PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE
AREA CAMPIONE: ALTA VAL TIBERINA

RELAZIONE DI SINTESI

REGIONE UMBRIA - DIREZIONE POLITICHE TERRITORIALI
AMBIENTE E INFRASTRUTTURE – SERVIZIO GEOLOGICO

Dott. Arnaldo Boscherini

Dott. Roberto Checcucci

Dott. Andrea Motti

Dott. Francesco Ponziani

Editing: Dott. Norman Natali

La microzonazione sismica dell'alta Valtiberina umbra è stata realizzata attraverso gli studi, le ricerche e le indagini sottoriportati:

AA. VV.- *Nuova Carta Geologica D' Italia, Scala 1:50.000, Foglio n. 289-Città di Castello*, originali d'autore scala 1:10.000 depositati presso il Servizio Geologico regionale.

AA.VV.- *Relazione geologiche e geotecniche a corredo della variante al progetto generale di consolidamento del Colle di Montone.* Atti progettuali giacenti presso gli uffici della Regione dell'Umbria, 1996.

Antonini G. - *Carta geologica del Servizio Geologico della Regione dell'Umbria in scala 1:10.000 della sezione n. 290-140 " Pietralunga".* Atti della Regione dell'Umbria presso il Servizio Geologico, 2001.

Crespellani T., Madiai C., Simoni G.- *Studio Geotecnico finalizzato alla valutazione degli effetti locali in un'area campione dell'Alta Valle Tiberina Umbra* – Relazione finale, Maggio 2001.

De Franco R., Caielli G., Corsi A., Ponziani F.- *Valutazione degli effetti di sito da dati sismologici:Città di Castello.Convenzione tra Regione Umbria e IRRS " studio volto alla valutazione degli effetti locali nell' ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione della pericolosità sismica locale – area campione Alta Val Tiberina* – Rapporti finali, Milano ,ottobre 2001.

De Franco R., Caielli G., Ponziani F., Corsi A. – *Acquisizione dati sismologici per la microzonazione sismica di Montone* . Rapporto finale, Milano, maggio 2001

Marcucci S. Milana G., Ponziani F. – *Acquisizione ed elaborazione di dati sismologici per la microzonazione sismica di Pietralunga.* Rapporto finale. Roma ,gennaio 2002.

Pergalani F., De Franco R., Compagnoni M., Caielli G. *Valutazione degli effetti locali tramite analisi numeriche e sperimentali nel sito di Città di Castello: analisi, confronti ed utilizzo dei risultati.* Rapporto finale, Milano , ottobre 2001.

Pergalani F. Compagnoni M – *Studio volto alla valutazione degli effetti locali nell' ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione della pericolosità sismica locale – Area campione Alta Val Tiberina Umbra* - Milano, 2001.

Rotili R..-*Relazioni e cartografie geologiche e geotematiche nei vari siti oggetto di microzonazione sismica.* Rapporti conclusivi, Dicembre 2001.

Soil Test s.r.l.- *Indagini geognostiche e geotecniche in sito; Prove di laboratorio; Indagini sismiche.* Rapporti, certificati e diagrammi, Novembre 2000.

Stucchi M., Zonno G. – *Studio volto alla valutazione degli effetti locali nell' ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione della pericolosità sismica locale – Area campione Alta Val Tiberina Umbra.- Definizione del moto sismico di riferimento* , Milano 2001.

La relazione di sintesi è stata predisposta utilizzando i risultati delle varie attività elencate.

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UNA ZONAZIONE TERRITORIALE DELLA PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE AREA CAMPIONE: ALTA VAL TIBERINA

INDICE DELLA RELAZIONE DI SINTESI

1. ***OBIETTIVI DEL PROGETTO***
   - ***1.1 Premessa……..p. 4***
   - ***1.2 Inquadramento geografico e dati disponibili……..6***
   - ***1.3 Sintesi degli aspetti geologici e geomorfologici……...8***
   - ***1.4 Rilevamenti di campagna……12***

2. ***CAMPAGNA GEOGNOSTICA E GEOFISICA***
   - ***2.1 Programmazione delle attività d' indagine……..14***
   - ***2.2 Raccolta dei dati disponibili……14***
   - ***2.3 Sondaggi geognostici e prove penetrometriche……...15***
   - ***2.4 Prove di laboratorio……17***
   - ***2.5 Indagini geofisiche……..17***

3. ***PROVE IN SITO E DI LABORATORIO***
   - ***3.1 Metodologia……..19***
   - ***3.2 Prove statiche CPTE……21***
   - ***3.3 Prove dinamiche SPT e DPSH……21***
   - ***3.4 Prove geofisiche……22***
   - ***3.5 Prove di laboratorio……..23***
   - ***3.6 Correlazioni tra parametri statici e dinamici……24***

4. ***MOTO DI INPUT E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI DI SITO***
   - ***4.1 Moto di input……25***
   - ***4.2 Modellazione degli effetti di sito: Città di Castello……..30***
   - ***4.3 Esempio di valutazione degli effetti locali: Città di Castello…....33***

5. ***MICROZONAZIONI SISMICHE STRUMENTALI***
   - ***5.1 Centri urbani indagati……..42***
   - ***5.2 La metodologia di valutazione degli effetti di sito da dati sismometrici……...42***
   - ***5.3 Valutazione degli effetti di sito : Città di Castello……43***
   - ***5.4 Montone……49***
   - ***5.5 Pietralunga……51***
   - ***5.6 Considerazioni……52***

6. ***CONCLUSIONI E RISULTATI***
   - ***6.1 Caratteristiche geologiche e geotecniche……53***
   - ***6.2 Analisi numeriche……...53***
   - ***6.3 Confronto delle analisi numeriche e strumentali……54***
   - ***6.4 Carte dei fattori di amplificazione……...55***
   - ***6.5 Utilizzo dei risultati e discussione……62***

7. ***Bibliografia……..……...64***

1. OBIETTIVI DEL PROGETTO

1.1 Premessa

Gli studi di microzonazione sismica nell'area campione dell'Alta Valtiberina umbra sono inseriti in un più vasto programma di lavori riguardanti la prevenzione dal rischio sismico ed idrogeologico nell'Umbria Nord-Occidentale.

La Giunta Regionale dell'Umbria con proprio atto n° 1398 del 29 Settembre 1999 ha approvato, fra l'altro, un " Programma finalizzato all'acquisizione dati di microzonazione per definizione rischi….." e successivamente il progetto collegato per la zonazione territoriale della pericolosità sismica locale nell'area campione dell'Alta Valtiberina. Le attività sono state finanziate parte con fondi europei, parte con fondi statali e parte con fondi propri.

In tali lavori la Regione dell'Umbria ha coinvolto numerosi soggetti che già a vario titolo avevano collaborato con l'Amministrazione Regionale dell'Umbria a seguito delle crisi sismiche del 1997-98: Consiglio Nazionale delle Ricerche-Istituto Ricerche sul Rischio Sismico, Dipartimento di Ingegneria Civile di Firenze, Servizio Sismico Nazionale.

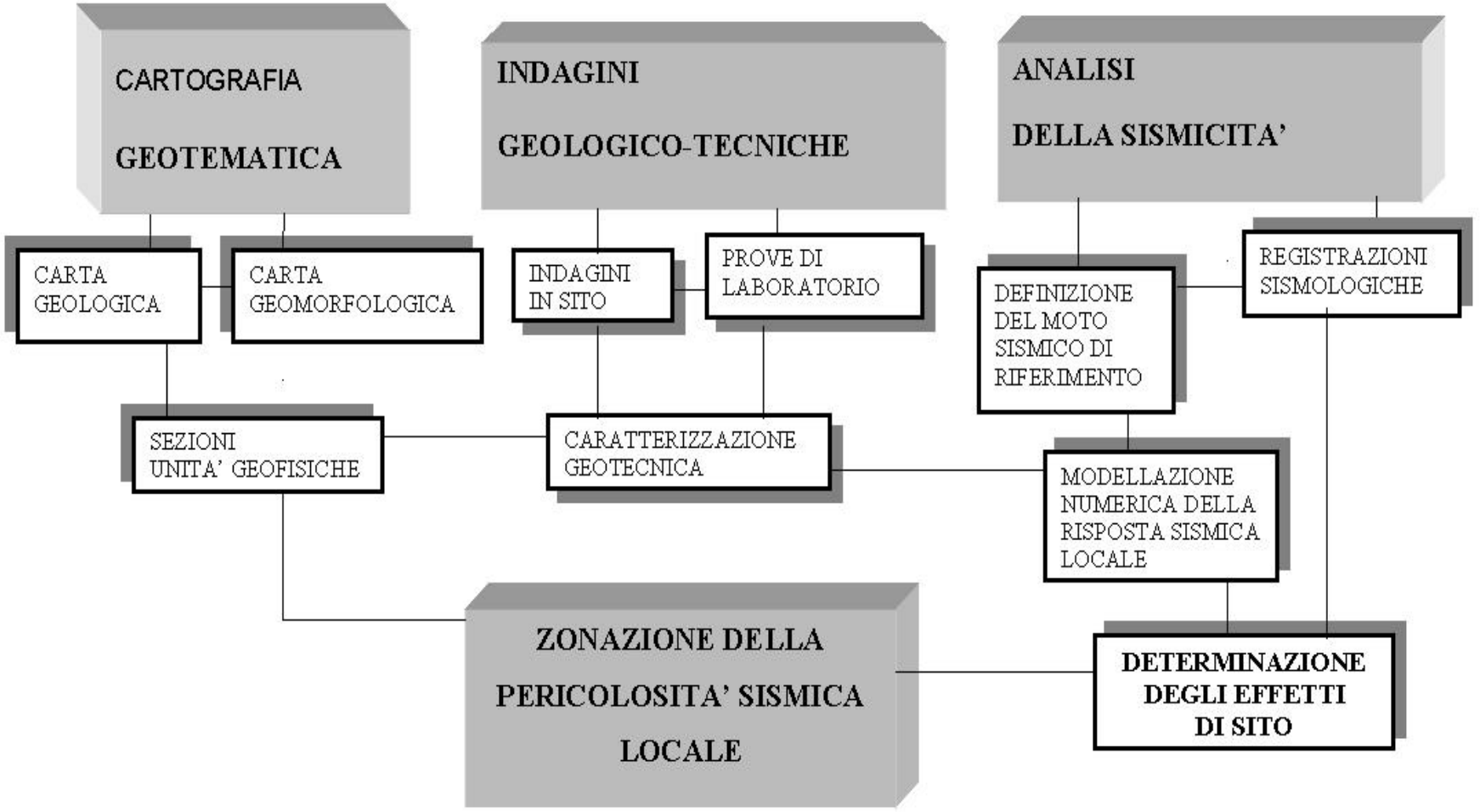
La definizione della pericolosità sismica locale, quale componente di valutazione del rischio sismico di una data area, rientra sia nelle attività di programmazione territoriale ed urbanistica, sia nei programmi regionali di protezione civile.

L'Alta Valtiberina è stata scelta come area campione principalmente perché è zona ad elevata sismicità e perchè era disponibile una aggiornata e dettagliata cartografia geologica.

Obiettivo del progetto è stato quello di pervenire, attraverso la definizione del moto sismico di riferimento e l'analisi degli effetti di sito, ad una zonazione del territorio dove individuare aree omogenee sotto il profilo della risposta sismica locale per indirizzare scelte di pianificazione regionale nonché di programmazione urbanistica comunale.

In Fig. 1 è riportato lo schema concettuale del progetto.

Fig. 1 – Schema concettuale del progetto



Il poter disporre di cartografie geotematiche e di dati territoriali geologici può permettere in fase di prevenzione di avviare programmi di mitigazione del rischio sismico del patrimonio edilizio e di individuare, successivamente al verificarsi di un eventuale evento sismico, le situazioni di pericolo incombente per effettuare rapide scelte inerenti:

- la verifica dei danni e delle situazioni di rischio;
- l'individuazione delle aree per l'installazione delle strutture di emergenza;
- gli interventi di messa in sicurezza di opere ed infrastrutture;
- la predisposizione degli interventi di recupero.

1.2 Inquadramento geografico e dati disponibili

La microzonazione sismica ha riguardato alcuni centri abitati fra i più popolati e rappresentativi delle realtà geomorfologiche, compresi i capoluoghi comunali, nei territori dei comuni di Città di Castello, San Giustino, Citerna, Monte Santa Maria Tiberina, Montone e Pietralunga (Fig.2).

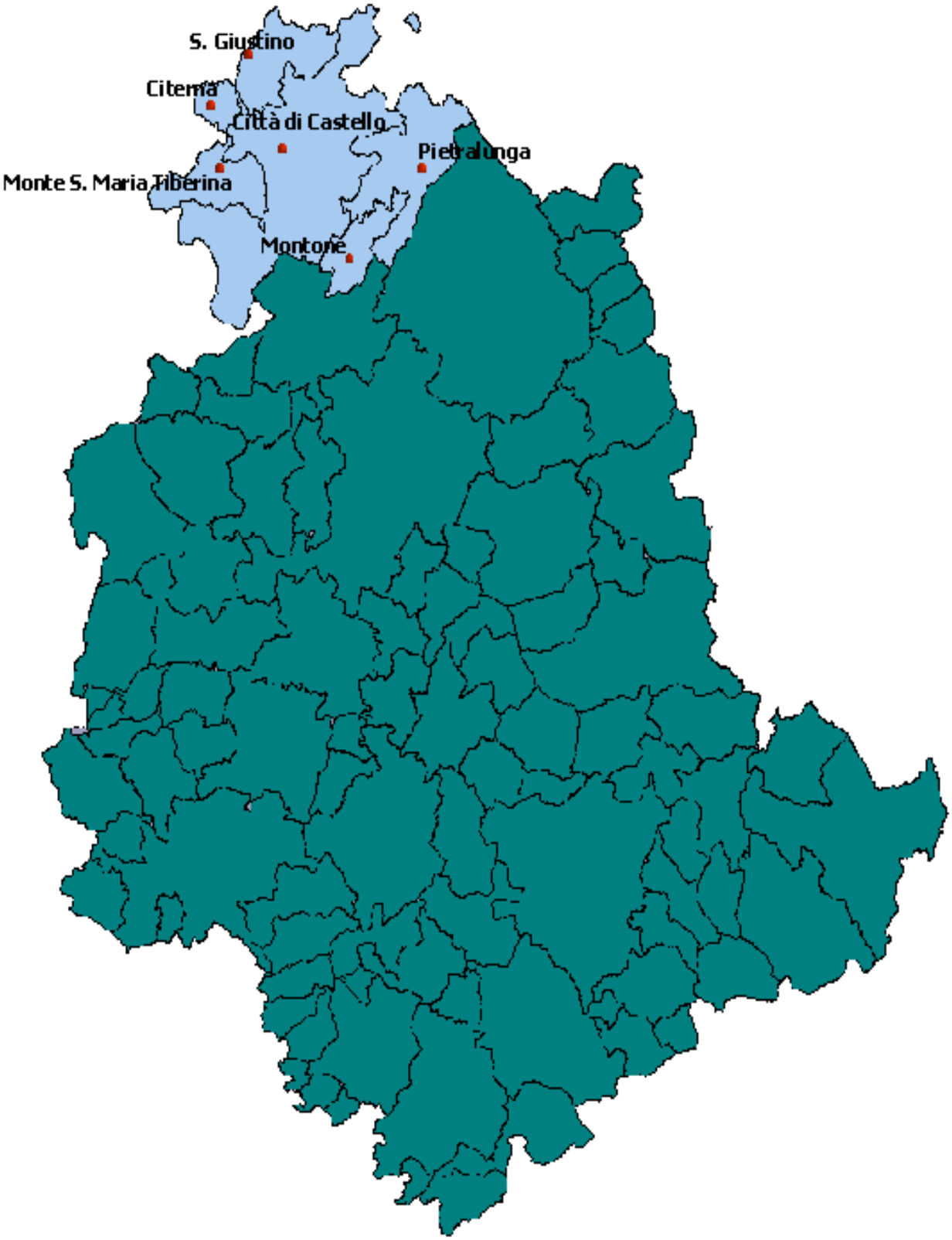


Fig. 2 – Inquadramento geografico dei centri abitati sottoposti a microzonazione sismica

Tra i progetti specifici che hanno interessato l'alta Valtiberina ha rivestito particolare importanza per la microzonazione sismica quello di cartografia geologica nazionale in scala 1:50.000 (Progetto CARG) con l'esecuzione del Foglio 289 " Città di Castello ". In tale ambito è stata prodotta una base geologica in scala 1:10.000. In essa sono stati mappati i depositi superficiali presenti nei circa 150 Kmq della pianura alluvionale dell'Alta Valtiberina; l'interpretazione e lo studio di circa 800 stratigrafie di sondaggi ha permesso, inoltre, la ricostruzione stratigrafica a diverse profondità dei depositi continentali. In aggiunta è stato possibile consultare ed utilizzare i dati provenienti dal progetto di consolidamento del Colle di Montone [3] (Comune ad Est di Città di Castello) e dalla recentissima cartografia geologica e geotematica in scala 1:10.000 dell'area di Pietralunga [6] (PG).

1.3 Sintesi degli aspetti geologici e geomorfologici.

L'Alta Valtiberina oggetto di indagine è posta a Sud del confine regionale umbro, si estende longitudinalmente da San Giustino (PG) ad oltre Città di Castello (PG) per una fascia con larghezza media di circa 10 Km. Il territorio, in gran parte pianeggiante, è riconducibile ad un' ampia conca intramontana, compresa tra i rilievi di M. S. Maria Tiberina (688 m s.l.m.) a Sud-Ovest e la fascia Preappenninica posta tra Bocca Trabaria (1049 m s.l.m.) e Bocca Serriola (730 m s.l.m.) a Nord-Est.

Sono ampiamente rappresentati nell'area pianeggiante e subpianeggiante i depositi alluvionali terrazzati e le conoidi alluvionali. I dati esistenti sui depositi continentali lasciano supporre l'esistenza di una soglia geologica subito a Sud di Città di Castello.

L'Alta Valtiberina umbra si colloca dal punto di vista geologico nel settore centro meridionale dell'Appennino Settentrionale, dove vengono a contatto le successioni epitoscane e della Falda toscana con quelle del Dominio umbro-romagnolo principalmente attraverso sovrascorrimenti di varia importanza (Fig.3).

Nella zona sottoposta ad indagini di microzonazione sismica affiorano unità litostratigrafiche della Falda toscana (Oligocene inferiore- Burdigaliano medio-superiore), della Successione epitoscana (Aquitaniano superiore- Burdigaliano medio) e delle successioni umbra e romagnola (Burdigaliano medio- Serravalliano).

Sono inoltre presenti, oltre ad alcuni depositi continentali quaternari, le unità stratigrafiche a limiti inconformi (unconformity bounded) del Supersintema Tiberino.

La *Falda toscana* è caratterizzata, a partire dal basso:

- dalla parte sommitale della Scaglia toscana rappresentata in prevalenza da argilliti e marne policrome;
- dalla successione torbiditica del Macigno passante da un membro arenaceo ad uno arenaceo-pelitico e poi pelitico arenaceo.

La *Successione epitoscana* è costituita dalle Arenarie di Celle, arenarie massive in grossi banchi, e dalle Marne di Vicchio, marne a volte silicee e siltiti marnose mal stratificate.

Le *successioni umbra e romagnola* sono rappresentate a partire dal basso:

- dalla Formazione Marnoso-arenacea Umbra, distinta in tre membri, costituita da torbiditi silico-clastiche talvolta prevalentemente arenacee alternate a marne e talora a calcareniti;
- dalla Formazione Marnoso-arenacea romagnola, affiorante nell'area del foglio Città di Castello con tre membri, composti da torbiditi pelitico-arenacee contenenti episodi da slumping e a luoghi potenti strati calcarenitici e marnosi;
- dalla Formazione di Monte Santa Maria Tiberina, distinta in quattro membri, passanti da calciruditi a marne siltose a torbiditi pelitico-arenacee e quindi a torbiditi prevalentemente pelitiche.

In questo contesto rivestono particolare interesse i depositi continentali ubiquitari e del Supersintema Tiberino perché in essi sono collocati quasi tutti i centri abitati e le principali attività antropiche.

In gran parte dell'area studiata sono presenti i depositi alluvionali recenti e terrazzati, costituiti in prevalenza da limi sabbiosi ed argillosi di frequente inglobanti depositi lentiformi e nastriformi di ghiaie.

