all'alterazione. Il rapporto arenaria/pelite è  $> 1$  ed aumenta verso il basso. Contatto inferiore netto o per breve alternanza con MVV. Affiora nell'area di Castagno d'Andrea.

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. B3.r1/4.d4/5.c4/5.

*Chattiano terminale-Aquitano MNN1a-MNN1indiff*

### Marne Varicolori di Villore (MVV)

Marne e marne argillose intensamente foliate di colore grigio chiaro-verdastro e talora rosso-vinaccia. Contatto inferiore non affiorante poiché la formazione risulta sempre interessata da superfici di sovrascorrimento. Affiorano nell'area di Castagno d'Andrea (Fig. 3.7) dove marcano il sovrascorrimento tra l'Unità tettonica Acquerino e l'Unità tettonica Castel Guerrino.

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. B2.r5/6.d4/5.c4/5.

*Chattiano-Aquitano MNP25a-MNN1d*



**Fig. 3.7** – Marne Varicolori di Villore (MVV) affioranti a NO di Castagno d'Andrea.

## **Geomorfologia dell'area**

### *Località Capoluogo*

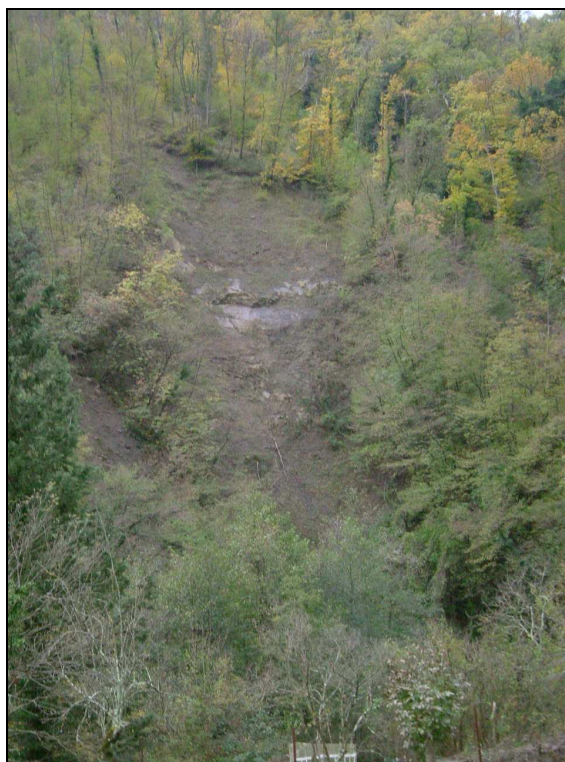
Il centro storico dell'abitato di San Godenzo è ubicato in destra idrografica del Torrente San Godenzo, al di sopra di una cresta rocciosa posta all'interno della confluenza tra il Torrente San Godenzo e il Torrente Orsiano.

Entrambi i torrenti presentano un andamento a meandri incassati all'interno di strette valli lungo le quali affiora prevalentemente il substrato roccioso. All'interno dei frequenti meandri si trovano piccoli lembi di depositi alluvionali terrazzati costituiti da ciottolami eterometrici e poligenici in matrice limoso-sabbiosa con tessitura da clasto a matrice-sostenuta, e subordinatamente ghiaie, sabbie e limi. Come precedentemente descritto sono stati riconosciuti tre ordini di terrazzi, dei terrazzi di primo e secondo ordine si riconoscono esclusivamente dei lembi, poiché la maggior parte delle antiche superfici sono state erose. I ripidi versanti costituiti prevalentemente da arenarie e marne sono caratterizzati dalla presenza di estesi accumuli di detrito e da frequenti fenomeni franosi. Questi ultimi sono maggiormente presenti lungo il pendio in destra orografica del Torrente Godenzo e del Torrente Orsiano in quanto favoriti dalla giacitura a franapoggio degli strati di arenarie e marne. I corpi di frana presenti nell'area di studio sono tutti quiescenti o stabilizzati per cause naturali ed i fenomeni gravitativi principali si trovano a Nord dell'abitato di S. Godenzo.

### *Località Castagno d'Andrea*

L'area di Castagno d'Andrea è completamente modellata dalla paleofrana che rase al suolo il villaggio nel 1335. L'attuale centro abitato di Castagno d'Andrea si trova sul corpo di questa antica valanga di roccia (fig. 3.9)

Il corpo di questa frana è composto da detriti di varie dimensioni e forma una vasta area mossa da evidenti gibbosità. Secondo alcuni autori l'evento franoso storico più catastrofico fu scatenato da un terremoto, ma sull'origine di questa frana, in parte ancora attiva, ha giocato un ruolo fondamentale il forte dislivello tra l'area di distacco e quella di accumulo e l'estrema fratturazione delle rocce, che ha favorito l'abbondante formazione di detriti (da sabbie a grossi massi) al piede dei versanti.



**Fig. 3.8** – Frana di crollo in sinistra idrografica del Fiume Godenzo.



**Fig. 3.9** – Particolare della paleofrana di Castagno d'Andrea.

### **Inquadramento Tettonico**

#### *Località Capoluogo*

Nell'area di San Godenzo la struttura principale è il sovrascorrimento dell'Unità tettonica Castel Guerrino sulla Formazione Marnoso-Arenacea. Gli strati hanno giacitura rovesciata a muro e a tetto del sovrascorrimento. La superficie di questo thrust ha una direzione NO-SE e viene probabilmente dislocata da una faglia sub-verticale, anch'essa a direzione NO-SE, con movimento apparente normale-destro e abbassamento del blocco a SO; tale faglia attraversa tutta l'area rilevata, interessando sia i terreni della Fm. Marnoso-Arenacea che la Fm. del T. Carigiola. Più esternamente all'interno della Fm. Marnoso-Arenacea, troviamo un sovrascorrimento minore, in corrispondenza del quale gli strati da rovesci si raddrizzano, e che sovrappone FMA2 a FMA3. Questa struttura, con andamento circa NNO-SSE, consiste probabilmente in una sinclinale rovesciata che ha sviluppato al nucleo un piano di taglio con movimento inverso, come spesso accade in questo tipo di strutture.

#### *Località Castagno d'Andrea*

A Castagno d'Andrea le strutture principali sono rappresentate dal sovrascorrimento dell'Unità tettonica Acquerino sull'Unità tettonica Castel Guerrino e di quest'ultima sulla Formazione Marnoso-Arenacea. Tali superfici, di estensione regionale, hanno direzione NO-SE ed immergono a SO. All'interno dell'Unità tettonica Acquerino sono presenti due sovrascorrimenti minori che sovrappongono la Fm. Dell'Acquerino, con giaciture degli strati rovesciate, sulle Marne Varicolori di Villore. La superficie di sovrascorrimento dell'Unità tettonica Castel Guerrino sulla Fm. Marnoso-Arenacea non affiora in quest'area in quanto rimane sepolta per la maggior parte al di sotto di un esteso corpo di frana.

All'interno della Fm. Marnoso-Arenacea sono state riconosciute tre faglie. La faglia ubicata nel settore settentrionale della zona studiata è ben visibile in affioramento per la brusca variazione della giacitura degli strati ed ha una direzione circa E-O (Fig. 3.10). Poco più a sud è presente una struttura in FMA2 che pone a contatto strati rovesciati con strati diritti: questa potrebbe essere

interpretata come una sinclinale rovesciata, successivamente dislocata al nucleo da una superficie di taglio ad alto angolo. La faglia più a sud, infine, pone a contatto FMA1 con FMA2 con un abbassamento relativo del blocco settentrionale.



**Fig. 3.10** – Faglia affiorante sul versante a nord di Castagno d’Andrea.

#### **4.0. Dati geotecnici e geofisici**

Dal rilievo geologico e geomorfologico eseguito nell’area di S. Godenzo erano emerse alcune problematiche geologiche e geomorfologiche 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.

Le indagini eseguite sono state eseguite all’interno del centro storico del Capoluogo con lo scopo 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 questo modo si è cercato di definire la profondità del *bedrock* sismico e di determinare lo spessore e dei parametri dinamici (soprattutto  $V_{SH}$ ) della copertura alluvionale e detritica presente al di sopra con lo scopo di analizzare possibili fenomeni di amplificazione sismica di natura stratigrafica

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.2a,b,c) e sono state le seguenti:

- campagna di indagini di sismica a rifrazione per il *Programma di Valutazione della Vulnerabilità sismica degli Edifici Scolastici (Scuola Materna e Scuola Elementare in Via Matteotti, Scuola Media e Palestra in Via A. Moro)*, eseguita nel Settembre del 2004 (n.1 linea di sismica a rifrazione);
- campagna di indagini geotecniche per il *Programma di Valutazione della Vulnerabilità sismica degli Edifici Scolastici (Scuola Materna e Scuola Elementare in Via Matteotti, Scuola Media e Palestra in Via A. Moro)*, eseguita nel Dicembre del 2004 (n.2 prove penetrometriche);
- campagna di indagini geotecniche e geofisiche in foro per il *Programma di Valutazione della Vulnerabilità sismica degli Edifici Scolastici (Scuola Materna e Scuola Elementare in Via Matteotti, Scuola Media e Palestra in Via A. Moro)*, eseguita nel Gennaio 2005 (n.2 sondaggi + DH + analisi di laboratorio);
- integrazione alla fase a) di campagna di indagini di sismica a rifrazione per il *Programma di Valutazione della Vulnerabilità sismica degli Edifici Scolastici (Scuola Materna e Scuola Elementare in Via Matteotti, Scuola Media e Palestra in Via A. Moro)*, eseguita nel Giugno del 2005 (n.1 linea di sismica a rifrazione);

Infine per la predisposizione del presente studio è stato necessario realizzare un ulteriore sondaggio (S3) ubicato nell'abitato di Castagno d'Andrea e una stesa di sismica a rifrazione (ST3), ubicata nel capoluogo. I risultati di tutte le indagini geofisiche, geotecniche e geofisiche in foro sono riportati nel DVD Allegato.

**Tab.2a** – Elenco delle linee sismiche realizzate

LOCALITA'	SIGLA	LUNGHEZZA	DATA ESECUZIONE	DATA CONSEGNA	IMPRESA	PROGRAMMA	SIGLA BANCA DATI
Capoluogo	ST1	120	giu-04	14/09/2004	Geof. Tosca	VEL	PSpsh1_VEL_ST1
Capoluogo	ST2	120	giu-05	21/06/2005	Geof. Tosca	VEL	PSpsh2_VEL_ST2
Capoluogo	ST3	60	ott-11	15/11/2010	Mannori	VEL	PSpsh3_VEL_ST3

**Tab.2b** – Elenco dei sondaggi e delle prove down-hole realizzate

SIGLA	PROF	D.L.	IMPRESA	DATA ESECUZIONE	DATA CONSEGNA	PROGRAMMA	SIGLA BANCA DATI	DATA ESECUZIONE DH	IMPRESA DH
S1	20	Martelli	Tecna	15/12/2004	15/01/2005	VEL	Sg1_VEL_S1	14/04/2005	Geof. Toscana
S2	15	Martelli	Tecna	17/12/2004	17/01/2005	VEL	Sg2_VEL_S2	14/04/2005	Geof. Toscana
S3	43	Vannini	Soiltest	05/09/2012	05/10/2012	VEL	Sg2_VEL_S3	14/10/2012	Trigeo

**Tab.2c** – Elenco delle prove penetrometriche realizzate

LOCALITA'	SIGLA	TIPOLOGIA DI PROVA	PROGRAMMA	SIGLA BANCA DATI	DITTA	DATA ESECUZIONE
Capoluogo	PpS1a	DPSH	VEL	Pdp1_VEL_PpS1a	Tecna	dic-04
Capoluogo	PpS2a	DPSH	VEL	Pdp2_VEL_PpS2a	Tecna	dic-04

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 San Godenzo 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/san\\_godenzo/san\\_godenzo.htm](http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/indagini/mugello/san_godenzo/san_godenzo.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.4 pozzi ad uso idropotabile con stratigrafia reperiti dall'archivio pozzi della Provincia di Firenze.
- 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).
- n.2 sondaggi geognostici reperiti nell'archivio del Genio Civile di Firenze.
- n.3 stese di sismica a rifrazione, fornite dall'Amministrazione Comunale di San Godenzo.

## 5.0. Modello del sottosuolo

A seguito di tutte le indagini geologiche, geofisiche e geotecniche svolte nell'area di indagine del Comune di San Godenzo, 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.

Le indagini svolte che hanno riguardato il **centro abitato di San Godenzo** consistono in n.3 prove penetrometriche (PpS1a-PpS2a), n.3 linee di sismica a rifrazione (ST1-ST3) e n.2 sondaggi (S1-S2) con relative prove down-hole. Dalle indagini svolte opportunamente integrate tra loro e con i dati di base 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<sub>1-n</sub>**), da detrito di versante (**a**) e da depositi di frana (**a1**).

Le **alluvioni attuali (b)** non sono state indagate data la loro vicinanza agli alvei attuali dei torrenti presenti nell'area. I **depositi alluvionali antichi terrazzati e recenti (b<sub>1-n</sub>)** sono costituiti da un ordine di terrazzo (**b3**), compreso tra le alluvioni attuali e il detrito alla base dei versanti, ubicato lungo il corso dei torrenti.

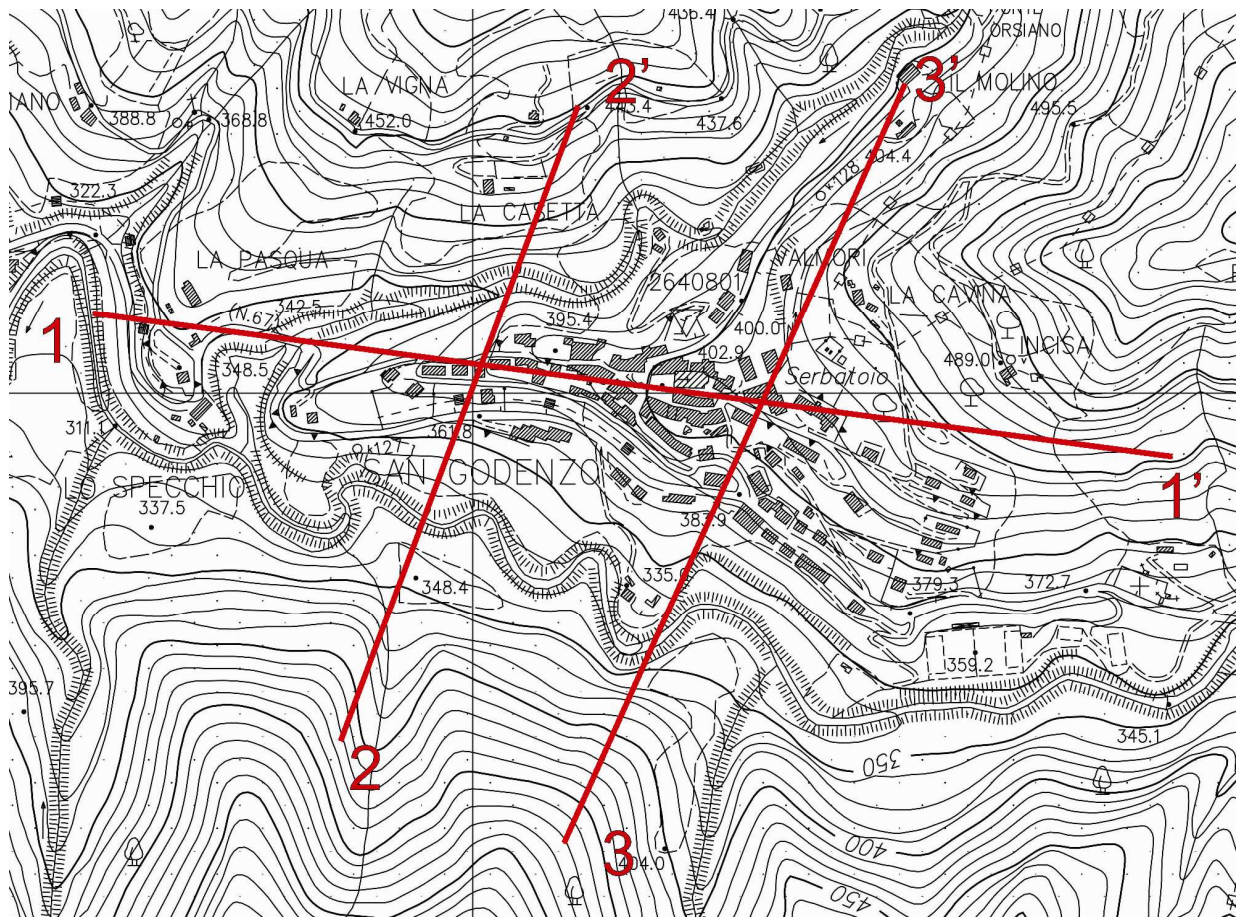
Tali depositi costituiti da materiale molto addensato, da ghiaia in matrice argillo-limosa con presenza di livelli sabbiosi e trovanti arenacei, presentano spessori variabili da pochi metri per i depositi più recenti fino a 8-10 metri per i depositi più antichi

Per quanto concerne il **detrito di versante (a)**, che costituisce delle estese coperture lungo i versanti dell'area di studio, è definito da velocità delle onde SH variabili tra 360 m/s e 640 m/s e da un alto numero di colpi SPT ( $N_{spt}= 76$  colpi). Il detrito è caratterizzato da clasti, prevalentemente arenacei, eterometrici a spigoli vivi in matrice limo-argillosa.

