



PIANO STRUTTURALE COMUNALE

SISTEMA AMBIENTALE E NATURALE

Relazione di microzonazione sismica

elaborato **B.REL.SIS.**

QUADRO CONOSCITIVO

Adozione:

Delibera di C.C. n. 65 del 29/03/2011

Approvazione:

Delibera di C.C. n. 00 del 00/00/0000

Sindaco:

Alberto Ravaioli

Assessore al Territorio:

Roberto Biagini

Presidente del Consiglio Comunale:

Antonella Ceccarelli

Segretario Comunale:

Laura Chiodarelli

**Direzione Pianificazione e
Gestione Territoriale, Coordinatore e
Capo Progetto Ufficio di Piano:**

Alberto Fattori

**Responsabili studio geologico e
geofisico:**

Roberta Carlini - Carlo Copioli

Consulenza Generale:

A.T.I. composta da

-Technicoop soc. coop

(Rudi Fallaci, Luca Biancucci)

-Giuseppe Campos Venuti

-Carla Ferrari

stesura 14 gennaio 2011



Immagine di Rimini (1580 - 1583)
Ignazio Danti, Galleria delle Carte Geografiche
Musei Vaticani

Ufficio di Piano

| | | |
|---|---------|-------------------------------------|
| Coordinatore e Capo Progetto | arch. | Alberto Fattori |
| Progettisti e responsabili delle Unità di Progetto | arch. | Alberto Fattori |
| | arch. | Mariarita Bucci |
| | dott.sa | Roberta Carlini |
| | dott. | Carlo Copioli |
| Segreteria Ufficio di Piano | | Nirvana Neri Luca Melillo |
| Gestione Amministrativa | dott. | Natalino Vannucci |
| | rag. | Paola Bartolucci Manuela Carlini |
| | dott.sa | Elisa Montebelli |
| Ufficio Geologico | geol. | Roberta Carlini |
| | geol. | Carlo Copioli |
| Gruppo di lavoro | dott.sa | Paola Bartolucci |
| | arch. | Stefania Bassi |
| | geom. | Elena Chindemi |
| | ing. | Giorgio Coppola |
| | arch. | Maria Corvino |
| | ing. | Chiara Dal Piaz |
| | geom. | Daniela Delvecchio |
| | arch. | Emanuela Donati |
| | arch. | Daniele Fabbri |
| | ing. | Giancarlo Ferri |
| | geom. | Carlo Lisi |
| | dott.sa | Osiris Marcantoni |
| | dott.sa | Elisabetta Righetti |
| | p.i. | Ivo Sansovini |
| | ing. | Luca Signorotti |
| | arch. | Lorenzo Turchi |

Consulenza generale ed operativa. Gruppo di lavoro A.T.I.

Responsabili del progetto

| | | |
|---------------------------|-------------|----------------------------|
| Coordinamento scientifico | prof. arch. | Giuseppe Campos Venuti |
| Consulenza urbanistica | arch. | Rudi Fallaci (Tecnicoop) |
| | arch. | Luca Biancucci (Tecnicoop) |
| Consulenza VAS/Valsat | arch. | Carla Ferrari |

Collaborazioni specialistiche

| | | |
|---|------------|------------------------------------|
| Aspetti ambientali ed economici del territorio agricolo | dott. agr. | Fabio Tuniola (Tecnicoop) |
| Analisi socio-economiche | dott. | Paolo Trevisani (Tecnicoop) |
| Mobilità e traffico | ing. | Franco Di Biase (Tecnicoop) |
| Acustica ambientale | ing. | Franca Conti (Tecnicoop) |
| Qualità dell'aria, elettromagnetismo | ing. | Virginia Celentano |
| Studi ambientali | dott. | Matteo Salvatori |
| Analisi del sistema insediativo | arch. | Giulio Verdini |
| Consulenza giuridica | avv. | Federico Gualandi |
| Consulenza archeologica | dott. | Marcello Cartoceti (AdArte snc) |
| | dott. | Luca Mandolesi (AdArte snc) |
| Elaborazioni cartografiche | | Andrea Franceschini (Tecnicoop) |
| | geom. | Sabrina Guizzardi (Tecnicoop) |
| | | Ivan Passuti |

