

Considerazioni su approcci metodologici, limiti e filosofia di intervento per la valutazione degli effetti di sito

Patrizio Signanini

DiGAT - Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente e il Territorio - Università "G. D'Annunzio" di Chieti, Campus Universitario,
Via dei Vestini 30, 66013 Chieti Scalo, Italia
Tel: +39-0871-3556160 Fax: +39-0871-3556149

Discussion about methodology, limits and some practical remarks concerning site effects evaluation

ABSTRACT: It's well-known that large modification of seismic waves is due to variation of natural characteristics of nearly surface rocks and sometimes is related to *bedrock* conformation, superficial topography, seismic impedance contrast between different lithologies, their attenuation features and structures. Different methods are used to foresee the behaviour that sometimes can produce strong site amplifications. This work tries to express a synthesis of the knowledge concerning the factors that determine these site effects and consider direct measures and the historical earthquakes effects that confirm what described above. In particular, are analyzed a sites series and related site effects modelling. These modelling are compared to macroseismic data and direct measures, trying to observe the probability of predictability and gaps, shown by modelling methods, analyzing the terms that are involved in input valuation codes. The results of comparison between measured and modelled scenarios offer very interesting points of remarks.

Key terms: site effects, prediction and quantification of local amplifications

Termini chiave: effetti di sito, previsione e quantificazione amplificazioni locali

Riassunto

E' noto che una grande modificazione delle onde sismiche è prodotta dalle variazioni delle proprietà naturali delle rocce prossime alla superficie terrestre, ed è talora in relazione con la conformazione del *bedrock*, la topografia di superficie, il contrasto di rigidità sismica tra i vari litotipi, le caratteristiche di attenuazione dei medesimi e della struttura stessa. Differenti metodi sono stati usati per prevederne il comportamento che può portare talora a forti amplificazioni di sito. Il presente lavoro tenta di esprimere una sintesi delle conoscenze relative ai fattori che determinano questi effetti di sito e prende atto delle misure dirette e di effetti di terremoti storici che confermano quanto sopradescritto. In particolare vengono analizzati una serie di siti e le relative modellazioni di effetto locale. Queste vengono comparate con i dati macrosismici e le misure dirette, nel tentativo di vedere le possibilità di previsione e le lacune che presentano i metodi di modellazione analizzando inoltre i termini che concorrono all'input dei codici di calcolo. I risultati della comparazione tra situazioni misurate e situazioni così modellate offrono spunti di interessanti riflessioni.

1. Premessa

Il problema della amplificazione locale dovuta agli effetti del sito è fenomeno descritto da molti autori storici che osservando gli effetti del terremoto rilevavano distruzioni

differenziate da paese a paese ed addirittura da sito a sito nell'abitato stesso.

Le osservazioni che tentano di correlare parametri geologici-geomorfologici con le differenti distruzioni in siti relativamente vicini si rinvengono già in diversi autori di fine '800 ed inizio '900 anche perché anteriormente il terremoto veniva inteso come castigo di Dio e pertanto in qualche modo mirato.

Queste distruzioni differenziate accadute in occasione di forti eventi sismici dipendono sia dalla resistenza alla sollecitazione delle costruzioni, sia dalla risposta del terreno inteso in senso lato; fattore che è stato lungamente sottovalutato cosicché bisogna arrivare circa agli anni 60 per un primo tentativo di definizione quantitativa dei parametri fisico-meccanico-geologici in gioco in questa fenomenologia.

Il presente lavoro oltre a presentare un breve *excursus* storico su alcuni metodi proposti e atti alla determinazione a priori di questi effetti di sito, presenterà una serie di risultati acquisiti sui valori di amplificazione in termini misurati, analizzerà alcuni metodi di previsione utilizzati evidenziandone i principali limiti comparandoli a quelli di normativa e ponendo alcuni interrogativi sul modo di operare sia a livello scientifico-professionale sia normativo.

2. Cosa si intende per effetto locale

Se in una zona colpita da un sisma a breve distanza (decine,

centinaia di metri) si rileva un differente grado di distruzione, la cosa può essere imputabile al comportamento dell'edificio o può in qualche modo dipendere dal comportamento del terreno. Più difficile è concepire che la quantità di energia che si trasmette dall'ipocentro del terremoto al *bed-rock* locale possa presentare differenze sensibili tali da poter provocare gli effetti rilevati.

Con questa premessa è possibile separare quegli effetti che possono correlarsi con il comportamento geologico-sismico locale da altri effetti più legati alla differente attenuazione del fronte d'onda nella sua propagazione in un mezzo sicuramente anisotropo, eterogeneo sia in termini di velocità che di *quality factor*.

In base a queste considerazioni potremmo così schematizzare il sistema (Fig. 1):

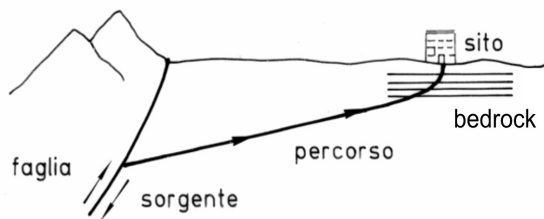


Fig. 1: Terremoto alla sorgente + percorso = terremoto al *bedrock*; terremoto al *bedrock* + effetti locali + vulnerabilità = effetti in superficie. Da Lanzo & Silvestri, 1999

Source earthquake + path = bedrock earthquake; source earthquake + local effects + vulnerabilità = superficial effects. By Da Lanzo & Silvestri, 1999

In base a questo schema appare ragionevole supporre che un certo tipo di approccio al problema degli effetti di sito, ricavati da sottrazione del campo macrosismico rilevato con un campo macrosismico teorico sintetico, ottenuto utilizzando un adeguato meccanismo di sorgente e considerando una propagazione del fronte d'onda in un mezzo a *quality factor* costante, sia concettualmente errato. Ciò soprattutto se si considera la scala a cui questi effetti vanno valutati e se si tiene conto della forte anisotropia del mezzo di propagazione rappresentato dai primi chilometri di sottosuolo del contesto italiano.

3. Quanto valgono le amplificazioni locali

Se consideriamo attendibile lo schema di base di figura 1, appare possibile percorrere alcune differenti strade per una determinazione quantitativa del parametro effetto locale ed esattamente:

1. Misura in superficie in siti ravvicinati mediante accelerometri o velocimetri posti a breve distanza e misura *in situ* mediante sensori posti in foro (al *bedrock*) ed in superficie in un unico punto (Metodi diretti).
2. Definizione dei parametri che concorrono a produrre questa amplificazione di sito e relativa misura ed elaborazione dei medesimi (Metodi indiretti).

3. Depurazione da un campo macrosismico locale e reale relativo ad un forte evento dell'effetto connesso con i differenti comportamenti degli edifici al sisma e ridefinizione dell'intensità. Questo parametro dovrebbe essere correlabile almeno come ordine di grandezza a quello di massima accelerazione al sito (Metodi a posteriore).

Se i punti 1) e 3) necessitano del verificarsi di eventi sismici, per ciò che riguarda il punto 2) un calcolo della amplificazione può essere fatto indipendentemente dal verificarsi dell'evento.

D'altra parte mentre i dati ottenibili con il percorso 1) sono assoluti ma non estrapolabili, nemmeno per quel tipo di terremoto, il percorso 3) presuppone un evento forte e, perché i dati siano attendibili, una tipologia di costruzione sufficientemente uniforme.

La necessità di produrre coefficienti di sicurezza adeguati alle costruzioni in zone sismiche, ha portato nell'ultimo mezzo secolo ad uno sviluppo di tecniche di valutazione di incremento di intensità e/o di accelerazione dovuto ad effetti locali, cioè dei metodi indiretti.

In particolare alcuni metodi si sono basati su impostazione più geologica (Broili, 1977; Broili et alii, 1980), alcuni altri metodi si sono basati più su registrazioni ed elaborazioni di microtremori (Kanai et alii, 1961; Nakamura, 1989; SESAME, 2004), alcuni altri si sono basati su dati geofisici-geotecnici ed hanno elaborato valori di velocità sismiche considerando il fenomeno di amplificazione locale in relazione con i rapporti di impedenza (Medvedev, 1965) o di rigidità nonché le condizioni di risonanza per singole frequenze (Bard et alii, 1985a, 1985b, 1986). Infine alcuni altri autori hanno proposto codici di calcolo che, considerando un terremoto al *bedrock* e tenendo conto di parametri quali, velocità V_s , densità, geometria del sistema, nonché dell'attenuazione, permettevano di ricostruire l'accelerogramma in superficie (Idriss, 1978; Idriss et alii 1992).

Nonostante il miglioramento dei metodi indiretti, il problema di una determinazione quantitativa reale degli effetti locali rimane ancora aperta. Infatti recentemente alcuni scienziati che hanno eseguito misure dirette con *array* di geofoni e con sensori in foro ed in superficie, hanno ritrovato picchi di accelerazione molto più alti di quelli modellati. In particolare ricercatori italiani e stranieri (Spudich et alii, 1996; Bellucci et alii, 1998; Bard, 2002) hanno rilevato talora differenze di accelerazione o di velocità di spostamento tra punto e punto molto superiori al previsto, infatti mentre li dove i sistemi indiretti potevano prevedere amplificazioni di picco di 3-4 volte, le misure hanno mostrato valori di 10-20 volte (Fig.2).

Quanto questa discrepanza tra valori ricavati da modello e dati misurati sia frequente è attualmente oggetto di intensa ricerca scientifica, cosicché anche il gruppo VEL della Regione Toscana sta operando in questo senso poiché è chiaro che, se questo fenomeno di alta amplificazione si rivelasse la norma sarebbe necessaria una revisione di tutta

l'attività nel campo del terremoto dalla sismologia all'ingegneria sismica.

Va rilevato che questi valori così differenziati di amplificazione erano stati in qualche modo ipotizzati anni fa da alcuni ricercatori che, operando secondo quanto descritto

nel punto 3, avevano per l'area di Ragnogna (Friuli) calcolato aumenti di intensità (MCS) dell'ordine di oltre tre gradi abbastanza in linea con i dati ultimamente misurati, in termini di accelerazioni (Signanini et alii, 1981).