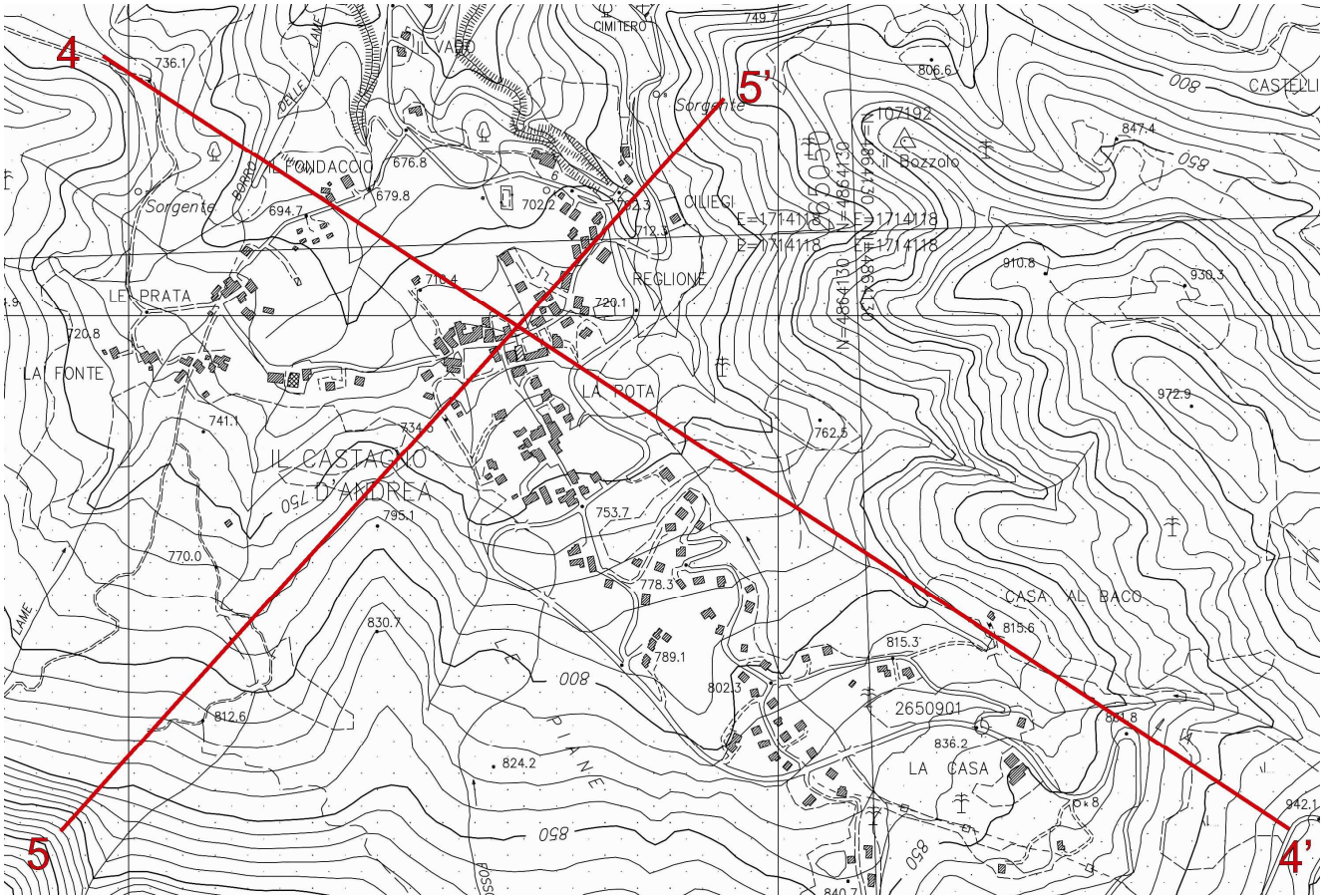
I movimenti franosi sono molto frequenti favoriti dalla acclività dei versanti (attorno ai 30°) e dalle formazioni della Marnoso-Arenacea costituite da alternanze di strati marnosi e arenitici. I principali corpi di frana (**a1q** e **a1sn**) sono ubicati a Nord del centro storico e presentano uno stato di attività stabilizzato per cause naturali o quiescenti.

Il substrato roccioso è costituito dal **Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo**, dall'**Unità Tettonica M. Castel Guerrino** e dall'**Unità Tettonica Acquerino**. Presso il Capoluogo, che è ubicato per gran parte al di sopra del substrato roccioso, sono presenti numerosi affioramenti dei Membri (**FMA1**, **FMA2** e **FMA3**) della **Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola** appartenente al **Dominio Umbro-Marchigiano-Romagnolo**. Più a Sud del Capoluogo, separato da un *thrust* con direzione appenninica, affiora la **Formazione del Torrente Carigiola (TCG)** dell'**Unità Tettonica M. Castel Guerrino**. Dalle indagini eseguite nel centro storico si è determinata una velocità delle onde SH relative al Membro di Corniolo (**FMA2**) medie di 1.535 m/s.

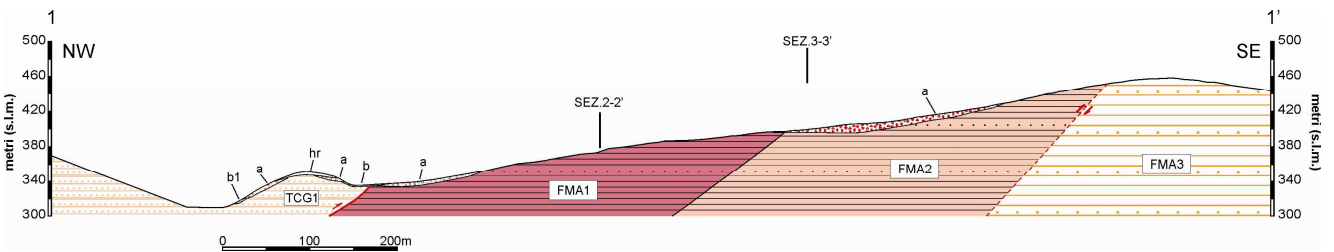
La località di **Castagno d'Andrea** è ubicata completamente al di sopra della estesa paleofrana in roccia (**a1sn**), costituita da materiale detritico di varie dimensioni, che nel 1335 distrusse il paese; Lo spessore delle paleofrana è superiore a 40 m. Le indagini eseguite nella frazione hanno permesso di suddividere i terreni di paleofrana in due orizzonti, quello superiore, dello spessore di circa 20 m caratterizzato da velocità delle onde SH di 400m/s e quello inferiore con velocità delle SH di 870 m/s. Ad Est si hanno affioramenti di substrato costituito da **FMA1** e **FMA2** della **Formazione Marnoso-Arenacea Romagnola**, ad Ovest, separato da un sovrascorrimento presente al di sotto del corpo di frana, affiora il **Membro a megastrati arenacei (TCG1)** dell'**Unità Tettonica M. Castel Guerrino**. Spostandosi ancora ad Ovest, affiorano, separati da vari contatti tettonici, il **Membro Arenaceo-Pelitico (AQR1)** e le **Marne Varicolori di Villore (MVV)** entrambi appartenenti all'**Unità Tettonica Acquerino**. A sud invece affiora il **Membro di Monte Falco (FAL1)**, della **Formazione delle Arenarie del Monte Falterona** appartenente alla **Dominio Toscano**.



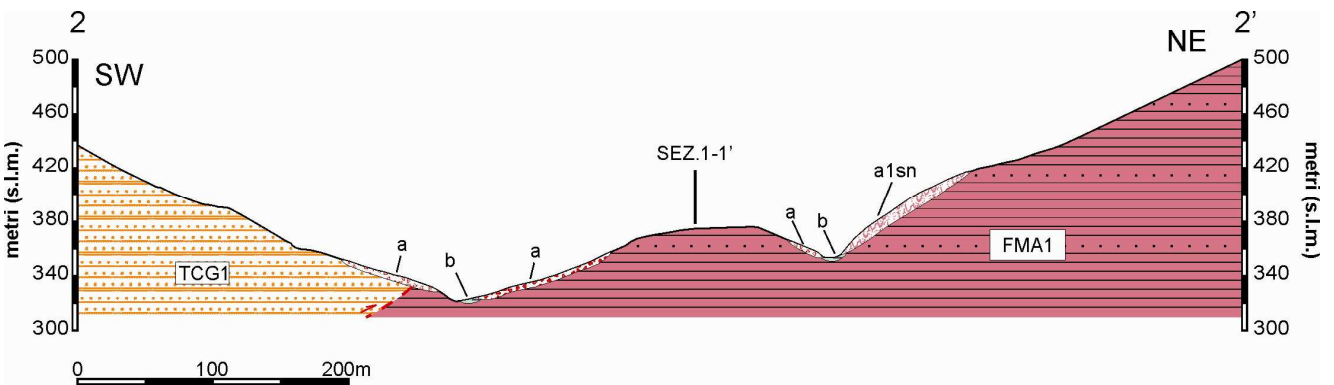
**Fig.5.1:** Ubicazione delle sezioni geologiche nel centro abitato di San Godenzo.



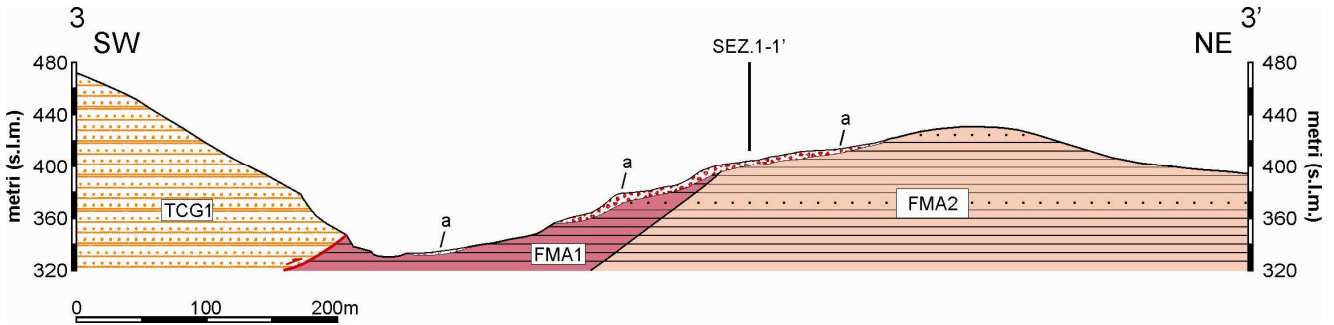
**Fig.5.2:** Ubicazione delle sezioni geologiche nella frazione di Castagno d'Andrea..



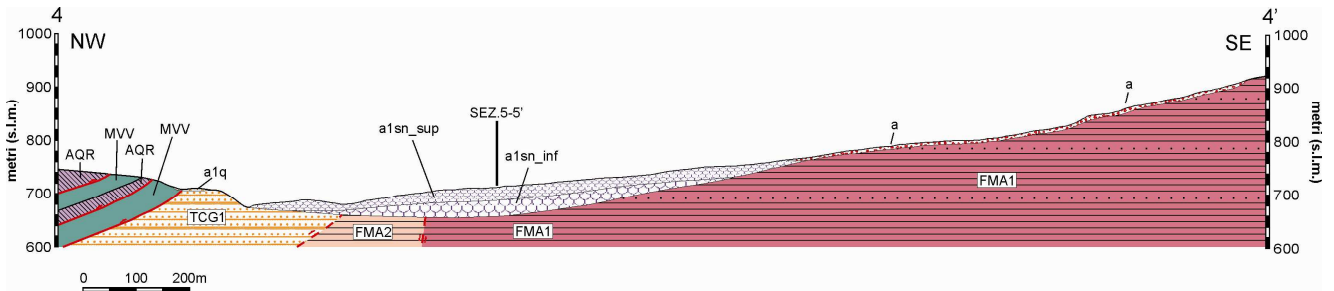
**Fig.5. 3:** Sezione geologica 1-1', nel capoluogo.



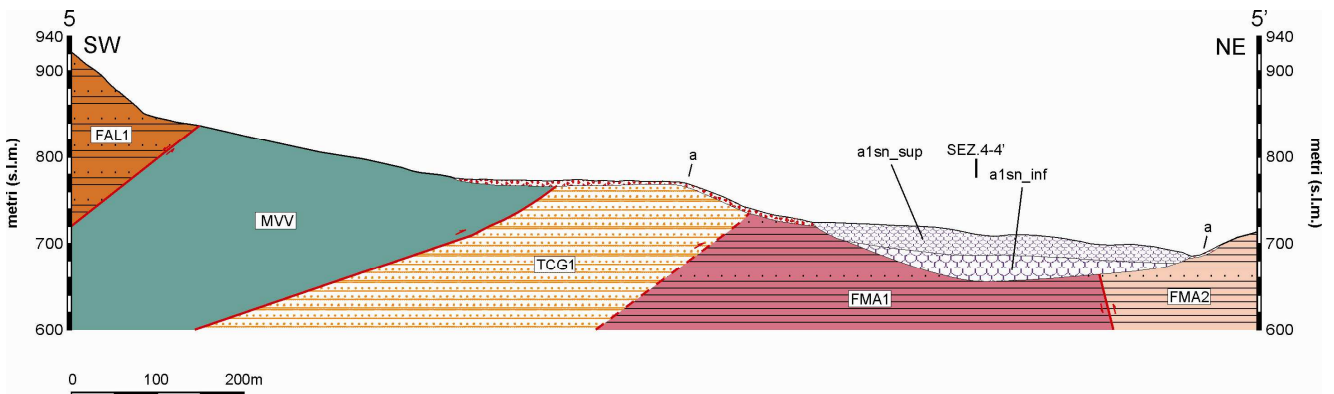
**Fig.5. 4:** Sezione geologica 2-2', nel capoluogo.