Hanno contribuito al percorso di elaborazione del piano i servizi interni dell'Amministrazione Comunale che di seguito si elencano:

| | | |
|---|---------|---------------------|
| Direzione Infrastrutture Mobilità e Ambiente | ing. | Massimo Totti |
| U.O. Gestione Qualità e servizi ambientali e sicurezza | dott. | Domenico Bartolucci |
| U.O. Edilizia Pubblica | geom. | Roberto Sartini |
| U.O. Opere a Rete | geom. | Paolo Venturini |
| U.O. Mobilità e gestione strade | arch. | Marco Tamagnini |
| U.O. Archeologia e culture extraeuropee | dott. | Maurizio Biordi |
| U.O. Piani Attuativi | arch. | Daniele Fabbri |
| U.O. di Staff Piano Strategico | dott. | Pietro Leoni |
| U.O. Politiche Abitative e del Lavoro – PEEP E ERP | ing. | Giancarlo Ferri |
| U.O. SIT – Toponomastica | dott.sa | Anna Maria Rabitti |
| Settore sportello unico per le attività produttive e attività economiche | arch. | Remo Valdiserri |
| Settore sportello unico per l'edilizia | dott.sa | Osiris Marcantoni |
| Ufficio Stampa | | Emilio Salvatori |
| Direzione patrimonio, espropri, e attività economiche | dott.sa | Anna Errico |
| U.O. Gestione sistema informativo | p.i. | Sanzio Oliva |

INDICE

| | |
|--|----|
| 1 –Premessa | 8 |
| 2 –Inquadramento geologico e morfologico | 9 |
| 3 –Sismicità dell'area | 13 |
| 4 –Identificazione delle aree suscettibili di effetti locali (primo livello di approfondimento)..... | 15 |
| 5 –Indagini di approfondimento..... | 18 |
| 5.1 – Le misure delle vibrazioni ambientali..... | 18 |
| 5.2 – La prova Cross-Hole..... | 20 |
| 5.3 – Sintesi dei risultati delle indagini..... | 22 |
| 6 –Scelta delle tabelle per la stima dei fattori di amplificazione | 22 |
| 7 – Stima dell'amplificazione (secondo livello di approfondimento)..... | 24 |
| 8 –Prescrizioni per le successive fasi di pianificazione urbanistica comunale..... | 27 |
| 9 –Considerazioni conclusive..... | 29 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 31 |

RELAZIONE DI MICROZONAZIONE SISMICA DI SECONDO LIVELLO

A cura di: C. Copioli e R. Carlini ¹, D. Albarello ², M. Filippini ³, L. Martelli ⁴

¹ *Comune di Rimini, Direzione Pianificazione e Gestione Territoriale*

² *Università degli Studi di Siena, Dipartimento di Scienze della Terra*

³ *Provincia di Rimini, Servizio Politiche di Coordinamento Territoriale e di Piano, Ufficio Difesa del Suolo*

⁴ *Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli*

1 –PREMESSA

Gli indirizzi regionali (DAL 112/2007) prevedono che la microzonazione sismica del territorio sia realizzata nelle fasi di pianificazione urbanistica a scala comunale.

Per ottimizzare costi e tempi, gli studi di microzonazione sismica sono richiesti solo nelle aree di effettivo interesse urbanistico, cioè nei centri abitati, nelle aree di potenziale espansione e di riqualificazione urbanistica e lungo le fasce al contorno delle reti infrastrutturali, e possono essere realizzati a vari livelli di approfondimento, a seconda delle condizioni di pericolosità, delle finalità, della scala di analisi e delle risorse disponibili.