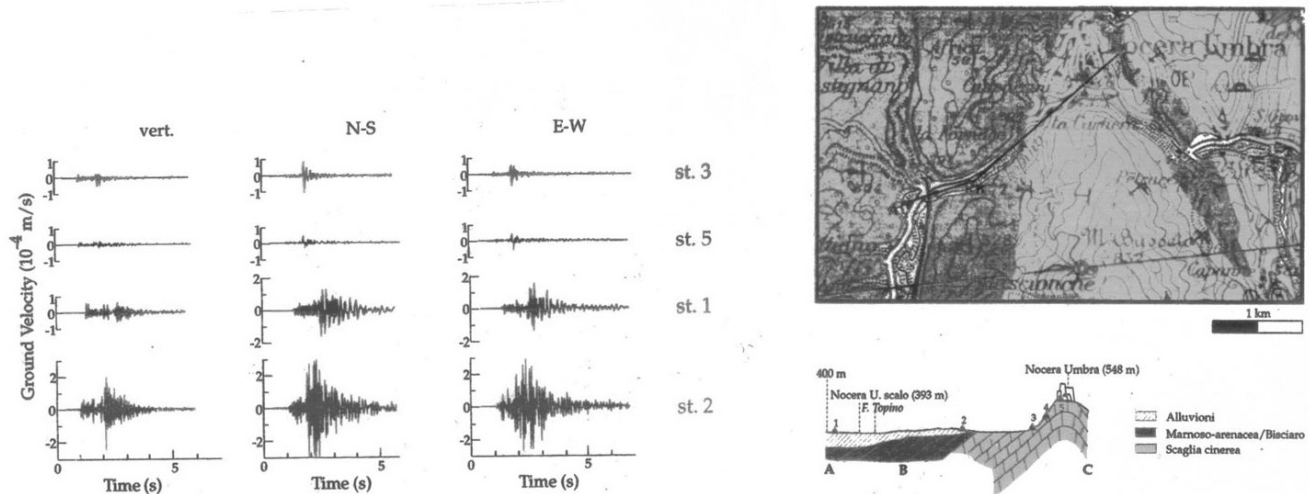


Fig. 2: Sismogrammi di uno stesso evento registrati da alcune delle stazioni mostrate nella figura in alto a destra a Nocera Umbra. (tratta da Bellucci et alii, 1998)

Seismograms of the same event registered by the stations shown in figure at Nocera Umbra site (by Bellucci et alii, 1998)

4. Possibilità di previsione degli effetti locali

Mentre quanto sopra esposto non sembra mettere in crisi alcuni operatori e scienziati professionisti del *microzoning*, alcuni altri scienziati, tra cui D.M. Boore, in una recentissima pubblicazione intitolata "*Can site response be predicted?*", (Boore, 2004) mettono addirittura in dubbio che in base alle conoscenze attuali sia possibile fornire modelli previsionali.

Da parte mia, per una serie di motivi che esporrò, sono dell'idea che una certa previsione sia possibile anche se unicamente semiquantitativa.

Innanzitutto va premesso che quello che abbiamo definito effetto locale può non essere unicamente relazionato all'accelerogramma in superficie e descritto mediante PGA, spettro di risposta, integrale di *Housner*, ma talora può derivare da durata del terremoto, da comportamento anelastico di alcuni litotipi, da alti valori di spostamento differenziale, ecc.

Pur con tutte le limitazioni che vedremo, i vari codici di calcolo di uso comune (*Quad4M*, *Shake*, *Onda*, *Dynaflow*, *Flac* ecc.), sono quanto di meglio abbiamo attualmente come strumenti previsionali. Teniamo però conto che rispetto al fenomeno fisico reale di trasferimento dell'energia sismica dal *bedrock* alla superficie, essi risultano molto primitivi, che alcune differenze possono verificarsi trattando gli stessi dati di *input* a seconda del legame costitutivo dei medesimi e a seconda che questi lavorino o per elementi o a differenze finite, e che i dati richiesti sono talora di complessa

acquisizione-determinazione.

I più importanti limiti dei codici di calcolo di corrente utilizzo in sintesi consistono:

1. Nell'impossibilità di considerare le onde superficiali (*Love*) talora molto energetiche con frequenze basse e che non derivano solo dal singolo punto ma dall'areale limitrofo.
2. Non tengono conto dei fenomeni di trasmutazione (Zoeppritz, 1919) per cui nella trasmissione dell'onda sismica in mezzi reali non necessariamente isotropi ne orizzontalmente stratificati, le onde di taglio mantengono le stesse componenti.
3. Non considerano i fenomeni di diffrazione che è facile vedere dalle prospezioni sismiche come talora siano fortemente energetici.
4. Non descrivono perfettamente i fenomeni di focalizzazione (Favali et alii, 1998).
5. Le analisi numeriche monodimensionali, data la ridotta dimensionalità, dovrebbero essere utilizzate solo in casi tanto semplici da essere adottabili molto di rado!

5. Cosa richiedono i codici di calcolo

Richiedono un terremoto di progetto compatibile per forma d'onda e picco massimo di accelerazione prevedibile in un determinato arco di tempo.

Va rilevato che non sempre metodi di studio diversi, di cui alcuni basati su dati strumentali e leggi statistiche, alcuni basati sul catalogo storico ed alcuni basati su

strutture sismogenetiche e tettonica recente, convergono sulla stessa magnitudo di terremoto massimo atteso.

Non necessariamente il contenuto spettrale di terremoti piccoli, utilizzato generalmente per la forma d'onda del terremoto di *input*, è analogo a quello del *main-shock* (Chiaruttini et alii, 1981).

Viene richiesto il decadimento del modulo di taglio dinamico e dell'attenuazione al variare della deformazione. Queste prove, eseguite con colonna risonante, taglio torsionale ciclico, taglio diretto ciclico ecc. si possono effettuare unicamente su campioni indisturbati, pertanto solo su formazioni campionabili e forniscono non sempre risultati coincidenti.

Inoltre in letteratura geofisica è noto come il parametro attenuazione, (a piccole deformazioni), sia fortemente legato a fenomeni di macroanisotropia (giunti di strato, fratture ecc.) che si sommano a quelli per microanisotropia considerati nella misura dell'attenuazione su campione.

Oltre a questi parametri i codici di calcolo richiederebbero anche i valori del Poisson dinamico, ma per

nostra fortuna questo ha un peso irrilevante nel processo, poiché sul significato ed i valori da dare a questo parametro vi sono divergenze tra la letteratura geofisica e geotecnica.

Richiedono inoltre una sismostratigrafia parametrizzata in termini di G_0 o di V_s (il parametro densità ha un peso trascurabile) ed in diverse situazioni, come vedremo, questa parametrizzazione va spinta molto più in profondità del limite usuale di 30 metri.

Altro problema di *input* in caso di faglia è rappresentato dal collegamento tra il tetto ed il letto della medesima, poiché nei due casi estremi possibili, i risultati in *output* possono essere nettamente differenti.

Relativamente ai codici di calcolo che lavorano in bidimensionale o in tridimensionale, va evidenziata l'importanza della forma delle superfici di separazione tra mezzi a caratteristiche differenti. Va da se che in questo caso la sola parametrizzazione del sottosuolo eseguita con prove puntuali, può non essere sufficiente ad una caratterizzazione geometrica producendo *output* diversi (Fig. 3).

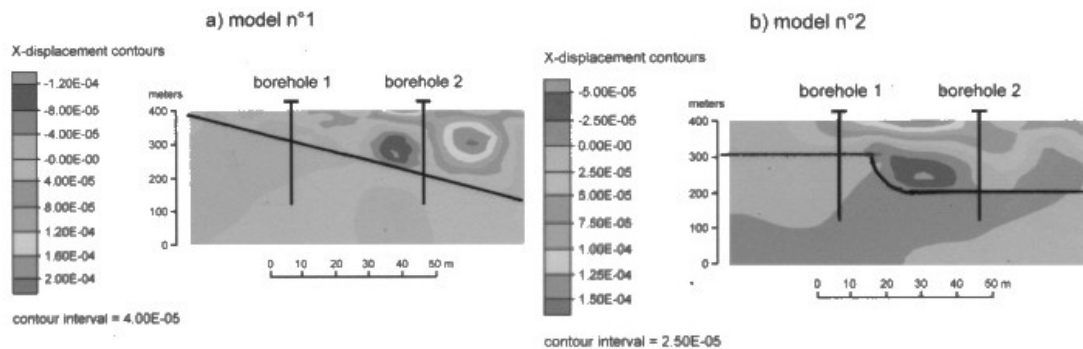


Fig. 3: Valori di massimo spostamento rilevati in due sezioni possibili e ricavate dai medesimi dati puntuali (tratta da Favali e alii, 1998) *Maximum displacement values measured at two probable and obtained sections from punctual data* (by Favali e alii, 1998)

6. Filosofia dell'intervento

Considerati i limiti metodologici sopra esposti, per ciò che riguarda la Lunigiana e la Garfagnana, aree in cui si è svolto il Progetto VEL e di cui si hanno i primi risultati, la filosofia che ci ha guidato è quella di lavorare in *back analysis*. Così tra i centri colpiti dal grande terremoto del 1920, sono stati selezionati paesi che presentavano eclatanti segni di amplificazione da effetti locali ed esattamente Fivizzano, Casola e Villacollemandina. E' stato studiato anche in *back analysis* un paese normale come Licciana Nardi (in cui dalle cronache storiche non risultavano danneggiamenti differenziati da punto a punto). Inoltre, nel senese, in Piancastagnaio, si è operato in un sito dove a seguito di un piccolo terremoto avvenuto nel 2000 di magnitudo locale ($M_L = 3,7$), alcune costruzioni presentavano un quadro fessurativo relazionabile con intensità sismiche dell'VIII-IX grado della scala EMS (Fig. 4).



Fig. 4: Effetti sul corpo centrale in area Sugherelle – Piancastagnaio (SI): le lesioni ad "x" implicano effetti dell'VIII-IX grado della scala MCS

Effects upon central body in Sugherelle – Piancastagnaio (SI) area: "x" lesions are justified by VIII-IX grade of MCS scale effects

Va segnalato che l'area era stata colpita da un terremoto locale negli anni '20 che aveva provocato gravi danni alle stesse strutture cosicché alcuni edifici erano stati abbattuti e ricostruiti con criteri antisismici almeno secondo i concetti dell'epoca. In questo sito sono state eseguite indagini finalizzate alla comprensione di questa anomalia comportamentale sicuramente ascrivibile ad effetto di amplificazione locale.