**Fig.5. 5:** Sezione geologica 3-3', nel capoluogo.



**Fig.5. 6:** Sezione geologica 4-4', a Castagno d'Andrea.



**Fig.5. 7:** Sezione geologica 5-5', Castagno d'Andrea.

Al modello geologico di sottosuolo definito sulla base dei rilievi geologici realizzati e delle indagini geognostiche e rappresentato sulla base delle n. 5 sezioni geologiche rappresentative, è stata associata una parametrizzazione geofisica media suddivisa per le varie formazioni geologiche, rappresentata nelle figure fig. 5.8 e 5.9. 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. Nei casi in cui le formazioni geologiche non fossero state investigate direttamente, i parametri sono stati desunti dal data-base del programma regionale VEL.

Formazione geologica	Sigla	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Rapporto Poisson	Densità Gamma (kg/dmc)	Modulo di taglio G (kg/cmq)	Modulo di Young E (kg/cmq)
Depositi alluvionali	b-bn	795	450	1,767	0,26	2,17	4.479,4	11.326,3
terreno di Riporto	hr	510	310	1,645	0,21	2,17	2.125,8	5.131,6
Depositi detritici	a	795	450	1,767	0,26	2,17	4.479,4	11.326,3
Depositi di frana quiescente	a1q	795	450	1,767	0,26	2,17	4.479,4	11.326,3
Depositi di frana stabilizzati naturalmente	a1sn	795	450	1,767	0,26	2,17	4.479,4	11.326,3
Formazione Marnoso Arenacea - Membro di Biserno	FMA1	3095	1535	2,016	0,34	2,55	61.247,4	163.762,2
Formazione Marnoso Arenacea - Membro di Corniolo	FMA2	3095	1535	2,016	0,34	2,55	61.247,4	163.762,2
Formazione Marnoso Arenacea - Membro di Biserno	FMA3	3095	1535	2,016	0,34	2,55	61.247,4	163.762,2
Formazione del Torrente Carigiola	TGC	2615	860	3,041	0,44	2,34	17.641,8	50.786,0

**Fig.5. 8:** velocità geofisiche medie nelle diverse formazioni geologiche, nell'area del capoluogo.

Formazione geologica	Sigla	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Rapporto Poisson	Densità Gamma (kg/dmc)	Modulo di taglio G (kg/cmq)	Modulo di Young E (kg/cmq)
Depositi detritici	a	1180	400	2,950	0,44	2,17	3.539,2	10.158,2
Depositi di frana quiescente	a1q	1180	400	2,950	0,44	2,17	3.539,2	10.158,2
Depositi di frana stabilizzati naturalmente - orizzonte superiore	a1sn_sup	1180	400	2,950	0,44	2,17	3.539,2	10.158,2
Depositi di frana stabilizzati naturalmente - orizzonte inferiore	a1sn_inf	2790	870	3,207	0,45	2,17	16.742,8	48.425,2
Arenare del M. Falterona-membro di Monte Falco	FAL1	3130	1155	2,710	0,42	2,55	34.676,5	98.563,3
Formazione dell'Acquerino	ACQ	2280	1100	2,073	0,35	2,55	31.452,6	84.815,7
Marne varicolori di Villore	MVV	2050	690	2,971	0,44	2,34	11.356,5	32.618,6
Formazione del Torrente Carigiola	TCG-TCG1	2615	860	3,041	0,44	2,55	19.225,1	55.343,7
Formazione Marnoso Arenacea - Membro di Biserno	FMA1	3095	1535	2,016	0,34	2,55	61.247,4	163.762,2
Formazione Marnoso Arenacea - Membro di Corniolo	FMA2	3095	1535	2,016	0,34	2,55	61.247,4	163.762,2

**Fig.5. 9:** velocità geofisiche medie nelle diverse formazioni geologiche, nella frazione di Castagno d'Andrea.

## 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 definizione degli spessori dei terreni in frana in località Castagno d'Andrea mediante ulteriori indagini (es. 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 cartografie, 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

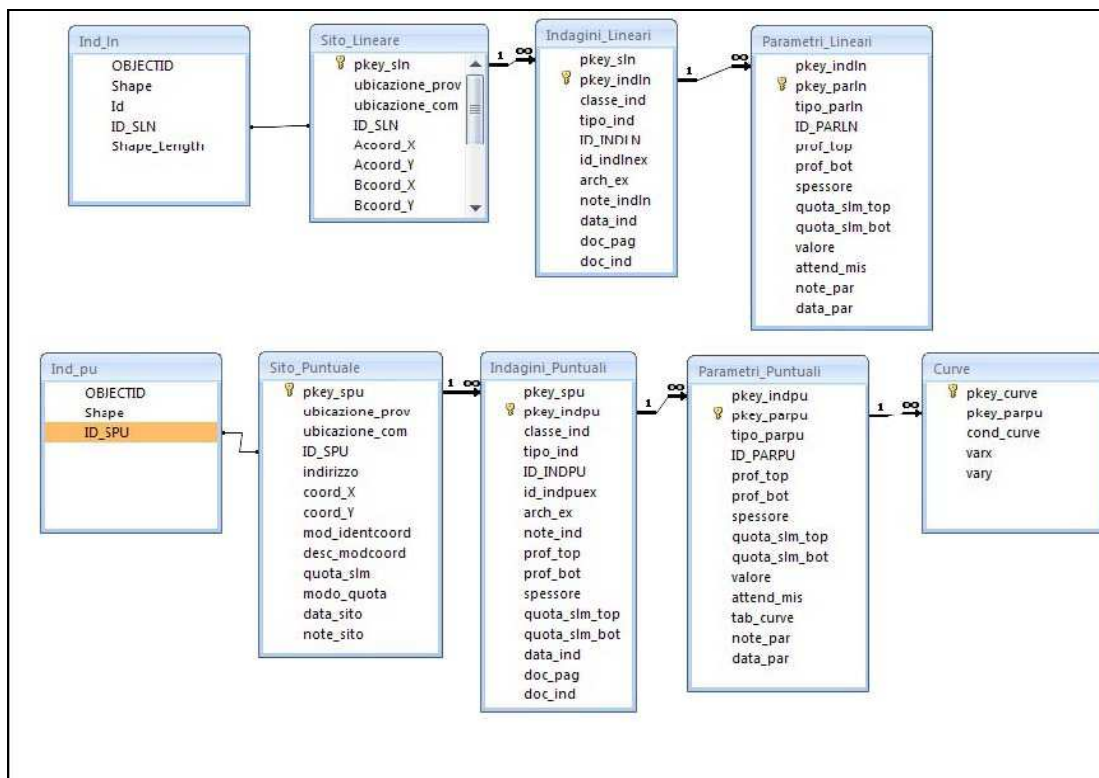


Fig. 7.1 – Relazione tra tabelle e shapefile

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>	<p>Cartella contenente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gli <i>shapefile</i> per l'analisi cella CLE <ul style="list-style-type: none"> <li>○ CL_AC</li> <li>○ CL_AE</li> <li>○ CL_AS</li> <li>○ CL_ES</li> <li>○ CL_US</li> </ul> </li> <li>• Il <i>database</i> CLE_db.mdb che contiene le tabelle relative alle schede: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ scheda_ES</li> <li>○ scheda_AE</li> <li>○ scheda_AC</li> <li>○ scheda_AS</li> <li>○ scheda_US</li> </ul> </li> </ul>



<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"> <li>• gli <i>shapefile</i> delle indagini: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ind_pu</li> <li>○ Ind_In</li> </ul> </li> <li>• il database "CdI_tabelle" con le tabelle per l'archiviazione delle indagini</li> <li>• la cartella Documenti per inserire i documenti pdf delle Indagini_puntuali e delle Indagini_lineari</li> </ul>
<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 San Godenzo, sono disponibili in formato .pdf sul seguente sito web:

[http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/01informazione/banchedati/indagini\\_terreno/indagini/mugello/san\\_godenzo/san\\_godenzo.htm](http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/01informazione/banchedati/indagini_terreno/indagini/mugello/san_godenzo/san_godenzo.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), i log-stratigrafici dei sondaggi geotecnici e i diagrammi delle dromocrone delle prove down-hole eseguite.

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  $V_p$ ,  $V_s$  e rapporto  $V_p/V_s$ .

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 dalla rifrazione in onde P e SH (Fig. 7.3) si nota la presenza di due gruppi di punti separati nettamente l'uno dall'altro. Il primo gruppo, caratterizzato da valori di  $V_p$  e di  $V_{sh}$  bassi, è collocato in basso a sinistra del grafico ed è costituito da valori appartenenti al terreno di riporto ( $V_s$  comprese tra 150 m/s e 360 m/s), al detrito di versante ( $V_s$  tra 360 e 640 m/s). In questo gruppo caratterizzato da basse velocità delle onde sismiche sia P che SH, sono presenti anche due valori appartenenti al Membro di Corniolo della Formazione marnoso-arenacea. Questi valori, ricavati in corrispondenza dello stendimento di sismica a rifrazione ST1, appartengono a un livello di alterazione del substrato roccioso, come anche rilevato dal vicino sondaggio geognostico S1.

Il raggruppamento di punti in alto a destra è, ovviamente, definito da velocità di onde P e di onde SH maggiori che appartengono al *bedrock* sismico costituito dal Membro di Corniolo (FMA2, con velocità di onde SH comprese tra 1.220 e 1.500 m/s)

Relativamente alla distribuzione delle velocità ricavate dalle indagini di down-hole (vedi fig. 7.4) si osserva come, nonostante il minor numero di dati rilevati, l'andamento del rapporto  $V_p/V_s$  sia simile a quello visto dalle velocità ricavate dalle stese di sismica a rifrazione.

Si possono distinguere un gruppo con valori di velocità minori (valori appartenenti ai depositi di riporto e al detrito di versante) ed un altro gruppo caratterizzato da velocità maggiori (con  $V_s$  maggiori di 1.200 m/s) ed appartenente alla Formazione marnoso-arenacea non alterata (Membro di Corniolo, FMA2).

Discorso a parte invece merita il corpo di frana stabilizzato naturalmente (a1sn), presente nell'abitato di Castagno d'Andrea, indagato nel sondaggio S3, caratterizzato da  $V_s$  molto disperse, tali da dividerla in un orizzonte superiore caratterizzato da  $V_s$  di 400 m/s, ed un orizzonte inferiore con  $V_s$  pari a 870 m/s.

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

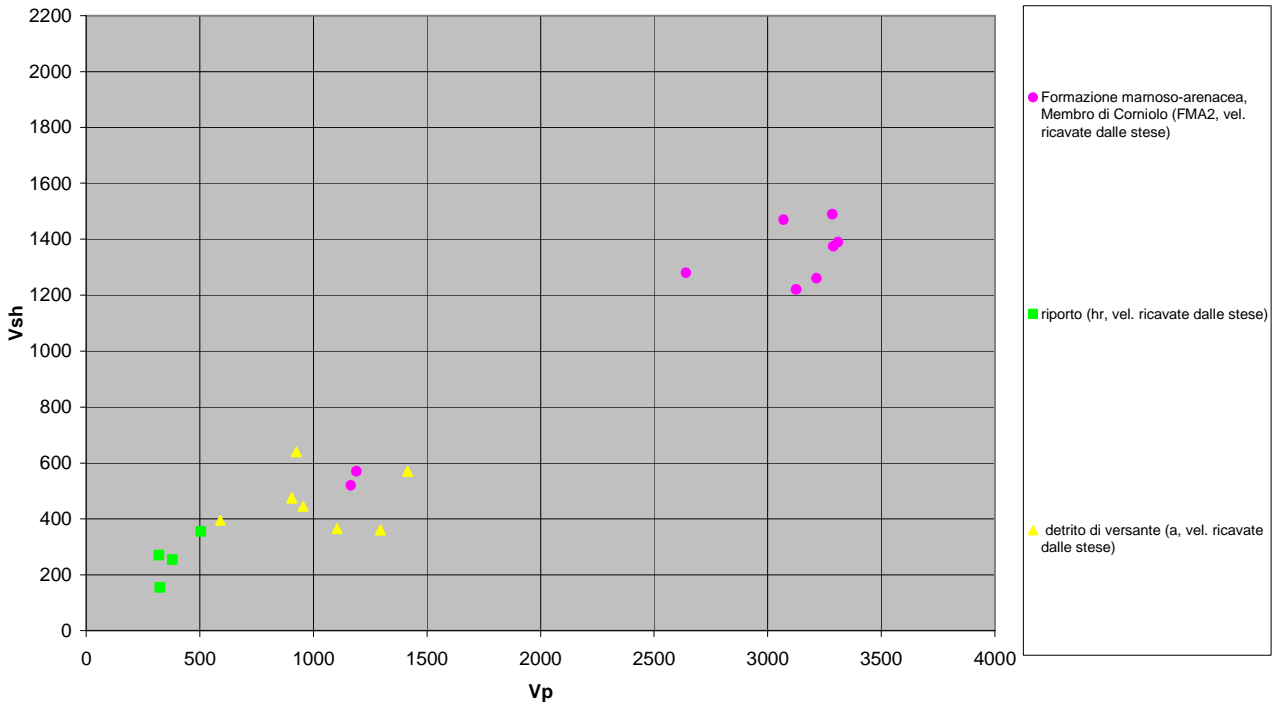


Fig.7.3– Distribuzione areale delle Vp e delle Vsh, ricavate dalle indagini di sismica a rifrazione in onde P e SH, in funzione delle litologie.

Distribuzione Vp - Vsh ricavate dalle down-hole

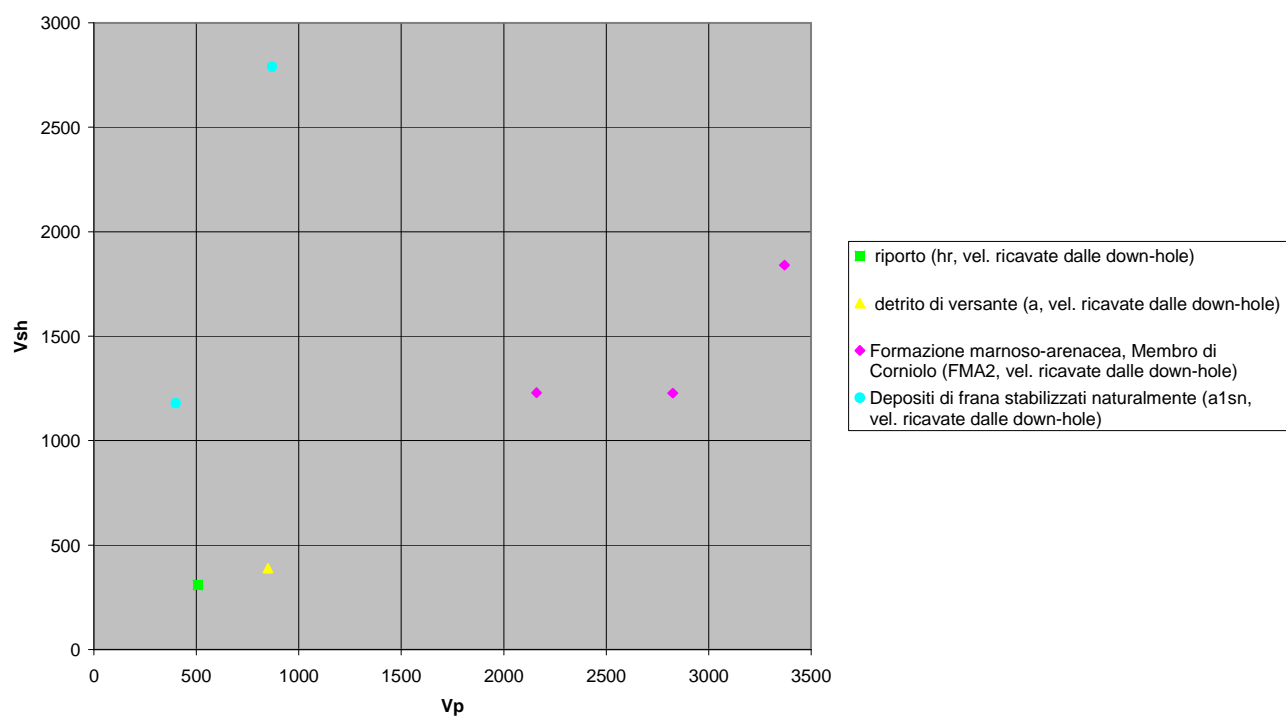


Fig.7.4 - Distribuzione areale delle Vp e delle Vsh, ricavate dalle indagini di down-hole, in funzione delle litologie.