Il primo livello di approfondimento consiste in un'analisi preliminare delle condizioni geologiche e morfologiche. Quest'analisi non fornisce la microzonazione sismica del territorio ma individua le aree suscettibili di effetti locali in cui effettuare gli studi e fornisce indicazioni sugli approfondimenti necessari (vedi Tav. B.9a/b - Carta delle aree suscettibili degli effetti locali, e Tav. B.10a/b- Carta di sintesi delle pericolosità sismiche redatte per il Quadro Conoscitivo del PSC).

Un'analisi di secondo livello è richiesta e ritenuta sufficiente nelle aree prive di particolari complicazioni geologiche e morfologiche, nelle quali sono attesi solo effetti di amplificazione. Per uno studio di secondo livello sono richieste indagini geotecniche e geofisiche di tipo standard e una stima dei fattori di amplificazione tramite tabelle e formule. E' importante sottolineare che la scelta e l'utilizzo delle tabelle richiedono un'attenta valutazione dei risultati delle indagini stratigrafiche e geofisiche.

Un'analisi più approfondita, di terzo livello, è invece richiesta nelle aree in cui sono presenti particolari condizioni di pericolosità locale (valli strette e zone pedemontane con spessori delle coperture rapidamente variabili, terreni potenzialmente liquefacibili ad elevata compressibilità, pendii instabili e potenzialmente instabili) o laddove sono previsti opere ed edifici di rilevante interesse pubblico (strutture di protezione civile, edifici pubblici, ...) come definiti ed elencati nella delibera di G.R. 1661/2009. Per questo tipo di analisi sono richieste indagini in sito e in laboratorio ed elaborazioni più approfondite e onerose, in termini di tempi e soprattutto di costi, in quanto le prove necessarie e le procedure di elaborazione dei dati richiedono particolari strumentazioni e codici di calcolo e un'elevata preparazione tecnica degli operatori.

Considerata la scala di analisi, a supporto delle scelte di un Piano Strutturale Comunale (PSC) è considerata idonea una microzonazione sismica di secondo livello che fornisca una classificazione relativa del territorio definendo aree a maggiore e minore pericolosità sismica locale e indicando i siti in cui sono ritenuti necessari ulteriori approfondimenti.

Le indagini di terzo livello sono demandate alle successive fasi di pianificazione urbanistica (Piano Operativo Comunale, POC; Piano Urbanistico Attuativo, PUA), ad eccezione dei siti in cui sia già nota la destinazione per opere ed edifici di particolare interesse pubblico.

Per una più efficace politica di prevenzione e riduzione del rischio sismico, sulla base degli esiti della microzonazione sismica, le Amministrazioni Comunali sono tenute, inoltre, anche a formulare norme e indirizzi per gli interventi successivi da inserire nel POC e nel RUE.

2 –INQUADRAMENTO GEOLOGICO E MORFOLOGICO

Il territorio comunale di Rimini si colloca in una posizione di transizione tra l'Appennino e la costa ed è possibile individuare al suo interno 3 distinti settori geomorfologici.

La parte sud-occidentale è costituita dai rilievi collinari del margine appenninico-adriatico, la parte centrale è costituita dalla pianura alluvionale originata dall'attività deposizionale dei corsi d'acqua appenninici, soprattutto dal Fiume Marecchia, mentre la parte nord-orientale corrisponde alla fascia costiera, ampia alcune centinaia di metri, costituita dai depositi litoranei e delimitata verso terra da una scarpata orientata circa NW-SE, parallelamente alla costa.

I terreni affioranti nel settore collinare appartengono alla "Successione post-evaporitica del margine padano-adriatico" qui prevalentemente costituita dalle Argille Azzurre di età Pliocene-Pleistocene inferiore, in cui si intercalano, a vari livelli stratigrafici, corpi arenacei (arenarie di Borello e arenarie di Lardiano) spessi anche varie decine di metri e accumuli di frana sottomarina, dalle Arenarie e Argille di Savignano (età Pleistocene inferiore) e dalle Sabbie di Imola (età Pleistocene medio, 0,8-0,65 MA).