Lo scopo che si proponeva la *back analysis* era di verificare se, utilizzando al meglio le tecniche a nostra disposizione, si sarebbe potuto in qualche modo prevedere e/o quantificare l'accaduto nelle aree sopra menzionate.

7. La filosofia operativa

Per chiarire la problematica sopraesposta, è stata utilizzata la filosofia classica del VEL che prevede (Regione Toscana, 2004):

- Raccolta dati geologici, geotecnica, sismologici, di perforazione ecc.
- Rilevamento geologico-geomorfologico a scala 1:2000 – 1:5000 delle aree urbane e di quelle limitrofe
- Definizione del terremoto di riferimento.
- Definizione di sezioni significative ed indagini atte a determinarne la geometria e la relativa parametrizzazione.
- Modellazione delle medesime mediante appropriati codici di calcolo ed elaborazione dei medesimi secondo la normativa italiana ed europea.
- Eventuale taratura dei dati con misure dirette o confronto con dati macrosismici.
- Analisi dei risultati in chiave geologica-geotecnica ed ingegneristico-strutturale.
- Integrazione dati geometrici e parametrici mediante indagini integrative e modellazioni.
- Definizione delle caratteristiche di amplificazione per

l'areale di studio.

8. Considerazioni sul peso dei parametri

In generale in un progetto di *microzoning* o di valutazione degli effetti locali che dir si voglia, convergono esperti di varie discipline; geologi, sismologi, geotecnici, geofisici, modellisti, ingegneri strutturali ed ognuno di questi porta una sua specifica competenza nel produrre quei dati, parametri ed elaborazioni che concorrono al risultato finale il quale ne risulta più un prodotto che una somma.

In questa ottica un punto che vale la pena di evidenziare è che tutti i parametri non hanno lo stesso peso; così se come già detto il Poisson dinamico pesa poco così il parametro V_s pesa moltissimo, molto di più ad esempio del decadimento del modulo di taglio e relativo aumento dell'attenuazione soprattutto in condizioni di terremoti piccoli ed in situazioni di *free-field*. Così mentre è pesante il valore di picco orizzontale dell'accelerazione, più contenuto è il peso della forma d'onda soprattutto se derivato da terremoti reali Italiani con ipocentro alla medesima profondità di quella prevista per la zona ed opportunamente scalati.

D'altra parte mentre vi sono parametri determinabili con grande precisione (esempio quelli geotecnici di laboratorio), ve ne sono altri il cui grado di aleatorietà è molto più alto (esempio terremoto di *input*).

Così mentre alcune operazioni atte a ricavare determinati parametri sono codificate ed i limiti d'errore sono sufficientemente noti (esempio codici di calcolo, prove di laboratorio), altre operazioni come per esempio le prove SPT, se da una parte sono ben codificate come esecuzione, dall'altra, per la determinazione delle V_s , almeno per ciò che riguarda il contesto in cui abbiamo operato, forniscono dati completamente fasulli (Fig. 5).

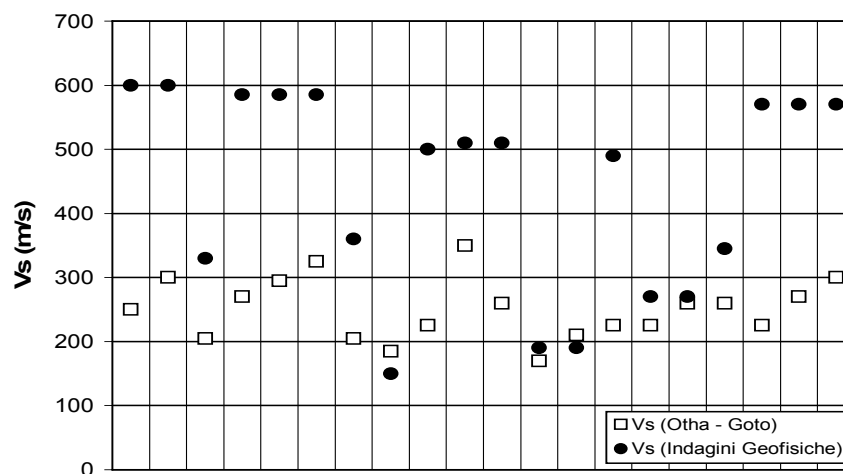


Fig. 5: Relazione tra dati di V_s misurati attraverso il DH e V_s calcolati attraverso la formula di Otha-Goto applicata ai valori di SPT eseguita su sedimenti incoerenti in località Fivizzano

Relationship between V_s down-hole measured data and V_s calculated using Otha-Goto equation applied to SPT values, carried out on incoherent sediments at Fivizzano town (MS)

Un altro punto da mettere in evidenza è che se esistono talora situazioni geologiche che consentono una buona estrapolazione del dato (esempio Vs), ve ne sono altre in cui purtroppo bisogna aumentare la densità di indagine per avere risultati accettabili.

Da tutta questa serie di punti commentati, emerge che l'esecuzione di un buon programma di valutazione degli effetti locali è qualche cosa di più della somma delle competenze delle singole discipline ed anche nella raccolta dati va sempre tenuto conto che i parametri più pesanti sono il terremoto di *input* e le sismostratigrafie in Vs. Così mentre il terremoto appropriato di *input* è per sua natura determinabile a livello probabilistico, il parametro Vs dovrebbe essere almeno in teoria di tipo deterministico. Nonostante ciò è proprio sulla quantificazione di questo parametro che si sono verificati i più eclatanti errori di misura-stima che hanno portato passati e purtroppo anche recenti lavori di *microzoning* ad essere errati o nella migliore delle ipotesi a risultare completamente aleatori e pertanto di portare alcuni autori a dubitare della possibilità di poter determinare gli effetti di sito (Boore, 2004).

9. Sintesi delle principali metodologie di misura delle Vs

Innanzitutto bisogna tenere presente che ricavare mediante "opportune formulette" dai valori di Vp le Vs (operazione purtroppo molte volte vista nel mondo professionale e talora scientifico italiano) significa ignorare cinquanta anni di letteratura scientifica specifica con le conseguenze che tutto ciò che poi ne deriva in termini di modellazioni non è che quello che nella letteratura anglosassone viene definito "garbage".

Tralasciando i metodi di misura della Vs di laboratorio su campioni perché poco rappresentativi, escludiamo che con le SPT e talora con le Cu si possono ricavare (forse ad eccezione di qualche sito estremamente specifico) qualsiasi informazione inerente la Vs; infatti, se a priori si conoscesse la Vs e conseguentemente la tangente alla parte iniziale del rapporto sforzo-deformazione, che in qualche modo la Vs rappresenta, nessun geofisico si sognerebbe mai di poterne ricavare parametri a rottura. Il processo inverso chiaramente, a mio avviso, è altrettanto aleatorio.

Prima di addentrarci nelle metodologie correntemente utilizzate per la determinazione di questo parametro e spesso comparate tra loro, vale la pena di riflettere su due punti chiave ed esattamente:

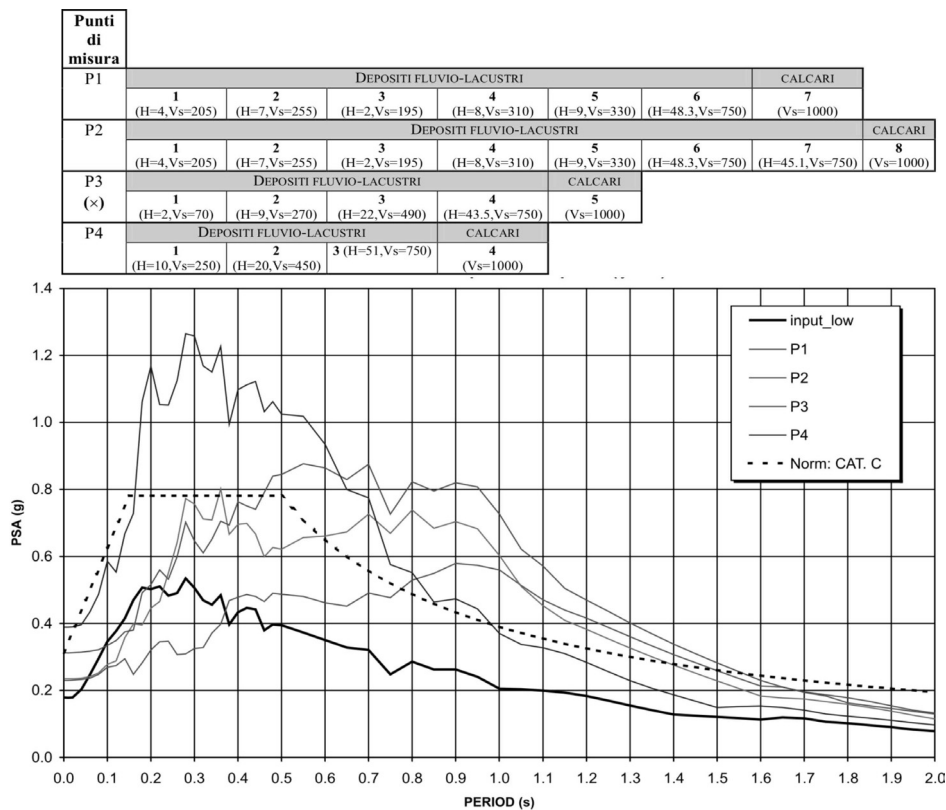


Fig. 6: Confronto tra sismostratigrafie e spettri di risposta in località Isernia e relazionati agli effetti di un terremoto di input lontano ed opportunamente scalato
Comparison between seismic stratigraphies and response spectra at Isernia and their relationship to far input earthquake effect coherently scaled

- Che vi sono alcune situazioni in cui la media delle Vs in certi intervalli produce circa gli stessi effetti di amplificazione rispetto ai dati scorporati (Vs, h), ma vi sono altre situazioni in cui la media non è rappresentativa dell'output (Fig. 6).
- Che mentre in alcune situazioni il limite dei primi 30 metri di profondità è sufficiente per la determinazione del fenomeno di amplificazione, in altre situazioni purtroppo risulta necessaria la conoscenza sismostratigrafica di circa un centinaio di metri (Fig.6).
- Esiste poi un terzo punto forse addirittura più importante di quelli sopra esposti che è quello relativo all'anisotropia del terreno in termini di Vs.