## **7.1 – Analisi di risposta sismica locale**

Le aree del centro abitato di San Godenzo e della frazione di Castagno d'Andrea sono state oggetto di analisi di risposta sismica locale in assetto mono e bidimensionale, finalizzate alla redazione di cartografie di microzonazione sismica di livello 3.

Il fine principale è stato quello di stimare, mediante una procedura analitica (possibile grazie alla 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 condotte in assetto bidimensionale 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 alcuni contesti, marcatamente caratterizzati in sezione dall'assenza di fenomenologie riconducibili a modelli 2D, sono state trattate esclusivamente in assetto monodimensionale.

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:

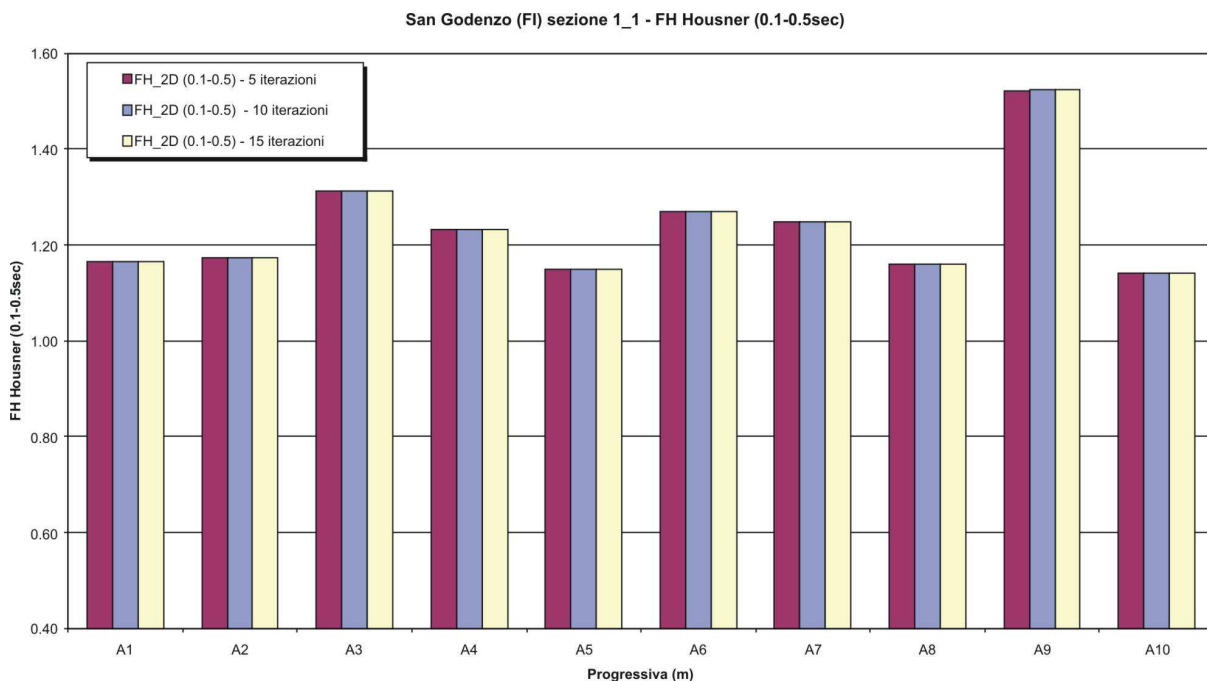
$$D_{max} = \lambda / 8 = 0.12 T V_s \quad (7.1)$$

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.

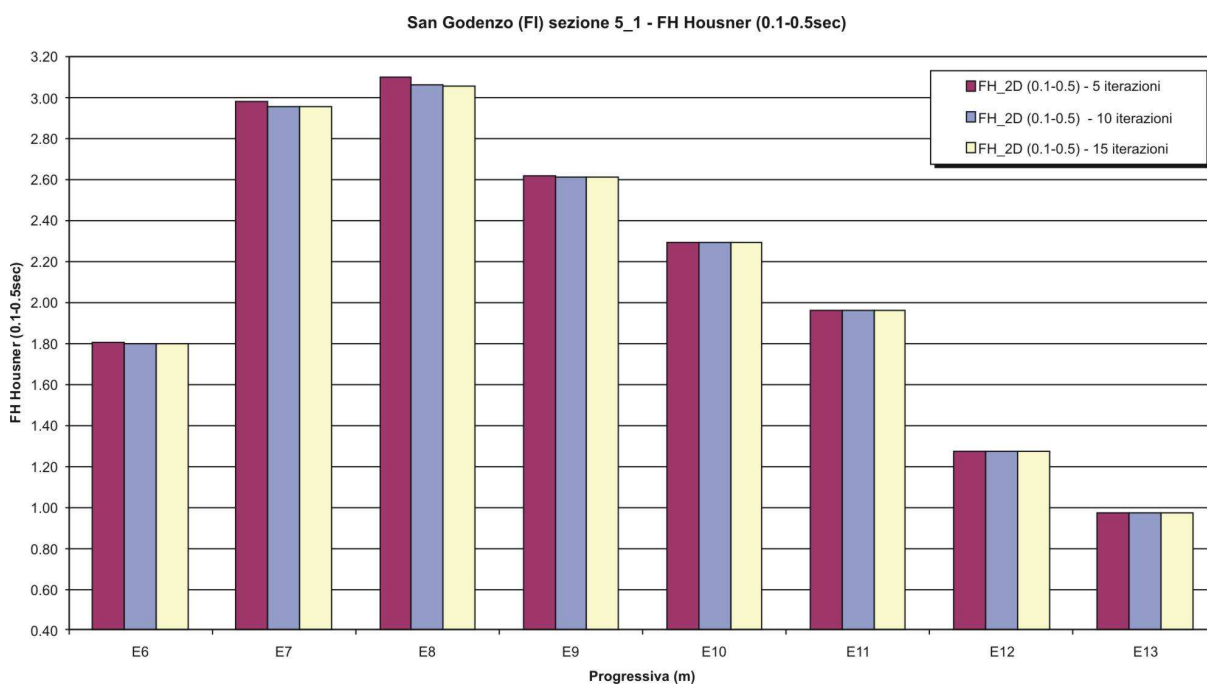
Il parametro utilizzato nel presente lavoro ai fini della rappresentazione dei livelli amplificativi è il fattore di amplificazione di Housner (di seguito denominato FH) misurato come rapporto tra l'integrale dello spettro di accelerazione in output ( $PSA_{out}$ ) ed l'omologo integrale dello spettro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

$$FH = \frac{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{out}(T) dT}{\int_{0.1}^{0.5} PSA_{in}(T) dT} \quad (7.2)$$

Considerate le caratteristiche medie degli abitati di San Godenzo e Castagno d'Andrea, 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.. Si è scelto di calcolare il valore del Fattore d'amplificazione FH singolarmente per ognuno dei sette accelerogrammi utilizzati come input, ottenendo il valore finale come media dei sette fattori.



**Fig.7.1.1** – Valori del fattore di amplificazione FH al variare del numero di iterazioni per la sezione 1 ubicata nell'area del capoluogo



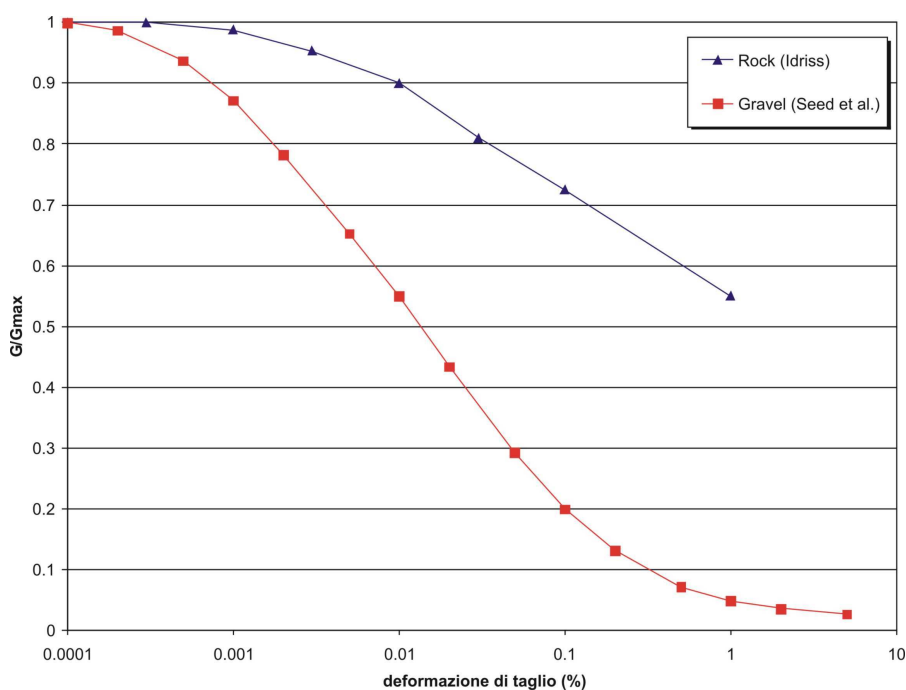
**Fig.7.1.1** – Valori del fattore di amplificazione FH al variare del numero di iterazioni per la sezione 5 ubicata nell'area di Castagno d'Andrea

Preliminarmente all'esecuzione delle analisi di risposta sismica locale, sono stati condotti test al fine di valutare 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 effettuate è stato 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 inferiori al 2% (come visibile nel grafico in figura 7.11 relativo alla sezione n°1 di San Godenzo e nel grafico in figura 7.1.2, riferito alla sezione n°5 di Castagno d'Andrea). La differenza, invece, tra i risultati ottenuti con 10 e 15 iterazioni è pressoché nulla.

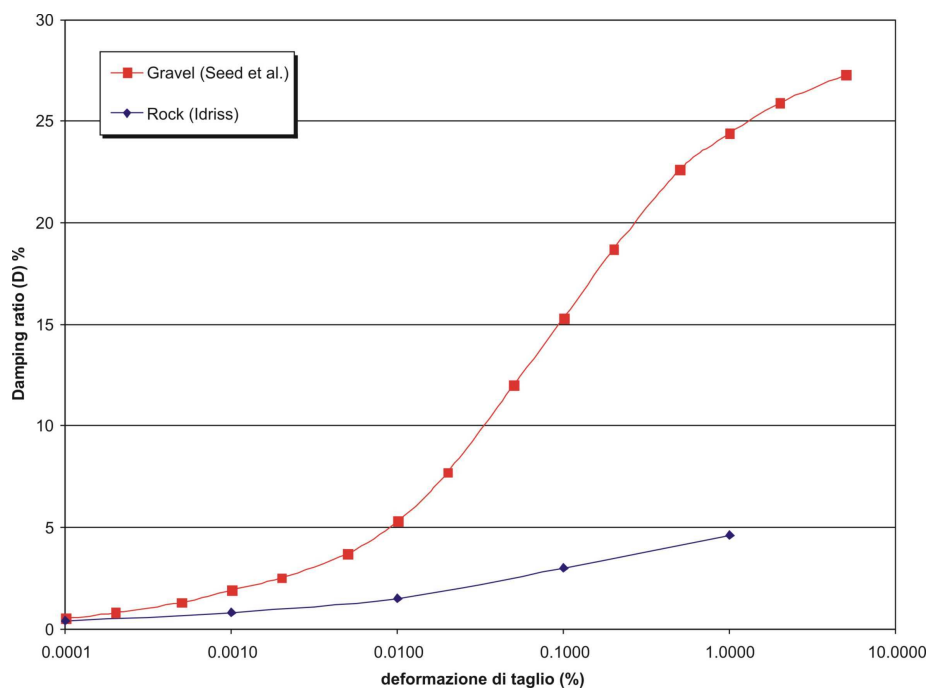
Sulla base del predetto confronto, si è stabilito un numero massimo di iterazioni pari a 10.

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 7.1.3 e 7.1.4 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 le formazioni rocciose che, in virtù delle proprietà fisico-meccaniche in campo dinamico, sono considerate bedrock sismico "deformabile".



**Fig.7.1.3** – Curve di degradazione del modulo di taglio “G” utilizzate nelle analisi illustrate nel presente capitolo

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.