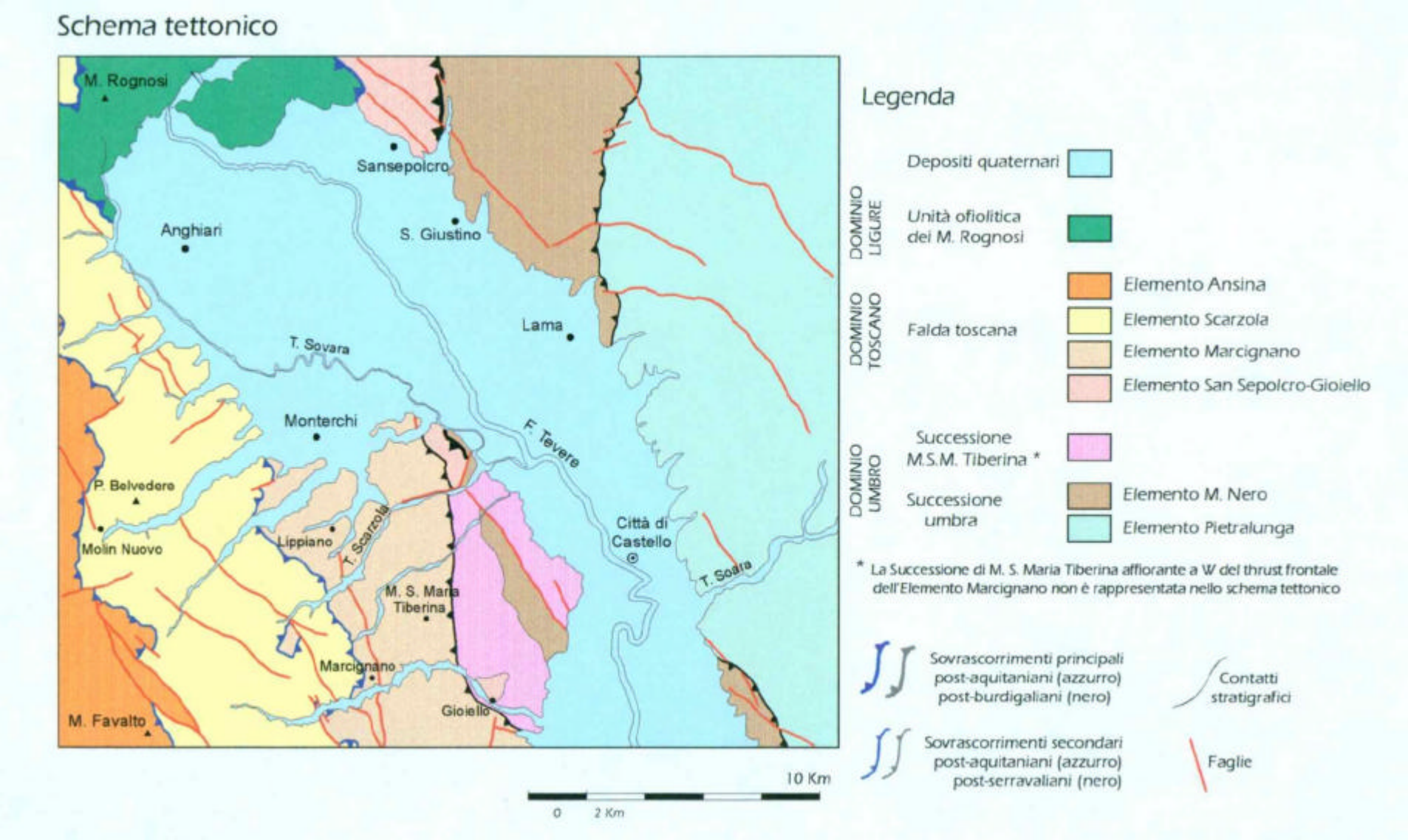
Le principali unità stratigrafiche pleistoceniche (Unconformity Bounded) contengono dal punto di vista litologico:

- depositi conglomeratici monogenici (Subsintema di Mercatale) e poligenici (Subsintema di M. Rotondo);
- brecce e megabrecce a basso grado di cementazione (Sintema di Selci- Lama);
- argille limose prevalenti alternate a sabbie fini (Sintema di Fighille);
- depositi prevalentemente limo-sabbiosi (Subsintema di Anghiari).

Il Sintema di Fighille, in facies litologica prevalentemente limo-argillosa, posto talvolta al letto delle alluvioni recenti e terrazzate costituisce gran parte del substrato non litoide delle zone sottoposte a microzonazione sismica compreso il centro di Città di Castello. Qui un sondaggio spinto fino a 180 m di profondità ne ha rivelato l'appoggio sulle successioni litoidi in prossimità di – 140 m rispetto al piano di campagna.

Lo schema tettonico della nuova Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (Fig.3), in fase di stampa, individua dei sovrascorrimenti principali post-Aquitaniani e post-Burdigaliani che procedendo da Ovest verso Est permettono l'accavallamento dei vari elementi della Falda toscana sulla Successione di Monte Santa Maria Tiberina e sulle successioni umbre e romagnole. Sono inoltre individuati sistemi di faglie dirette successive alla fase compressiva con direzione prevalente Nord-Ovest/Sud-Est, principalmente Est immergenti ad Ovest del F.Tevere e Ovest immergenti ad Est dello stesso.

Fig. 3 [2] – Schema tettonico del Foglio Geologico 289 – Città di Castello



Alcune di queste strutture sono da ritenere attive o con attività recentissima poiché tagliano i depositi quaternari e sono responsabili della formazione dei sistemi vallivi nonché di apprezzabili rigetti di unità litostratigrafiche alluvionali la cui geometria è stata ricostruita attraverso stratigrafie di sondaggi.

Vanno in questa sede ricordate le strutture attive individuate e descritte nella " Carta delle faglie attive ed analisi sismotettonica di dettaglio delle principali aree sismiche della Regione Umbria " [4].

I segmenti della cosiddetta "Faglia Altotiberina" posti nel settore Occidentale e Nord-Occidentale di Città di Castello risultano orientati con direzione Nord-Ovest/Sud-Est ed immersione Nord-Est.

Altre faglie normali di probabile importanza sismogenetica sono individuate a Nord/Nord-Est di Città di Castello, sono orientate prevalentemente in direzione Nord-Ovest/Sud-Est e immersione Sud-Ovest, costituirebbero delle strutture coniugate antitetiche della "Faglia Altotiberina".

I terremoti storici associati a tali strutture avrebbero raggiunto intensità IX M.C.S. e Mm (Magnitudo macrosismica) 6,0 R.

1.4 Rilevamenti di campagna

Le conoscenze del territorio e l'esistenza di una carta geologica in scala 1:10.000, eseguita nell'ambito del progetto CARG, hanno permesso di individuare circa 50 località rappresentative delle caratteristiche antropiche e urbanistiche nonché delle realtà geomorfologiche. Tra queste ne sono state selezionate una ventina tra quelle maggiormente popolate e raffigurative di tutte le tipologie geomorfologiche presenti (Tab 1).

Tab. 1

Comune	**Località**
Citerna	Centro storico
	Fighille
	Pistrino
Monte S. Maria Tiberina	Centro storico
	Lippiano

Città di Castello	Centro storico e urbano
	Celle
	Cerbara
	Fraccano
	Gioiello
	Lerchi
	Nuvole
	Piosina
	Ponte d'Avorio
	San Secondo
	Santa Lucia
San Giustino	Centro storico e urbano
	Celalba
	Lama
	Selci

Per ognuna delle venti località selezionate è stata acquisita la carta geologica esistente in scala 1:10.000 e raccolti tutti i dati superficiali e profondi.

Con successive indagini di campagna è stata redatta la carta geologica con elementi geomorfologici in scala 1:5.000.

In generale la base geologica esistente ha subito pochissime modifiche, su di essa sono stati aggiunti gli elementi morfologici di interesse per la modellazione sismica locale.

Sono state utilizzate le unità litostratigrafiche del Foglio CARG, Città di Castello, in scala 1:50.000, in stampa [2]. Per gli elementi morfologici, invece, è stata acquisita la legenda impiegata nel progetto di microzonazione sismica speditiva in Umbria a seguito delle crisi sismiche del 1997-98 [1].

I dati derivanti dai rilievi di campagna più dettagliati e dalle indagini geognostiche hanno permesso di affinare ed arricchire la conoscenza della composizione litologica e delle strutture sedimentarie delle varie unità litostratigrafiche. Su tali basi geologiche sono state poi scelte delle sezioni geologiche, estrapolate quando possibile fino al substrato litoide.

Le sezioni geologiche sono state effettuate alla stessa scala delle carte, 1:5.000, sia in altezza che in lunghezza.

2. CAMPAGNA GEOGNOSTICA E GEOFISICA

2.1 Programmazione delle attività di indagine

La finalità dell'esecuzione delle indagini geologico-tecniche attuate era la caratterizzazione, sia in condizioni statiche che dinamiche e cicliche, delle unità geofisiche presenti nell'area in studio, che potessero essere sede di amplificazioni sismiche locali o instabilità dinamiche in concomitanza di eventi sismici.

I dati ricavati sono così stati utilizzati, nello sviluppo del progetto, come dati di input per le modellazioni numeriche di risposta di sito, per inquadrare ed estendere i risultati delle microzonazioni di dettaglio basate sull'acquisizione di dati sismologici, nonché come base per la redazione di tutte le carte finali di amplificazione sismica e instabilità dinamiche locali.

Le nuove indagini sono state finalizzate alla caratterizzazione di tutte le più importanti formazioni di copertura esistenti nell'area, principalmente mediante l'ottenimento di stratigrafie litologiche, di *Vs* dettagliate e prove di laboratorio in campo statico e dinamico. Sono stati quindi eseguiti sondaggi predisposti per prove “down hole” (di seguito indicate come DH) e “cross hole” (CH), anche nelle principali formazioni del substrato. La campagna geognostica programmata, finalizzata all'ottimizzazione dei risultati delle modellazioni numeriche per l'analisi degli effetti di sito, ha avuto così anche la finalità di costruire un database ricco di informazioni estrapolabili per l'applicazione di studi di risposta sismica locale in altre aree.

2.2 Raccolta dei dati disponibili

Nel pianificare le indagini geologico-tecniche necessarie alla caratterizzazione delle varie situazioni morfostratigrafiche presenti in un vasto territorio, come quello esaminato con il presente progetto, occorre un’approfondita analisi delle informazioni geologiche di base e dei dati stratigrafici e geomeccanici esistenti.

In fase di redazione del progetto si aveva a disposizione la cartografia geologica di dettaglio a scala 1:10.000, redatta nell'ambito del progetto CARG, a cui era associata la raccolta dei dati litostratigrafici e di caratterizzazione geotecnica, in particolare riguardo i

depositi continentali quaternari. Ciò ha permesso di impostare un quadro geologico, di dettaglio già nelle prime fasi di sviluppo del progetto, nonché di definire abbastanza dettagliatamente ed in tempi brevi il programma di indagini in sito ed in laboratorio.

In fase di esecuzione del progetto è stata svolta un'ulteriore raccolta dei dati disponibili presso gli uffici tecnici degli enti locali o da privati. Le indagini reperite sono ubicate, quasi nella loro totalità, in corrispondenza dei centri abitati o di sviluppo edilizio di fondovalle. Poche sono quelle realizzate nei centri abitati ubicati sui rilievi collinari, ove si hanno sedimenti prevalentemente conglomeratici.

Le prospezioni acquisite sono state suddivise in tre gruppi a seconda della tipologia: 215 Prove Penetrometriche Statiche (CPT), 57 Prove Penetrometriche Dinamiche (DPSH), 74 Sondaggi Geognostici (S).

Esecuzione delle indagini

La Tab. 2 sintetizza le collocazioni e tipologie di indagine eseguite: sono stati effettuati sondaggi a carotaggio continuo e a distruzione, prelievi di campioni per prove tecniche di laboratorio, penetrometrie statiche e dinamiche, prospezioni geofisiche in foro ed in superficie.

2.3 Sondaggi geognostici e prove penetrometriche

Sono stati realizzati 29 sondaggi dei quali 17 a carotaggio continuo e 12 a distruzione di nucleo, con prelievo di un totale di 40 campioni indisturbati, la cui ubicazione è riportata in Fig. 4.

I metri di perforazione ammontano a 757 dei quali 184 a distruzione. In particolare, è stato eseguito un sondaggio a distruzione profondo ai margini dell'abitato di Città di Castello, tentando di definire gli spessori complessivi delle formazioni di copertura della valle: il substrato roccioso (Vs 1100 m/s), costituito dalle successioni torbiditiche, è stato effettivamente raggiunto identificando uno spessore di 140 m dei depositi di copertura. Il sondaggio, profondo 180 m, è stato predisposto per l'alloggiamento di una stazione sismologica fissa.

Durante i sondaggi sono state eseguite n. 62 prove S.P.T., e prove con pocket penetrometer e scissometro tascabile in tutti gli intervalli disponibili di testimoni del carotaggio in materiali coesivi.

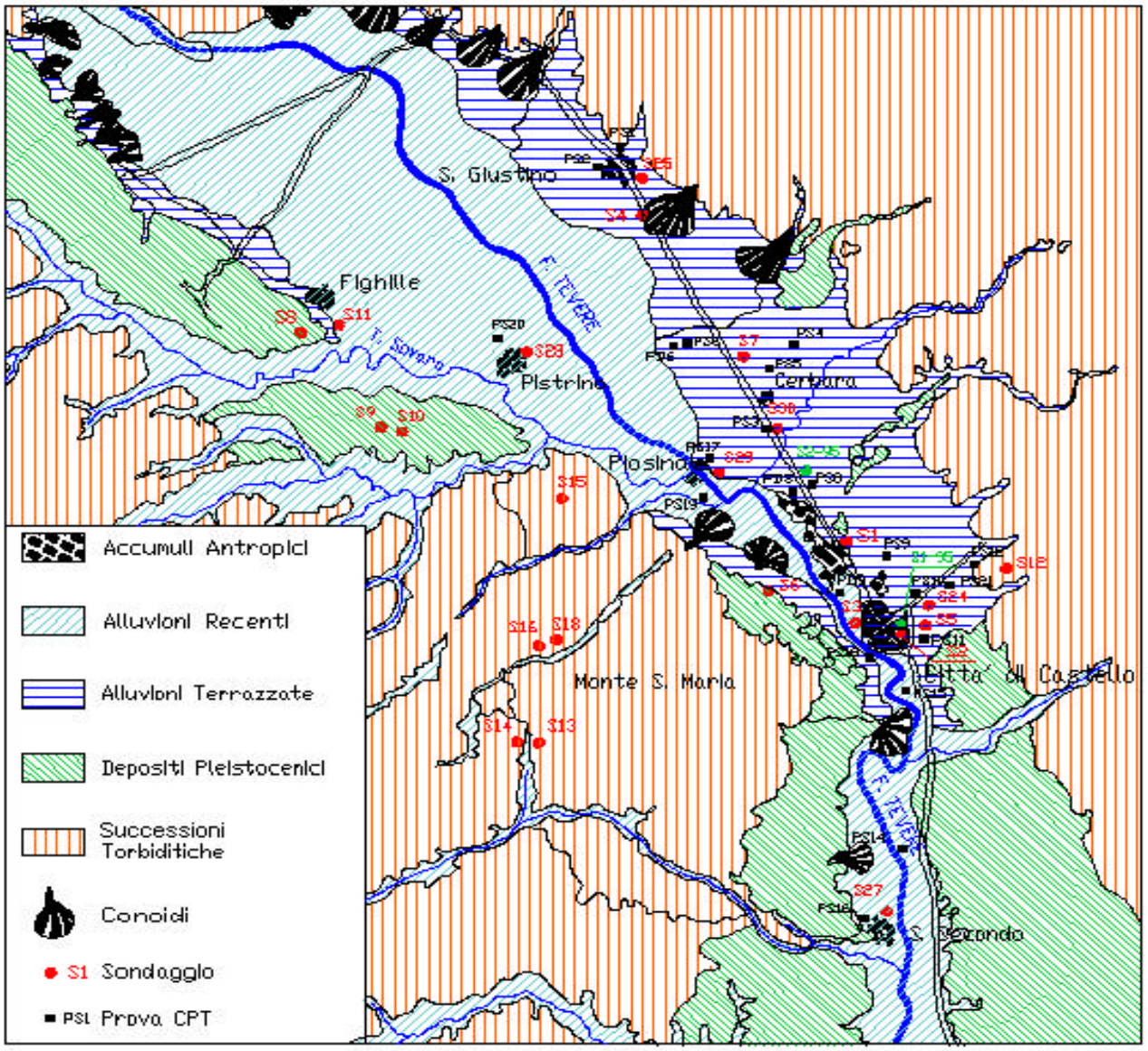


Fig. 4 [8] - Ubicazione indagini geognostiche

Prove penetrometriche

Sono state eseguite n. 22 prove penetrometriche statiche (CPTE) con penetrometro da 20 t a punta elettrica, e n. 5 prove penetrometriche dinamiche (DPSH) per un totale complessivo di 320 m.

Alcune delle prove sono state realizzate in adiacenza ai sondaggi per poter correlare adeguatamente i parametri penetrometrici sia tra loro, che con i valori ricavati dalle prove di laboratorio e quelli derivanti dalla prospezione relativa alla sismica in foro.

2.4 Prove di laboratorio

Le prove di laboratorio hanno permesso di definire le proprietà indice e le caratteristiche granulometriche dei terreni, su un totale di 34 campioni, con l'esecuzione di 9 prove ad espansione laterale libera, 23 edometriche e 10 triassiali consolidate e non drenate (C.I.U.). Sono state inoltre realizzate 5 prove di colonna risonante e 5 di taglio torsionale ciclico.

2.5 Indagini geofisiche

I sondaggi eseguiti, ad eccezione di quello profondo, sono stati predisposti per l'esecuzione di prove DH, utilizzando due geofoni in foro ed energizzazioni opposte in fase. Al fine di massimizzare la trasmissione di energia, ove possibile sono state eseguite apposite gettate in calcestruzzo per l'energizzazione. Per assicurare qualità di dati in corrispondenza degli abitati di maggior dimensione, a Città di Castello e Selci-Lama sono state eseguite due prove cross hole, a tre fori.

Si è quindi ottenuto un consistente database di stratigrafie e log di *Vp* e *Vs* con 23 prove DH e 2 prove CH. Le estensioni medie in profondità delle stratigrafie e dei log sono di 10 m per le formazioni del substrato, 20-30 per quelle di copertura, fino ad un massimo di circa 50 m.

In ultimo, in cinque località ai bordi della valle sono stati eseguiti 5 profili di sismica a rifrazione di 230 m, allo scopo di definire le geometrie di contatto copertura-bedrock per meglio vincolare le sezioni geologiche prodotte.

LOCALITA'	SITUAZIONE MORFOSTRATIGRAFICA	TIPOLOGIA DI PROSPEZIONE
CITTA' DI CASTELLO	Depositi alluvionali di fondovalle sovrastanti il Sintema di Fighille	n. 4 sondaggi a carotaggio n. 1 sondaggio a distruzione n. 3 prove DH e 1 prova CH n. 8 prove CPTE n.2 prove DPSH n. 2 sismiche a rifrazione
CITTA' DI CASTELLO	Sequenza di depositi continentali sovrastanti il basamento litoide	n. 1 sondaggio a distruzione di 180 m
S.SECONDO – S.LUCIA	Depositi alluvionali pedemontani e di fondovalle sovrastanti il Sintema di Fighille	n. 1 sondaggio a carotaggio n. 2 prove CPTE n. 1 sismica a rifrazione
CERBARA	Depositi alluvionali di fondovalle sovrastanti il Sintema di Selci Lama	n. 1 sondaggio a carotaggio n. 1 prova DH n. 2 prove CPTE
LERCHI	Depositi alluvionali pedemontani	n. 1 prova CPTE
FIGHILLE	Dorsale costituita dai depositi del Subsintema di Anghiari e di M. Rotondo. Depositi alluvionali di fondovalle sovrastanti il Sintema di Fighille	n. 2 sondaggi a carotaggio n. 2 prove DH n. 1 prova DPSH
PISTRINO - PIOSINA	Depositi alluvionali di fondovalle	n. 2 sondaggi a carotaggio n. 2 prove DH n. 1 prova DPSH n. 2 prova CPTE
SELCI LAMA	Depositi alluvionali di fondovalle e pedemontani sovrastanti il Sintema di Selci Lama	n. 1 sondaggio a carotaggio n. 1 sondaggio a distruzione n. 1 prova CH n. 4 prove CPTE
CELALBA	Depositi alluvionali pedemontani sovrastanti il substrato litoide	n. 1 sismica a rifrazione
S. GIUSTINO	Depositi alluvionali di fondovalle e pedemontani sovrastanti il Sintema di Selci Lama	n. 2 sondaggi a carotaggio n. 2 prove DH n. 2 prove CPTE n. 1 prova DPSH n. 1 sismica a rifrazione
CITERNA	Dorsale costituita dai depositi del Supersintema Tiberino	n. 2 sondaggi a carotaggio n. 2 prove DH
NUVOLE	Versante con affioramento del Subsintema di Nuvole sovrastante il substrato litoide	n. 1 sondaggio a carotaggio n. 1 prova DH
MONTE SANTA MARIA TIBERINA – CELLE – CAGNANO – TERME DI FONTECCHIO – M-ACUTO	Unità della Falda Toscana e Successione Epitoscana – Successione Umbra e Romagnola – Formazioni del substrato carbonatico	n. 10 sondaggi a distruzione n. 10 prove DH

CH = prova crosshole - DH = prova down hole

CPTE = prova penetrometrica statica con punta elettrica - DPSH = prova penetrometrica dinamica superpesante

Tab.2: Schema riassuntivo delle situazioni morfostratigrafiche indagate e relativa tipologia di prospezione

3. PROVE IN SITO E DI LABORATORIO

3.1 Metodologia d' indagine

Le procedure numeriche per la determinazione degli effetti di sito richiedono la conoscenza di alcuni parametri geotecnici rappresentativi dello stato naturale del terreno prima dell'evento sismico e del suo comportamento durante l'evento, in presenza cioè delle azioni dinamiche e cicliche indotte dal moto sismico di riferimento. I parametri geotecnici richiesti dalle varie procedure di calcolo sono differenti e devono essere determinati con prove in sito e in laboratorio specificatamente indirizzate a indagare il comportamento del terreno ai livelli deformativi previsti durante il terremoto atteso e considerati dai vari codici di calcolo.

I codici di calcolo scelti per la valutazione degli effetti di sito nella Valtiberina eseguono l'analisi della risposta sismica in termini di pressioni totali, e utilizzano un legame sforzi-deformazioni lineare equivalente.

I parametri geotecnici richiesti dai codici di calcolo utilizzati sono, per ogni strato di terreno considerato:

- per definire lo stato iniziale *prima* del terremoto: la densità r, il modulo di taglio iniziale G_0, il rapporto di smorzamento iniziale D_0 e, nel caso di modelli bidimensionali, il coefficiente di Poisson ν;
- per definire il comportamento *durante* il terremoto: la legge di variazione con l'ampiezza della deformazione di taglio g, del modulo di taglio $G(g)$, e del rapporto di smorzamento $D(g)$; vedi Fig. 5.