Il metodo più esatto per la determinazione di questo parametro e delle sue variazioni nonché più risolutivo ed a prova d'errore almeno a livello teorico è indubbiamente quello costituito dalla sismica a riflessione in SH della quale esiste ormai una notevole bibliografia sull'argomento (Bachrach et alii, 1998; Gasperini et alii, 1983, 1990, 1994; Knapp, 1986; Milkereit, 1986; Palestini, 1988).

Per ciò che riguarda questo tipo di prospezioni, se mirate come nel nostro caso ad obiettivi più superficiali, esistono però dei limiti ed esattamente:

- se il sistema terreno è sensibilmente eterogeneo ed anisotropo, risulta impossibile fare lo *stacking* dei "raggi dei percorsi" molto differenti e pertanto bisognerà ridurre il *move-out* funzione della distanza massima punto di energizzazione-geofono.
- Se si riduce il *move-out* le iperboli di riflessione perdono di definizione con la profondità e pertanto il sistema è in grado di fornire informazioni unicamente sulle velocità dei livelli più superficiali (spero sia noto che la velocità per la quale le iperboli corrette danno luogo ad uno strato sismico è la velocità del pacchetto sovrastante, da cui l'affermazione che il metodo sia a prova d'errore).

La figura 7 mostra esempi di sezioni in sismica a riflessione in SH in terreni sufficientemente omogenei (Fig. 7a e 7b), e in situazioni estremamente disomogenee (Fig. 7c e 7d).

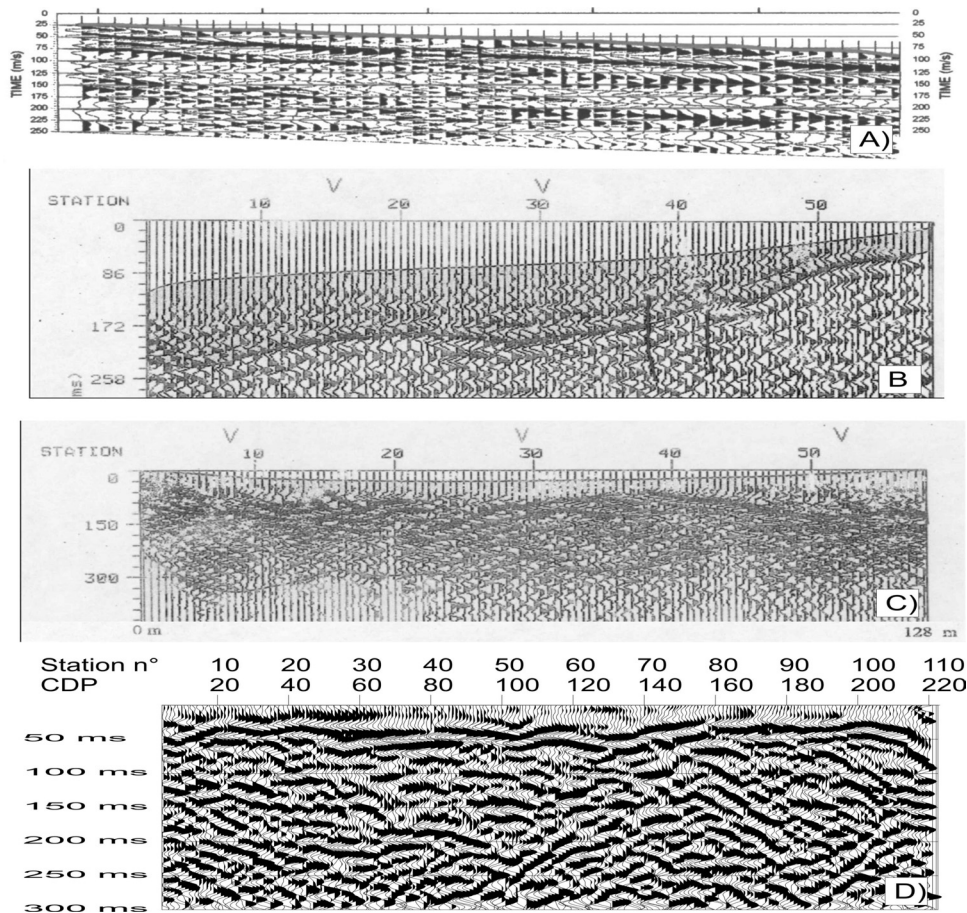


Fig. 7: Esempi di sezioni di sismica a riflessione in onde SH in terreni omogenei (a: Grecia, b: Fabriano quartiere Spina) e in terreni non omogenei (c: Fabriano quartiere Spina, d: Terrarossa-Lunigiana); nella figura a si può apprezzare la buona continuità dei riflettori per l'intera sezione

Example of SH waves seismic reflection sections in homogeneous soils (a: Greece, b: Fabriano quartiere Spina) and in not-homogeneous soils (c: Fabriano quartiere Spina, d: Terrarossa-Lunigiana); note in figures a and b the good continuity of reflectors in the whole section

E' chiaro che nel primo caso potrò utilizzare grandi *move-out*, estrapolare al meglio indagini puntiformi così come potrò utilizzare con buoni risultati tutti i metodi basati sulla propagazione e caratteristiche delle onde di *Rayleigh* ed al limite utilizzare metodi di registrazione passiva che presuppongono per la loro inversione un modello a strati piano-paralleli.

Problemi operativi piuttosto consistenti nell'utilizzo delle metodologie sopra descritte li risconterò viceversa nel secondo caso dove l'eterogeneità in termini di Vs è marcata; in questo caso ed in casi consimili è stato da noi valutato che il sistema operativo più adatto e più applicabile nonostante i forti limiti intrinseci sarebbe stato quello di operare con la sismica a rifrazione in SH (e P) acccontentandoci in questo caso di un dato che, seppur

abbastanza mediato, risulta meno influenzato dalle variazioni laterali della Vs ma che in ogni caso misura di questo parametro e non velocità di onde superficiali la cui trasformazione in valori di Vs può essere, per mezzi porosi e granulari, non così precisa come la trattazione classica potrebbe suggerire. Queste prospezioni vengono tarate su indagini in foro che nel caso specifico sono state prove *Down-hole* (DH) eseguite con gli opportuni accorgimenti (Regione Toscana, 2004). Questi opportunamente interpretati nonché integrati con tecniche VSP (Fig. 8) ci hanno permesso tra l'altro di valutare l'applicabilità della tecnica di sismica a rifrazione da noi utilizzata sia come metodo di correlazione dei DH sia come sistema operativo autonomo.

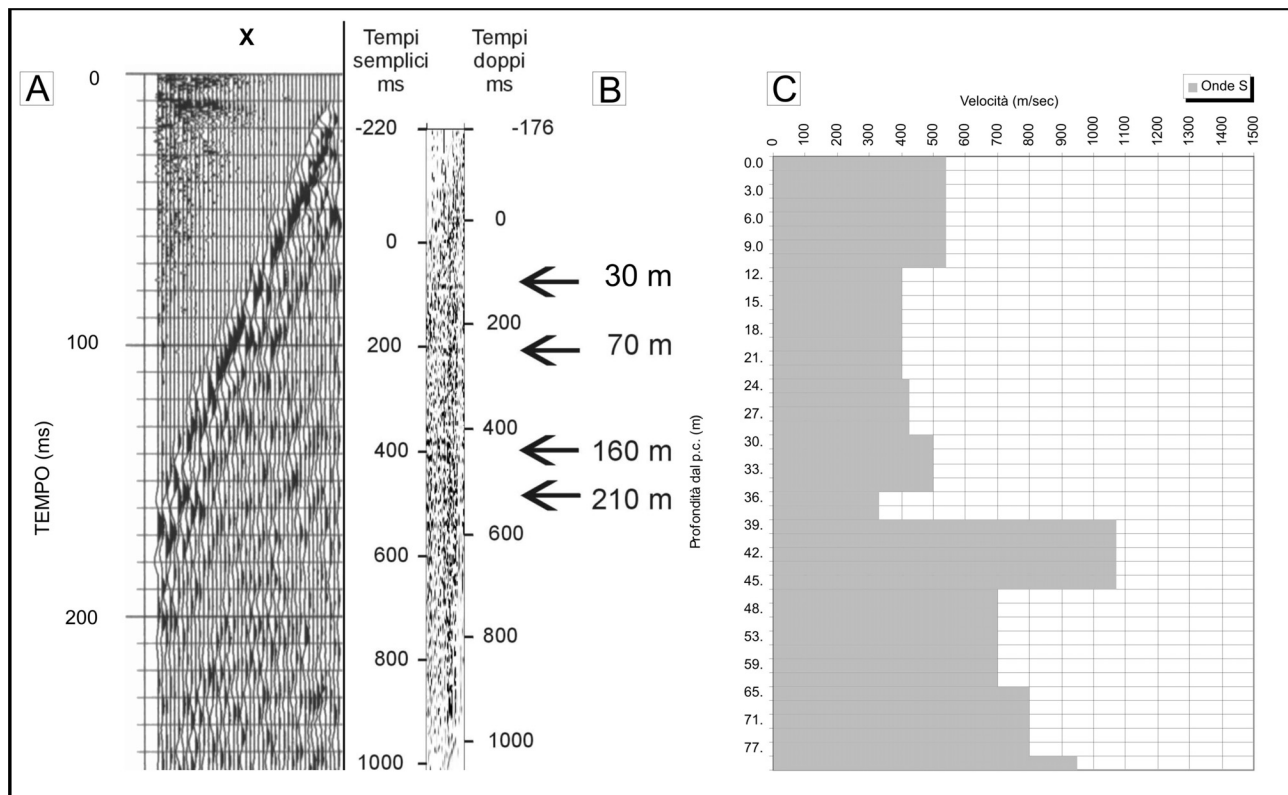


Fig. 8: Esempi di DH con relativo VSP: A) sismogramma down-hole; B) sezione VSP derivata da A; C) velocità ricavate da A. (tratta da Signanini et alii, 2001)

DH test examples with relative VSP: A) down-hole seismogram; B) VSP section derived from A; C) calculated velocity from A. (by Signanini et alii, 2001)

Vale la pena segnalare che una buona acquisizione in SH richiede molta più cura di una acquisizione eseguita con onde superficiali e che particolare accortezza deve essere rivolta ai sistemi di energizzazione per generare SH pure sia operando in rifrazione ma soprattutto in riflessione.

Una prima elaborazione comparata tra dati di sismica a rifrazione rispetto a quelli dei DH ha fornito, in Garfagnana-Lunigiana, buona corrispondenza per oltre il 90% dei casi.