Le Argille Azzurre sono costituite soprattutto da centinaia di metri di argille e marne, deposte in ambiente di mare aperto. La natura argilloso-marnosa rende questi terreni in genere poco consolidati e facilmente erodibili. Perciò nel settore appenninico sono diffusi i calanchi, estese forme di erosione e denudamento che se da un lato costituiscono un problema per la stabilità del territorio dall'altro permettono di osservare direttamente la natura del substrato dei depositi alluvionali dei fondovalle e della pianura.

All'interno di questa successione pelitica si intercalano orizzonti lenticolari, spessi anche varie decine di metri, di sabbie talora cementate. La cementazione rende questi terreni più competenti e resistenti all'erosione e quindi localmente si osservano

rilievi e scarpate.

Verso l'alto stratigrafico le Argille Azzurre passano alle Arenarie e Argille di Savignano, formazione spessa poche decine di metri costituita dalla fitta alternanza di sottili livelli sabbiosi e pelitici. I caratteri sedimentologici indicano che queste sabbie e argille si sono deposte in ambiente marino poco profondo e prossimale.

Il passaggio dagli ultimi depositi francamente marini ai depositi alluvionali è segnato da alcune decine di metri di sedimenti di transizione di ambiente litorale, per lo più sabbie di spiaggia e cordoni di dune note come "Sabbie di Imola". Queste sabbie sono in genere poco cementate.

La successione continentale dei fondovalle e della pianura è talora visibile lungo le scarpate dei terrazzi alluvionali e negli alvei dei corsi d'acqua. Per lo studio di questa successione sono comunque risultati fondamentali le perforazioni (sondaggi a carotaggio continuo, pozzi per acqua) e l'interpretazione di indagini indirette (geotecniche e geofisiche).

Il substrato dei depositi alluvionali si immerge gradualmente dal margine appenninico verso nord; lo spessore della successione alluvionale aumenta quindi da sud a nord e da ovest verso est fino a superare i 200 m di profondità (figg. 1 e 2).

Figura 1: sezione geologica attraverso la val Marecchia; da Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 256 Rimini (APAT, 2005).