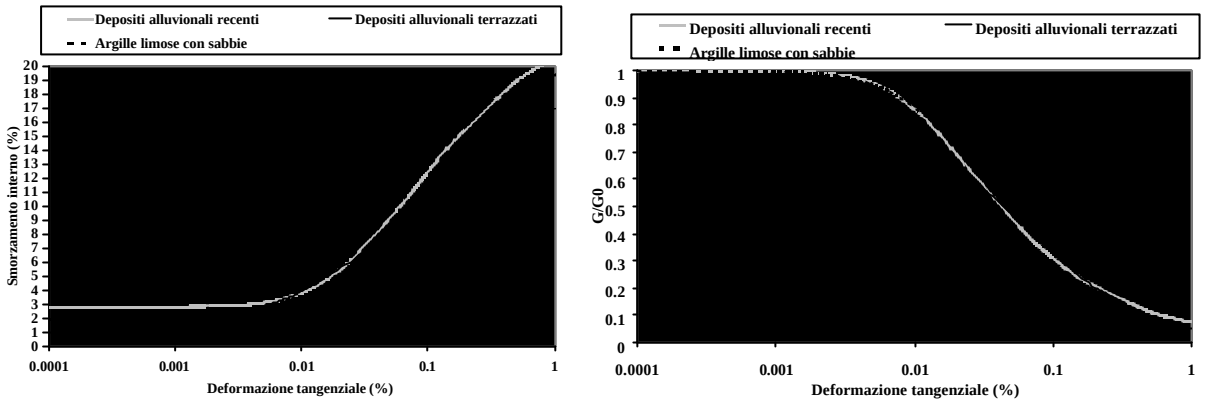


Fig. 5 – Esempi di “Curve di smorzamento interno “ e “Curve di decadimento del modulo di taglio”

La campagna delle indagini geotecniche è stata perciò prioritariamente finalizzata alla definizione, tramite prove in sito e in laboratorio, dei suddetti parametri nei siti di maggiore interesse, in modo da ricavare il maggior numero possibile di informazioni geotecniche dai campioni estratti ai fini sia della ricerca di correlazioni regionali tra parametri statici e dinamici, sia della caratterizzazione delle principali formazioni presenti nell'area.

Data la loro diffusa presenza nel territorio, sono state considerate separatamente le proprietà geotecniche delle seguenti formazioni:

a) Depositi continentali quaternari (Alluvioni recenti - b_2, e Alluvioni terrazzate - b_n)

b) Unità pleistoceniche (Sintema di Fighille - FHL, e Sintema di Selci Lama - SLA)

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati prelevati N. 40 campioni indisturbati su cui sono state eseguite prove statiche e dinamiche. Le prove statiche sono state condotte in vari laboratori geotecnici e hanno compreso: prove di classificazione, prove edometriche ad incrementi di carico (EDO), prove di resistenza al taglio (compressione uniassiale ad espansione laterale libera, ELL e triassiali non drenate con consolidazione isotropa, TxCIU). Le prove dinamiche sono state effettuate nel Laboratorio Geotecnico del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze e hanno compreso prove di colonna risonante (RC) e di taglio torsionale ciclico (TTC).

3.2 Prove statiche CPTE

Nell'area in studio si ha la presenza di due tipi fondamentali di materiali, la cui consistenza (o compattezza) è rispettivamente medio alta e medio bassa. Laddove i valori di q_c compresi tra 2 e 4 MPa corrispondono a materiali fini (limi argillosi), lo stato di consistenza è medio o medio - alto, mentre, laddove prevalgono limi sabbiosi o sabbia, lo stato di addensamento è da ritenersi invece mediamente addensato o poco addensato. Nei materiali a prevalente componente argillosa, la buona consistenza del materiale è anche comprovata dai valori della coesione non drenata misurata in laboratorio, che in tutti i campioni esaminati è sempre superiore a 50 kPa.

Andamento di q_c con la profondità e relazione $q_c \Rightarrow z$ - I depositi alluvionali recenti e terrazzati sono di natura molto composita, perciò le relazioni $q_c \Rightarrow z$ sono state studiate separando i valori di q_c in funzione della granulometria. Ciò ha permesso di togliere i principali incrementi dei valori della resistenza alla punta nei profili $q_c \Rightarrow$ z determinati dai materiali a grana grossa. Dall'esame dei risultati ottenuti, anche considerando separatamente i materiali fini e grossolani, non appare possibile identificare, almeno sulla base dei dati disponibili, una relazione affidabile tra q_c e la profondità z.

3.3 Prove dinamiche SPT e DPSH

Nel corso dei sondaggi sono state effettuate n° 62 prove SPT, i valori del numero dei colpi, N_{SPT}, sono per lo più molto dispersi e confermano la natura molto composita dei vari depositi nonché la mancanza di trend con la profondità, riscontrata anche con le altre prove in sito. Sono state poi anche effettuate n. 5 prove con il penetrometro dinamico superpesante (DPSH), tipo ISSMFE. Tali prove hanno raggiunto profondità variabili tra i 12 e i 20 m ed hanno interessato prevalentemente i depositi alluvionali recenti e terrazzati. In generale si riscontra una buona corrispondenza tra i parametri N_{30}, q_c, V_S con una tendenza ad assumere valori crescenti con la profondità.

3.4 Prove geofisiche

Nei sondaggi effettuati sono state eseguite prove DH e prove CH a tre fori al fine di determinare in maniera diretta mediante la misura delle velocità delle onde di taglio il modulo di taglio iniziale G_0 .

Sono stati ottenuti valori piuttosto elevati del coefficiente di Poisson, soprattutto per i depositi alluvionali pleistocenici. Nelle verticali più profonde investigate, non si assiste generalmente, soprattutto per i materiali a grana fine, ad un netto aumento della *Vs* con la profondità. Ciò è particolarmente visibile per il Sintema di Fighille, che costituisce la formazione di copertura più diffusa nella valle. Questo porta a considerare velocità *S* medie complessive delle coperture poco elevate; cosa confermata fra l'altro dall'inversione dei dati sismologici registrati nell'area di Città di Castello. L'analisi delle registrazioni delle varie stazioni distribuite lungo un transetto attraverso la valle, di un evento sismico profondo, indica una velocità *S* media per l'insieme delle coperture intorno ai 600 m/s $\pm$ 100 m/s.

Velocità *S* più elevate, fino a 1000 m/s, sono state riscontrate per i subsintemi di M. Rotondo, Mercatale e Molin dell'Olio, formazioni più competenti ma comunque meno diffuse nell'area.

Le prove in foro eseguite nelle formazioni del substrato avevano lo scopo principale di colmare una lacuna di informazioni sulle velocità *S* delle formazioni di basamento più diffuse nella regione. I risultati delle prove DH, in realtà di non sempre semplice interpretazione, danno velocità *S* nell'ordine di 1000 - 1200 m/s per le formazioni marnose o arenacee come la Marnoso Arenacea, le Arenarie di Celle e le Marne di Vicchio, presentando regolarmente nei primi metri una riduzione di velocità. Una prova eseguita nella formazione calcarea della Maiolica mostra *Vs* di 1500 m/s già dal primo metro di sondaggio.

Dai profili di sismica a rifrazione si sono ottenute velocità delle onde *P* che sono in buon accordo con i log di sondaggio: il bedrock, costituito generalmente da Marnoso Arenacea, presenta velocità da 2000 a 2600 m/s con punte di 3000 m/s; i materiali di copertura, indagati per spessori da 10 a 40 m mostrano, a parte l'areato, velocità variabili da 1000 a 1600 - 1800 m/s (Fig.6).

Fig. 6 – Quadro di sintesi delle Vs e Vp

UNITA' LITOSTRATIGRAFICA	INTERVALLO Vs (m/s)	INTERVALLO Vp (m/s)
DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI		
Depositi alluvionali recenti e terrazzati	180 - 640	400 - 2100
Sintema di Selci Lama	400 - 1100	700 - 2500
Subsintema di Nuvole	280	950
Subsintema di Anghiari	340	670
Subsintema di M.Rotondo	730 - 1000	2200 - 3000
Subsintema di Molin dell'Olio	450	1400
Sintema di Fighille	400 - 700	1500 - 3300
SUCCESSIONI TORBIDITICHE		
Marne, Arenarie, Calcareniti	800 - 1500	2000 - 3200
SUCCESSIONI CARBONATICHE		
Bisciaro	400 - 800	1500 - 2500
Marne a Fucoidi	1000 - 2000	1700 - 3100
Maiolica	1500	3100

3.5 Prove di laboratorio

Sui campioni indisturbati estratti nel corso dei sondaggi sono state eseguite numerose prove di laboratorio, distinguibili in due gruppi: a) prove di classificazione e per la misura delle proprietà di deformabilità e di resistenza; b) prove per la misura dei parametri dinamici.

Prove di classificazione e di misura delle proprietà di deformabilità e di resistenza

In generale i campioni esaminati ricadono in due categorie fondamentali di terreno: a prevalente componente sabbiosa o a prevalente componente limo-argillosa. I primi sono allo stato da poco a mediamente addensato; i secondi sono in genere mediamente plastici, allo stato semisolido e solido-plastico e poco deformabili, spesso sovraconsolidati nei primi 10m. Risulta inoltre un buon accordo tra i risultati ottenuti in laboratorio e quelli ottenuti con le prove penetrometriche (CPTE, SPT e DPSH).

3.6 Prove dinamiche

Su n. 5 campioni rappresentativi delle varie formazioni sono state eseguite prove dinamiche con l'apparecchio di colonna risonante, RC, e con l'apparecchio di taglio torsionale ciclico, TTC. La misura dei parametri dinamici e delle loro leggi di variazione al variare dei livelli deformativi è stata effettuata nelle condizioni di prova più idonee a simulare le condizioni in sito durante il terremoto di riferimento e, inoltre, sugli stessi campioni sono state eseguite anche altre prove geotecniche (di classificazione, edometriche, ecc.) per la determinazione delle proprietà (indice dei vuoti e_0, grado di sovraconsolidazione *OCR*, indice di plasticità I_p, ecc.) che maggiormente influenzano i parametri dinamici e le loro leggi di variazione con i livelli deformativi.

Correlazioni tra parametri statici e dinamici

Uno degli obiettivi dello studio condotto è stato quello di ricercare delle relazioni empiriche di validità regionale per la stima di *Vs* (o G_0) a partire da parametri legati alla profondità (quota o pressione di confinamento) o da parametri desunti da prove geotecniche di tipo convenzionale (prove SPT, CPT, ecc.).

La relazione tra V_s e la profondità è stata determinata interpolando i dati sperimentali con la relazione $V_S = az^b$, dove a e b sono i parametri numerici di correlazione.

Solo per i materiali di origine alluvionale recente la relazione $V_s \Rightarrow z$ è risultata significativa.

Il numero dei colpi corretto N_{30} della prova DPSH può differire notevolmente da N_{SPT}; tuttavia, ai fini della ricerca di una correlazione tra V_S e il numero dei colpi la prova DPSH offre un numero di punti considerevolmente più elevato rispetto alla prova standard. Ai fini pertanto della ricerca di una correlazione con V_s tali prove sono state utilizzate adottando un fattore di conversione tra N_{30} e N_{SPT} valido per il sito, e sono stati confrontati tutti i valori disponibili fino alla profondità di 12 m con i valori di V_s. A profondità maggiori, per la presenza di materiali grossolani, si hanno scostamenti tra le due misure più elevati.

Tra tutte le correlazioni studiate, la correlazione che presenta il coefficiente di correlazione R^2 più elevato (R^2 = 0.6367) è quella esponenziale e precisamente:

$$V_S = 112.32\, N_{SPT}^{\ 0.329}$$

Poiché le misure di N_{SPT} ricadono nelle alluvioni tale relazione è da ritenersi valida per tali materiali.

4. MOTO DI INPUT E MODELLAZIONE DEGLI EFFETTI DI SITO

Estratto da Stucchi M. e Zonno G. [22]

4.1 Moto di input

Questa parte del progetto ha definito il moto sismico di riferimento per le località oggetto di studio che servirà come input per le elaborazioni previste nella fase di modellazione.

A partire dalla valutazione del potenziale sismogenetico di interesse per l‘ area, il moto sismico di riferimento è stato calcolato in termini di :

- accelerazione spettrale, con un modelllo probabilistico
- accelerogrammi di riferimento

Secondo la zonazione sismogenetica corrente, compilata nel 1996, denominata di seguito ZS4, le località oggetto di questa indagine sono localizzate nella ZS 45, che ha avuto negli ultimi 1000 anni secondo il catalogo NT 4.1 [5], una magnitudo massima pari a 6.2, in occasione dei terremoti del 1352 e 1458 (tale valore è stato rideterminato rispettivamente in 6.0 e 5.8 dal catalogo CPTI – GdL CPTI, 1999).

L’ area in esame è esposta anche a terremoti provenienti dalle vicine ZS 40, 44, 46 e 47 (Fig.7).

Come è noto, la zonazione sismogenetica ZS4 è stata utilizzata in ambito GNDT assieme al catalogo NT4.1 e ad altre informazioni, per compilare le carte di pericolosità sismica del territorio nazionale [20].

Per questo studio è stata utilizzata la zonazione ZS4 limitatamente alle ZS 40, 44, 45, 46, 47.

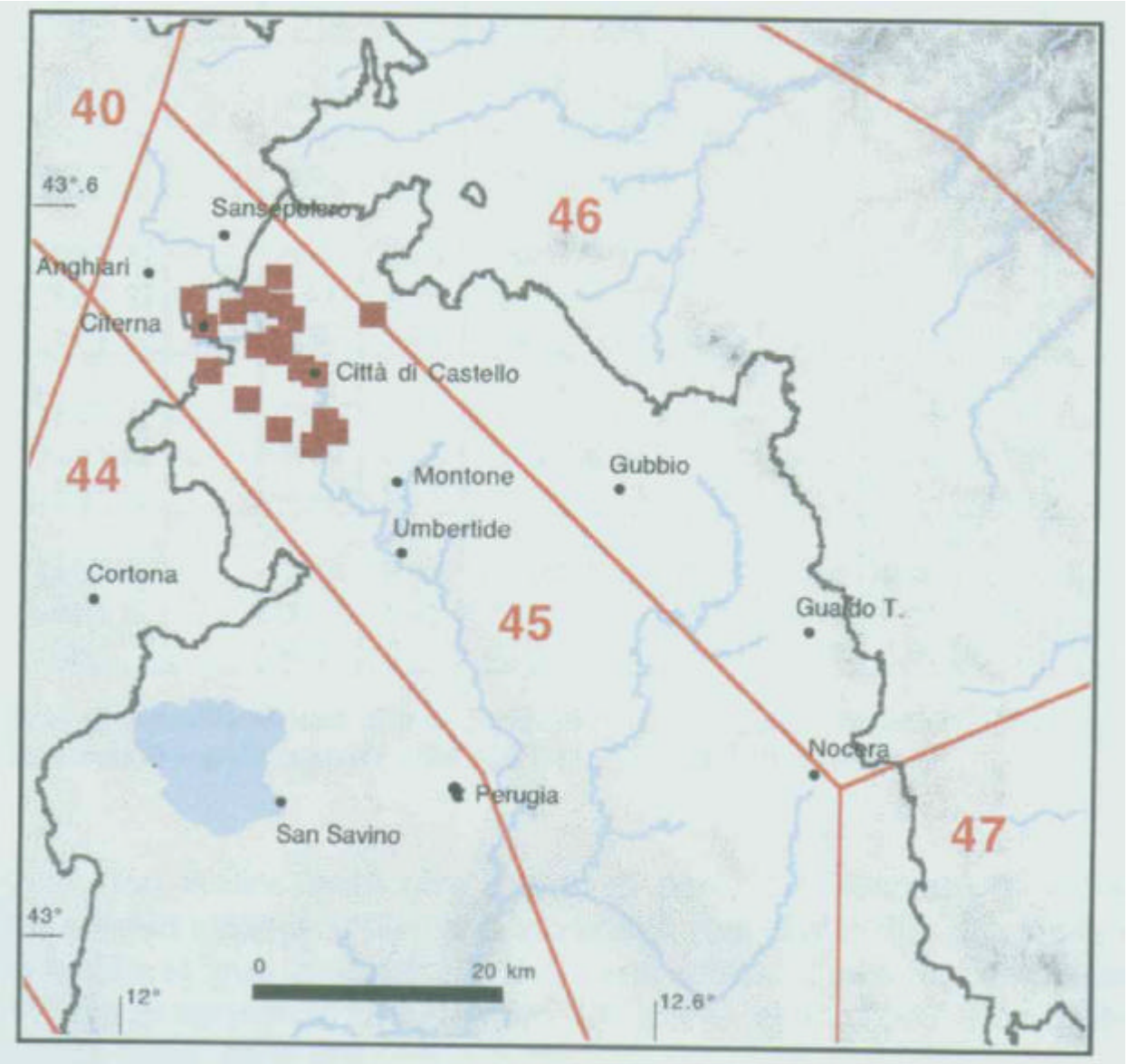


Fig. 7 – Ubicazione delle località nel contesto della zonazione ZS4.

La stima del moto sismico di riferimento, da utilizzare come input per la valutazione degli effetti di sito, è stata svolta sviluppando i seguenti punti:

- Valutazione della pericolosità in termini di ordinate spettrali di spettro di risposta con smorzamento critico 5 %. Sono state utilizzate le leggi di attenuazione già disponibili in letteratura considerando le registrazioni accelerometriche dei terremoti del catalogo ENEL – SSN disponibili per l' area;
- Determinazione di accelerogrammi di riferimento secondo procedure già sperimentate per altre indagini di microzonazione.

La valutazione probabilistica del moto sismico di riferimento è basata sull'approccio probabilistico classico di Cornell utilizzando il codice di calcolo SEISRISK III.

I dati di input che necessita il programma SEISRISK III sono :

- Modello delle zone sorgenti
- Tassi di sismicità per ogni zona sorgente
- Leggi di attenuazione

Per tutte le 20 località dell'Alta Val Tiberina (Fig. 8 e 9), si sono valutati i valori di PGA (accelerazione di picco) e gli spettri di risposta PSA (pseudoaccelerazione al 5% dello smorzamento critico) corrispondenti al 90% di probabilità di non eccedenza in 50 anni, considerando cioè un periodo di ritorno di 475 anni, valore convenzionale adottato anche nell' Eurocodice 8.

I metodi e i lavori utilizzati per la stima di PGA e PSA sono riportati nell'elaborato originale [22].

LOCALITA'	SIGLA	PGA (475 anni P.R.)
Città di Castello	**CAS**	**0.201**
Celalba	**CEB**	**0.193**
Celle	**CEL**	**0.200**
Cerbara	**CER**	**0.198**
Citerna	**CIT**	**0.197**
Fighille	**FIG**	**0.195**
Fraccano	**FRA**	**0.180**
Gioiello	**GIO**	**0.197**
Lerchi	**LER**	**0.200**
Lippiano	**LIP**	**0.192**
Monte S. Maria Tiberina	**TIB**	**0.196**
Nuvole	**NUV**	**0.201**
Piosina	**PIO**	**0.200**
Pistrino	**PIS**	**0.199**
Ponte d' Avorio (PA)	**SPA**	**0.202**
S. Giustino	**GIU**	**0.198**
San Secondo (SS)	**SSS**	**0.200**
Santa Lucia (SL)	**SSL**	**0.202**
Selci – Lama	**SLA**	**0.198**

Figura 8 – Elenco delle località analizzate in questo studio per il progetto Alta Val Tiberina. Per ogni sito sono riportati i valori di PGA.

Nella figura 9 sono rappresentati insieme tutti gli spettri di accelerazione calcolati per Città di Castello e le restanti 19 località dell'Alta Val Tiberina.

Per ogni sito è stato individuato l'accelerogramma simulato. L'accelerogramma di riferimento è stato calcolato con il codice di calcolo SIMQKE1 [11].

A partire dagli spettri ottenuti con l'analisi probabilistica (Fig. 9) sono stati generati accelerogrammi sintetici (Fig. 10) e i relativi spettri in accelerazione (Fig. 11).