La scelta di utilizzare la metodologia dei DH rispetto a quella dei *Cross-hole* come talora suggerito (norma ASTM)

non è unicamente dettata da problemi di costo ma soprattutto da due motivi tecnici ed esattamente:

- l'energizzazione in superficie permette di generare onde SH sufficientemente pure e di ridurre perciò i problemi di trasmutazione cosa impossibile in foro dove l'energizzazione in SV dei *Cross-hole* non garantisce che i primi arrivi siano ad intero percorso SV.
- Il fenomeno dei primi arrivi rifratti è molto più controllabile con i DH (Gasperini et alii, 1983) che con i *Cross-hole*. Un esempio di quanto affermato si può

desumere dal percorso dei raggi sismici visibile in una classica tomografia in un mezzo reale (Fig. 9).

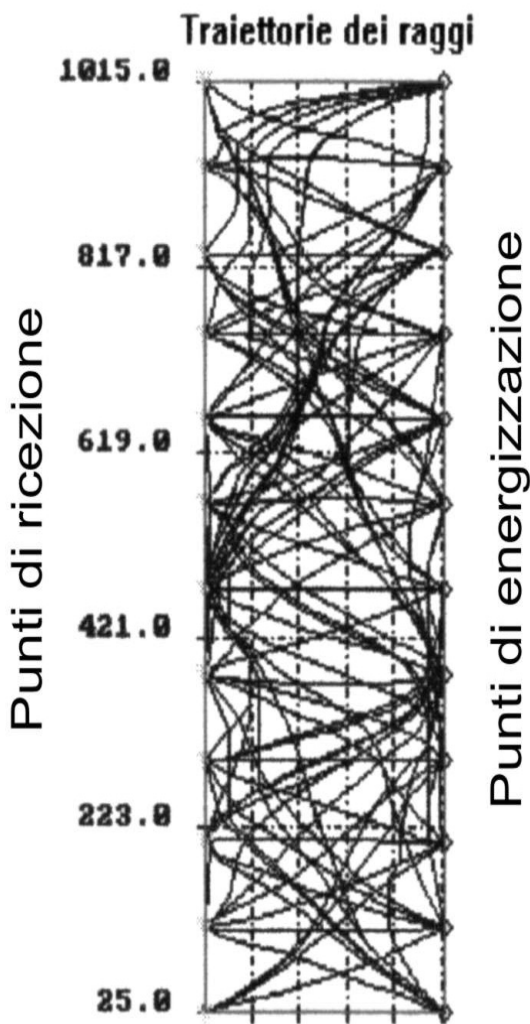


Fig. 9: Esempio di percorso dei raggi sismici in un mezzo interessato da prospezione tomografica (tratta da Pasculli et alii, 2002)

Example of seismic ray-paths in a medium interested by tomographic prospection (Pasculli et alii, 2002)

Come già sopra espresso le tecniche di prospezione e parametrizzazione in Vs da noi sperimentate sono state tutte quelle sopra descritte, ma quelle che sono state più utilizzate estensivamente sono sismica a rifrazione in P ed SH, DH e VSP, sismica a riflessione generalmente in SH.

10. Primi risultati

Con le premesse e le metodologie sopra descritte, abbiamo operato su quei centri campione con un controllo in *back-analysis* utilizzando per la verifica quelli che sopra abbiamo definito metodi diretti e metodi a posteriori.

Il terremoto che ha colpito il paese di Fivizzano nel 1920 e che ha mietuto un centinaio di vittime nelle aree della Lunigiana e Garfagnana, è un terremoto sfortunatamente pre-strumentale ma è stato descritto con grande accuratezza negli effetti da diversi autori. Il quadro macrosismico di questa località ha mostrato che la totalità dei collassi, perciò delle vittime, (una cinquantina) e dei danni gravi che hanno portato alla ricostruzione del paese, erano tutti concentrati in una specifica area che geologicamente presentava un potente pacchetto alluvionale. Là dove il terrazzo alluvionale perdeva di spessore, il danneggiamento risultava molto più ridotto così che in alcune frazioncine limitrofe al paese (Motta) il terremoto aveva causato danni così lievi che detti siti non erano stati ammessi ai finanziamenti per la ricostruzione.

Situazione inversa per Casola in cui il centro aveva subito pochissimi danni mentre una frazione limitrofa (Vigneta) era stata completamente distrutta dal sisma che aveva ivi causato una decina di morti.

Sempre sull'ordine della decina di morti si erano verificati a Villacollemandina località peraltro molto distante da Fivizzano (oltre una cinquantina di chilometri) in cui una parte del paese era stata fortemente colpita mentre una restante parte aveva avuto danneggiamenti molto più lievi e frazioni limitrofe quali Comino avevano risentito molto poco del terremoto.

Il paese "normale" e rappresentativo risulta Licciana Nardi che, sebbene distante solo una quindicina di chilometri dalla zona epicentrale (Fivizzano-Sassalbo), subiva risentimenti molto più contenuti come la quasi totalità dei paesi limitrofi a Fivizzano.

Sia a Licciana Nardi che a Fivizzano nonché a Casola e Casola Vigneta ed a Villacollemandina si è operato come sopra descritto; alcuni risultati delle ricerche in questi centri sono stati pubblicati o in via di pubblicazione.

Volendo sintetizzare i risultati raggiunti possiamo dire che a Fivizzano, nelle aree in cui si è avuto il massimo delle distruzioni che geologicamente corrispondono a quelle con spessore di alluvione più elevato (circa 30-40m) e con presenza di un orizzonte rigido sottostante, i modelli sia monodimensionali che bidimensionali hanno mostrato il massimo di amplificazione. Man mano che lo spessore di queste alluvioni diminuiva sia la carta dei danni che la modellazione coincidevano mostrando amplificazioni più basse e soprattutto frequenze più elevate di quelle pericolose per gli edifici, cosicché le frazioni quali Motta rimaste illese, corrispondevano, in modellazione, ad aree non amplificate (Fig. 10).

La stessa situazione geologica rilevata trova la sua corrispondenza in località Vigneta dove il grosso pacchetto di alluvioni, analogamente a Fivizzano centro, spiega la severità dei danni, inversamente da Casola dove il *bedrock* più superficiale ha prodotto un risentimento minore. La modellazione ivi eseguita conferma il dato macrosismico.

Relativamente al paese di Licciana Nardi, in figura 11 vengono mostrati i risultati della modellazione.

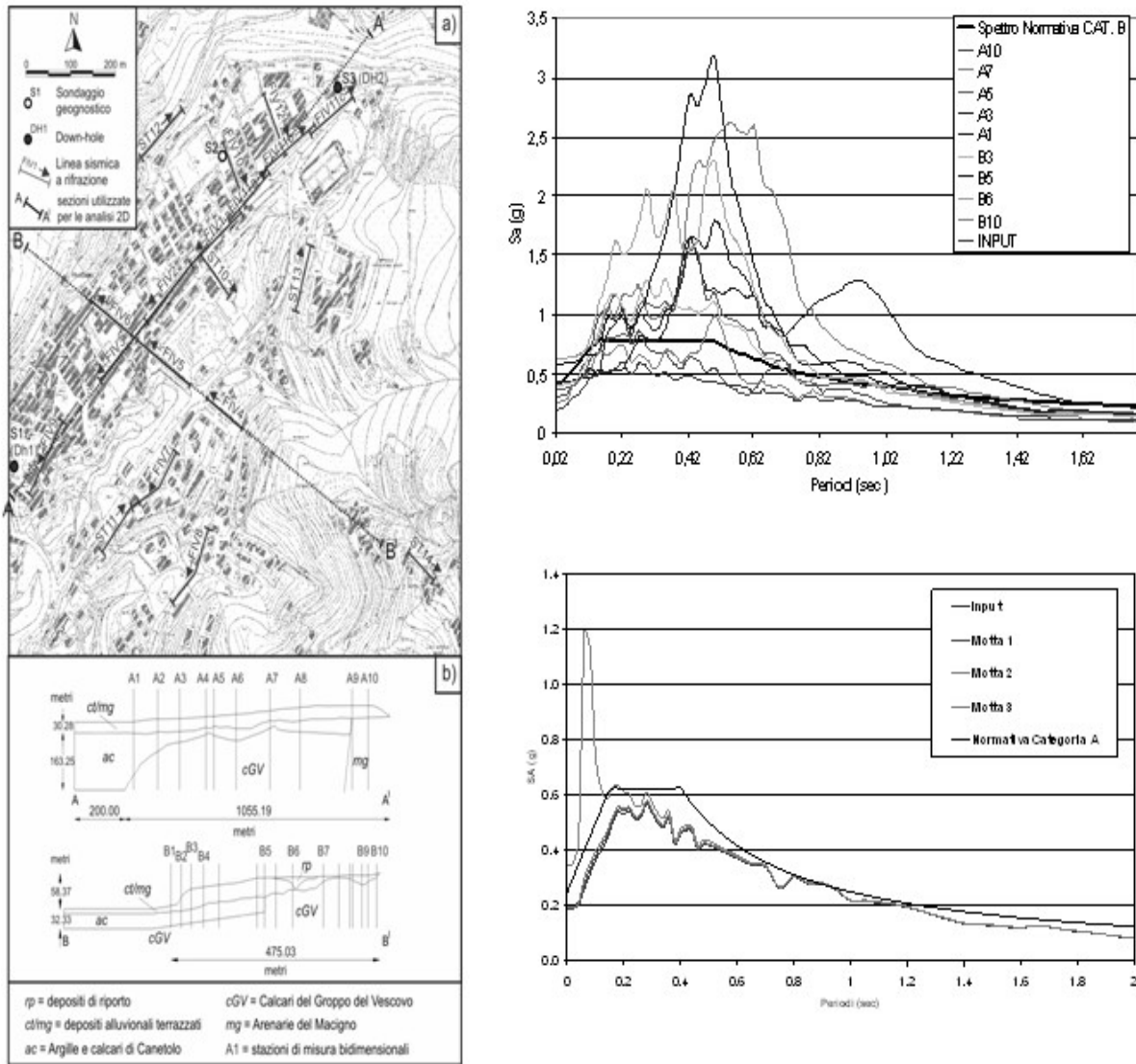


Fig. 10: a: ubicazione delle indagini in località Fivizzano; b: schema della modellazione bidimensionale; c: spettri di normativa e spettri di risposta relativi al terremoto di input in località Fivizzano centro; d: spettri di normativa e spettri di risposta relativi al terremoto di input in località Motta.