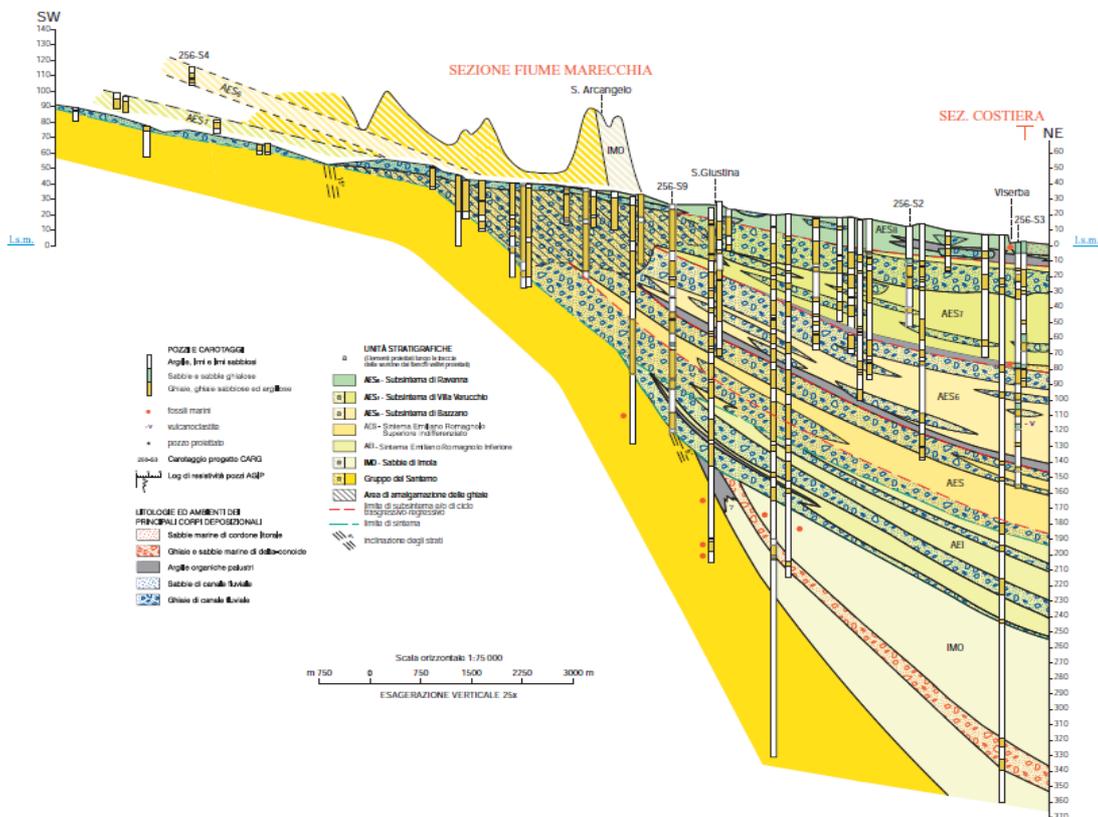
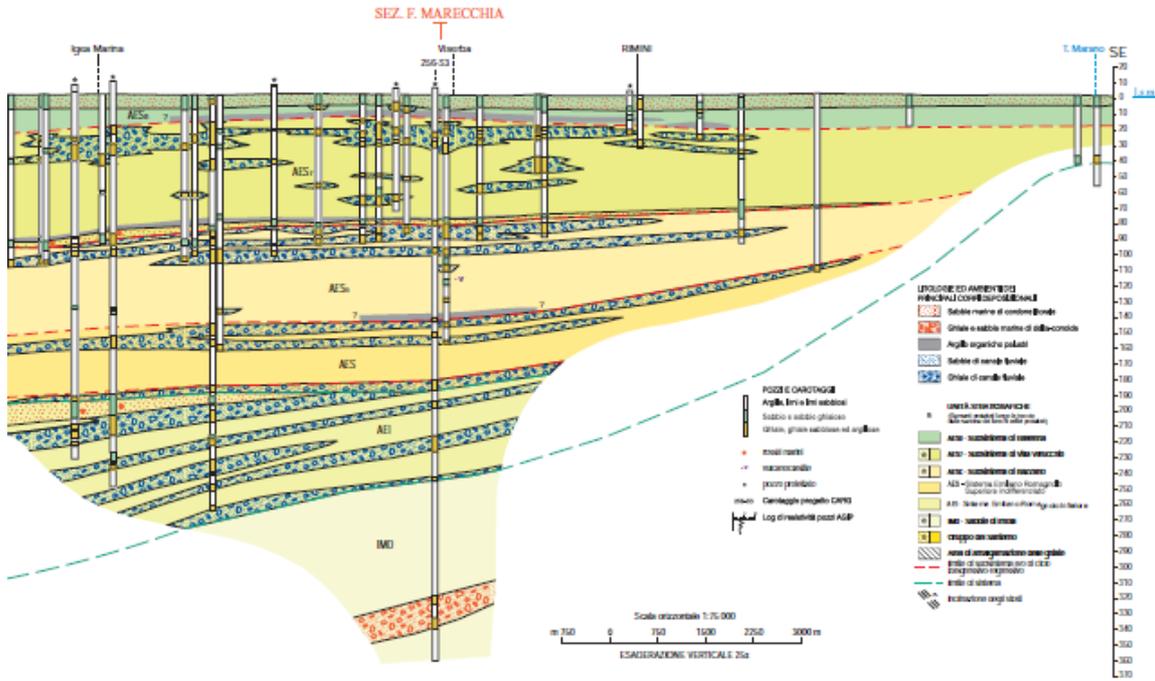