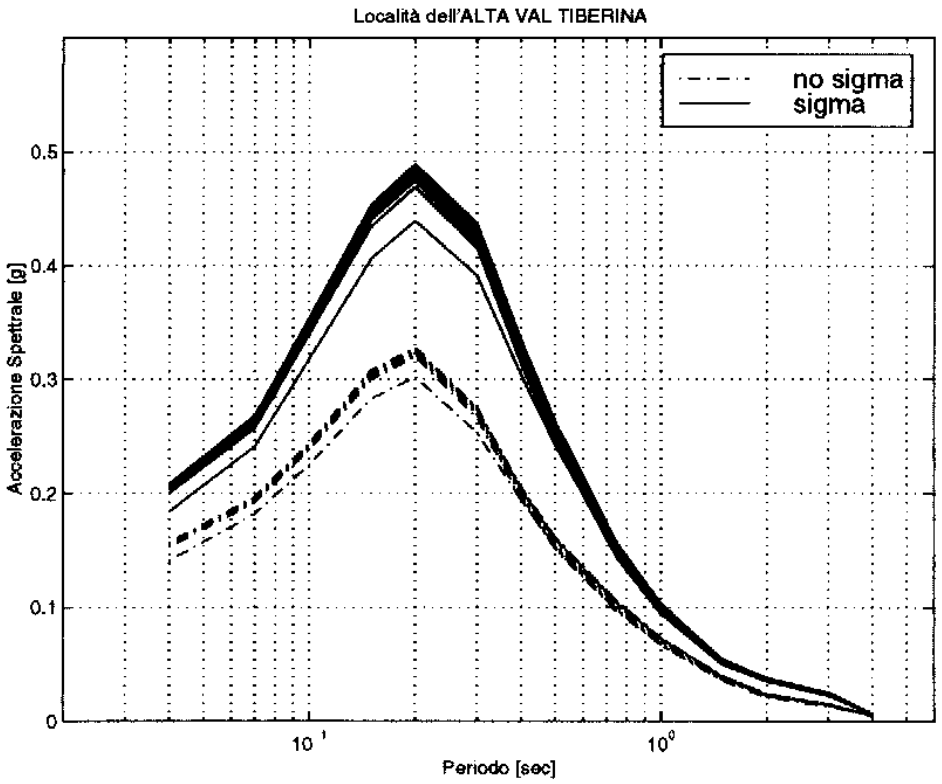
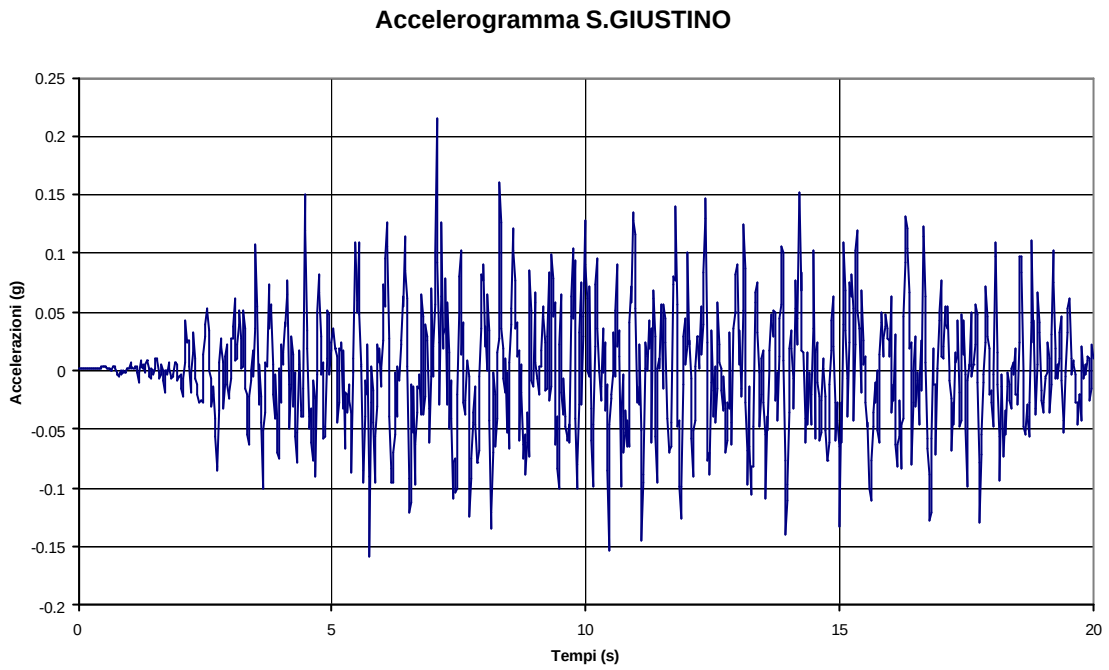


Fig. 9 – Nella figura sono rappresentati insieme tutti gli spettri di accelerazione per Città di Castello e per le 19 località dell ' Alta Val Tiberina .

Fig. 10 – Esempio di accelerogramma utilizzato per il sito di S. Giustino



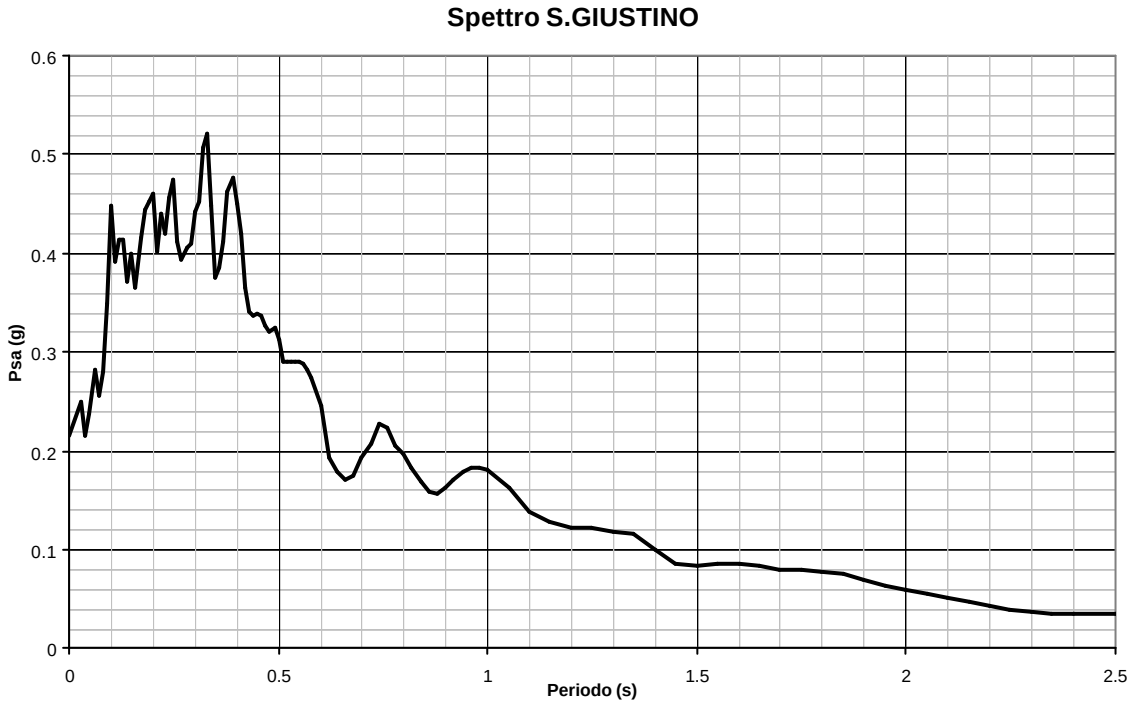


Fig. 11 – Esempio di spettro utilizzato per il sito di S. Giustino

4.2 Modellazioni

Estratto da Pergalani F. e Compagnoni M. [16]

La modellazione della risposta sismica locale è stata effettuata utilizzando codici di calcolo mono e bidimensionali in relazione alla complessità geologica del sito in esame.
L' applicazione dei codici suddetti ha permesso di ottenere l'amplificazione del moto sismico di input per ogni situazione investigata.
Per la modellazione sono stati utilizzati per ogni litotipo i valori della velocità delle onde S (Vs) della velocità delle onde P (Vp), del modulo di taglio iniziale (G_0), del coefficiente di smorzamento interno (D), del coefficiente di Poisson (ν) nonché le curve di decadimento del modulo di taglio (G/Go) e di smorzamento interno in funzione della deformazione tangenziale.
I risultati delle analisi sono riassunti in una serie di spettri elastici in pseudoaccelerazione calcolati in diversi punti (nodi) delle sezioni (Figg. 12 e 13).
Per ogni spettro elastico è stata calcolata l'intensità spettrale (SI) nell'intervallo 0.1-0.5 s, assunto come rappresentativo del periodo proprio delle tipologie di edifici presenti nell'area, e nell' intervallo 0.1-2.5 s come definito da Housner (1952).
L'intensità spettrale è stata calcolata sugli spettri in pseudovelocità (PSV) al 5% dello smorzamento critico ξ:

$$SI(PSV) = \int_{0.1}^{0.5} PSV(T,x)\,dT$$

Sono stati quindi calcolati i rapporti tra l'intensità spettrale calcolata nei vari nodi di ciascuna sezione o colonna stratigrafica e l' intensità spettrale degli spettri di input.
Questo rapporto (Fa) definisce il fattore di amplificazione legato agli effetti di sito.

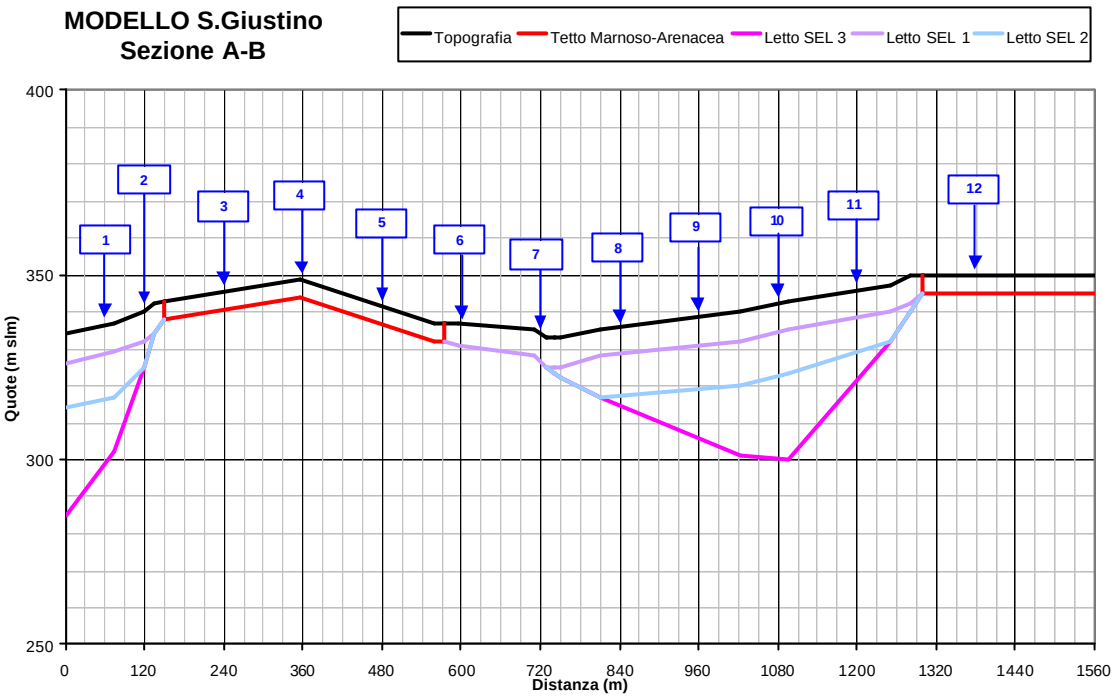
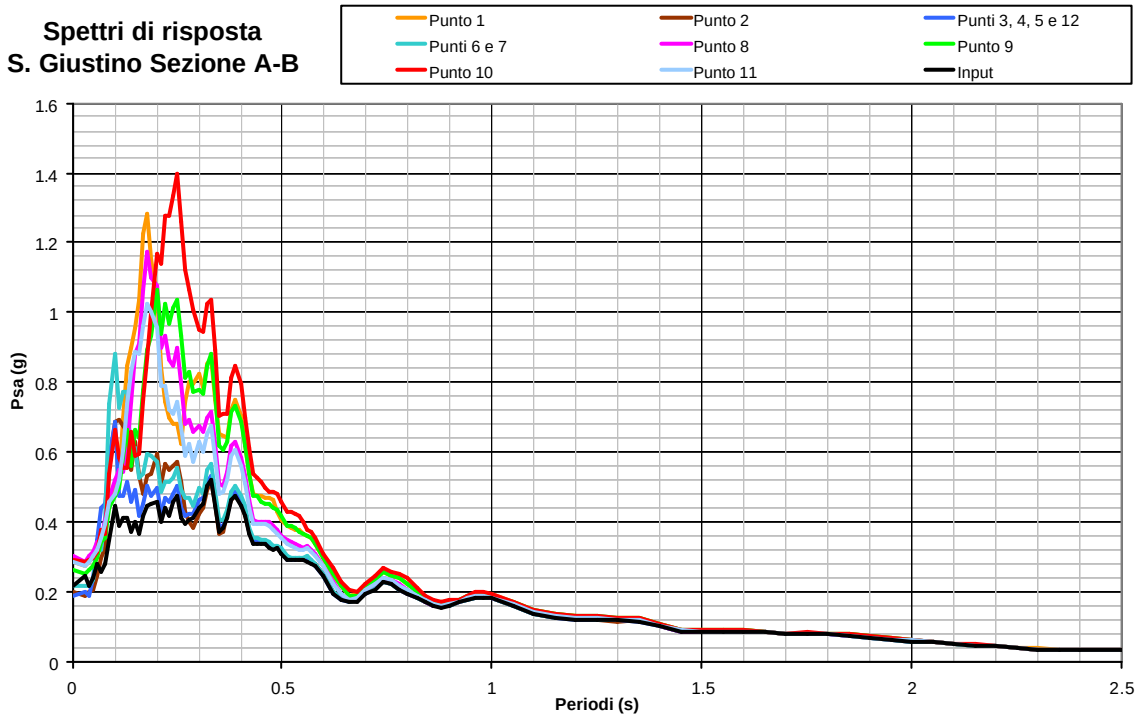


Fig. 12 – Esempio di rappresentazione schematica di una sezione

Fig. 13 – Esempio di spettri di risposta in pseudoaccelerazioni ottenuti effettuando l'analisi



Nella Fig. 14 è rappresentato un esempio dei risultati ottenuti per l'area di S.Giustino, in termini di valori dei rapporti di intensità spettrale Fa.

Punto	*Input 0.1-2.5*	*Input 0.1-0.5*	*Output 0.1-2.5*	*Output 0.1-0.5*	*Fa 0.1-2.5*	*Fa 0.1-0.5*
1	0.48872	0.07518	0.57426	0.12765	**1.18**	**1.70**
2	0.48872	0.07518	0.49780	0.08198	**1.02**	**1.09**
3	0.48872	0.07518	0.49431	0.07914	**1.01**	**1.05**
4	0.48872	0.07518	0.49418	0.07911	**1.01**	**1.05**
5	0.48872	0.07518	0.49401	0.07899	**1.01**	**1.05**
6	0.48872	0.07518	0.49742	0.08158	**1.02**	**1.09**
7	0.48872	0.07518	0.50179	0.08595	**1.03**	**1.14**
8	0.48872	0.07518	0.54386	0.11537	**1.11**	**1.53**
9	0.48872	0.07518	0.57186	0.12701	**1.17**	**1.69**
10	0.48872	0.07518	0.60533	0.14870	**1.24**	**1.98**
11	0.48872	0.07518	0.53581	0.10757	**1.10**	**1.43**
12	0.48872	0.07518	0.49411	0.07902	**1.01**	**1.05**

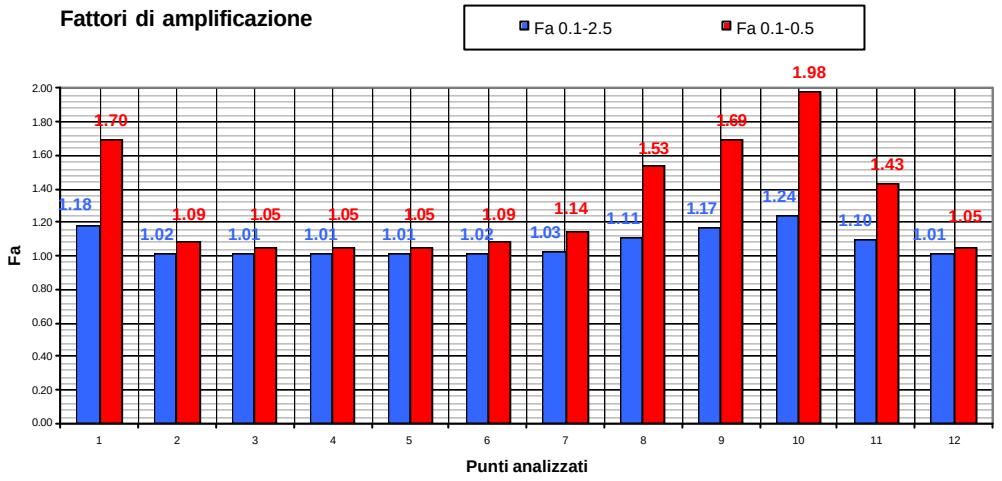


Fig. 14 – Valori del coefficiente di amplificazione (Fa) calcolato per l'intervallo 1-2.5 e l'intervallo 0.1-0.5

4.3 Esempio di valutazione degli effetti locali: area Città di Castello

Geologia

Al fine di effettuare la modellazione per la valutazione degli effetti locali sono state reperite le informazioni utili e necessarie:

- dai rilievi geologici di superficie e dai sondaggi geognostici, finalizzati alla stesura della carta geologica e delle sezioni geologiche;
- dalle prove di sismica in foro (down hole e cross-hole) e dalle prove di laboratorio per la definizione dei parametri geotecnici e la stesura delle sezioni geofisiche, riguardanti il sito di Città di Castello.

Parametri geotecnici

I valori dei parametri geotecnici reperiti ed utilizzati nell'analisi sono riportati in Tabella 2, dove per ogni litotipo sono forniti i valori del peso di volume (γ), della velocità delle onde S (Vs), della velocità delle onde P (Vp), del modulo di taglio (G), del coefficiente di smorzamento interno (ξ?) e del coefficiente di Poisson (ν).

	Parametri					
Litotipo	g **(kN/m^3)**	**Vp (m/s)**	**Vs (m/s)**	**G (MPa)**	x **(%)**	n
Depositi alluvionali recenti olocenici	19.0	550	220	94	0.01	0.40
Depositi alluvionali terrazzati Pleistocenici	19.0	730	270	141	0.01	0.42
Argille limose con clasti (Subsintema di Nuvole)	20.5	940	280	164	0.01	0.45
Depositi clastici Pleistocenici (Sintema di Selci-Lama)	19.5	1550	370	272	0.01	0.47
Argille limose con sabbie (Sintema di Fighille) (da 0 a 20 m)	20.0	1600	440	395	0.01	0.46
Argille limose con sabbie (Sintema di Fighille) (da 20 a 50 m)	20.5	1800	540	609	0.01	0.45
Argille limose con sabbie (Sintema di Fighille) (oltre i 50 m)	20.5	2300	700	1024	0.01	0.45

Tabella 2 – Tabella dei parametri geotecnica

Modelli utilizzati

Il sito in esame si colloca nel mezzo dell'Alta Valle Tiberina, di cui è capoluogo; il centro abitato è molto esteso e si sviluppa interamente in corrispondenza dei depositi alluvionali recenti e terrazzati del Fiume Tevere, quasi completamente in sinistra orografica.

La situazione apparentemente è piano-parallela, ma la reale geometria del sottosuolo è resa più complessa dalla presenza di una faglia distensiva profonda interessante il substrato roccioso ed antecedente alla deposizione delle argille sabbiose del Sintema di Fighille; inoltre, in corrispondenza della copertura pleistocenica, esistono delle piccole chiusure laterali tra le diverse litologie.

Tutte le formazioni pleistoceniche si chiudono ad on-lap sul substrato roccioso sottostante, delineando la caratteristica forma di una valle della larghezza di 3200 m.

Per la particolare situazione geologica dell'area si è preferito effettuare le analisi numeriche bidimensionali utilizzando modelli ad elementi finiti (QUAD4M, Hudson et al., 1993), in modo da poter considerare l'effetto della geometria del modello. Questo programma permette di modellare qualsiasi sezione caratterizzata da diversi materiali ed ha la capacità di analizzare la risposta non lineare dei depositi; per questo motivo è utilizzato quando si ha la presenza di depositi con caratteristiche fisico-meccaniche scadenti.

Si è perciò costruito un modello geofisico analizzando la risposta sismica locale lungo 2 sezioni diversamente orientate ed attraversanti l'abitato:

- la sezione A-B, trasversale alla valle del Fiume Tevere, è orientata WSW-ENE ed è lunga 5600 m;
- la sezione C-D, longitudinale alla valle, è orientata NW-SE ed ha uno sviluppo di circa 3000 m.

Data l'eccessiva estensione della sezione A-B si è preferito suddividerla in due sezioni distinte, tralasciando dall'analisi quei tratti in cui il substrato roccioso è affiorante e dove, ovviamente, l'amplificazione è nulla.

Si è analizzato, perciò:

- il settore WSW della sezione A-B per un tratto di circa 400 m, dove affiorano le argille limose con clasti del Subsintema di Nuvole per uno spessore massimo di 10-12 m, poggianti direttamente sul substrato roccioso;

- il settore centrale della sezione A-B per un tratto di 3200 m coincidente con la valle del Fiume Tevere;
- l'intera sezione C-D rappresentata da una geometria piano-parallela e in cui la profondità del substrato roccioso è stata ipotizzata sulla base delle conoscenze geologiche della zona.

Per ogni modello geofisico cosi costruito si sono scelti dei punti di analisi rappresentativi e per questi è stata calcolata la risposta sismica locale.

Il substrato roccioso è costituito dalla successione torbiditica pelitico-arenacea silicoclastica della Formazione della Marnoso-Arenacea e dalle calciruditi, calcareniti ed areniti ibride della Formazione di M. S. M. Tiberina; insieme rappresentano il bedrock con densità di 22.0 kN/m^3 e velocità V_p= 2100-3100 m/s e V_s=1100 m/s.

Risultati

I risultati delle analisi sono riassunti in una serie di spettri elastici in pseudoaccelerazione calcolati per ciascun punto di analisi. Per ogni spettro elastico è stata calcolata l'intensità spettrale (SI) nell'intervallo 0.1-0.5 s, assunto come rappresentativo del periodo proprio delle tipologie di edifici presenti nell'area e nell'intervallo 0.1-2.5 s come definito da Housner (1952).

L'intensità spettrale è stata calcolata sugli spettri in pseudovelocità (PSV) al 5% dello smorzamento critico ξ:

$$SI\ (PSV) = \int_{0.1}^{0.5} PSV(T,x)dT$$

Sono stati quindi calcolati i rapporti tra l'intensità spettrale calcolata per ogni punto e l'intensità spettrale degli spettri di input. Questo rapporto (Fa) definisce il fattore di amplificazione legato agli effetti di sito.

In Figura 15 è rappresentato il settore centrale della sezione A-B schematica analizzata, dove sono riportati i punti per i quali è stata calcolata la risposta sismica.