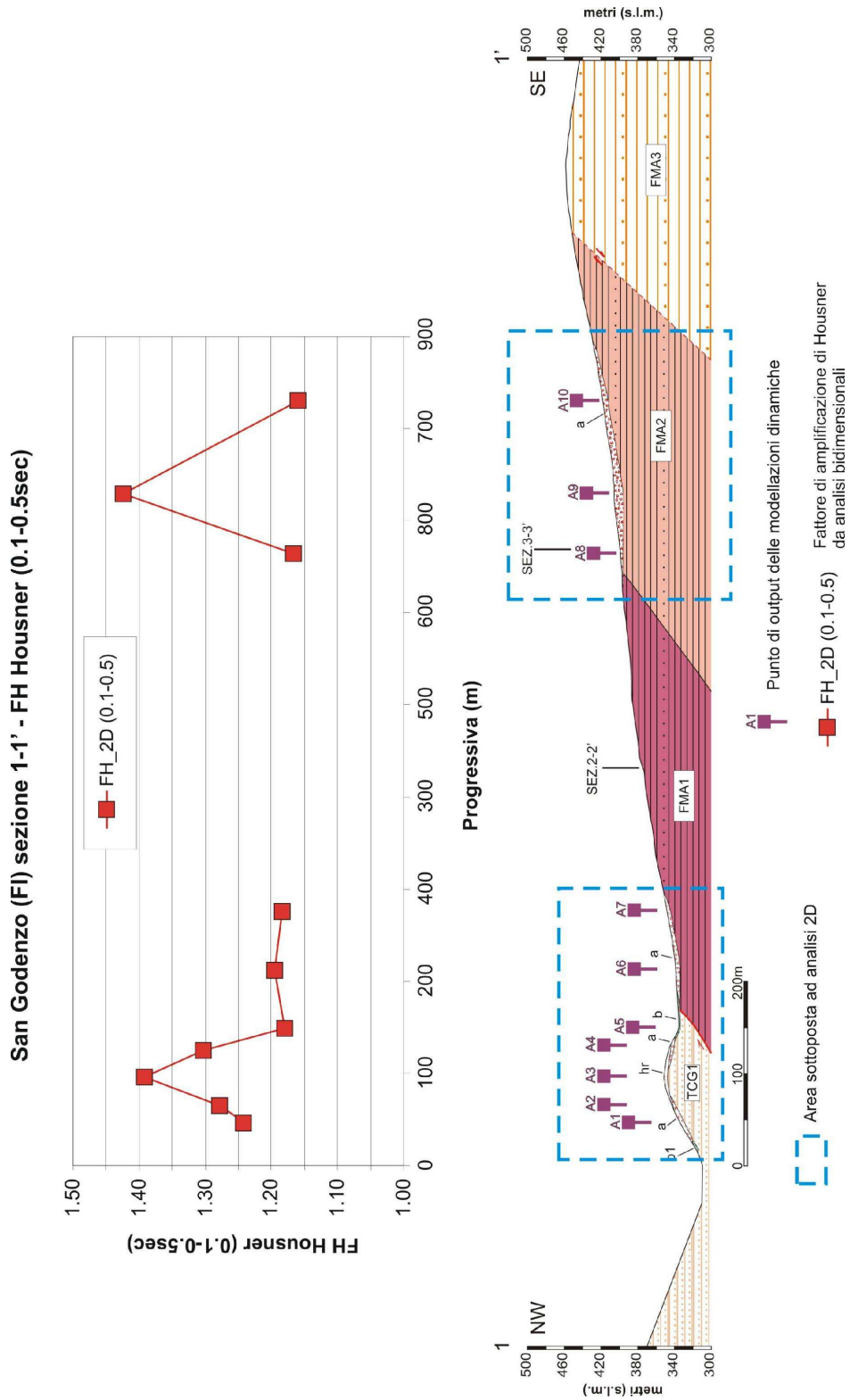
**Fig.7.1.4** – Curve di smorzamento “D” utilizzate nelle analisi illustrate nel presente capitolo

**Tab.7.1.1** – Dati sismostratigrafici utilizzati per le analisi di risposta sismica locale nel comune di San Godenzo

Tipologia terreno	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vp/Vs	Rapporto Poisson dinamico	Peso di volume (kN/m3)	ambito di applicazione
Alluvioni (b-b1)	795	450	1.767	0.26	21.26	sezioni 1, 2
terreni di riporto (Hr)	510	310	1.645	0.21	21.26	sezione 1
detrito di versante (a) - area di San Godenzo	795	450	1.767	0.26	21.26	sezioni 1, 2 e 3
detrito di versante (a) - area di Castagno d'Andrea	1180	400	2.950	0.44	21.26	sezioni 4, 5
depositi di frana quiescenti (a1q)	1180	400	2.950	0.44	21.26	sezione 4
depositi di frana stabilizzati (a1sn) - livello superiore	1180	400	2.950	0.44	21.26	sezioni 4, 5
depositi di frana stabilizzati (a1sn) - livello inferiore	2790	870	3.207	0.45	22.95	sezioni 4, 5
Marne varicolori di Villore (MVV)	2050	690	2.971	0.44	22.95	sezioni 4, 5
Formazione dell'Acquerino (AQR)	2280	1100	2.073	0.35	25.00	sezione 4
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Biserno (FMA1)	3095	1535	2.016	0.34	25.00	sezioni 1, 2, 3, 4 e 5
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Corniolo (FMA2)	3095	1535	2.016	0.34	25.00	sezioni 1, 3, 4 e 5
Formazione marnoso-arenacea - Membro di Premilcuore (FMA3)	3095	1535	2.016	0.34	25.00	sezione 1
Formazione del Torrente Carigiola (TGC)	2615	860	3.041	0.44	22.95	sezioni 1, 2, 3 e 4

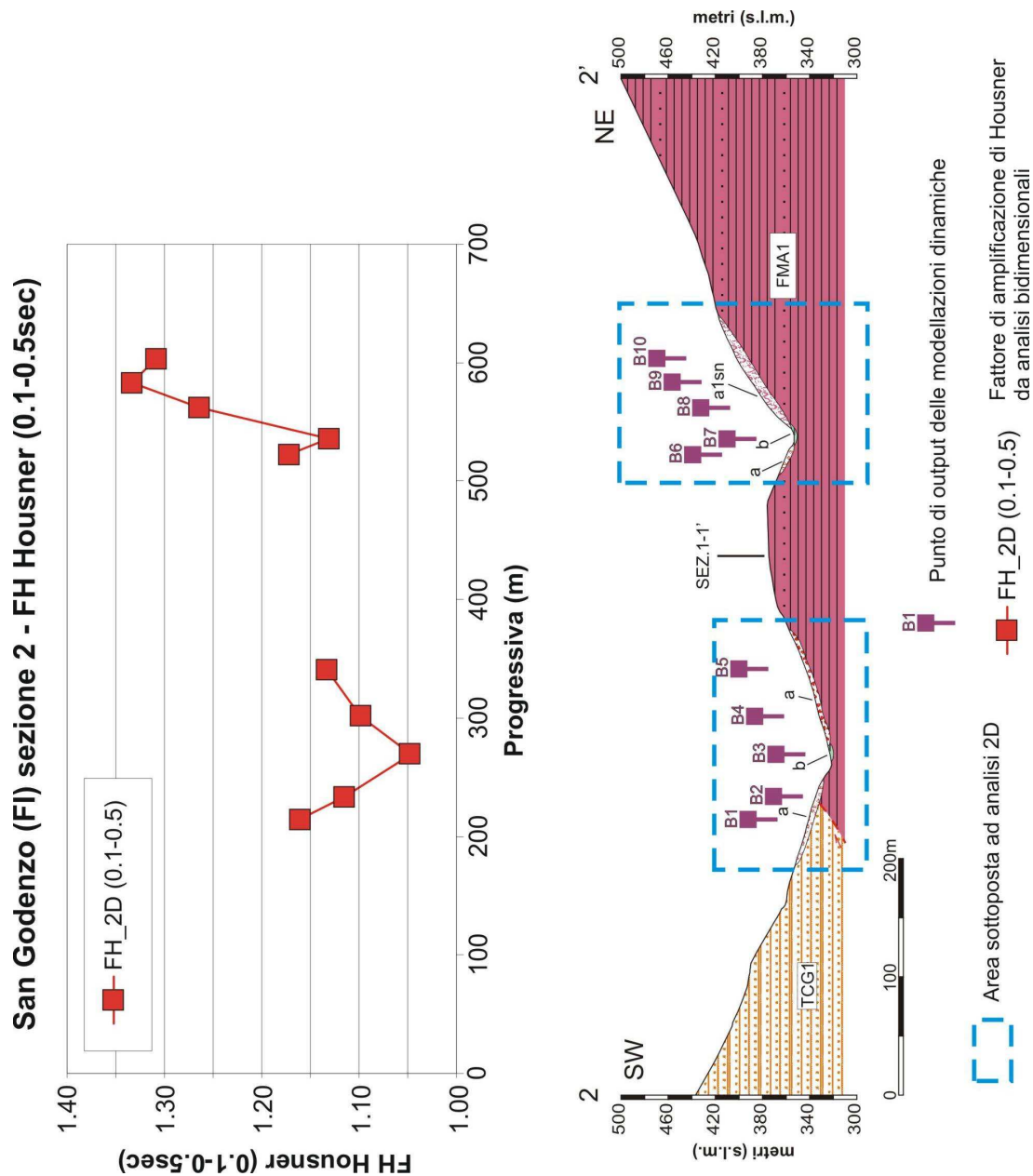
Nell’area del capoluogo di San Godenzo sono state realizzate analisi bidimensionali su 3 sezioni geologico-tecniche.

I risultati, in termini di FH sono illustrati nelle figure dalla 7.1.5 alla 7.1.7, dove i valori dei fattori di amplificazione sono rappresentati in corrispondenza delle sezioni geologico-tecniche, utilizzate come input per la costruzione del modello di sottosuolo sottoposto ad analisi.



**Fig.7.1.5 – Risultati in termini di FH (da analisi bidimensionale) per la sezione n°1**





**Fig.7.1.6** – Risultati in termini di FH (da analisi bidimensionale) per la sezione n°2

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  $\rho$ , dal modulo di taglio  $G$ , e dal fattore di smorzamento  $\xi$ .

### San Godenzo (FI) sezione 3 - FH Housner (0.1-0.5sec)

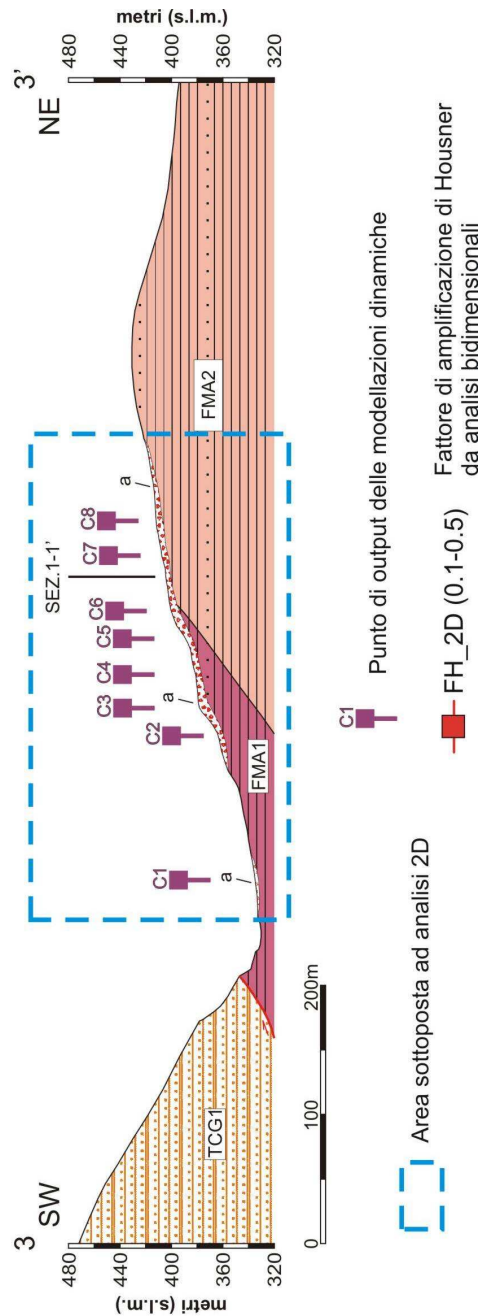
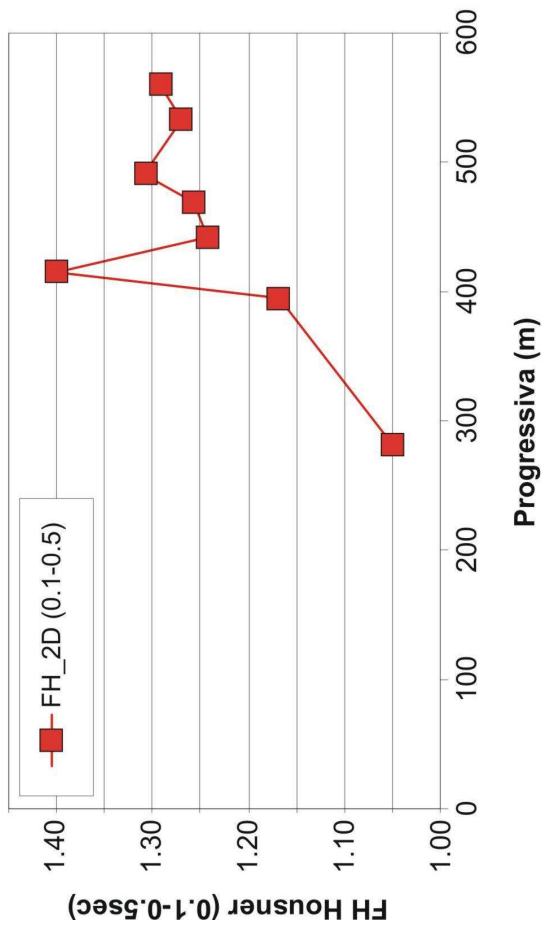


Fig.7.1.7 – Risultati in termini di FH (da analisi bidimensionale) per la sezione n°3

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

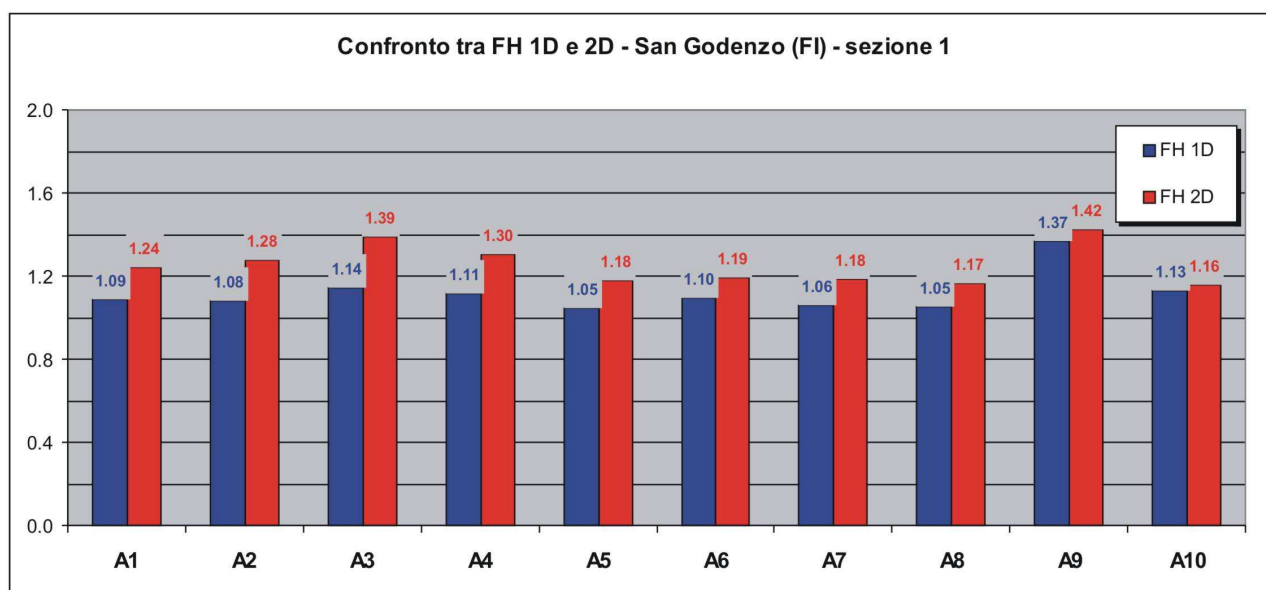
e  $\xi$  iniziali vengano progressivamente sostituiti con i valori degradati, sulla base delle curve dinamiche inserite per ogni strato;

- 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.

Dall'osservazione dei risultati delle analisi bidimensionali in termini di FH è possibile evincere come in assetto 2D l'area fornisca amplificazioni di media entità, collegate alla presenza di coperture sismiche caratterizzate da modesti spessori. Infatti, i valori di FH più elevati sono da correlarsi a zone in cui le coperture sismiche hanno i maggiori spessori (ad esempio il punto di misura A9), oppure a contesti in cui all'amplificazione stratigrafica si sommano amplificazioni dovute ad aspetti topografici (punti di misura A3 e C3).