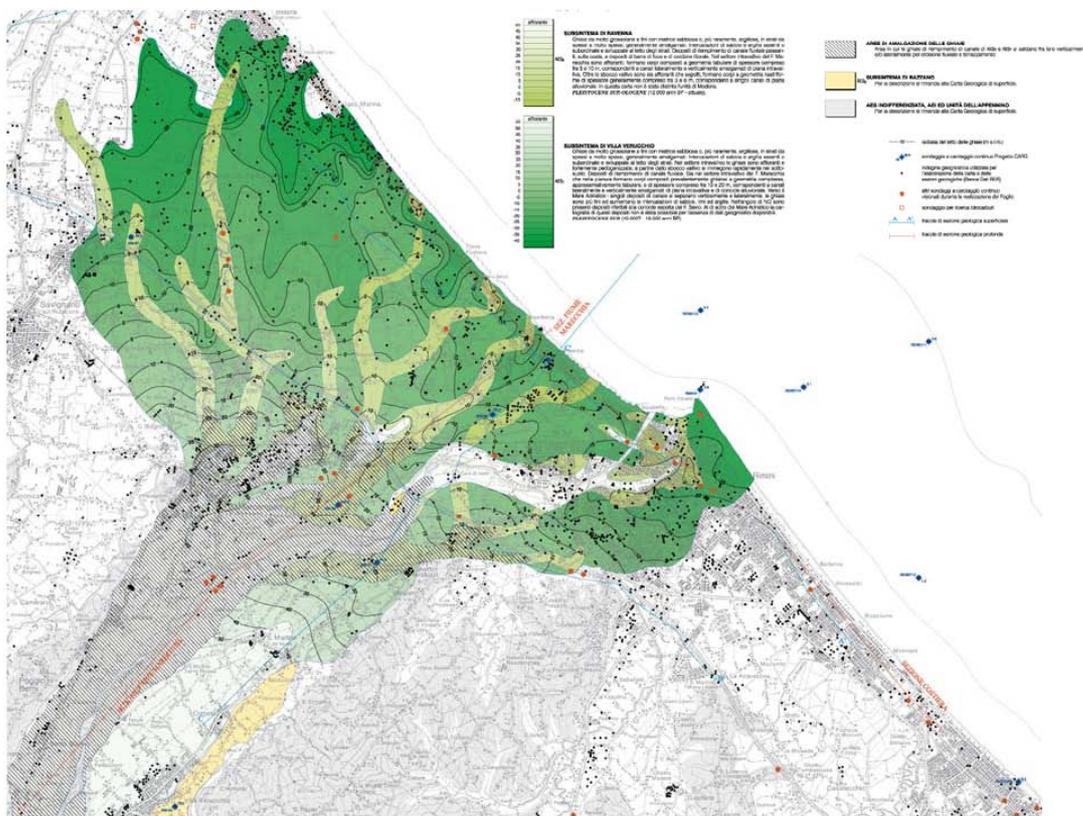