Ubication of survey carried out at Fivizzano town(MS); b: 2D modelling schematic section; c: normative spectra and relative response spectra for input earthquake at Fivizzano centro; d: normative spectra and relative response spectra for input earthquake at Motta

Se comparati con quelli di Fivizzano centro è facile osservare come le amplificazioni relative alle frequenze pericolose siano molto meno forti; anche in questo caso si è provveduto ad operare in *back-analysis* ma purtroppo o per fortuna non potendo utilizzare i dati macrosismici per tararci (secondo le cronache il livello di danneggiamento è stato abbastanza uniforme per tutto il paese), è stato installato un sistema di misura diretta di amplificazione mediante *arrays* di cui un sensore su roccia. I risultati di detta operazione facente parte del programma VEL, e descritti in dettaglio da Eva et alii, 2005, ben combaciano con quanto previsto dai metodi indiretti di modellazione del paese.

Sempre in Licciana Nardi la sperimentazione eseguita

(sempre in ambito VEL) con tecnica Nakamura e con rumore passivo ha fornito risultati comparabili con quelli precedentemente commentati (Eva et alii, 2005).

Per ciò che riguarda viceversa Villacollemandina, pur essendo la sperimentazione ancora in corso, i primi risultati ottenuti attraverso modellazioni monodimensionali mostrano amplificazioni basse (Fig. 12) ed incapaci di spiegare le forti distruzioni localizzate verificatesi a seguito del terremoto del 1920. Ciò nonostante che per lo studio del paese si sia operato non solo con le tecniche usuali del VEL ma altresì con metodologia SASW, con tecniche di rumore passivo e metodologie di tipo geoelettrico.

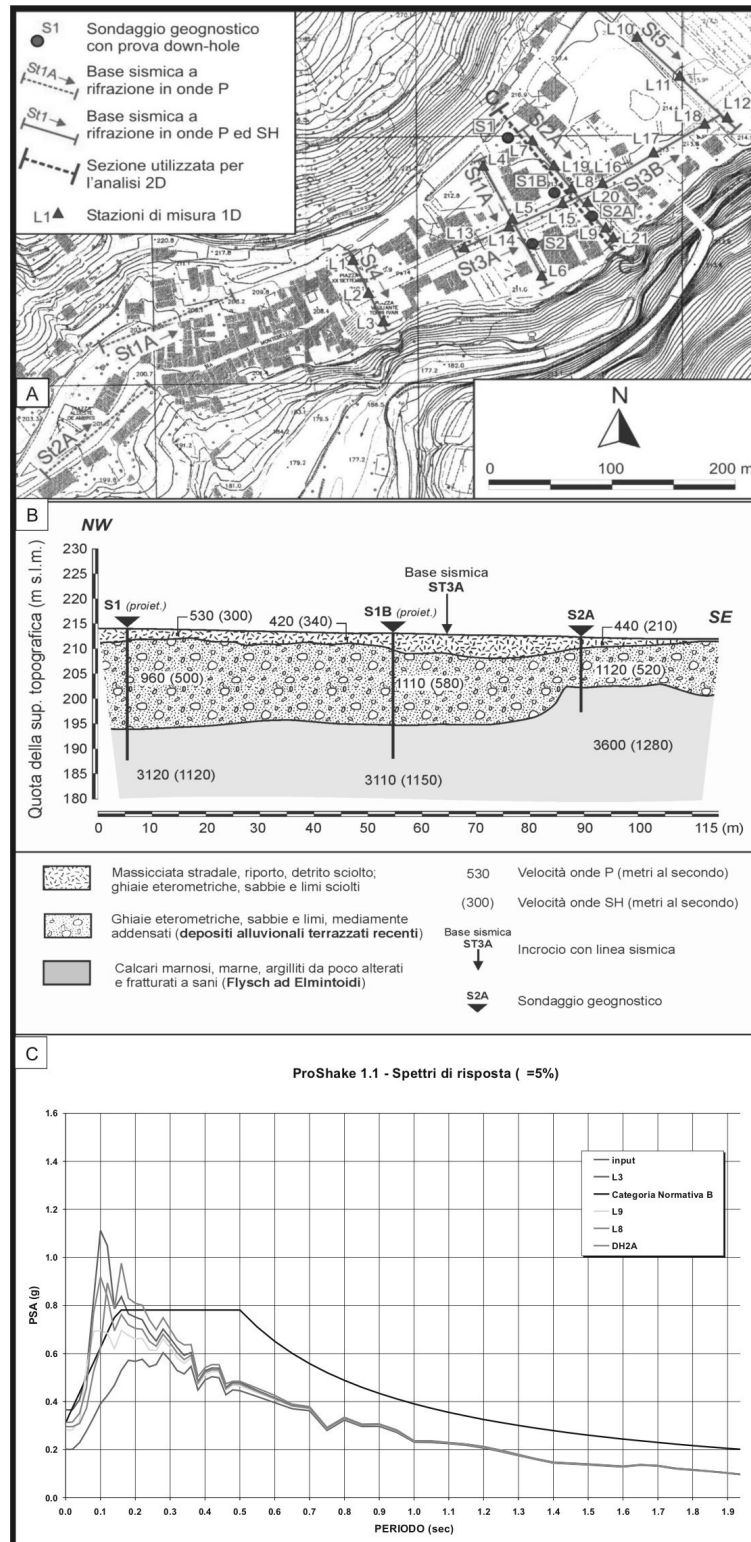


Fig. 11: a) ubicazione delle indagini in località Terrarossa; b) sezione di V_p e V_s del profilo sismico a rifrazione; c) spettri di normativa e spettri di risposta relativi al terremoto di input ed ai punti S1, S1B e S2A
 Ubication of survey carried out at Terrarossa site; b) V_p and V_s sections of refraction seismic profile; c) normative spectra and response spectra relatives for input earthquake at points S1, S1B e S2A

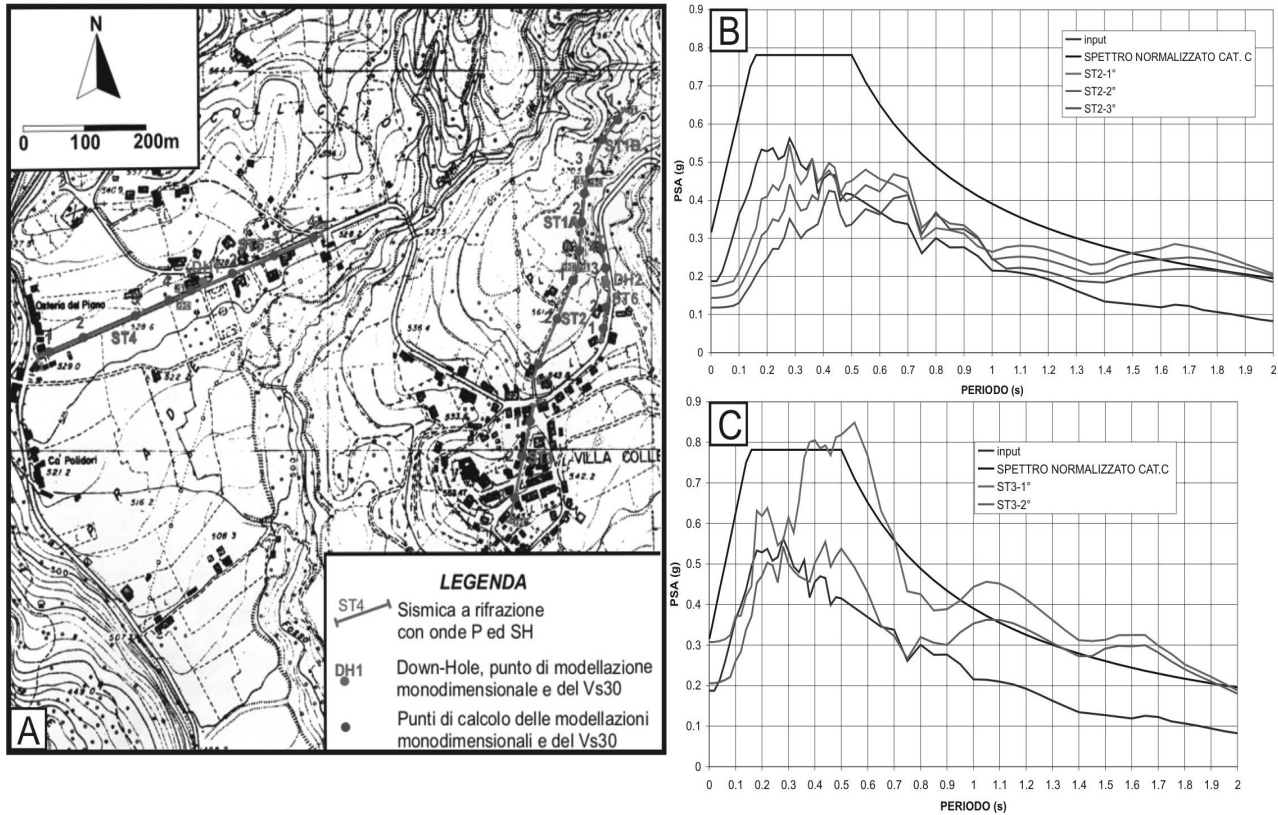


Fig. 12: a: ubicazione delle indagini in località Villacollemandina; b, c: spettri di normativa e spettri di risposta relativi al terremoto di input

Ubication of survey carried out at Villacollemandina; b,c: normative spectra and response spectra relatives for input earthquake

Relativamente a quanto sopra detto circa le amplificazioni di sito, la figura 13 mostra che anche l'analisi eseguita in termini di FA (Housner) conferma pienamente quanto espresso sopra circa il peso degli effetti locali nei tre siti analizzati di Fivizzano, Liciana Nardi e Villacollemandina.

Altro caso di lampante incongruenza tra risultati della modellazione ed effetti macrosismici è rappresentato dal terremoto di Piancastagnaio con limitate aree a forte risentimento. In particolare, in relazione al Podere Sugherelle, che presenta il quadro fessurativo già mostrato in figura 4, i dati modellati hanno fornito agli estremi dell'edificio risposte equivalenti ed in ogni caso basse amplificazioni confermando così scarsa relazione tra effetto macrosismico e risultato della modellazione (Fig. 15).