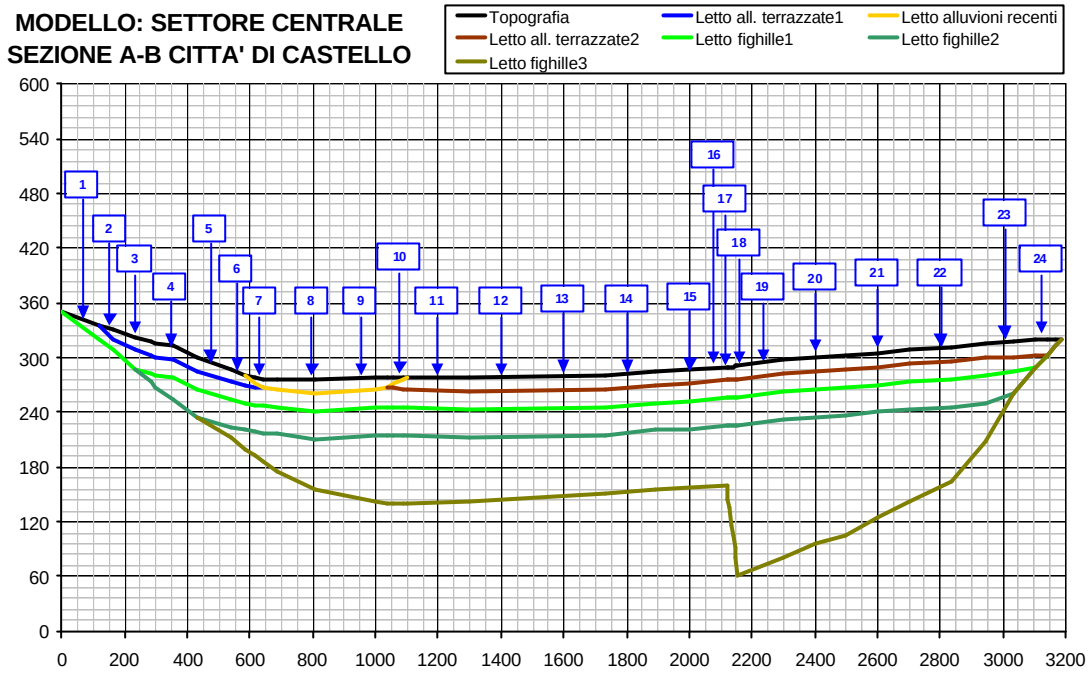


Figura 15 – Rappresentazione schematica del settore centrale della sezione A-B analizzata.

Nella Figura 16, e nella Figura 17 sono rappresentati i risultati, in termini rispettivamente di spettri elastici in pseudoaccelerazione e valori dei rapporti di intensità spettrale, ottenuti effettuando le analisi descritte precedentemente per il settore centrale della sezione A-B.

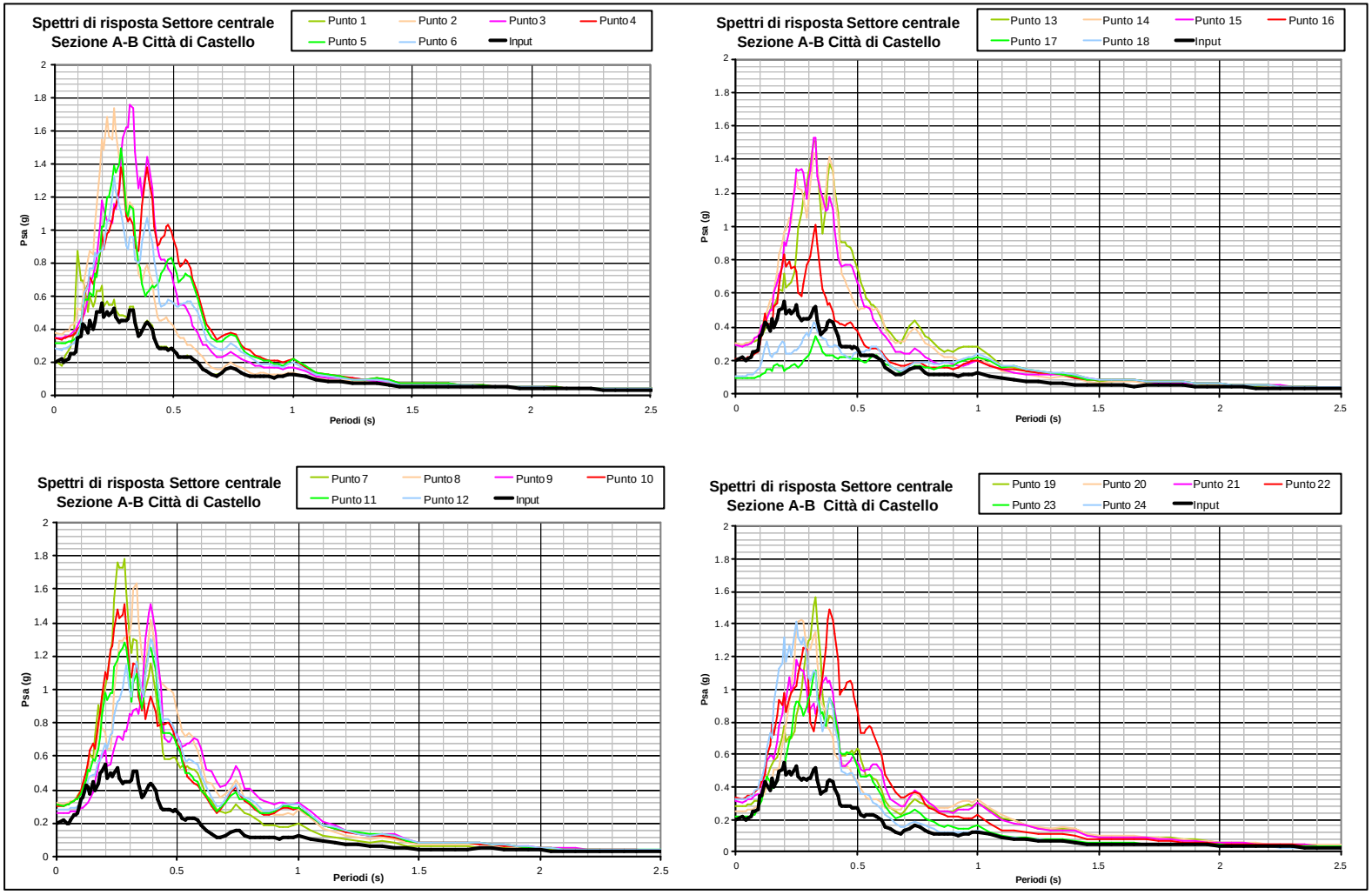
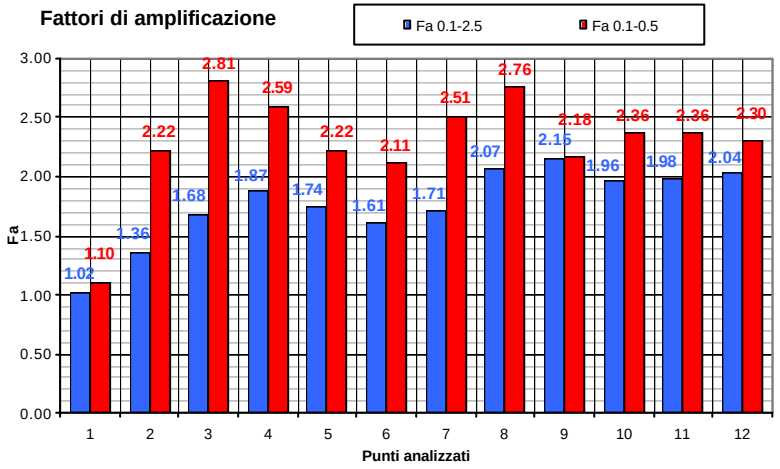


Figura 16: Spettri di risposta in pseudoaccelerazione ottenuti effettuando l'analisi

Punto	Input 0.1-2.5	Input 0.1-0.5	Output 0.1-2.5	Output 0.1-0.5	Fa 0.1-2.5	Fa 0.1-0.5
1	0.35146	0.07388	0.35898	0.08118	**1.02**	**1.10**
2	0.35146	0.07388	0.47738	0.16423	**1.36**	**2.22**
3	0.35146	0.07388	0.59043	0.20724	**1.68**	**2.81**
4	0.35146	0.07388	0.65853	0.19137	**1.87**	**2.59**
5	0.35146	0.07388	0.61307	0.16414	**1.74**	**2.22**
6	0.35146	0.07388	0.56686	0.15586	**1.61**	**2.11**
7	0.35146	0.07388	0.60170	0.18550	**1.71**	**2.51**
8	0.35146	0.07388	0.72632	0.20374	**2.07**	**2.76**
9	0.35146	0.07388	0.75644	0.16069	**2.15**	**2.18**
10	0.35146	0.07388	0.68924	0.17452	**1.96**	**2.36**
11	0.35146	0.07388	0.69538	0.17452	**1.98**	**2.36**
12	0.35146	0.07388	0.71610	0.16996	**2.04**	**2.30**



Punto	Input 0.1-2.5	Input 0.1-0.5	Output 0.1-2.5	Output 0.1-0.5	Fa 0.1-2.5	Fa 0.1-0.5
13	0.35146	0.07388	0.69849	0.18492	**1.99**	**2.50**
14	0.35146	0.07388	0.63742	0.18444	**1.81**	**2.50**
15	0.35146	0.07388	0.63237	0.18464	**1.80**	**2.50**
16	0.35146	0.07388	0.52172	0.10893	**1.48**	**1.47**
17	0.35146	0.07388	0.45535	0.04007	**1.30**	**0.54**
18	0.35146	0.07388	0.48754	0.05316	**1.39**	**0.72**
19	0.35146	0.07388	0.69648	0.15553	**1.98**	**2.11**
20	0.35146	0.07388	0.69963	0.15081	**1.99**	**2.04**
21	0.35146	0.07388	0.68963	0.15320	**1.96**	**2.07**
22	0.35146	0.07388	0.68738	0.19325	**1.96**	**2.62**
23	0.35146	0.07388	0.48904	0.13874	**1.39**	**1.88**
24	0.35146	0.07388	0.45961	0.15962	**1.31**	**2.16**

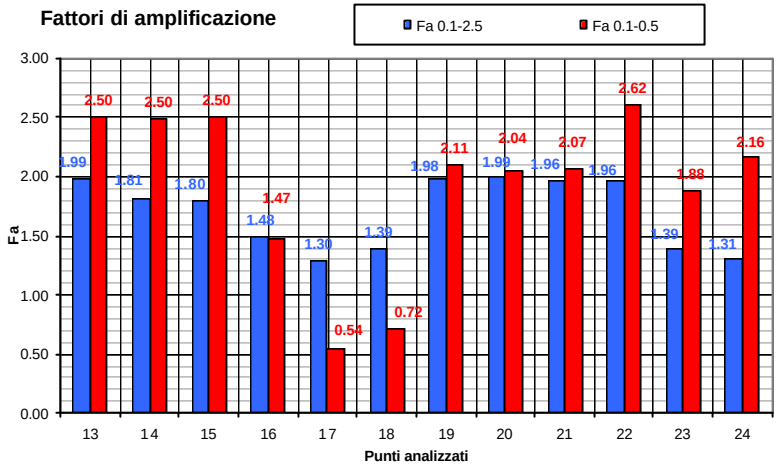


Figura 17 – Valori del coefficiente di amplificazione (Fa) calcolato considerando l'intervallo 0.1-2.5 e l'intervallo .1-.5

In Figura 18 è rappresentata la sezione C-D schematica analizzata, dove sono riportati i punti per i quali è stata calcolata la risposta sismica.

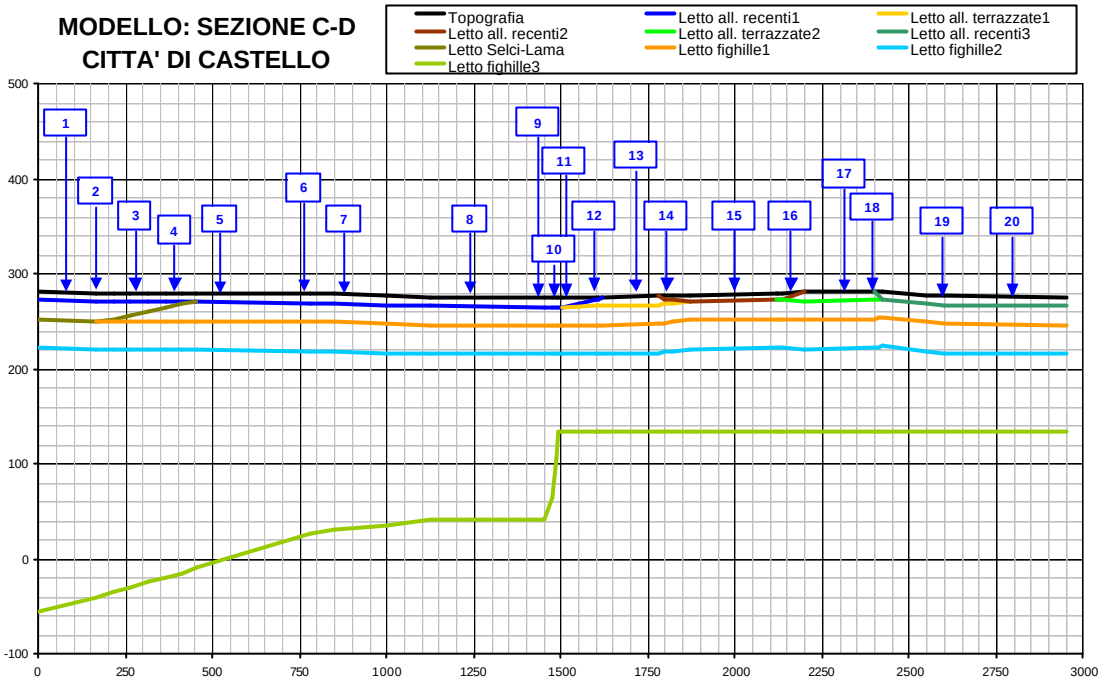


Figura 18 – Rappresentazione schematica della sezione C-D analizzata.

Nella Figura 19 e nella Figura 20 sono rappresentati i risultati, in termini rispettivamente di spettri elastici in pseudoaccelerazione e valori dei rapporti di intensità spettrale, ottenuti effettuando le analisi descritte precedentemente per il settore centrale della sezione C-D.

Figura 19 - Spettri di risposta in pseudoaccelerazione ottenuti effettuando l'analisi

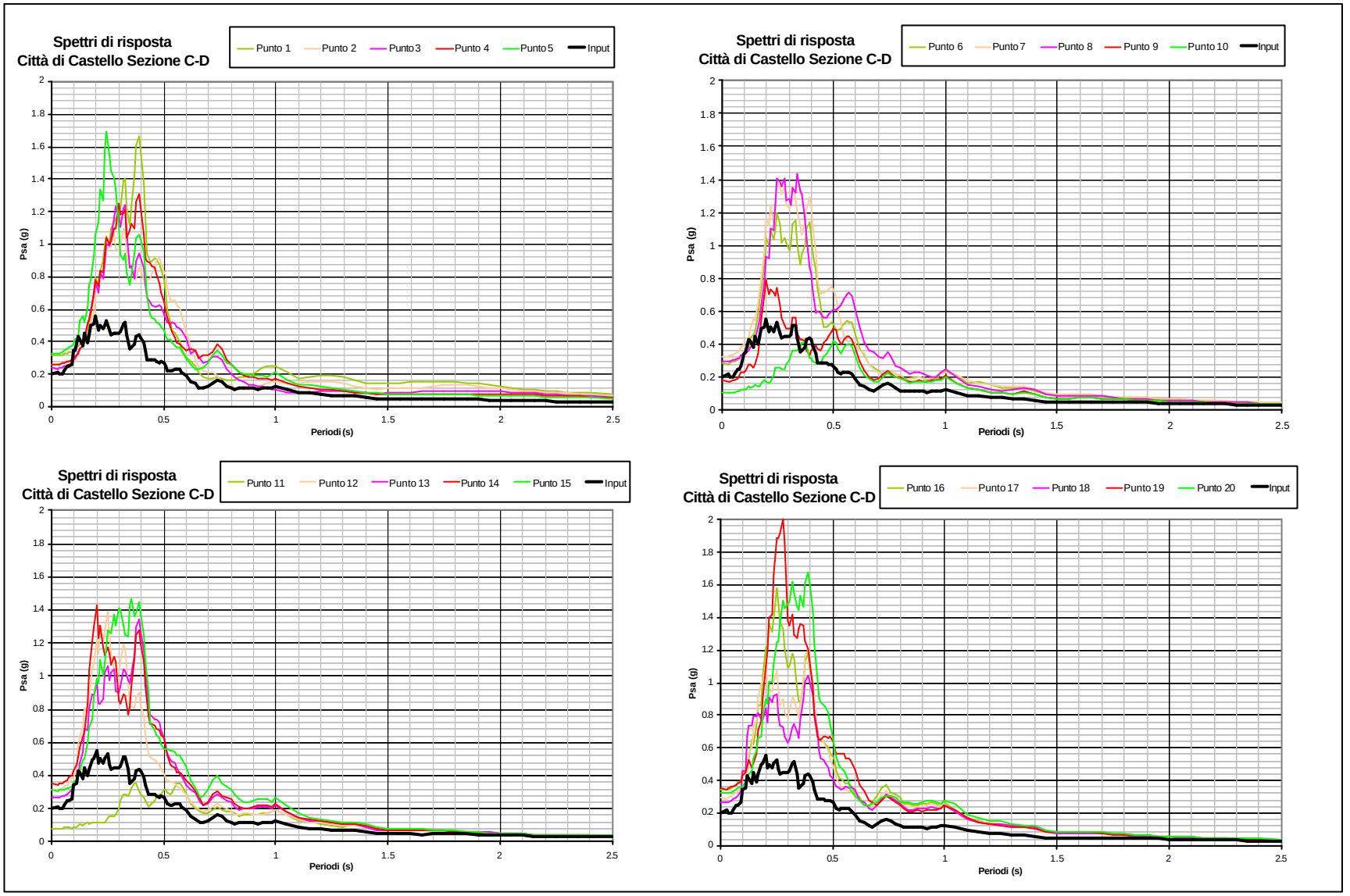
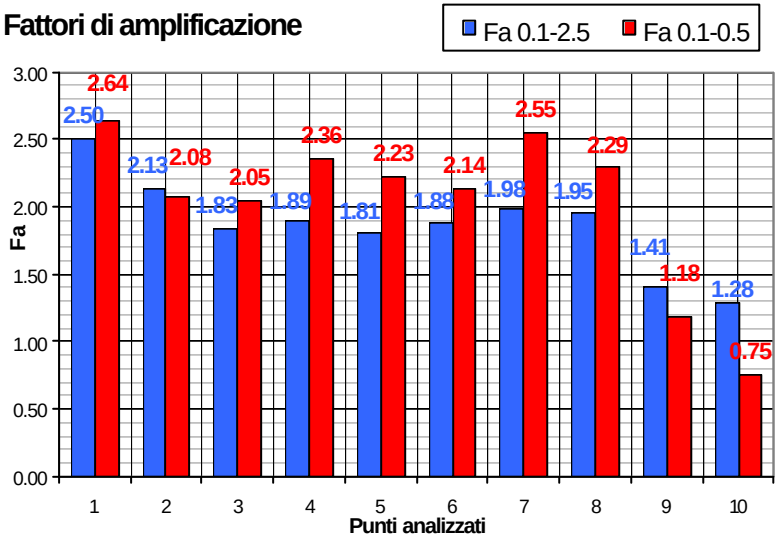
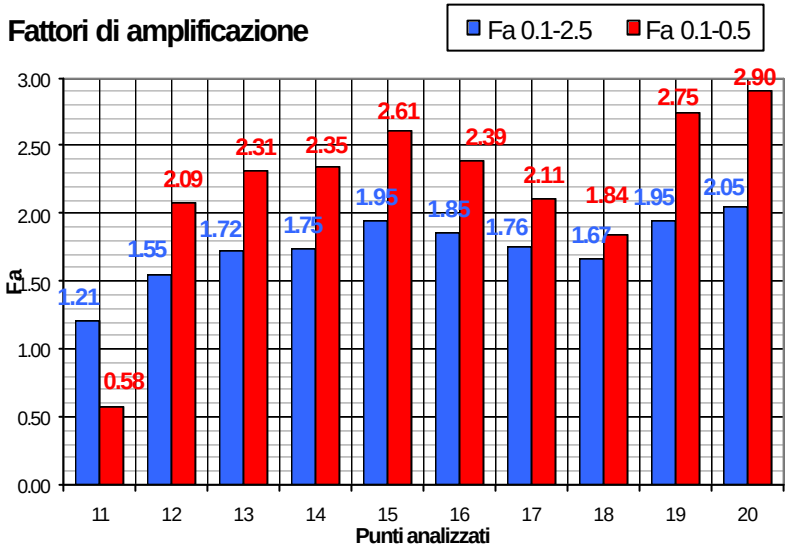


Figura 20 – Valori del coefficiente di amplificazione (Fa) calcolato considerando l'intervallo 0.1-2.5 e l'intervallo .1-.5

Punto	*Input 0.1-2.5*	*Input 0.1-0.5*	*Output 0.1-2.5*	*Output 0.1-0.5*	*Fa 0.1-2.5*	*Fa 0.1-0.5*
1	0.35146	0.07388	0.87954	0.19539	**2.50**	**2.64**
2	0.35146	0.07388	0.74883	0.15363	**2.13**	**2.08**
3	0.35146	0.07388	0.64460	0.15127	**1.83**	**2.05**
4	0.35146	0.07388	0.66587	0.17435	**1.89**	**2.36**
5	0.35146	0.07388	0.63628	0.16468	**1.81**	**2.23**
6	0.35146	0.07388	0.66023	0.15779	**1.88**	**2.14**
7	0.35146	0.07388	0.69468	0.18849	**1.98**	**2.55**
8	0.35146	0.07388	0.68569	0.16920	**1.95**	**2.29**
9	0.35146	0.07388	0.49509	0.08727	**1.41**	**1.18**
10	0.35146	0.07388	0.45136	0.05564	**1.28**	**0.75**

Punto	*Input 0.1-2.5*	*Input 0.1-0.5*	*Output 0.1-2.5*	*Output 0.1-0.5*	*Fa 0.1-2.5*	*Fa 0.1-0.5*
11	0.35146	0.07388	0.42594	0.04266	**1.21**	**0.58**
12	0.35146	0.07388	0.54446	0.15414	**1.55**	**2.09**
13	0.35146	0.07388	0.60388	0.17078	**1.72**	**2.31**
14	0.35146	0.07388	0.61370	0.17364	**1.75**	**2.35**
15	0.35146	0.07388	0.68524	0.19251	**1.95**	**2.61**
16	0.35146	0.07388	0.65086	0.17682	**1.85**	**2.39**
17	0.35146	0.07388	0.61705	0.15566	**1.76**	**2.11**
18	0.35146	0.07388	0.58759	0.13586	**1.67**	**1.84**
19	0.35146	0.07388	0.68448	0.20283	**1.95**	**2.75**
20	0.35146	0.07388	0.72046	0.21450	**2.05**	**2.90**





5. MICROZONAZIONI SISMICHE STRUMENTALI

5.1 Centri urbani indagati

Nell'ambito del progetto, è stata eseguito un programma di valutazione strumentale di dettaglio degli effetti di amplificazione locale per la microzonazione sismica di tre centri urbani: Città di Castello, Pietralunga e Montone, tramite acquisizione ed elaborazione di dati sismometrici. La realizzazione di questa parte di progetto ha visto quindi una campagna di acquisizione dati con reti sismometriche dell'I.D.P.A.-C.N.R. (Istituto per la dinamica dei Processi Ambientali, ex Istituto per la Ricerca sul Rischio Sismico) e del Servizio Sismico Nazionale, coadiuvate da strumentazione propria del Servizio Geologico della Regione Umbria. I dati acquisiti hanno portato alla determinazione degli spettri di risposta elastici nei punti monitorati, la definizione dei Fattori di Amplificazione e la trasformazione dei risultati in suggerimenti applicativi a livello urbanistico.