Figura 2: sezione geologica lungo la costa; da Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 256 Rimini (APAT, 2005).



La successione stratigrafica di pianura (Supersintema Emiliano-Romagnolo, di età compresa tra 0,65 MA e il periodo attuale) è costituita prevalentemente da sedimenti alluvionali depositi dai corsi d'acqua appenninici con intercalazioni di depositi marini in prossimità della costa in occasione delle principali risalite eustatiche. Sulla base dei principali eventi tettono-climatici il Supersintema Emiliano-Romagnolo è stato suddiviso in: Sintema Emiliano-Romagnolo inferiore (0,65-0,45 MA) e Sintema Emiliano-Romagnolo superiore (0,45 MA-Attuale), a loro volta suddivisi in sub-sintemi e unità. Litologicamente questi depositi alluvionali sono distinguibili in depositi grossolani (ghiaie e sabbie) di conoide, depositi fini (limi, argille e sabbie fini) di piana e interconoide, sabbie di canale e argine. La successione alluvionale si presenta prevalentemente costituita da sedimenti fini nella zona a sud della città mentre a nord sono più frequenti le intercalazioni di corpi grossolani (figg. 1 e 2). Dalla ricostruzione della conoide del Marecchia (fig. 3) è evidente che questa si è sviluppata soprattutto a nord del centro storico; è probabile che ciò sia dovuto al sollevamento del margine appenninico che ha determinato una migrazione del depocentro verso nord.

Figura 3: mappa della conoide alluvionale del Fiume Marecchia; da Allegato "Geologia di sottosuolo" alla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 256 Rimini (APAT, 2005).



Lungo la costa, a valle della scarpata, al di sopra dei depositi alluvionali si individua una fascia, spesso fino a 8-10 m, di sabbie marine recenti (< 20.000 anni), sciolte con livello della falda generalmente poco profondo (anche < 1 m).

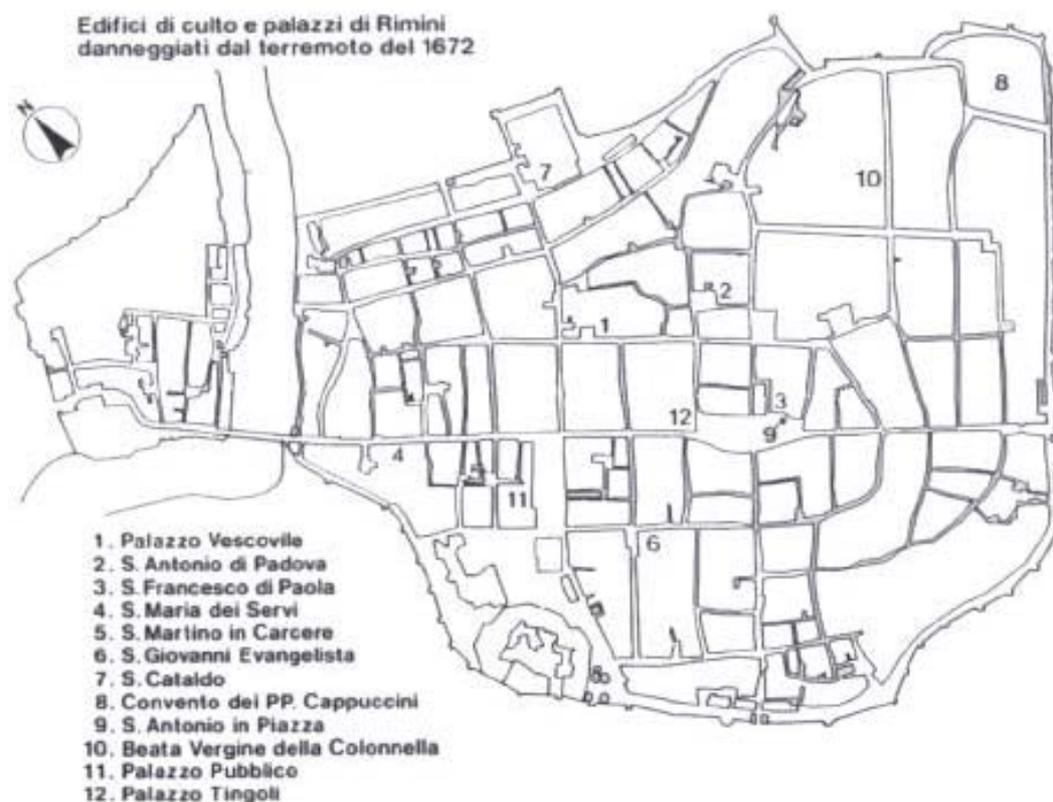
Nel settore appenninico, la successione continentale è costituita, oltre che dai depositi alluvionali terrazzati, anche da depositi detritici dovuti all'erosione e alle dinamiche dei versanti.