Per tentare di capire la causa prima di questi effetti di amplificazione anomali si operato con sismica a riflessione in SH (Fig. 14) che ha confermato la presenza di fagliazione interessante l'edificio in oggetto peraltro già ipotizzata precedentemente in base ad analisi fotogeologica.

Si è arrivati così alla conclusione, nel caso specifico e relativamente ad altre situazioni nell'area di Piancastagnaio, che gli effetti locali rilevati erano da ascrivere a problemi di fagliazione (Fig. 14).

In quest'ottica si sta procedendo per Villacollemandina

cioè operando con tecniche in grado di avere una migliore ricostruzione del sottosuolo (sismica a riflessione) per tentare di focalizzare al meglio i fattori implicati. Questi sono generalmente definibili solo a livello qualitativo per quanto sopra esposto circa i limiti dei codici di calcolo, ma talora possono essere suscettibili di modellazione come in caso di fagliazione fornendo al modello informazioni- ipotesi sul grado di collegamento tra i blocchi. Proprio sul problema di faglie e fagliazioni vale la pena soffermarsi; infatti l'esperienza del progetto VEL ci ha permesso di vedere come male sia stato affrontato questo problema sia a livello scientifico che legislativo. In particolare alcune faglie, definite in letteratura attive e addirittura sismogenetiche, centrate attraverso metodologie geofisiche e perforate passando dal tetto di una formazione al tetto dell'altra, (questa operazione è stata eseguita ben cinque volte con faglie sepolte), mostrano fenomeni di cementazione o addirittura presenza di calcite spatica, segno evidente di inattività. In altre situazioni faglie, peraltro non evidenziate in letteratura geologica, vengono individuate attraverso la geofisica, che evidenzia gradini di sblocco delle alluvioni oloceniche; la presenza di queste è confermata attraverso la perforazione che individua livelli metrici di milonite.

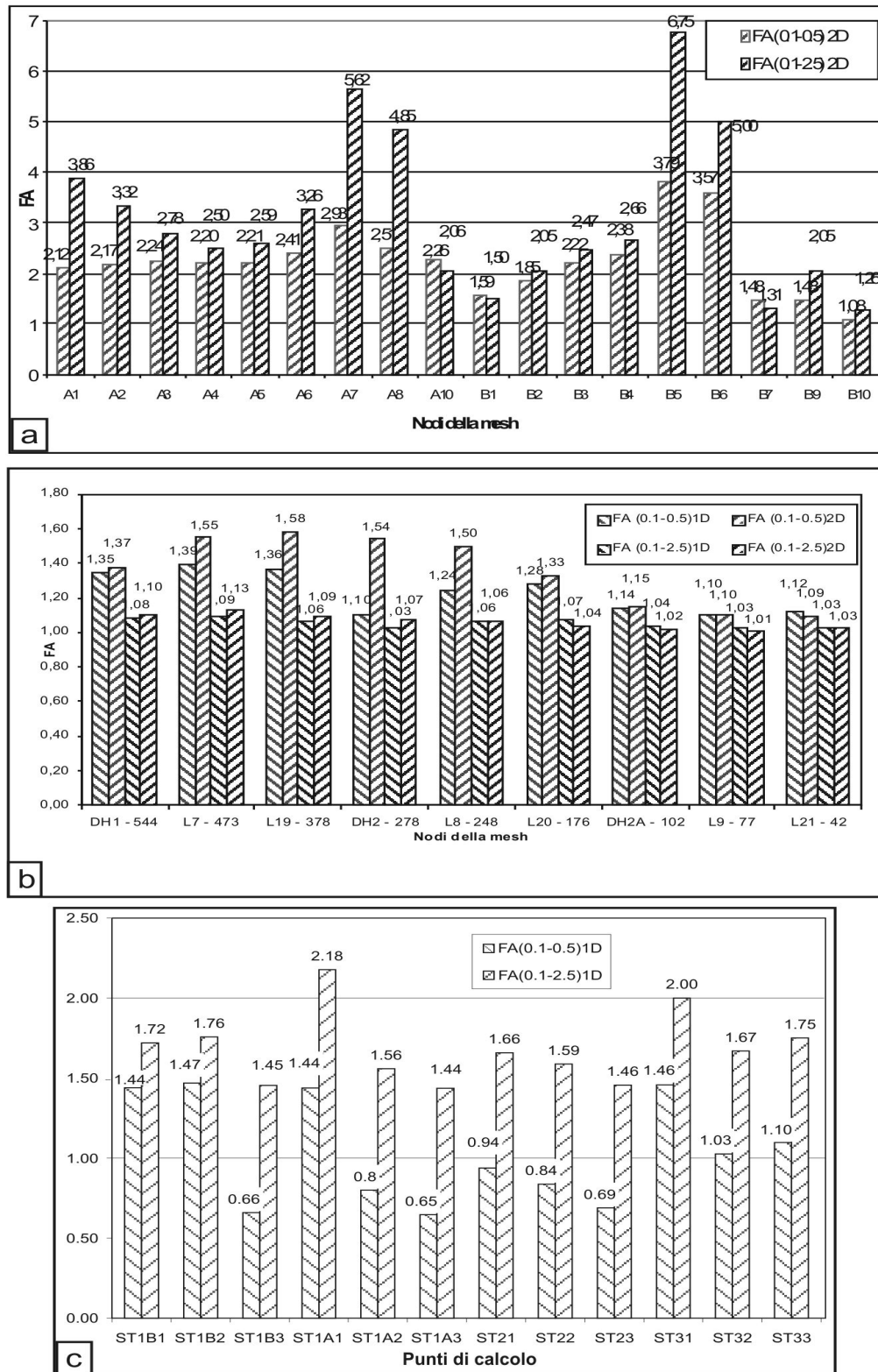


Fig. 13: Fattori di Amplificazione a confronto nei siti a) Fivizzano, b) Licciana Nardi, c) Villacollemandina
 Comparison between amplification factors in different sites at a) Fivizzano, b) Licciana Nardi, c) Villacollemandina

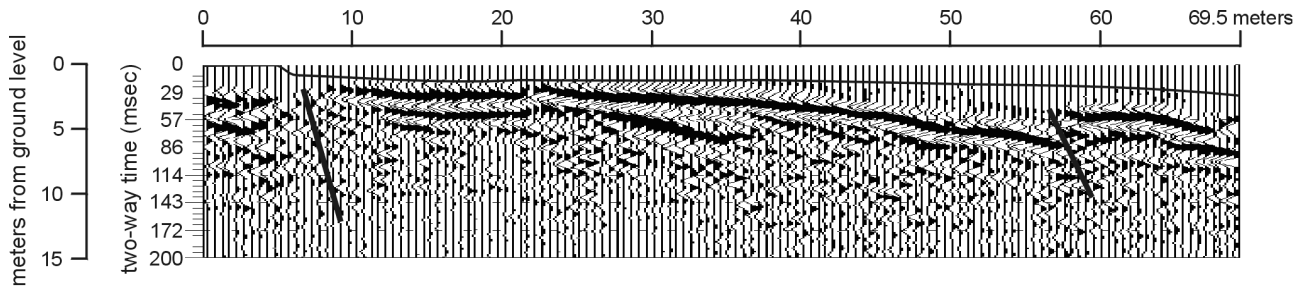


Fig. 14: Sezione sismica in onde SH in loc. Piancastagnaio (SI)
SH-waves seismic section at Piancastagnaio (SI)

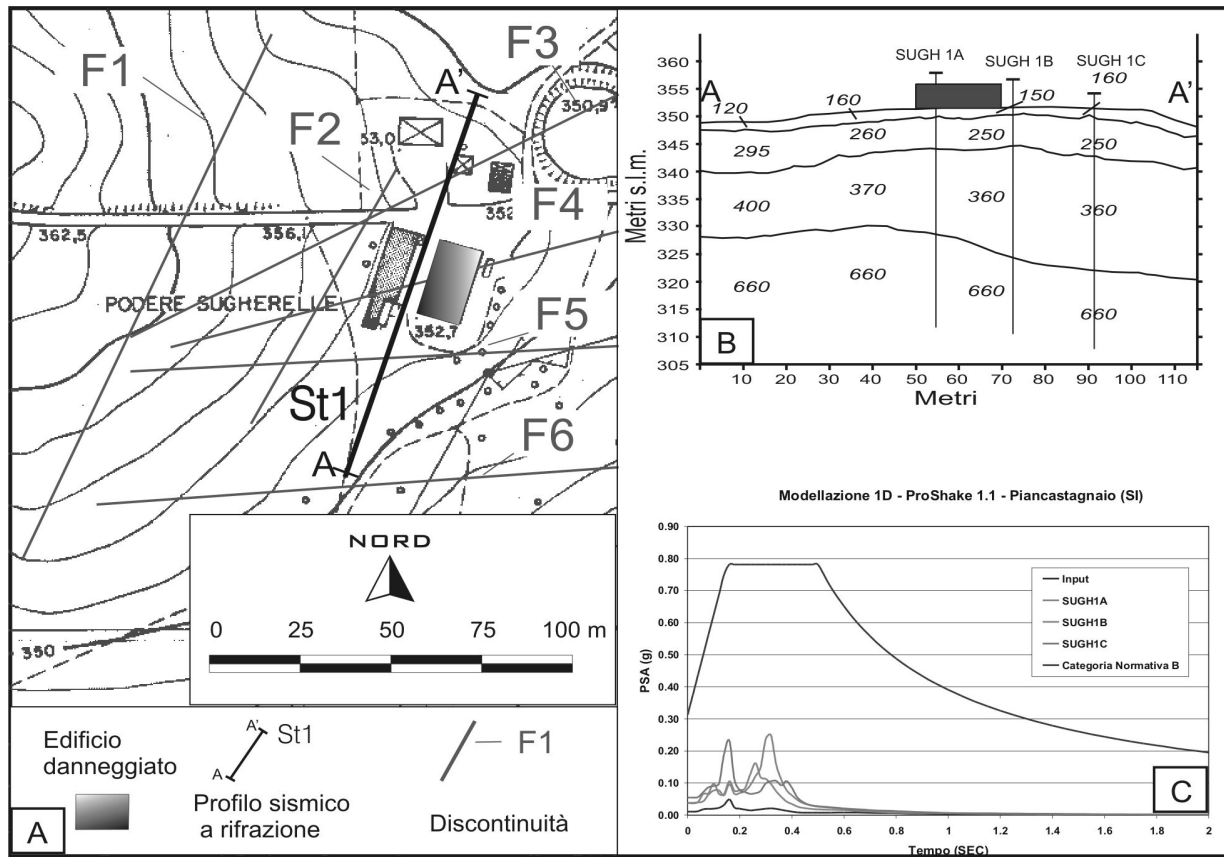


Fig. 15: a: ubicazione delle indagini in località Sugherelle (Piancastagnaio); b: sezione di Vs del profilo sismico a rifrazione St1; c: spettri di normativa e spettri di risposta relativi al terremoto di input ed ai punti SUGH 1A, SUGH 1B e SUGH 1C
a: Ubication of survey carried out at Sugherelle (Piancastagnaio); b: Vs section of St1 seismic refraction profile; c: normative spectra and response spectra relatives for input earthquake at points SUGH 1A, SUGH 1B e SUGH 1C

11. Conclusioni

I risultati da noi illustrati mostrano che su quattro siti della Lunigiana e Garfagnana analizzati in *back-analys*, per tre di questi la modellazione utilizzata ha dato buoni risultati almeno in termini qualitativi. Per ciò che riguarda i termini quantitativi del problema, mentre per Licciana Nardi è stato vista una buona corrispondenza tra metodi indiretti e diretti, per Fivizzano la deamplificazione di alcune aree e l'amplificazione di altre ha ben evidenziato soprattutto nella

modellazione bidimensionale amplificazioni di tre-quattro volte in termini di spettri di risposta che a mi avviso o sono in linea o addirittura sottostimano gli effetti di sito reali. Stesso discorso vale per Casola e Vigneta.