5.2 La metodologia di valutazione degli effetti di sito da dati sismometrici

L'obbiettivo delle campagne di acquisizione dati sismometrici è quello di giungere alla valutazione degli effetti di amplificazione sismica locale misurando direttamente "in situ" gli effetti prodotti dai terremoti tramite strumentazione sismologica. I vantaggi di questa metodologia sono costituiti sostanzialmente dal fatto che lo spettro di risposta determinato al sito di misura non è funzione del grado di conoscenza delle caratteristiche geolitologiche e geomorfologiche dell'area in esame, ma fornisce direttamente un risultato che è comprensivo dei fattori e condizioni locali presenti, che possono in taluni casi non essere adeguatamente conosciuti o modellizzabili con tecniche di analisi numerica. D'altra parte, la qualità della soluzione offerta da queste tecniche è funzione della completezza del database sismologico registrato, nel senso delle magnitudo massime registrate e della copertura azimutale. Bisogna infatti tenere conto che generalmente durante le campagne di acquisizione vengono registrati "moti deboli", cioè terremoti con magnitudo inferiori a quella del terremoto di progetto, in cui il comportamento dei suoli non comprende ad esempio eventuali effetti dovuti alla non linearità.

Per l'elaborazione e l'interpretazione dati sono state usate metodologie di rapporti spettrali, sia tra componenti verticali e orizzontali dello stesso sito (Funzione Ricevitore), sia utilizzando siti di riferimento opportunamente posizionati, cioè in pratica confrontando le risposte ai siti di interesse con quelle di siti in cui effetti di amplificazione vengono considerati non presenti. Sono state anche eseguite campagne di misura di microtremori. Date le caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata ed in base agli interessi ingegneristici, per le indagini a Città di Castello e Montone i risultati possono considerarsi validi in un intervallo di frequenze compreso tra 0.5 e 10 Hz (ed intervalli di circa 0.5Hz), mentre per Pietralunga possono considerarsi validi valori a partire da 0.2 Hz.

5.3 Valutazione degli effetti di sito: Città di Castello

L'area di Città di Castello, costituendo per dimensioni il più importante centro urbano dell'area indagata nell'ambito del progetto, è stata oggetto di una campagna di acquisizione dati che in due fasi successive ha portato al monitoraggio di 20 siti, organizzati principalmente secondo due direttrici orientate E-O e N-S, con l'obiettivo di campionare gli effetti di sito secondo una direzione perpendicolare alle principali strutture tettoniche e parallelamente ad esse. Alcuni siti sono stati comunque strumentati con l'obiettivo di aumentare le indagini nell'area del centro storico e per estendere le informazioni lateralmente rispetto alle due direttrici principali. Sono stati utilizzati due siti di riferimento, agli estremi della sezione E-O, posizionati su affioramenti del basamento locale costituito dalla Formazione della Marnoso-Arenacea.

L'area, dal punto di vista geologico (Fig.4), si sviluppa su sedimenti alluvionali recenti (Olocene) di tipo fluviale e alluvioni terrazzate Pleistoceniche sulle quali è edificato il centro storico; è limitato ad Est ed Ovest da depositi continentali Pleistocenici (argille limose, conglomerati e limi sabbiosi) e dai depositi miocenici della formazione Marnoso-Arenacea.

La campagna di acquisizione dati è durata complessivamente circa 7 mesi producendo un database che ha portato all'utilizzo di 111 eventi selezionati, al cui interno sono presenti eventi di magnitudo fino a 4.3 R.

In Fig. 21 è riportata la mappa dell'area con l'ubicazione dei siti monitorati.

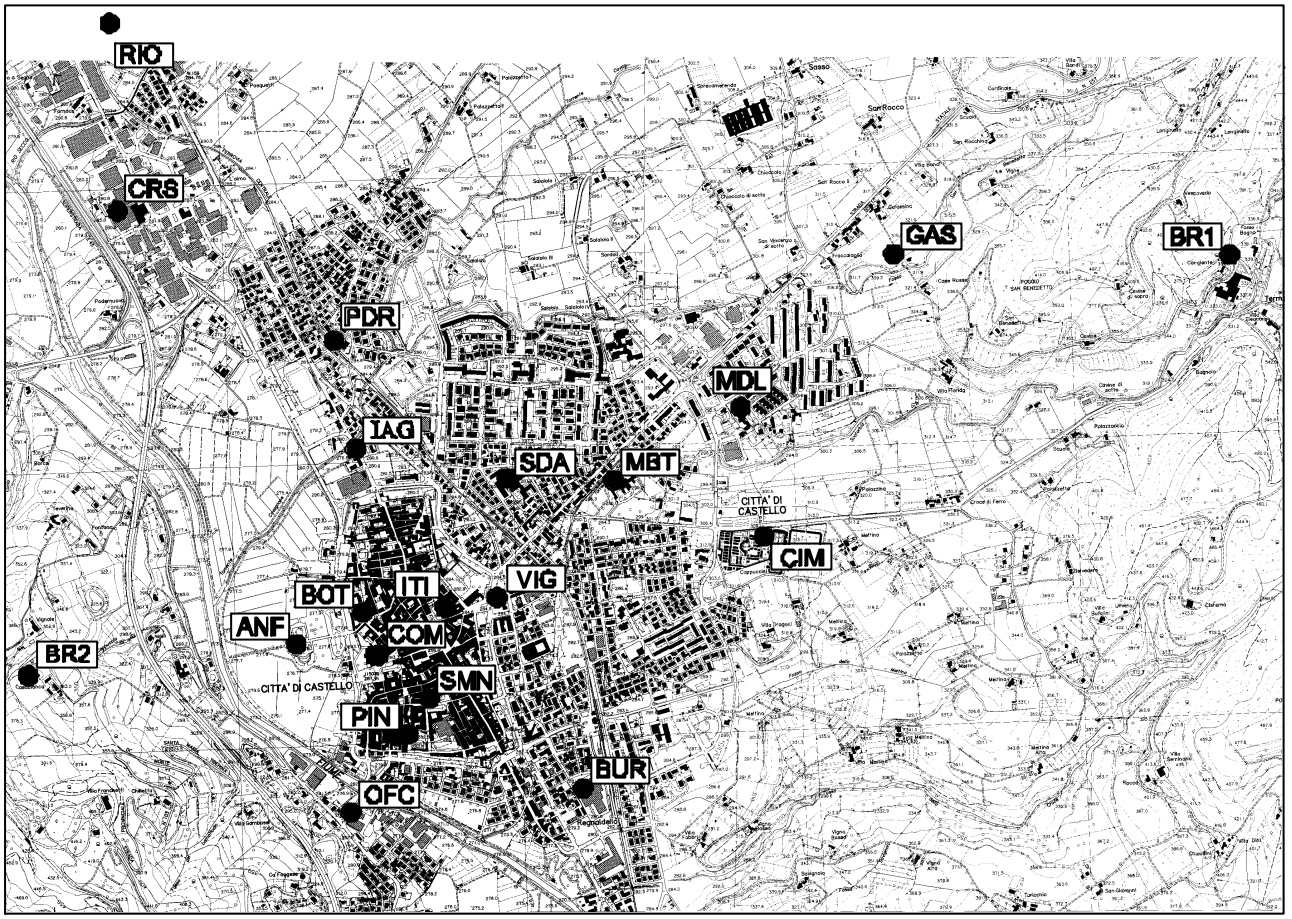


Fig. 21 - ubicazione dei siti di registrazione della campagna di microzonazione strumentale di Città di Castello.

In Fig. 22 è riportato un esempio della registrazione di un'evento (Ml 4.3R) su alcune stazioni (componente EO), in cui è ben visibile l'aumento di ampiezza del moto del suolo e della durata di scuotimento, rispetto alle stazioni di riferimento BR1 e BR2.

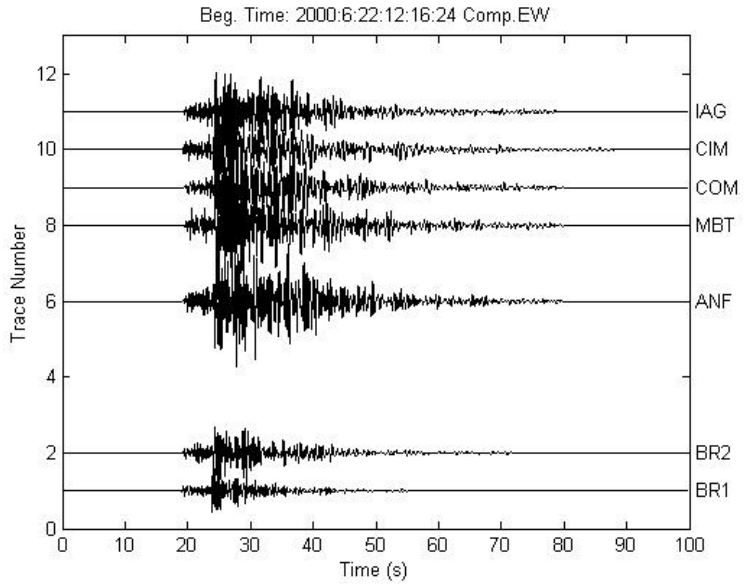


Fig. 22 - registrazione dell'evento di Magnitudo 4.3R (BR1, BR2, siti di riferimento) su 7 stazioni della rete.

I rapporti spettrali calcolati mostrano che in generale i siti monitorati sono caratterizzati da livelli medio-alti di amplificazione sismica nell'intero intervallo di frequenza considerato. In Fig. 23 sono riportati i valori dei rapporti spettrali misurati nei vari siti rispetto al sito di riferimento BR1.

Si può inoltre osservare come i siti presentino andamenti tra loro simili fatta eccezione del sito GAS il quale presenta valori di amplificazione medio-alta nella banda di frequenza 3-5 Hz, del sito di RIO il quale presenta valori di amplificazione medio-bassi e del sito di SMN che presenta valori alti nell'intervallo di frequenza 1-4 Hz. Per il sito BR2 considerato come secondo sito di riferimento si osservano valori bassi per tutto l'intervallo di frequenza considerato.

Nelle due figure successive (Fig 24-25) viene riportato l'andamento areale delle amplificazioni del moto sismico calcolati, sempre rispetto il sito di riferimento BR1. Un'analisi dei risultati ottenuti utilizzando input probabilistici e stocastici non ha mostrato variazioni significative.

In generale si osserva un significativo decremento dei valori osservati nella banda delle frequenze più alte (5-10 Hz), di un fattore medio di circa 1.5 volte, rispetto a quelli osservati nella banda 0-5 Hz. La distribuzione delle amplificazioni di sito nella banda 0-5 Hz è piuttosto uniforme, con valori alti ad eccezione di due minimi relativi ad Est del centro storico (MDL, VIG) e nella parte più settentrionale della zona investigata (RIO, CRC). Nella banda 5-10 Hz la situazione è più articolata, con massimi relativi a Nord ed Ovest del centro storico (IAG, ANF)

ed in prossimità degli affioramenti di Marnoso Arenacea ad Est (GAS). Si ha invece un minimo relativo nella parte centro-meridionale del centro storico (COM, PIN) ed uno più pronunciato, in analogia con la banda 0.5 Hz ad Est (MDL). Tali differenze potrebbero essere attribuite ad una variazione delle caratteristiche dei terreni alluvionali e/o a brusche variazioni

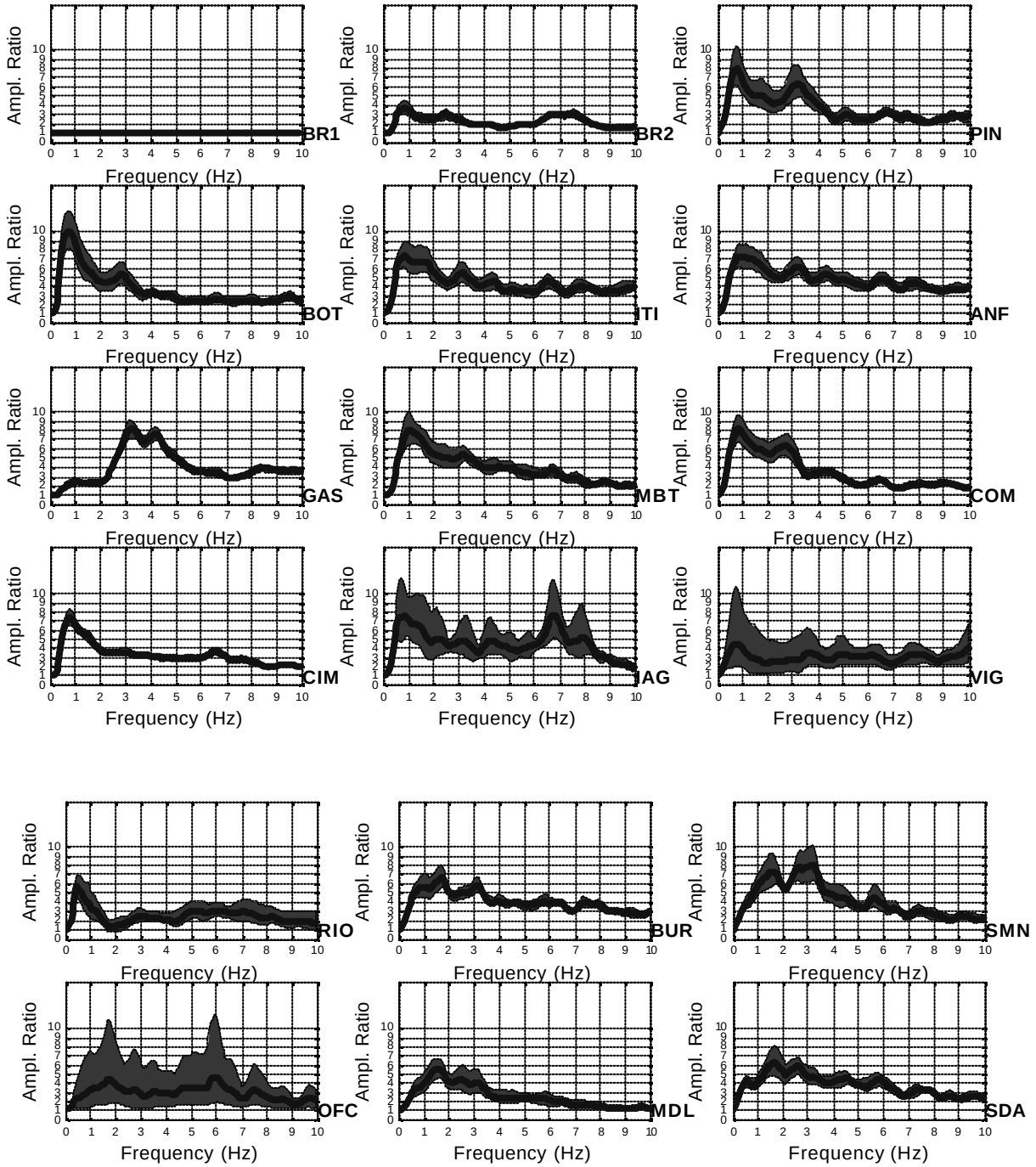
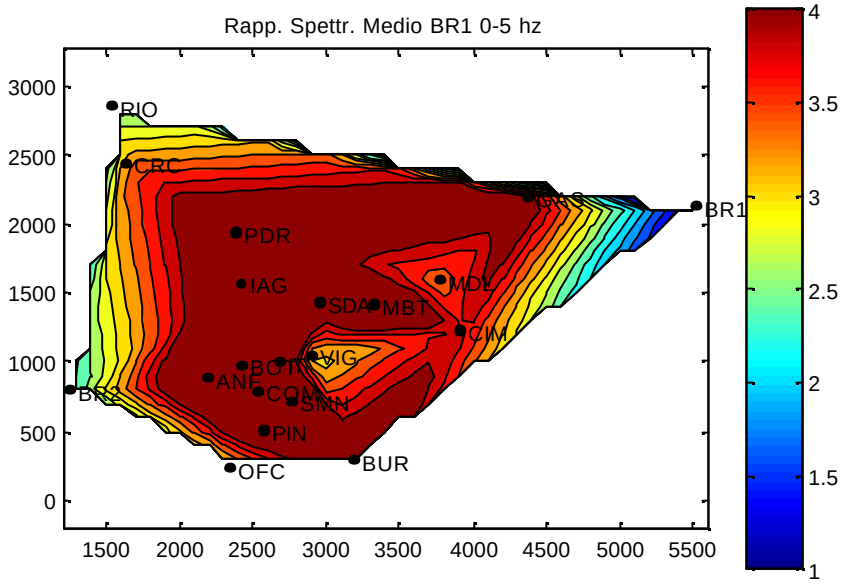
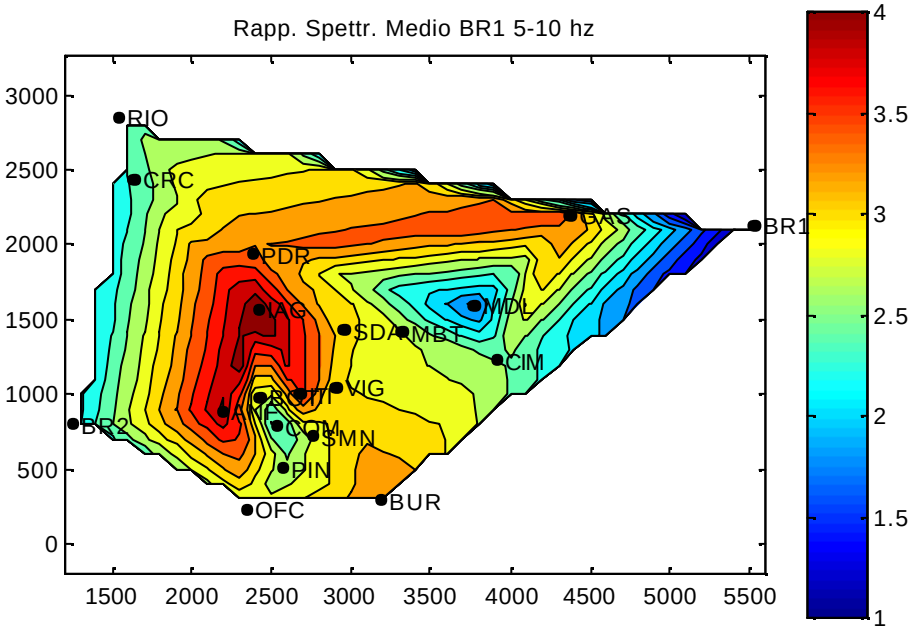


Fig. 23 – Rapporti spettrali medi cumulati delle due componenti NS e EW

In conclusione, si può affermare che la valutazione di dettaglio degli effetti locali a Città di Castello mostra un quadro caratterizzato mediamente da alte amplificazioni, soprattutto se confrontata con altri siti dell'Umbria similmente indagati. L'integrazione di questi risultati con le indagini geotecniche-geofisiche effettuate nella campagna geognostica a corredo, il quadro geologico e i risultati delle modellazioni numeriche permettono di giungere a quei suggerimenti applicativi a livello urbanistico che costituivano uno degli obiettivi del progetto regionale.





Figg. 24,25 - andamento areale dei Fattori di Amplificazione (sito rif. Br1). Nota: data la distribuzione disomogenea delle stazioni, il contouring è affetto da artefatti ai bordi e dalle zone a basso campionamento spaziale.