In corrispondenza di tutti i punti di misura 2D ubicati nel centro abitato di San Godenzo, sono state realizzate analisi monodimensionali, eseguite utilizzando i medesimi parametri geomeccanici e sismologici. Generalmente tutti i valori derivanti dalle analisi 2D sono superiori agli omologhi valori relativi alle analisi 1D, ad eccezione dei punti di misura B8, B9 E B10.

Il confronto tra i valori di FH mono e bidimensionali è riportato, per ogni sezione, nelle figura dalla 7.1.8 alla 7.1.10 e riassunte in tabella 7.1.2.

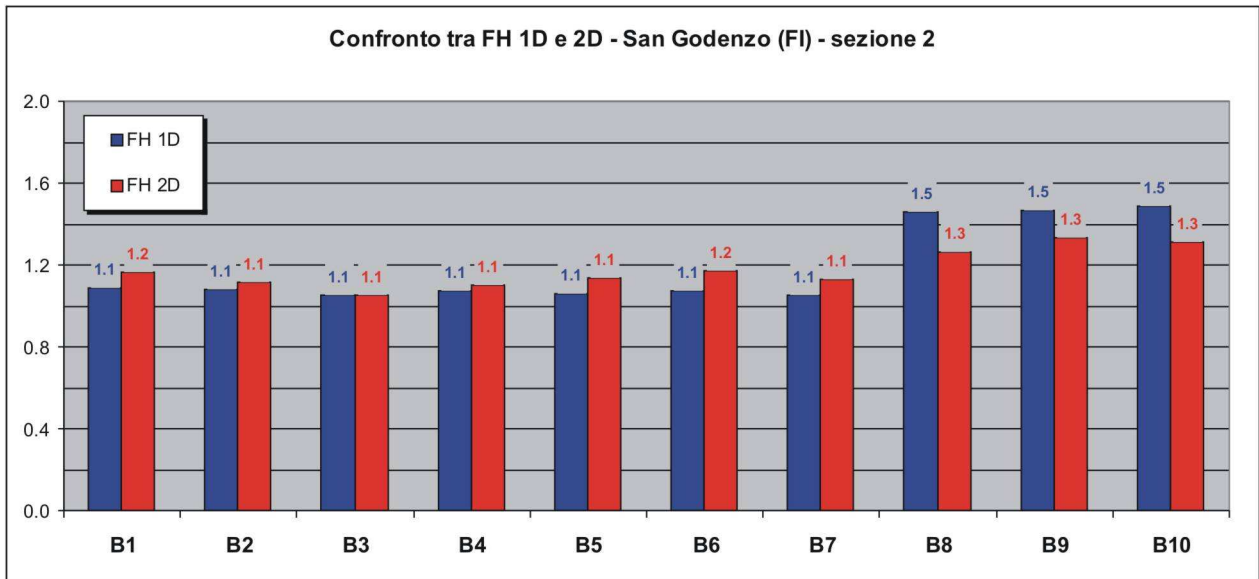


**Fig.7.1.8** – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione 1

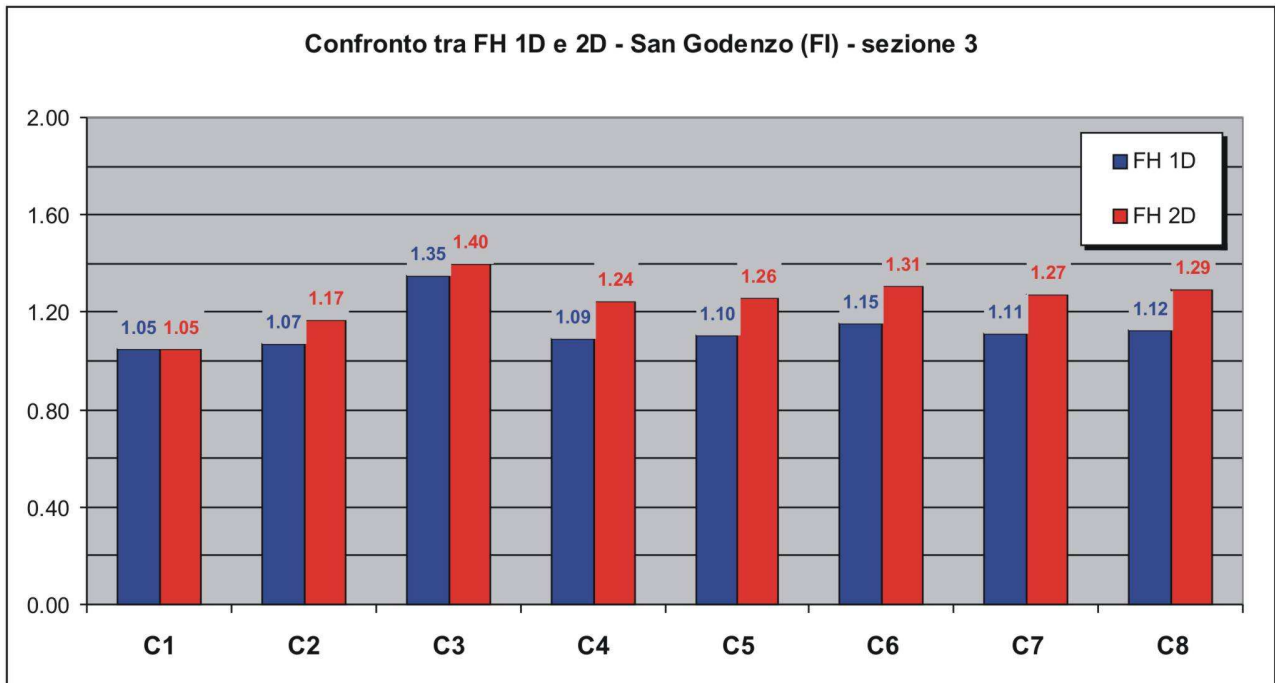
Nelle figure 7.1.11 e 7.1.12 sono illustrati i risultati, sempre in termini di FH, relativi alle 2 sezioni geologico-tecniche, modellate per il centro abitato di Castagno d'Andrea.

In quest'area, in virtù dell'assetto sismostratigrafico radicalmente differente dall'area del capoluogo, anche i risultati in termini di valori di FH sono sensibilmente diversi.

In particolare, la zona di affioramento dei depositi di frana stabilizzati (A1sn) su cui è posto il centro abitato, è caratterizzata da elevati valori del fattore di amplificazione, che si attesta con buona costanza su valori prossimi a 2.



**Fig.7.1.9** – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione 2



**Fig.7.1.10** – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione 3

**Tab.7.1.2** – Fattori di amplificazione di Housner FH (0.1s-0.5s) rilevati dalle analisi di risposta sismica bidimensionale e monodimensionale nel centro abitato di San Godenzo

<b>Punto di output delle analisi dinamiche</b>	<b>FH 2D</b>	<b>FH 1D</b>
A1	<b>1.24</b>	1.09
A2	<b>1.28</b>	1.08
A3	<b>1.39</b>	1.14
A4	<b>1.30</b>	1.11
A5	<b>1.18</b>	1.05
A6	<b>1.19</b>	1.10
A7	<b>1.18</b>	1.06
A8	<b>1.17</b>	1.05
A9	<b>1.42</b>	1.37
A10	<b>1.16</b>	1.13
B1	<b>1.17</b>	1.09
B2	<b>1.12</b>	1.08
B3	<b>1.05</b>	<b>1.05</b>
B4	<b>1.10</b>	1.07
B5	<b>1.14</b>	1.06
B6	<b>1.17</b>	1.07
B7	<b>1.13</b>	1.05
B8	1.27	<b>1.46</b>
B9	1.33	<b>1.47</b>
B10	1.31	<b>1.49</b>
C1	<b>1.05</b>	<b>1.05</b>
C2	<b>1.17</b>	1.07
C3	<b>1.40</b>	1.35
C4	<b>1.24</b>	1.09
C5	<b>1.26</b>	1.10
C6	<b>1.31</b>	1.15
C7	<b>1.27</b>	1.11
C8	<b>1.29</b>	1.12

Le attigue aree di affioramento dei depositi detritici di versante, sono state, invece, sottoposte ad analisi di risposta sismica di tipo monodimensionale.

Infatti, per questi depositi, presenti sia nella sezione n°4 sia nella sezione n°5, si è verificata preliminarmente l'assenza di condizioni riconducibili a fenomenologie di natura bidimensionale.

I punti di misura ubicati in corrispondenza di tali depositi dimostrano valori del fattore d'amplificazione radicalmente più esigui, in linea con il loro ridotto spessore.

Anche per il sito di Castagno d'Andrea, tutti i valori del Fattore di amplificazione bidimensionale sono stati confrontati con gli omologhi valori dedotti da analisi monodimensionali.

Il confronto è visibile nelle figure 7.1.13 e 7.1.14 e riassunto nella tabella 7.1.3.

Come è possibile notare dal confronto, non sempre nell'area di Castagno d'Andrea i risultati delle analisi 2D sono più elevati dei corrispondenti FH monodimensionali, pur tenendo conto non solo dell'aspetto stratigrafico, ma anche del contesto geometrico sepolto.

### San Godenzo (FI) sezione 4 - FH Housner (0.1-0.5sec)

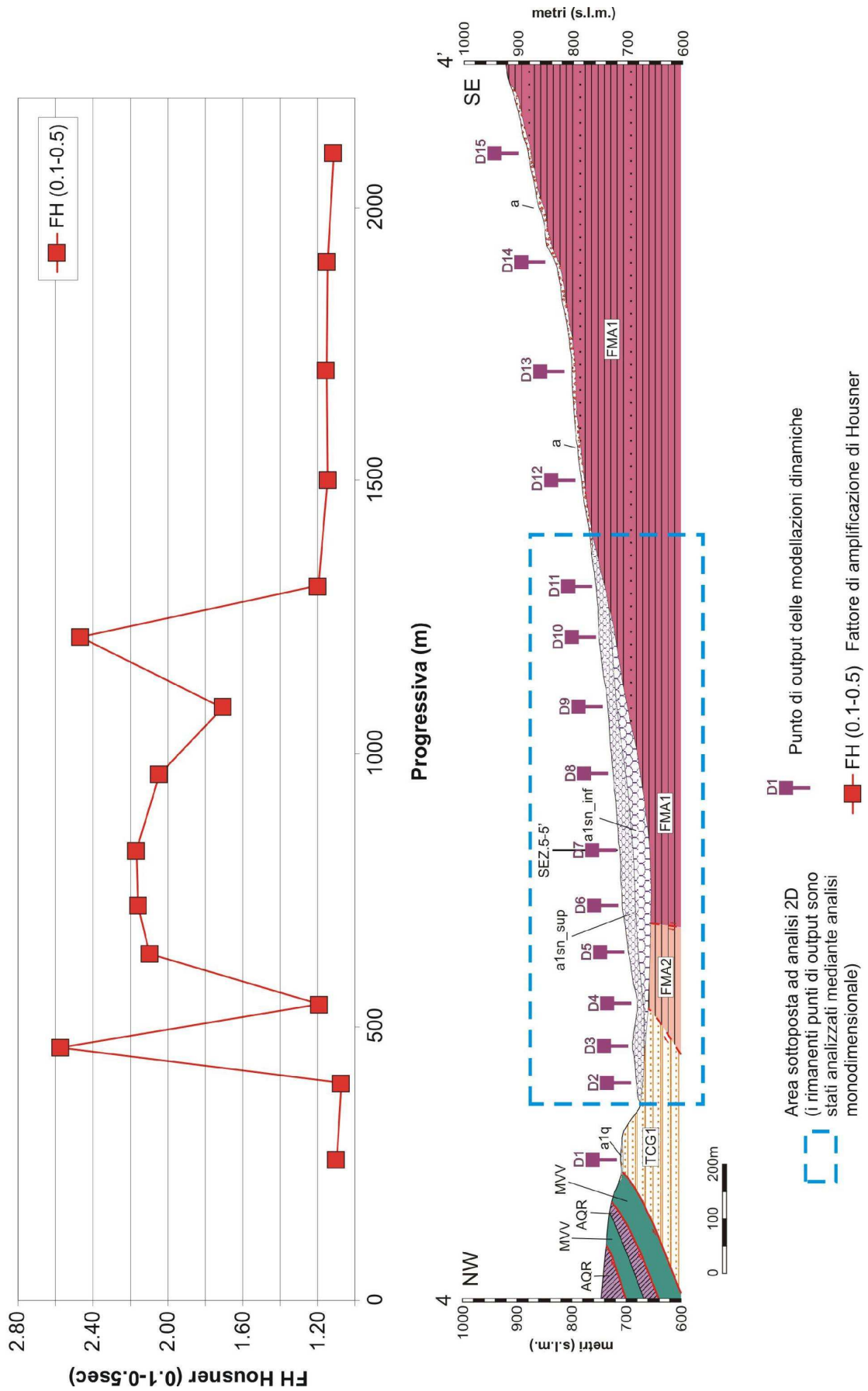


Fig.7.1.11 – Risultati in termini di FH per la sezione n°4

San Godenzo (FI) sezione 5 - FH Housner (0.1-0.5sec)