In ogni caso va rilevato che per alcune aree di Fivizzano possono verificarsi in caso di terremoto analogo a quello del 1920, accelerazioni orizzontali maggiori di quelle previste per l'antica prima categoria.

Va inoltre rilevato che se si fosse operato

esclusivamente secondo quanto previsto dal V_{s30} (Testo Unico-Ordinanza), mentre a Licciana Nardi gli effetti locali sarebbero stati valutati correttamente, per ciò che riguarda Fivizzano e Vigneta essi sarebbero stati fortemente sottostimati.

Sempre su Fivizzano, per ciò che riguarda le faglie, se ci si fosse accontentati di dati bibliografici si sarebbe in qualche modo dovuto vincolare un'area che peraltro, non avendo mostrato particolari risentimenti a seguito del terremoto del 1920, solo dopo indagini dettagliate è stata appurato non presentare elementi di pericolosità legati a questo fattore.

Per ciò che riguarda il quesito se può essere prevista l'amplificazione di sito (Boore, 2004), la risposta del sottoscritto è sì se la procedura con cui si opera è corretta ed adeguata al sistema, e si soprattutto perché gli effetti locali

valgono molto. No se si opera con terremoti di progetto fasulli, a scala inadeguata, non tenendo conto che un corretto modello di sottosuolo è condizione basilare di ogni successiva operazione, che generalmente l'eterogeneità del primo sottosuolo è la regola e che la densità di indagine è condizionata da questo fattore.

E' chiaro che la previsione per tutto quanto esposto può avvenire solo al livello semiquantitativo e dovrebbe essere altrettanto chiaro che eventuali miglioramenti della capacità di previsione sono oltre che legati a raffinamento di codici di calcolo, al miglioramento delle tecniche di prospezioni-parametrizzazione, ad una migliore definizione del parametro attenuazione e ad una maggior conoscenza delle proprietà dei mezzi porosi soprattutto quando questi sono di natura granulare.

Bibliografia

- Bachrach, R. & Nur, A., 1998. High-resolution shallow-seismic experiments in sand. Part I: Water table, fluid flow and saturation. *Geophysics*, 63, 1225-1233.
- Bard P.Y., Bouchon M., 1985a. The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. *Bull. Seism. Soc. Of America*, Vol. 75.
- Bard P.Y., Tucker B.E., 1985b. Underground and ridge site effects. A comparison of observation and theory. *Bull. Seism. Soc. Of America*, Vol. 75.
- Bard P.Y., Gabriel J.C., 1986. The seismic response of two-dimensional deposits with large vertical velocity gradients. *Bull. Seism. Soc. Of America*, Vol. 76.
- Bard P.Y., 2002. Les effet de site de la cuvette grenobloise. *Risques Infos*, 13.
- Bellucci F., Caserta A., Cultrera G., Donati S., Marra F., Mele G., Palombo B., Rovelli A., 1998. Studio dell'amplificazione locale nell'area di Nocera Umbra. Studi preliminari sulla sequenza sismica dell'Appennino Umbro-Marchigiano del settembre-ottobre 1997, Istituto Nazionale di Geofisica, Roma.
- Boore D.M., 2004. Can site response be predicted?. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 8, Special Issue 1 (2004) 1-41, Imperial College Press.
- Broili L., 1977. La zonizzazione geologico-tecnica del territorio. *Rassegna tecnica del Friuli Venezia Giulia*, Rivista bimestrale, anno XXVIII settembre-ottobre 1997.
- Broili L., Carraio F., Cucchi F., Onofri R., Stefanini S., Ricciardi F., Comune di Gemona del Friuli, 1980. Studio geologico per la ricostruzione. *Tipogr. Nazion. Trieste*.
- Cherubini C., D'Intinosante V., Ferrini M., Rainone M.L., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Signanini P., Vessia G., 2004. Valutazione della risposta sismica locale attraverso l'applicazione di metodologie multidisciplinari comparate: gli esempi di Fivizzano e Licciana Nardi (Toscana Settentrionale). XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova 25-29 gennaio 2004.
- Cherubini C., D'Intinosante V., Ferrini M., Lai C., Lo Presti D.C., Rainone M.L., Signanini P., Vessia G., 2004. Problems associated with the assessment of local site effects through a multidisciplinary integrated study: the case of Fivizzano's town (Italy). Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, New York, April 13-17 2004.
- Chiaruttini C., Siro L., 1981. Analisi spettrali massimizzate degli accelerogrammi del Friuli del 1976. *Rend. Soc. Geol. It.*
- Eva C., Carezzo G., Ferretti G., Pasta M., Spallarossa D., Zumino E., 2005. Realizzazione di rete di monitoraggio sismico nonché attività di studi e ricerche per la valutazione della pericolosità sismica, in aree produttive campione dei comuni della Garfagnana e Lunigiana ai fini della valutazione del rischio sismico e criteri di mitigazione, nell'ambito del programma DOCUP 2000-2006. Convenzione tra la Regione Toscana e il Dipartimento per lo studio del Territorio e delle Sue Risorse, Università degli Studi di Genova, rapporto intermedio, 2° Relazione Attività, giugno 2005.
- Favali P., Rainone M.L., Sciarra N., Signanini P., 1998. Examples of site soil response induced by the 1997 Umbria-Marche seismic sequenze, Italy. 8th congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Vol II, Engineering Geology, pp. 715-719, Vancouver.
- Gasperini M., Signanini P., 1983. Il metodo down-hole per la misura delle onde nelle terre. *Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia*, n 4, 35-37.
- Gasperini, M., Ligi, M., Migliarini, S., Signanini, P. & Tombolini, F., 1990. Esempio di prospezione sismica con onde trasversali polarizzate orizzontalmente. *Atti del IX Convegno Nazionale G.N.G.T.S.*, vol. I, 587-599.
- Gasperini, M., Giorgetti, F., Rainone, M.L. & Signanini, P., 1994. SH waves high resolution and very high resolution seismic reflection prospecting: some examples. *Atti 1st. European Congress on Regional Geological Cartography and Information System*. Bologna, 13-16 June 1994.
- Idriss I.M., 1978. Characteristics of earthquake ground motions. *A.S.C.E. Earthq. Eng. Soil Dyn. Conf.*, Pasadena, California, June 19-21, 1151-1256.
- Idriss I.M., Sun J.I., 1992. SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. *User's Guide*, University of California, Davis, California, 13 pp.
- Lanzo G., Silvestri F., 1999. Risposta sismica locale, teoria ed esperienze. *Argomenti di ingegneria geotecnica*. Hevelius Edizioni srl, Benevento.
- Kanai K., Tanaka T., 1961. On microtremors, VIII. *Bull. Earthq. Res. Inst.* 39.
- Knapp, R.W. & Steeples, D.W., 1986. High resolution common depth point seismic reflection profiling: Instrumentation. *Geophysics*, 51, 276-282.
- Medvedev S.V., 1965. *Engineering Seismology*. Israel Program for scientific translations, Jerusalem, Edizione in lingua russa, 1962.
- Milkereit, B., Stumpel, H. & Rabbel, W., 1986. Shear waves reflection profiling for near surface lignite exploration. *Geophys. Prospect.*, 34, 45-67.
- Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QR Railway Tech. Res. Inst.* 30, 1, 25-33.
- Palestini, R., Signanini, P. & Tombolini, F., 1988. Esempio di prospezione sismica a riflessione con onde di taglio. *Atti del VII Conv. del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida*, vol. I, 313-323.
- Pasculli A., Rainone M.L., Sciarra N., Signanini P., 2002. Scale experimental testing of the resolution capabilities of seismic tomography techniques. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*. ISSN: 0006-6729.

Regione Toscana U.O.C. Rischio Sismico, (2004). Istruzioni Tecniche per le indagini geologico tecniche, le indagini geofisiche, e geotecniche, statiche e dinamiche, finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici.

Sesame European Research Project, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. European Commission – Research General Directorate Project No. EVG1-CT-2000-00026

SESAME.

Signanini P., Cucchi F., Frinzi U., Scotti A., 1981. Esempio di microzonazione sismica nell'area di Ragogna. *Rend. Soc. Geol. It.*, Vol. 4, pp. 645-653.

Signanini P., Torrese P., Gasperini L., 2001. La metodologia VSP per l'investigazione del sottosuolo nell'ambito del progetto VEL della Regione Toscana: il sito sperimentale di Pieve Fosciana (LU). *Atti del 20° Convegno Nazionale GNGTS*. Roma, 6-8 Novembre, 205-206.

Spudich P., M. Hellweg, W.H.K. Lee, (1996). Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake: implications for mainshock motions, *Bull. Seism. Soc. Am.* 86, no. 18, S193–S208.

Zoeppritz K., 1919. *Über Erdbebenwellen VII B. Über Reflexion und Durchgang Seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen*, *Nachr. Der Königlichen Gesell. Wiss., Göttingen, math.-phys. Kl.*, p.66-84.