Il lavoro di microzonazione strumentale è stato utilizzato principalmente per definire con maggior precisione la variazione spaziale degli effetti di sito e, subordinatamente, per individuare i valori dei fattori di amplificazione, i quali sono stati mutuati dalle modellazioni specifiche. Tale assunzione è stata fatta tenendo conto delle attenuazioni del moto del suolo che ci si aspetta a causa dei fenomeni di non linearità legati alle magnitudo più elevate dei terremoti di input.

In ogni caso, utilizzando gli Fa relativi al sito di rifer. BR2 ci si avvicina ad un accordo anche quantitativo fra i risultati delle due metodologie.

5.4 Montone

L'abitato di Montone presenta, riguardo gli studi di effetti locali, una situazione differente da quella di Città di Castello essendo il centro abitato edificato su sedimenti più competenti (conglomerati) e/o in situazione morfologica di cresta con un dislivello abbastanza pronunciato rispetto al fondovalle. Per questo la geometria della rete sismometrica è stata impostata con l'obiettivo di campionare una sezione trasversale al crinale, con un infittimento delle stazioni alla sommità, dove è ubicato il centro storico. Un sito di riferimento è stato posizionato in coincidenza di un affioramento di Marnoso-Arenacea nel fondovalle.

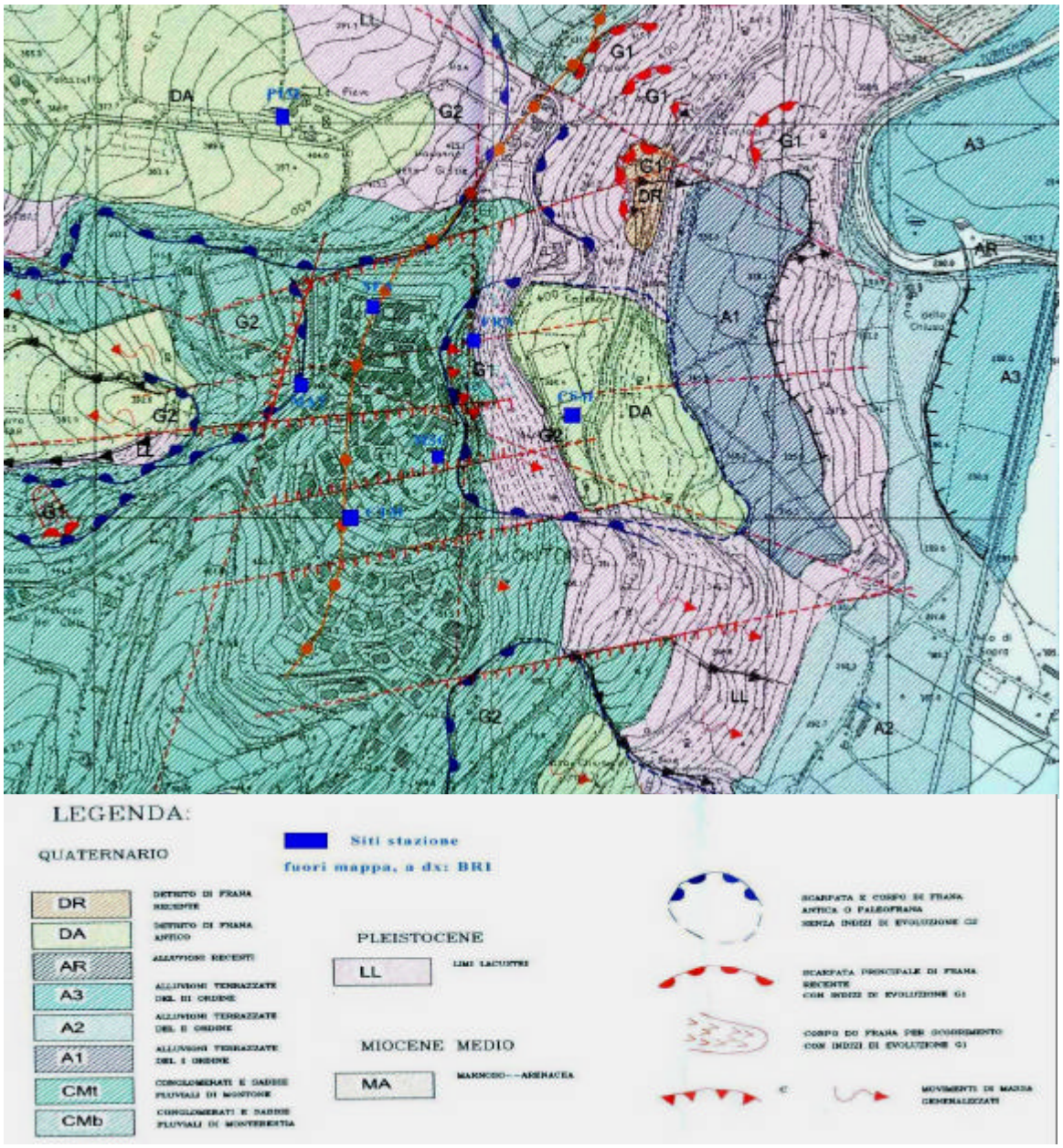


Fig. 26 - carta geologica di Montone [3] con siti di monitoraggio.

Due degli 8 siti campionati sono stati ubicati su affioramenti di detrito mentre gli altri (tranne BR1), sono posizionati su conglomerati nella zona del centro storico.

Il database sismologico ha una finestra di registrazione di circa 5 mesi ed una consistenza di 31 eventi selezionati.

I valori dei rapporti spettrali e dei Fattori di Amplificazione determinati mostrano rispetto all' area di Città di Castello un livello di amplificazione medio-basso per i siti nel centro storico, con una debole correlazione degli Fa rispetto alle variazioni di quota relativi fra questi ultimi, comunque all'interno dei margini di incertezza nella stima degli Fa: mediamente, gli spettri delle stazioni posizionate nel centro storico, quindi con situazione geolitologica e morfologia simile, hanno fornito valori fra loro ben comparabili. Nettamente diversa la situazione dei due siti posti su detrito, posti a quota inferiore: rapporti spettrali e fattori di amplificazione, con valori anche qui ben comparabili per i due siti, mostrano importanti effetti di amplificazione attribuibili al contrasto di impedenza con il bedrock. Risulta in particolare più amplificata la porzione centrale dello spettro di frequenza considerato, tra 2 e 7 Hz.

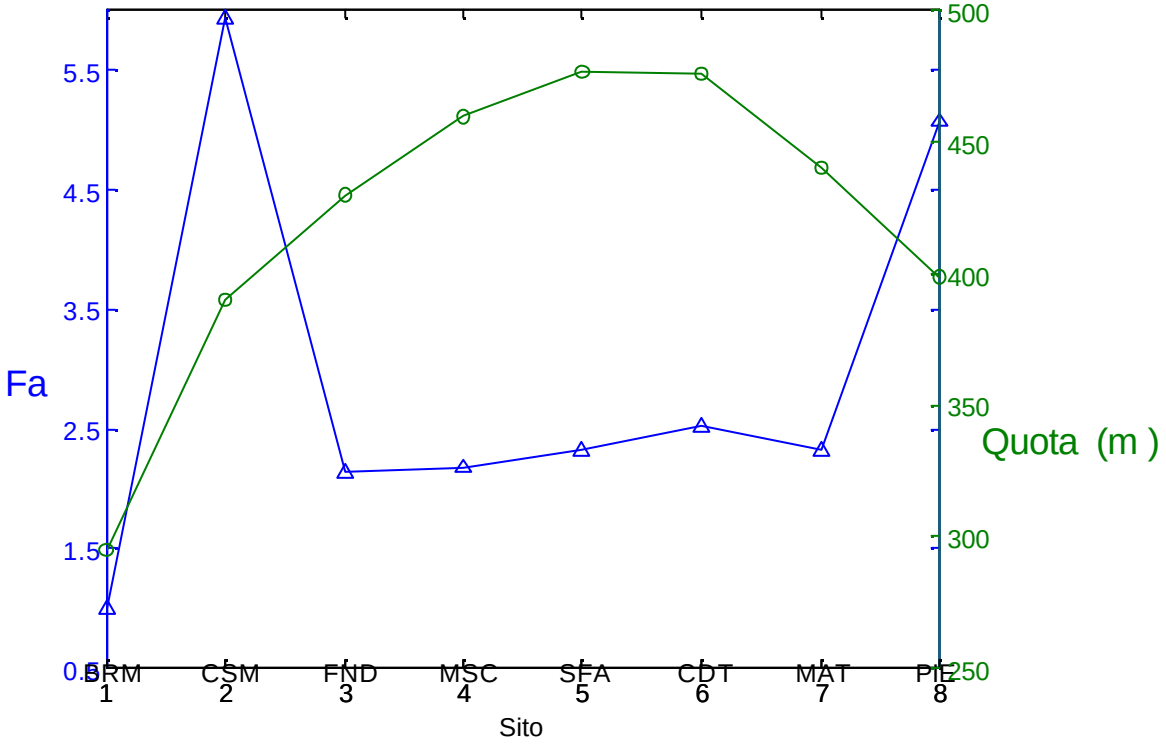
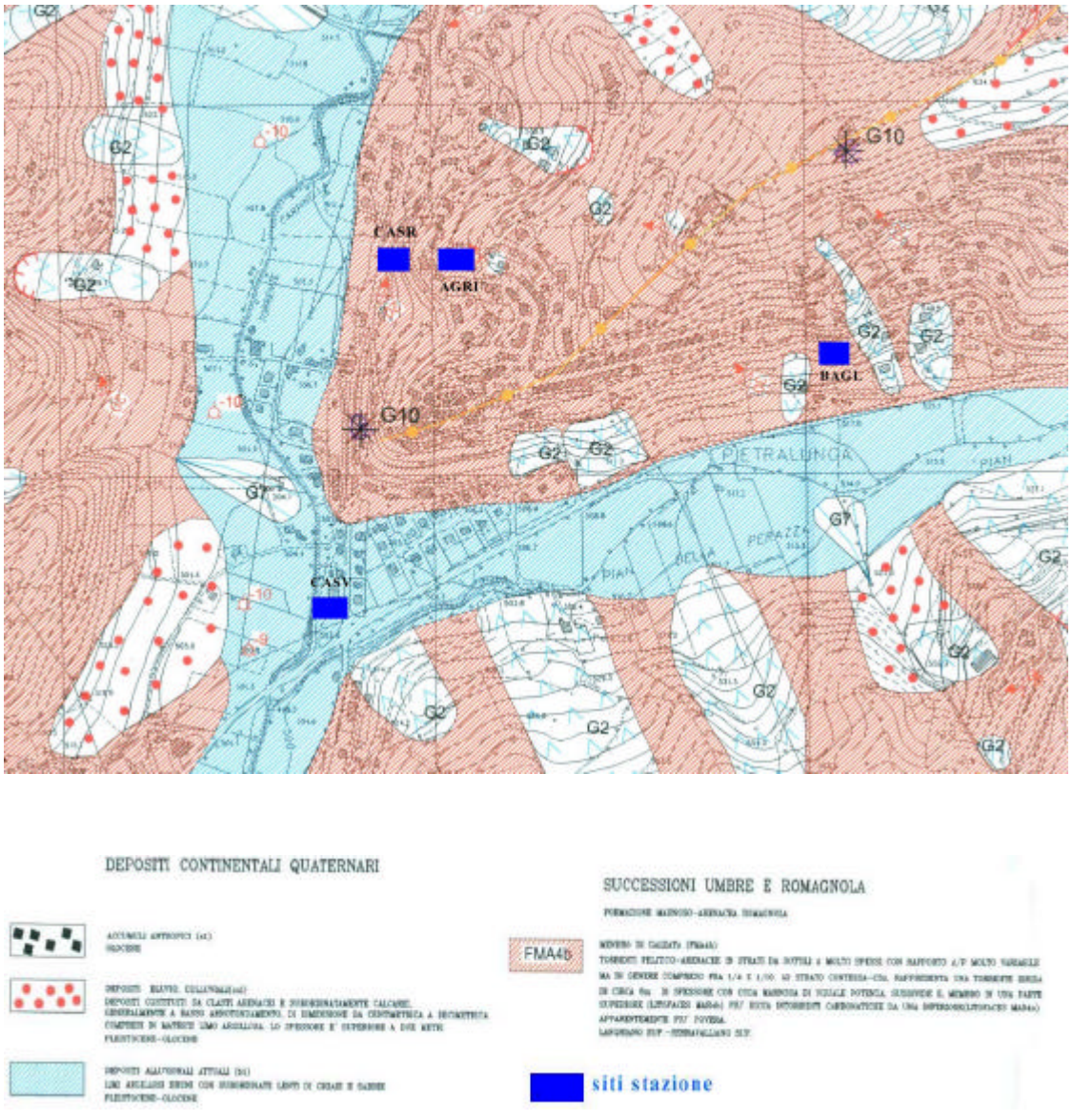


Fig. 27 - Andamento degli Fa (triangoli) e loro confronto con la quota topografica (cerchi).

5.5 Pietralunga

L'abitato di Pietralunga è posto su un modesto rilievo costituito dalla formazione della Marnoso-Arenacea, mentre alla base della collina sono presenti due valli alluvionali con insediamenti di recente costruzione.

Fig. 28 - Carta geologica di Pietralunga [6] con posizione dei siti monitorati.



La microrete di rilevamento, costituita da accelerometri ad alta dinamica del Servizio Sismico Nazionale, ha campionato 4 siti di cui 3 ubicati in centro storico su morfologie non pianeggianti, ed uno sulla piana alluvionale.

L'elaborazione del database mostra come le tre stazioni posizionate su Marnoso Arenacea, diano risultati simili tra loro mostrando solo limitati effetti di amplificazione, posizionati nella parte alta dello spetto particolarmente per il sito CASR, forse attribuibili ai piccoli riporti di terreno su cui era posizionata la stazione. Evidente è invece l'effetto dei depositi alluvionali, che danno nel sito CASV un pronunciato picco di amplificazione attorno ai 6 Hz, compatibile ad esempio con uno spessore di sedimenti di circa 10-15m ed una velocità S intorno ai 200 m/s. I valori dei Fattori di Amplificazione rilevati si pongono mediamente tra 1.2 e 1.4 per i siti AGRI, BAGL e CASR, mentre arrivano a 2 per il sito CASV.

5.6 Considerazioni

L'analisi d'insieme dei risultati delle tre microzonazioni strumentali di dettaglio sono sostanzialmente in accordo con gli effetti che potevano essere presunti dalla variabilità geolitologica e geomorfologica dei siti indagati. La variabilità dello spessore dei sedimenti presenti nell'area di Città di Castello e le loro caratteristiche meccaniche spesso scadenti, unite a probabili complessità tettoniche del basamento sepolto concorrono a formare un quadro di effetti di amplificazione locale mediamente di livello abbastanza elevato e lateralmente variabile, soprattutto alle frequenze più alte di interesse ingegneristico. Va per inciso considerato un buon risultato aver trovato un accordo, perlomeno qualitativo, tra la mappa dei livelli di amplificazione nel centro storico ed il quadro del danneggiamento ricostruito durante i rilievi relativi al terremoto del 30/09/1789.

Gli effetti morfologici su litologie più competenti, in analogia con i risultati di altre sperimentazioni, mostrano un'importanza relativamente secondaria rispetto agli effetti legati alla presenza di sedimenti soffici su basamento.

Siti di indagine diversi ma situati su situazioni geolitologiche e morfologiche simili hanno dato risultati conformi tra loro, confermando la robustezza del metodo strumentale.

Le metodologie delle microzonazioni strumentali e delle modellazioni numeriche dovrebbero essere ulteriormente affinate ed utilizzate congiuntamente per raggiungere quella convergenza quantitativa dei risultati ai fini dei risvolti applicativi.

6. CONCLUSIONI E RISULTATI

6.1 Caratteristiche geologiche e geotecniche

Lo studio condotto ha permesso di definire, sulla base della ricostruzione dell'assetto geologico e litostratigrafico delle varie formazioni caratterizzanti i depositi presenti nell'area in esame, le proprietà geotecniche dei depositi della Valtiberina in particolare per quei parametri utili all'implementazione dei modelli numerici di valutazione degli effetti di sito. Per questo motivo, la caratterizzazione delle principali formazioni geologiche è stata indirizzata prioritariamente alla definizione dei parametri dinamici iniziali (G_0 e D_0) e delle leggi di decadimento $G(g)$ e $D(g)$ da utilizzare per le analisi numeriche.

Tuttavia, con tale studio sono state anche predisposte le basi sia per dare avvio ad una banca dati geotecnici regionale sia per potere effettuare delle analisi degli effetti di sito con modelli più semplificati nelle aree in cui affiorano le formazioni geologiche esaminate. Sono state, infatti, trovate alcune correlazioni di carattere regionale per una stima preliminare della velocità delle onde *S* sulla base di parametri di più facile determinazione (profondità, numero dei colpi della prova SPT). Tali relazioni sono risultate statisticamente abbastanza affidabili per i depositi alluvionali fini, che, come risulta anche dalle analisi numeriche, esibiscono, nel campo di frequenze di interesse per le costruzioni presenti nell'area, i più alti valori di amplificazione delle onde sismiche in arrivo.

6.2 Analisi numeriche

Per ciascuna località sono state effettuate analisi numeriche monodimensionali o bidimensionali a seconda delle condizioni morfostratigrafiche rappresentative dell'abitato.

Nei casi in cui la geometria dei depositi era costituita da strati piano-paralleli senza l'influenza di morfologie superficiali o sepolte, si è ricorsi a modelli monodimensionali. Questi casi sono occorsi prevalentemente nei fondovalli alluvionali. Negli altri casi, si è ricorso ad analisi bidimensionali per tener conto non soltanto delle condizioni stratigrafiche dei terreni di copertura, ma anche delle condizioni morfologiche al contorno, rappresentate ad esempio dalla presenza di scarpate, di creste, dalla geometria del contatto substrato rigido (bedrock) – terreni di copertura, ecc.

Dall'analisi di tutti i casi analizzati si è anche cercato di definire alcuni rapporti tra il valore del coefficiente di amplificazione *Fa* ed alcune caratteristiche geometriche e geotecniche dei siti considerati, al fine di trovare leggi e correlazioni che permettessero di

identificare il valore di *Fa* senza dover ogni volta effettuare l'analisi numerica, disponendo dei dati geologici e geotecnici.

I dati sono stati inseriti nel grafico di Fig. 29 in cui è stata individuata una curva che fornisce un rapporto tra le caratteristiche geometriche e geotecniche del deposito ed il valore di Fa atteso e dove Fa è il Fattore di amplificazione e P il periodo proprio del deposito calcolato come:

$$P= 4* S /(S1*V1+S2*V2+….Sn*Vn)$$

Dove :

S è lo spessore totale , S1 ..Sn sono gli spessori dei vari strati, V1..Vn sono le velocità dei vari strati.

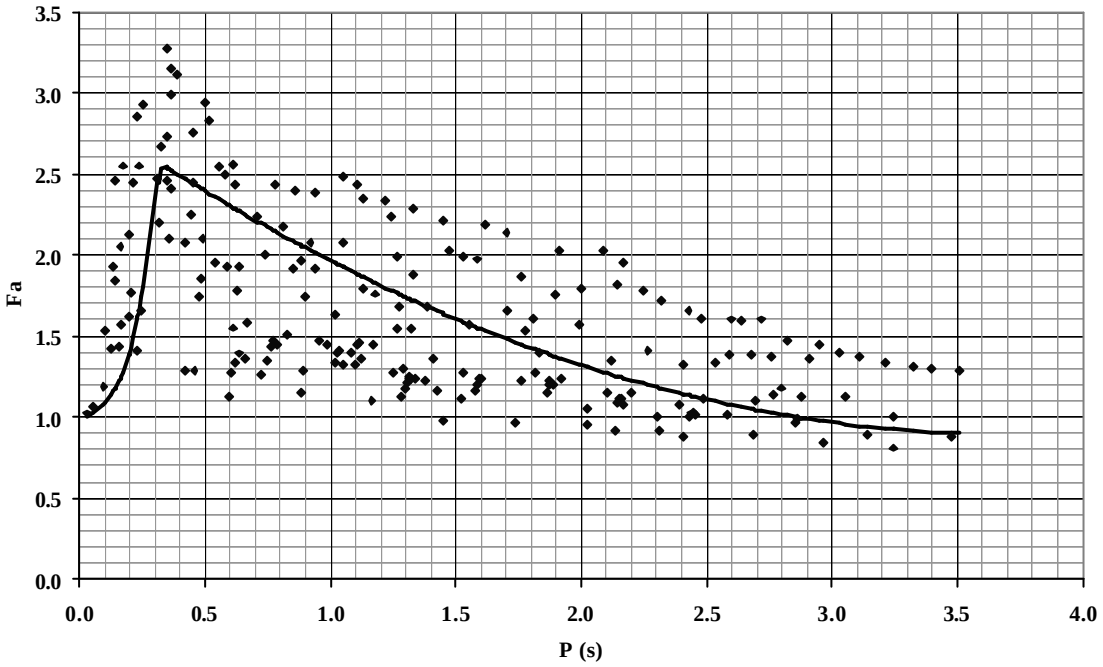


Fig. 29 – Andamento dei valori di Fa con il periodo proprio del deposito calcolati con SHAKE.