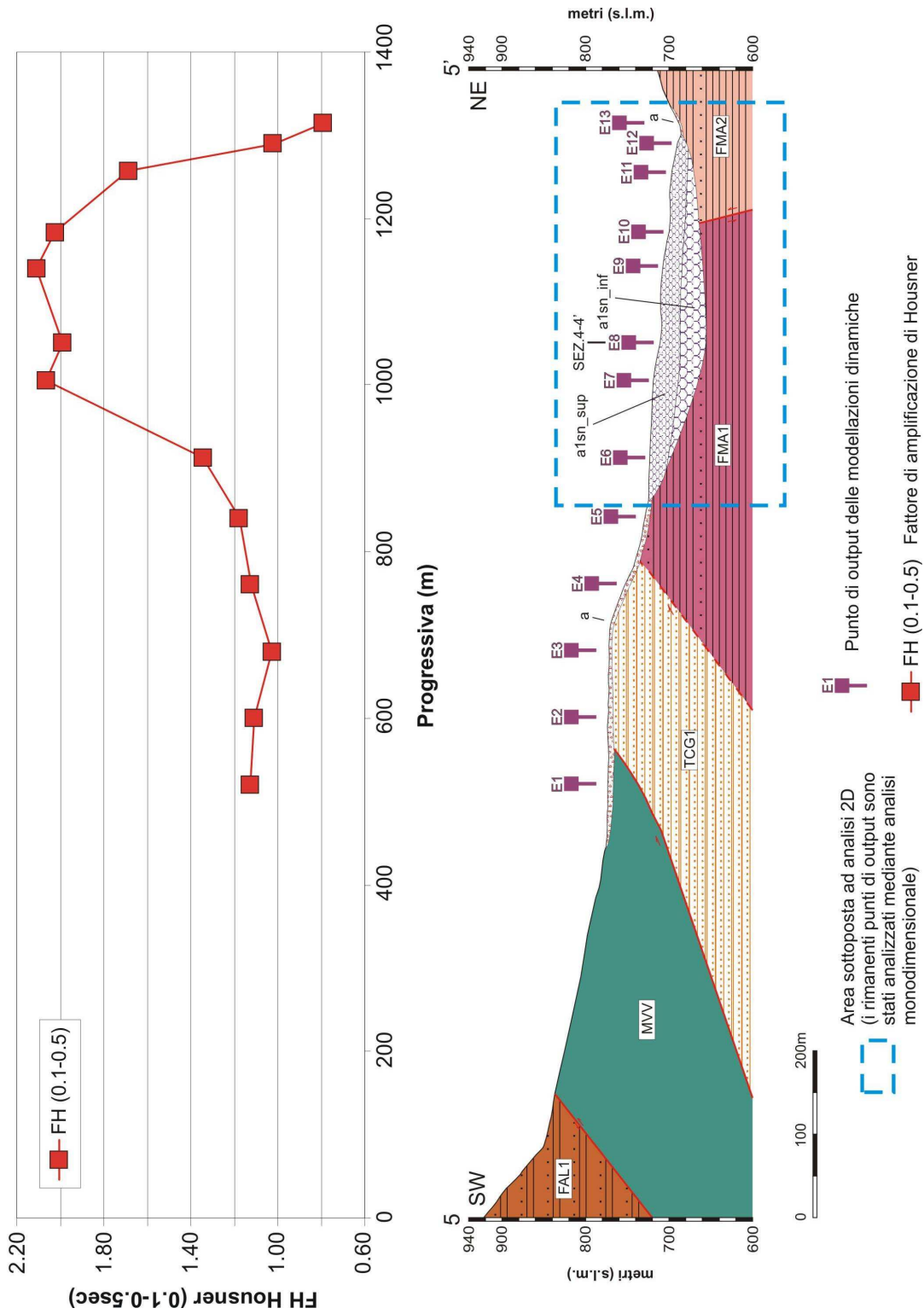
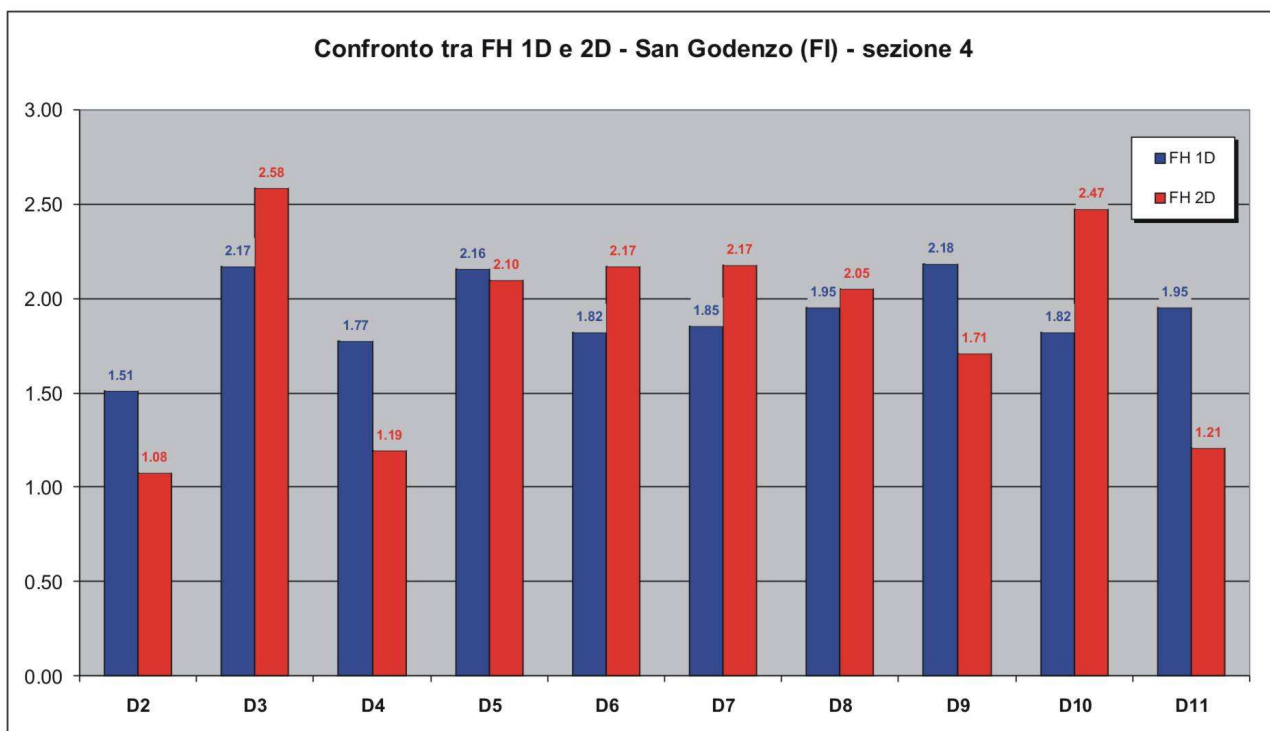
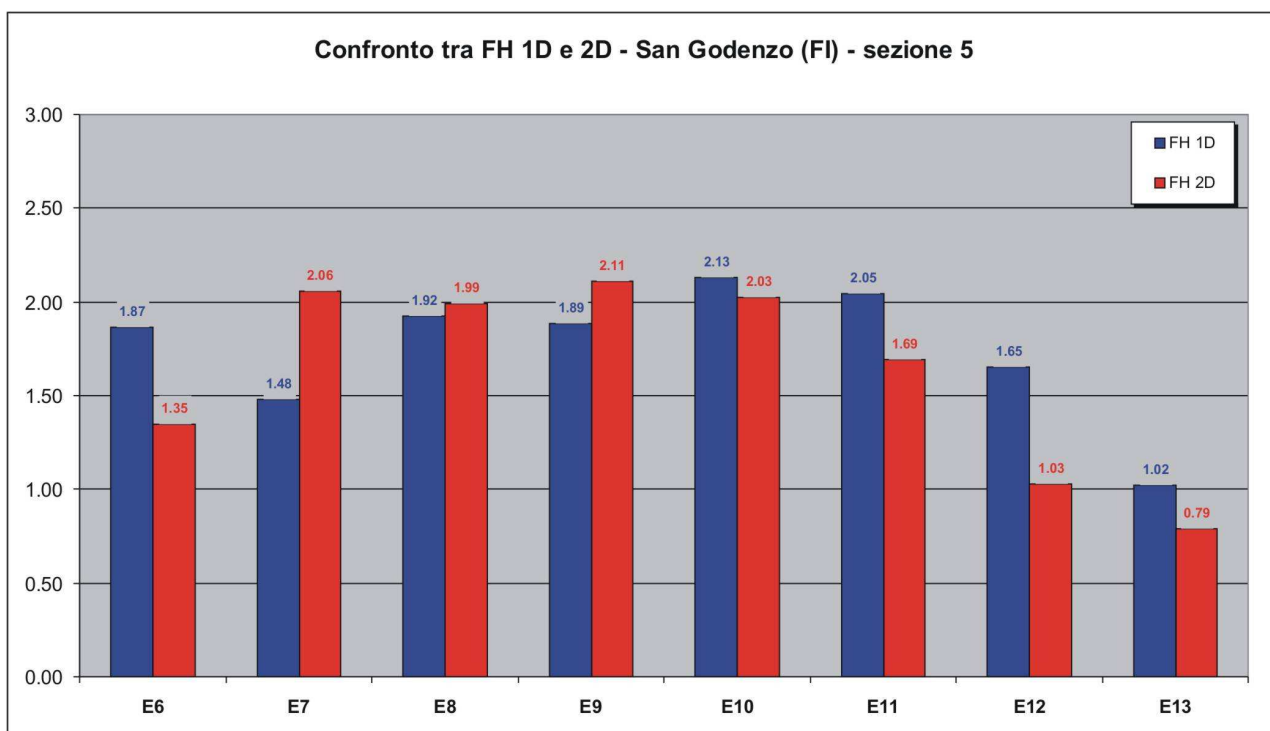


Fig.7.1.12 – Risultati in termini di FH per la sezione n°5



**Fig.7.1.13** – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione 4



**Fig.7.1.14** – Confronto tra FH 1D e 2D per alcuni punti di misura ubicati in corrispondenza della sezione 5



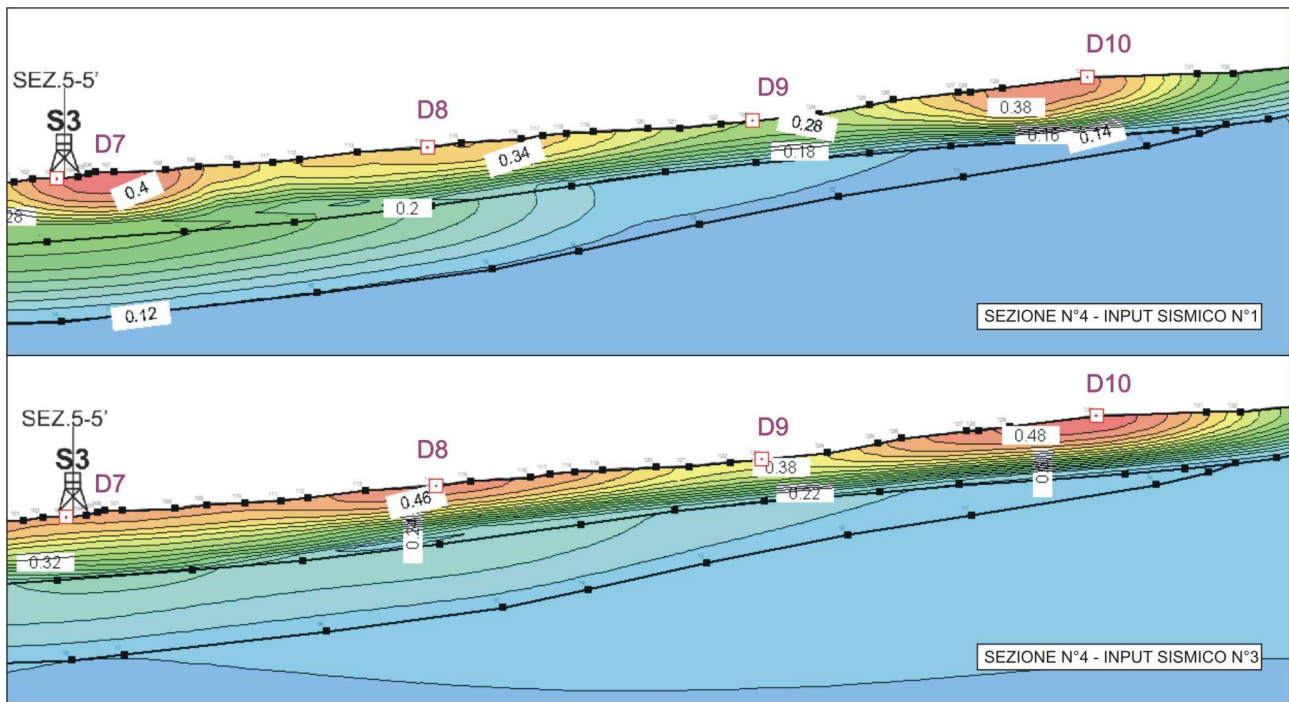
Ciò è riscontrabile nell'area per due differenti tipologie di contesti:

- diffusamente nei punti di misura ai bordi della sezione, e generalmente nei punti di misura in cui gli spessori di copertura sono esigui. Una 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 artificialmente a condizioni medie sia di profondità dell'interfaccia bedrock sismico-coperture, sia di caratteristiche fisico-meccaniche in campo dinamico del bedrock sismico. Ciò potrebbe comportare per i punti di misura ubicati in corrispondenza di minori spessori una sottovalutazione in termini di fattore di amplificazione;
- All'interno dei depositi di frana stabilizzati, in corrispondenza di verticali corrispondenti ad aree di relativa deamplificazione, dovuta alla laterale compresenza di zone di focalizzazione. E' questo il caso, ad esempio, del punto di misura D9, di cui si riporta in figura 7.1.15 la distribuzione delle PGA relative allo step finale dell'analisi 2D relativa agli input sismici n°1 e n°3 (capitolo 2). Come è possibile notare, i valori di PGA nel nodo D9 sono sensibilmente inferiori ai nodi limitrofi, con conseguente ripercussione sullo spettro di risposta e, quindi, sul valore di FH.

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.7.1.3** – Fattori di amplificazione di Housner FH (0.1s-0.5s) rilevati dalle analisi di risposta sismica bidimensionale e monodimensionale nel centro abitato di Castagno d'Andrea

Punto di output delle analisi dinamiche	FH 2D	FH 1D
D1	-	<b>1.11</b>
D2	1.08	<b>1.51</b>
D3	<b>2.58</b>	2.17
D4	1.19	<b>1.77</b>
D5	2.10	<b>2.16</b>
D6	<b>2.17</b>	1.82
D7	<b>2.17</b>	1.85
D8	<b>2.05</b>	1.95
D9	1.71	<b>2.18</b>
D10	<b>2.47</b>	1.82
D11	1.21	<b>1.95</b>
D12	-	<b>1.14</b>
D13	-	<b>1.16</b>
D14	-	<b>1.15</b>
D15	-	<b>1.12</b>
E1	-	<b>1.13</b>
E2	-	<b>1.11</b>
E3	-	<b>1.02</b>



**Fig.7.1.15** – Distribuzione delle PGA relative allo step finale dell’analisi 2D relativa alla propagazione degli input sismici n°1 e n°3, in corrispondenza di un tratto della sezione n°4. I valori sono espressi in g.

Infine, si è valutata monodimensionalmente la propensione all’amplificazione sismica locale dell’assetto che contraddistingue l’affioramento delle formazioni litoidi, affioranti diffusamente nella porzione nordoccidentale dell’area di studio, con riferimento all’affioramento della formazione delle Marne varicolori di Villore (MVV) caratterizzate da valori di  $v_s$  inferiori ad 800 m/s e poggianti sia sulla Formazione dell’Acquerino (AQR), sia sulla Formazione del Torrente Carigiola (TGC).

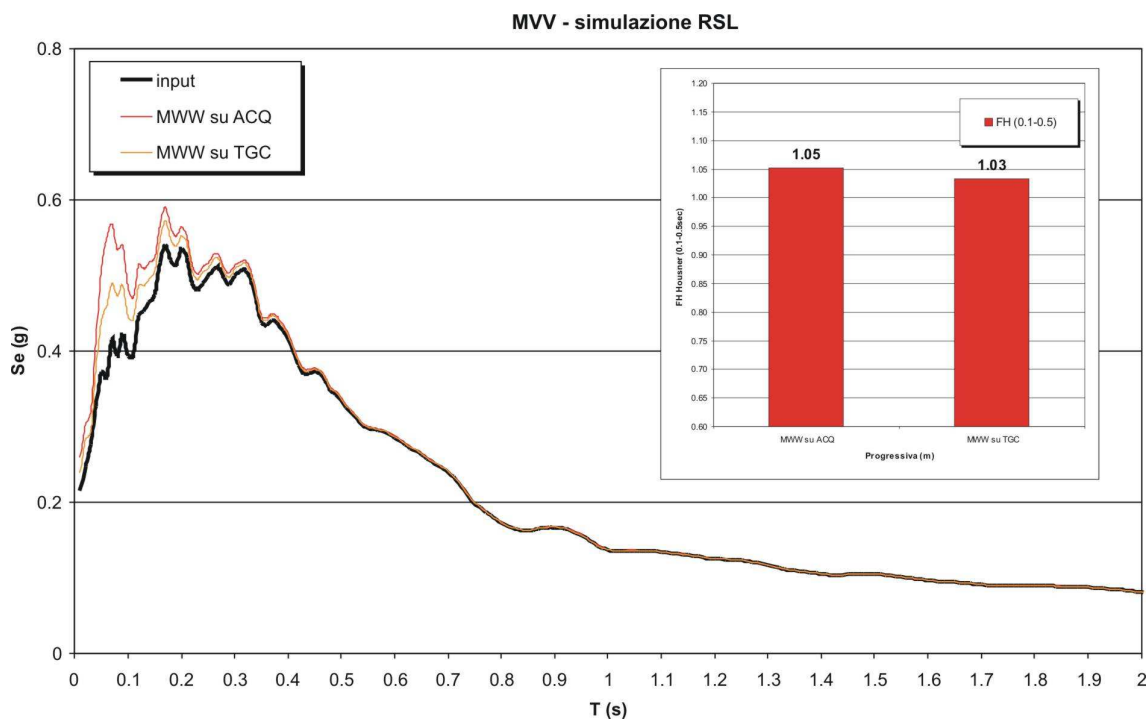
In figura 7.1.16 è presentato il risultato dell’analisi 1D in cui, considerando uno spessore medio di MVV pari a 10m, vengono variate le proprietà del bedrock sismico, in riferimento ai valori caratteristici di ACQ e TGC, così come desumibile dalla tabella 7.1.1.