6.3 Confronto delle analisi numeriche e strumentali

Dal confronto delle analisi numeriche e strumentali effettuate per il sito di Città di Castello si possono trarre le seguenti considerazioni:

- esistono alcune differenze di base nei due metodi;
- esiste coerenza tra i due diversi approcci di studio;

- l’analisi numerica ha il vantaggio di essere facilmente applicabile con tempi veloci, ma ha lo svantaggio di considerare unicamente una situazione bidimensionale (che non è possibile risolvere neppure considerando più sezioni tra loro secanti), di semplificare le geometrie di situazioni geologiche troppo complesse per essere modellizzate, di trascurare l’effetto delle onde superficiali e quindi sottostimare gli effetti ad alti periodi;
- l’analisi strumentale ha il vantaggio di considerare l’effetto della sollecitazione sismica nelle tre dimensioni spaziali, ma ha lo svantaggio di considerare normalmente eventi di bassa magnitudo e quindi valutare il comportamento dei materiali solo per basse deformazioni in campo elastico, di richiedere oltre alle analisi sismologiche analisi geotecniche dinamiche integrative atte a rilevare il comportamento del substrato sotto sollecitazione, di effettuare le registrazioni per periodi di tempo che dipendono dalla sismicità dell’area e che possono variare da un minimo di 1 mese ad un massimo di 2 anni;
- con l’integrazione dei due metodi per compensare i limiti dell’uno con i vantaggi dell’altro; in questo modo è possibile effettuare un’analisi veramente completa che consideri sia l’effetto della tridimensionalità sia il comportamento non lineare dei materiali soggetti a sollecitazioni sismiche.

6.4 Carte dei fattori di amplificazione

Al termine del lavoro tutti i risultati ottenuti, in termine di valutazione della pericolosità sismica locale, sono stati sintetizzati nella cartografia di zonazione dei fattori di amplificazione.

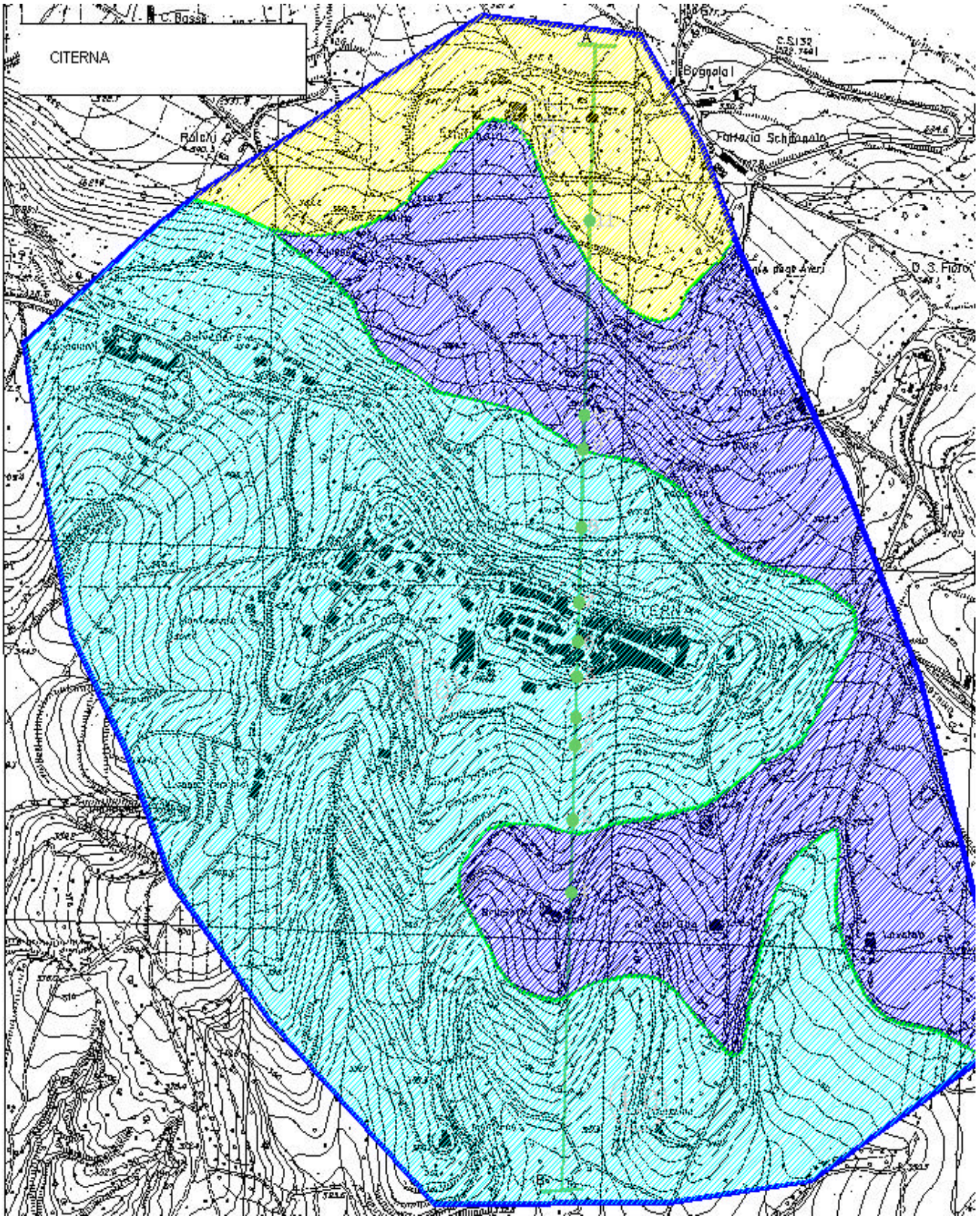
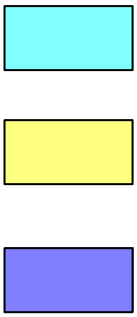


Fig.30 – Esempio di carta di zonazione dei fattori di amplificazione.

LEGENDA ALLA CARTA DI ZONAZIONE DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

Fattori di amplificazione (Fa) - (Fa per periodo 0.1-0.5)



Traccia di sezione geologica modellizzata

Nodo di verticale modellizzata

Limite aree di applicazione della modellazione effettuata

Limite aree amplificazione derivante da modellazione specifica

Di seguito vengono sinteticamente esposte, per ogni località sottoelencata, le distribuzioni dei fattori di amplificazione relativi al periodo di intervallo 0.1 – 0.5 sec che è rappresentativo della maggioranza degli edifici presenti nell'area in studio.

Città di Castello

Si distinguono 5 aree a diverso fattore di amplificazione. Le aree con Fa = 1.0 corrispondono a quelle con il substrato affiorante. Le più estese sono quelle con Fa = 2.2 e Fa = 2.5 che comprendono tutto l'abitato di Città di Castello. L'area con Fa = 1.3 è localizzata in destra idrografica del Tevere sulla bassa collina. L'area con Fa = 1.9 forma una stretta fascia di media collina compresa tra le aree con Fa = 1.0 e la citata zona con Fa = 1.3.

Celalba

La zona con l'affioramento del bedrock non è soggetta ad incrementi sismici (Fa = 1.0). La fascia pedecollinare comprende aree con Fa pari a 1.3 e 1.9 rispettivamente corrispondenti

alle aree insistenti sui depositi alluvionali e sul detrito. La fascia a valle dell'abitato assume un valore di Fa pari a 1.7. Infine quella più valliva mostra un valore di Fa pari a 1.5.

Cerbara

L'ambito di modellazione è suddiviso in tre zone di cui due con fattore di amplificazione pari a 1.5 e quella tra esse comprese pari a 1.3. Dalla rappresentazione cartografica si evince che in massima parte l'abitato è caratterizzato da Fa = 1.3. mentre le due parti con Fa = 1.5 interessano delle zone dell'ambito perimetrato con ridotto sviluppo edilizio.

Badiali

Tutta l'area ha un valore di Fa pari a 1.7.

Baucca

Si distinguono due aree. La pianura alluvionale con Fa = 1.3 e la zona collinare dei conglomerati con Fa= 1.5.

Cantone

L'area perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1 .0.

La zona del detrito e di frana dovrà essere classificata in seguito ad indagini di dettaglio.

Celle

Tutta la zona perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1 .0.

Ciciliano - Bosco

La gran parte dell'area perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1.0 corrispondente alle aree con il substrato affiorante. Mentre la zona di cresta del crinale è caratterizzata da un fattore di amplificazione Fa = 1.5.

Citerna

La parte sommitale del colle ove si sviluppa l'abitato non è sottoposta ad amplificazioni del moto . Mentre si hanno amplificazioni nelle zone a quote più basse.

Corposano

La zona perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1 .0.

La zona di frana dovrà essere classificata in seguito ad indagini di dettaglio.

Cospaia

L'area perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1 5.

Le zone di frana e di detrito dovranno essere classificate in seguito ad indagini di dettaglio.

Croce di Castiglione

L'ambito di territorio perimetrato è caratterizzato da un fattore di amplificazione Fa = 1.7.

Fighille

La zona di modellazione è interessata da incrementi sismici che vanno dal minimo valore di 1.3 a 1.9. All'area corrispondente alla frana (G1) non è stato assegnato il valore di Fa in quanto essa dovrà essere oggetto di studi particolareggiati che dovranno valutare gli spessori del corpo di frana e le caratteristiche geotecniche dei terreni.

Fraccano

La zona perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1.0. L'area in frana e la coltre detrititica dovranno essere classificate in seguito ad indagini di dettaglio.

Gioiello

L'area perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1.0 corrispondente alle aree con il substrato affiorante. La zona di fondo valle è caratterizzata da un valore di Fa pari a 1.9. Mentre la piccola area di detrito modellizzata ha un valore di Fa pari a 1.3. Alle aree corrispondenti alle coperture detritiche (DR) e a quelle delle frane (G2) non sono stati assegnati valori di Fa in quanto esse dovranno essere oggetto di studi particolareggiati che dovranno valutare gli spessori e le caratteristiche geotecniche dei terreni.

Lerchi

L'area di affioramento del substrato non è soggetta ad incrementi sismici. La fascia pedecollinare comprende aree con Fa pari a 1.3 e 1.5. La fascia immediatamente a monte dell'abitato assume un valore di Fa pari a 1.9, Mentre la fascia che comprende l'abitato di Lerchi assume un valore di Fa pari a 2.5. Infine nella zona più valliva si ha un valore di Fa pari a 1.5.

Lippiano

L'area perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1 .0. La zona di frana dovrà essere classificata in seguito ad indagini di dettaglio.

Marcignano

Le zone con fattore di amplificazione Fa pari 1.0 corrispondono alle aree con il substrato affiorante,mentre le zone di cresta dei due crinali sono caratterizzate da fattore di amplificazione Fa = 1.4 ed Fa = 1.2. La zona di fondo valle delle alluvioni è caratterizzata da Fa = 1.3.

Monte S. Maria Tiberina

In massima parte la zona perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1.0, mentre la zona sommitale del rilievo ove insiste l'abitato è caratterizzata da un fattore Fa pari a 1.3. Le zone di detrito e di frana dovranno essere classificate in seguito ad indagini di dettaglio.

Montone

Per la quasi totalità del centro abitato dove sono presenti i conglomerati e le sabbie fluviali il valore di Fa risulta pari a 1.4. Valori di Fa pari a 3.1 sono invece da attribuire alle coltri relative ai detriti di frana.

Nuvole

La zona perimetrata è suddivisa in tre classi di amplificazione. La zona dell'abitato di Nuvole e quella più valliva a Nord è caratterizzata da un valore di Fa pari a 1.9. Tra esse sono identificate due zone con Fa pari a 2.2 e 1.3.

Parnacciano

L'area perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1 .0. La zona del detrito (DR) dovrà essere classificata in seguito ad indagini di dettaglio.

Pietralunga

Nell'area di fondovalle in concomitanza dei depositi alluvionali il valore di Fa risulta pari a 1.8. Per il settore del centro abitato situato ad Est del Torrente Carpina, in corrispondenza della dorsale morfologica si hanno valori di Fa = 1.4 per il nucleo del centro storico e valori di Fa = 1.2 per la restante parte dell'edificato. Valori di Fa = 1. 2 per altri versanti in carta su Marnoso Arenacea potranno essere valutati in seguito ad indagini per la valutazione dello stato di alterazione della Marnoso Atenacea. Le zone di detrito ed in frana dovranno essere classificate in seguito ad indagini di dettaglio.

Piosina

Il territorio perimetrato risulta suddiviso in due aree con valori di Fa pari a 1.3 e 1.5. In massima parte l'abitato di Piosina è compreso nella fascia con Fa = 1.3.

Pistrino

Tutta l'area, in considerazione della omogeneità stratigrafica e morfologica, è sottoposta ad una sola classe di incremento sismico con Fa pari a 1.3.

Pitigliano - Colle Plinio

Il territorio modellizzato è stato suddiviso in quattro classi di Fa. Nelle aree con affioramento del substrato si ha un valore di Fa = 1.0. L'abitato di Colle Plinio è compreso nella zona con Fa = 1.3. L'abitato di Pitigliano è compreso nella zona con Fa = 1.7. Tra le due aree è presente la fascia con Fa = 1.5.

Rovereto-Fornace

Le zone con fattore di amplificazione Fa pari 1.0 corrispondono alle aree con il substrato affiorante. Mentre le zone di cresta dei crinali sono caratterizzate da Fattore di amplificazione Fa = 1.2 ed Fa = 1.3. La zona di fondo valle delle alluvioni è caratterizzata da Fa = 1.3.

S.Anastasio

Tutta la zona perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1.0. La zona di frana dovrà essere classificata in seguito ad indagini di dettaglio.

San Giustino

La zona con l'affioramento del substrato non è soggetta ad incrementi sismici, fatto eccezione nella parte dell'abitato di Compaia, ove si ha un valore di Fa pari a 1.5. Nella stretta fascia alluvionale del Vertola si ha un valore di Fa pari a 1.3. Si passa ad un valore di Fa pari a 1.5 nella fascia di raccordo tra i rilievi collinari e la pianura alluvionale. Quasi tutto l'abitato di San Giustino è compreso nella fascia con valore di Fa pari a 1.7. Spostandosi verso ovest si passa alla zona con Fa pari a 1.5. Alle aree corrispondenti alle coperture detritiche (DR) e a quelle delle frane (G2) non sono stati assegnati valori di Fa in quanto esse dovranno essere oggetto di studi particolareggiati che dovranno valutare gli spessori e le caratteristiche geotecniche dei terreni.

San Secondo – Ponte d' Avorio – S. Lucia

L'ambito di territorio perimetrato è suddiviso in due aree a diverso fattore di amplificazione. Si ha la prevalenza dell'area con Fa = 1.7 che interessa l'abitato di San Secondo, per la parte studiata, la zona industriale e parte dell'abitato di S.Lucia, l'abitato di Ponte D'Avorio. All'interno di tale zona è stata delimitata l'area con Fa = 1.9. Essa interessa, rispetto alla precedente una modesta area edificata, una piccola parte dell'abitato di Santa Lucia.

Selci - Lama

Il territorio modellizzato è stato suddiviso in quattro classi di Fa. In massima parte i centri abitati rientrano nelle classi Fa = 1.1 ed Fa = 1.5.

Nella zona con Fa = 1.1 rientra quasi tutto l'abitato di Lama, mentre in quella con Fa = 1.5 rientra tutto l'abitato di Selci e la parte più valliva dell'abitato di Lama. La fascia più orientale con Fa = 1.5 interessa la zona industriale di Lama.

Uppiano

In massima parte la zona perimetrata ha un fattore di amplificazione Fa pari 1.0 corrispondente alle aree con il substrato affiorante, mentre la zona di cresta del crinale è caratterizzata da un fattore di amplificazione Fa = 1.2. Alle aree corrispondenti alle coperture delle frane e del detrito non sono stati assegnati valori di Fa in quanto esse dovranno essere oggetto di studi particolareggiati che dovranno valutare gli spessori e le caratteristiche geotecniche dei terreni.

Vallurbana

Si distinguono tre zone con diversi Fa. La zona con Fa = 1.0 corrisponde al substrato affiorante. Quella con Fa = 1.3 alla valle alluvionale. Quella con Fa = 1.2 ove sorge il nucleo abitato, alla zona di crinale. Le zone del detrito e di frana dovrà essere classificata in seguito ad indagini di dettaglio.

6.5 Utilizzo dei risultati e discussione

I risultati del lavoro forniscono parametri e funzioni utilizzabili per la predisposizione di strumenti urbanistici e per la progettazione antisismica.

In particolare sono stati forniti per tutte le località indagate:

- la "PGA, " accelerazione massima attesa (Peak Ground Acceleration);
- l'accelerogramma sintetico di input relativo al sisma massimo atteso per un periodo di 475 anni;
- lo spettro di risposta in pseudoaccelerazione su tutti i nodi modellati;
- i rapporti spettrali su tutti i siti d'ubicazione delle stazioni sismiche;
- il valore del Fattore di amplificazione Fa , (come rapporto tra l'intensità spettrale in superficie e il substrato, sul nodo considerato);
- carta della zonazione dei fattori di amplificazione, come prodotto di sintesi tra indagini in sito e in laboratorio, rilevamenti geologici, modellazioni numeriche e, laddove eseguite, acquisizioni strumentali di terremoti.

Questi strumenti potranno fornire utili indicazioni sulla possibilità di utilizzo del territorio ai fini urbanistici, sulle eventuali modalità costruttive e non ultimo sulla necessità di abbassare la vulnerabilità di edifici esistenti su alcune aree prioritarie.

Si ritiene opportuno che gli esiti del progetto siano valutati da esperti di calcolo degli edifici al fine di utilizzare nel modo più corretto e utile possibile i valori del Fa, anche nei diversi campi di frequenze, per la progettazione di varie tipologie di edifici nuovi o esistenti da adeguare o migliorare.

Bibliografia

[1] AA.VV.- *La Microzonazione Sismica Speditiva relativa ai terremoti del 1997-98 in Umbria.* Regione dell'Umbria, 2000.

[2] AA. VV.- *Nuova Carta Geologica D' Italia, Scala 1:50.000, Foglio n. 289-Città di Castello*, in stampa.

[3] AA.VV. *Relazione geologiche e geotecniche a corredo della variante al progetto generale di consolidamento del Colle di Montone.* Atti progettuali giacenti presso gli uffici della Regione dell'Umbria, 1996.

[4] Brozzetti F., Boncio P., Lavecchia G.- *Relazioni tra faglie attive e sismicità nella Regione dell'Umbria.* Atti della Regione dell'Umbria presso il Servizio Geologico Regionale, 2000.

[5] Camassi R. e Stucchi M. 1997 - *NT 4.1 un Catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno CNR- GNDT*, Milano , 86 pp.

[6] *Carta geologica del Servizio Geologico della Regione dell'Umbria in scala 1:10.000 della sezione n. 290-140 " Pietralunga".* Atti della Regione dell'Umbria presso il Servizio Geologico, 2001.

[7] CEC.- Eurocodice 8: strutture in zone sismiche, maggio 1988 e successive versioni.

[8] Crespellani T., Madiai C., Simoni G.- *Studio Geotecnico finalizzato alla valutazione degli effetti locali in un'area campione dell'Alta Valle Tiberina Umbra – Relazione finale*, Maggio 2001.

[9] De Franco R., Caielli G., Corsi A., Ponziani F.- *Valutazione degli effetti di sito da dati sismologici:Città di Castello.Convenzione tra Regione Umbria e IRRS " studio volto alla valutazione degli effetti locali nell' ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione della pericolosità sismica locale – area campione Alta Val Tiberina* – Rapporti finali, Milano, ottobre 2001.

[10] De Franco R., Caielli G., Ponziani F., Corsi A. – *Acquisizione dati sismologici per la microzonazione sismica di Montone . Rapporto finale*, Milano, maggio 2001.

[11] Gasparini D.A. and Vanmarcke E.H. , 1976. *Simulated Earthquake Motions Compatible With Prescribed Response Spectra*, Department of Civil Engineering, Reserach Report R 76-4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.

[12] Meletti C., Stucchi M., Galadini F.; Leschiutta I e Scandone P., 2000 – *Criteri e procedure per la compilazione di un inventario speditivi delle sorgenti potenziali di terremoti distruttivi, finalizzato alla compilazione di una nuova mappa delle zona sismogenetiche per l' area italiana*.In Galadini F., [13] Meletti C. e Rebez A. (A cura di) .Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996-1999) .CNR-GNDT, Roma ,pp. 379-397.

[14] Marcucci S. Milana G., Ponziani F. – *Acquisizione ed elaborazione di dati sismologici per la microzonazione sismica di Pietralunga*. *Rapporto finale*. Roma ,gennaio 2002.

[15] Pergalani F., De Franco R., Compagnoni M., Caielli G. *Valutazione degli effetti locali tramite analisi numeriche e sperimentali nel sito di Città di Castello: analisi, confronti ed utilizzo dei risultati. Rapporto finale*, Milano , ottobre 2001.

[16] Pergalani F. Compagnoni M – *Studio volto alla valutazione degli effetti locali nell' ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione della pericolosità sismica locale – Area campione Alta Val Tiberina Umbra - Milano, 2001.*

[17] Regione dell' Umbria, Delibera di Giunta n. 226 del 14 marzo 2001- Criteri per l'esecuzione degli studi di microzonazione sismica a supporto della redazione degli strumenti urbanistici- S.O. n. 2 al Bollettino Ufficiale della Regione dell' Umbria n.16 del 4 aprile 2001.

[18] Regione dell' Umbria, Delibera di Giunta n. 1398 del 29 settembre 1999 – Programma finalizzato all'acquisizione dati di microzonazione per definizione rischi (carte dei rischi) ed individuazione aree da destinare ad interventi sostitutivi.

[19] Regione dell'Umbria, Determinazione Dirigenziale n. 8057 del 22 ottobre 1999 – Progetto per la realizzazione di una zonazione territoriale della pericolosità sismica locale – area campione; Alta Valle del Tevere.

[20] Sabetta F. and Pugliese A., 1996 - *Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions*. Bull.Seism.Soc.Am. 86 , 337-352.

[21] Slejko D., Peruzza L. and Rebez A., 1998 - *Seismic hazard maps of Italy* .Annali di Geofisica, 41, 183-214.

[22] Stucchi M. ,Zonno G. – *Studio volto alla valutazione degli effetti locali nell' ambito del progetto per la realizzazione di una zonazione della pericolosità sismica locale – Area campione Alta Val Tiberina Umbra.- Definizione del moto sismico di riferimento* , Milano 2001.