Gli spettri elastici di output denotano modeste amplificazioni, che si ripercuotono su valori del fattore di amplificazione FH di poco superiori all’unità.

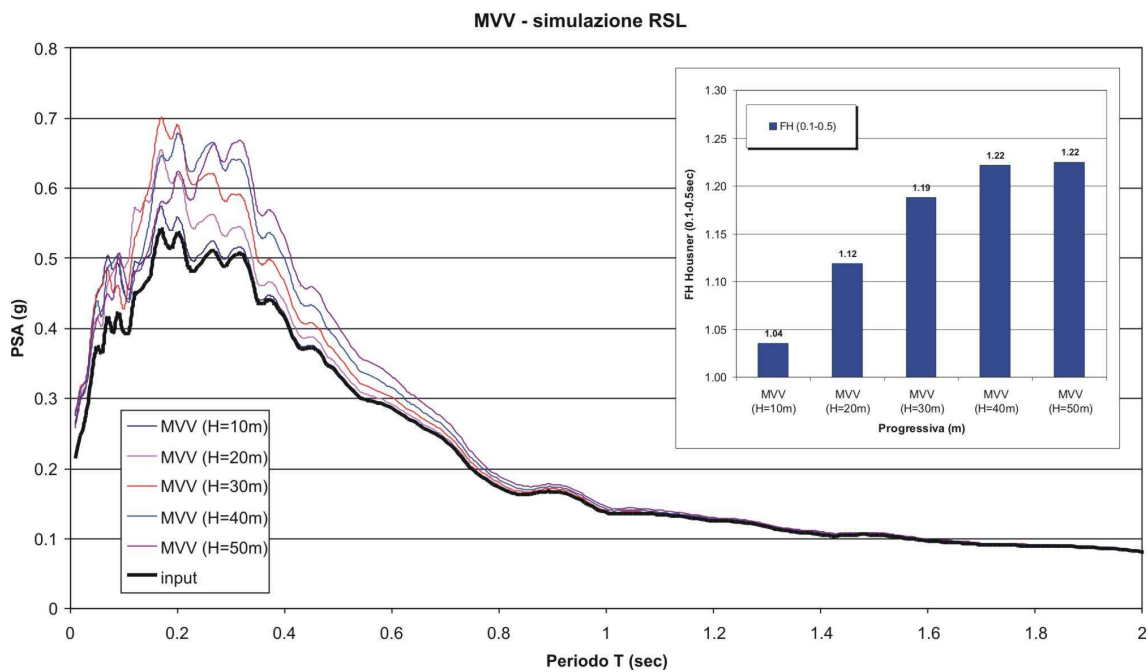
Inoltre, si è valutata la risposta sismica locale di tale assetto, variando lo spessore (da 10m a 50m) di MVV poggiate su TGC, in ottemperanza a quanto illustrato in sezione 5.

L’amplificazione locale, anche in questo caso, si dimostra di modesta entità (figura 7.1.17) con valori di FH sempre inferiori ad 1.3.

Pertanto, ai fini della trasposizione areale dei predetti risultati in termini di classi di microzonazione sismica, le aree di affioramento della formazione MVV sono state considerate, come meglio illustrato nel successivo capitolo, stabili ma suscettibili di amplificazione stratigrafica, seppur di modesta entità.



**Fig.7.1.16** – Simulazione 1D su MVV poggianti su bedrock sismici differenti



**Fig.7.1.17** – Simulazione 1D su MVV con spessori variabili

## **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 geonostiche 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 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).

### **8.3 – 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.

## 8.4 – 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 geo-litologiche, 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 e per la frazione di castagno d'Andrea.

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°, non presente nell'area investigata.
- **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 (Marne Varicolori di Villore) che non 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* (Marne Varicolori di Villore) che non 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. 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<sub>I</sub>-b<sub>II</sub>) 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 terreni di riporto ( $b_I-b_{III}$ ) con spessori massimi di 4m 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 6**, caratterizzata dalla presenza di depositi quaternari di copertura alluvionale ( $b_I-b_{III}$ ) con spessori massimi di 10m circa poggianti su un substrato non 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 falde detritiche.

**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 San Godenzo è riportata integralmente nel DVD allegato.

### **8.5 – 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 frazione di Castagno d'Andrea.

I risultati in termini di FH, desunti dalle analisi 2D effettuate in corrispondenza delle 5 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, per entrambe le aree interessate dalla redazione di cartografie di microzonazione sismica di livello 3, 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-tecnico alla base di ogni valore di FH desunto;
3. identificazione sulle cartografie tematiche esistenti (in particolare geologico-tecniche e MOPS) di analoghe condizioni geologico-tecniche 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 simili 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 capoluogo di San Godenzo nelle seguenti classi:

**ZONA A (FH =1):** include le aree di affioramento del substrato sismico. Si evidenzia che in quest'area il substrato roccioso presenta una pendenza sempre superiore a 15° a cui è stato assegnato un fattore di amplificazione topografica pari ad 1.2 (massimo fattore previsto per le aree caratterizzate da categoria topografica T2, ai sensi delle NTC2008);

**ZONA B (1 < FH < 1.3)** gran parte del centro abitato caratterizzato da modesti spessori delle coperture sismiche in grado di fornire dalle modellazioni eseguite amplificazioni modeste, soprattutto nell'intervallo di periodi definiti per la computazione del fattore di amplificazione di Housner (FH);

**ZONA C (1.3 ≤ FH < 1.5):** comprende limitate porzioni del territorio del capoluogo, per le quali alle modeste amplificazioni stratigrafiche, descritte per la precedente zona, si sommano amplificazioni di natura topografica.

Per quanto concerne, invece, l'area di Castagno d'Andrea, in funzione del differente contesto geologico-tecnico, la situazione è più complessa dell'area del capoluogo e richiede alcune doverose precisazioni. Il centro abitato di Castagno d'Andrea è ubicato per la maggior parte su una frana di colamento inattiva. Essa, ai sensi degli ICMS andrebbe quindi contornata ed inserita nel novero delle aree instabili, con indicazione del codice relativo alla sua tipologia ed allo stato di attività.

Così, infatti, viene rappresentata tale frana nella cartografia di livello 3 per l'area di Castagno d'Andrea, allegata al presente lavoro.

Tuttavia, una frana inattiva e/o definitivamente stabilizzata non riporta più problematiche indotte in campo dinamico, ma costituisce pur sempre un deposito, in grado di fornire amplificazioni locali, talvolta elevate (come nel caso in oggetto).

Infatti, in corrispondenza del deposito di frana stabilizzato (si faccia riferimento alle sezioni geologico-tecniche n°4 e n°5), sono state realizzate analisi di risposta sismica locale in assetto bidimensionale, tarate successivamente (come illustrato nel precedente capitolo) in campo monodimensionale.

Ne risulta una diffusa presenza di situazioni altamente amplificanti, in cui sovente i fattori di amplificazione (FH) sono superiori a 2.

In riferimento a quanto riportato dal regolamento regionale 53R/2011, un'area di frana stabilizzata andrebbe considerata come area a pericolosità sismica media S2, mentre lo stesso deposito, caratterizzato da elevati fattori di amplificazione, andrebbe inserito in area a pericolosità sismica elevata S3.

Pertanto, d'intesa con i colleghi del DPC di Roma, si è deciso di fornire per l'area di Castagno d'Andrea una cartografia di microzonazione di livello 3 redatta in duplice modo. In particolare, viene allegata alla presente relazione una carta di microzonazione sismica di livello 3 redatta sulla base delle indicazioni fornite dagli ICMS ed in cui, quindi, l'area di frana stabilizzata è riportata

senza che siano forniti in corrispondenza di essa i valori del fattore di amplificazione. Questo per garantire un'omogeneità con tutte le carte di microzonazione sismica di livello 3 redatte a livello nazionale.

Inoltre, viene riportata nel presente rapporto, una cartografia alternativa (figura 8.6.1), in cui i depositi costituenti l'area di frana stabilizzata vengono definiti sulla base del valore del fattore di amplificazione sismica. Sulla base di tale cartografia derivano, quindi, le indicazioni per la trasposizione della carta di microzonazione sismica in carta di pericolosità e le conseguenti prescrizioni da adottare a livello urbanistico.

Pertanto, sulla base di quanto finora illustrato e riportato in figura 8.1, l'area di Castagno d'Andrea

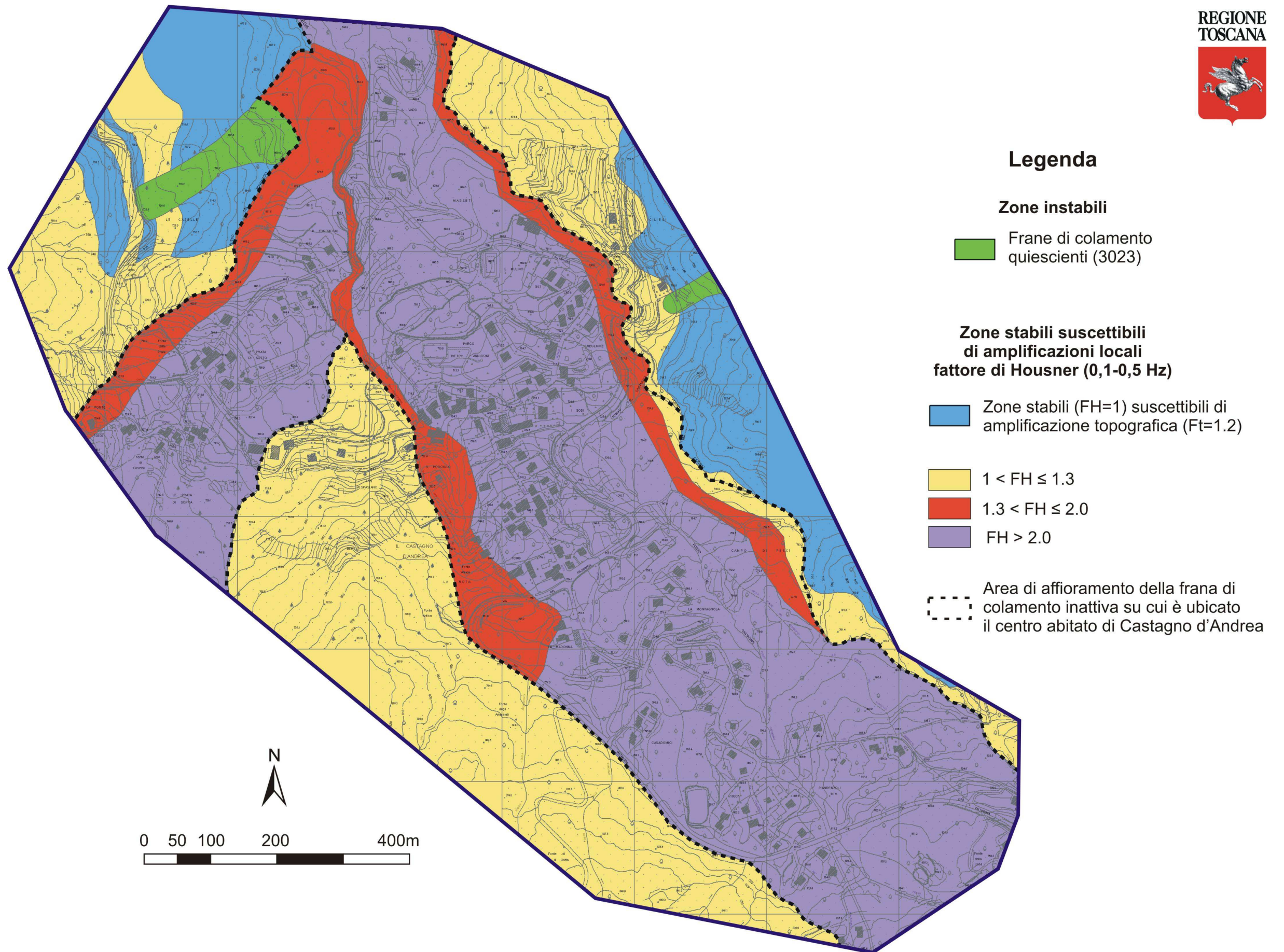
**ZONA A (FH =1):** include le aree di affioramento del substrato sismico. Si evidenzia che in quest'area il substrato roccioso presenta una pendenza sempre superiore a 15° a cui è stato assegnato un fattore di amplificazione topografica pari ad 1.2 (massimo fattore previsto per le aree caratterizzate da categoria topografica T2, ai sensi delle NTC2008);

**ZONA B (1 < FH ≤ 1.3):** sono riportate in questa classe, sia le aree di affioramento della formazione Marne varicolori di Villore (MVV) con valori di vs inferiori ad 800 m/s e poggianti su formazioni litoidi caratterizzate da valori di vs maggiori, sia le aree di affioramento di modesti spessori di depositi detritici, poggianti su substrato sismico;

**ZONA C (1.3 < FH < 2.0) e ZONA D (FH ≥ 2.0):** in queste classi sono riportate le aree di affioramento dei depositi di frana stabilizzata, caratterizzati da elevati valori di FH imputabili a motivazioni stratigrafiche, topografiche e legate a geometrie sepolte.



Fig.8.5.1 – Carta di microzonazione sismica di livello 3 per l'area di Castagno d'Andrea, con differenziazione dei depositi di frana inattiva sulla base del valore di FH



## **8.6 – Commenti finali e criticità**

**La cartografia di livello 1 non deve essere presa a riferimento per definire la pericolosità sismica di cui al Regolamento regionale 53R/2011, ma deve indirizzare la campagna di indagini per una corretta programmazione delle indagini da eseguire in sede redazione di strumento urbanistico o di progetto edilizio diretto..**

**La cartografia di microzonazione sismica di livello 3, meglio illustrata nei precedenti capitoli, deve invece 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 = classe di pericolosità sismica S3

Inoltre, si fa presente che, in corrispondenza delle aree di instabilità di versante dovuta a fenomeni gravitativi quiescenti, dovranno essere perimetrate le classi di pericolosità 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 e D (classe di pericolosità S3) si ritiene opportuno 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 parautochthon (northern Apennine, Italy)*. *Geologica Ultraiectina*, 19, 1-98.
- DE JAGER J. (1979) - *The relation between tectonics and sedimentation along the "Sillaro Line" (Northern 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.
- MINISTERO DELLA INFRASTRUTTURE (2008), D.M. 14/01/2008 (G.U. n.29 del 04/02/2008) – *Norme Tecniche per le Costruzioni*, Roma

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.