Per informazioni più dettagliate si rimanda alla relazione geologica B.RELGEO del Quadro Conoscitivo e alle note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 256 Rimini (Martelli et al., 2005).

3 –SISMICITÀ DELL'AREA

La costa romagnola è stata colpita in passato da terremoti rovinosi, i cui effetti sul tessuto economico-sociale e sull'ambiente costruito sono descritti in modo dettagliato nelle cronache e nei documenti coevi a partire dal XVII° secolo. In particolare vi è testimonianza dei danni ai monumenti ed ai beni storico-culturali prodotti dai terremoti del 1672, del 1786, del 1875 e del 1916. A titolo di esempio in Figura 1 (Guidoboni e Ferrari, 1986) sono localizzati gli edifici di culto e i palazzi di Rimini danneggiati dal terremoto del 1672.

Figura 4: Rimini: localizzazione degli edifici di culto e dei palazzi maggiormente colpiti dal terremoto del 14 aprile 1672 (da Guidoboni et al., 1986)



Ulteriori informazioni sui danneggiamenti della città di Rimini da terremoti storici sono reperibili in altre interessanti pubblicazioni quali: "Il terremoto di Rimini e della costa romagnola: 25 dicembre 1786 e "San Marino e il Terremoto".

In sintesi, il territorio riminese è soggetto ad una sismicità rilevante sia in termini di frequenza che di energia. Dai cataloghi storici (Stucchi et al., 2007) risulta infatti che negli ultimi secoli la città di Rimini è stata interessata da vari terremoti di magnitudo stimata tra 5,5 e 6, che hanno causato effetti di intensità fino a $I_{MCS} = VIII$ (tab.1). Il

comune di Rimini è perciò classificato in zona 2 dalla vigente classificazione sismica nazionale (OPCM 3274/2003).

Considerata l'elevata concentrazione di popolazione e attività, che aumenta ulteriormente nei mesi estivi per la nota vocazione turistica della città, il rischio sismico è decisamente elevato. Inoltre, occorre anche considerare che il comune di Rimini, già classificato sismico nel 1927, è stato declassificato nel 1938, per "favorirne lo sviluppo", e riclassificato solo nel 1983. Poiché negli anni in cui la città di Rimini non è stata classificata sismica si è avuta una forte espansione urbanistica, è presumibile che gran parte delle costruzioni, edificata senza criteri antisismici, abbia un'elevata vulnerabilità, elemento che contribuisce ad aggravare il rischio sismico dell'area urbana.

Tabella 1: i principali terremoti ($I_s > 5$) che hanno interessato la città di Rimini (semplificata da Stucchi et al., 2007).

I_s = intensità al sito; I_o = intensità nell'area epicentrale; M_w = magnitudo

| I_s | Anno | Mese | Giorno | AE | I_o | M_w |
|-------|------|------|--------|-----------------------|-------|-------|
| 8 | 1672 | 04 | 14 | Riminese | 8 | 5,60 |
| 8 | 1786 | 12 | 25 | Riminese | 8 | 5,67 |
| 8 | 1875 | 03 | 17 | Romagna sud-orientale | 8 | 5,74 |
| 8 | 1916 | 05 | 17 | Alto Adriatico | 8 | 5,85 |
| 8 | 1916 | 08 | 16 | Alto Adriatico | 8 | 5,92 |
| 7-8 | 1308 | 01 | 25 | Rimini | 7-8 | 5,37 |
| 7 | 1472 | | | Rimini | 7 | 5,17 |
| 6 | 1483 | 08 | 11 | Romagna meridionale | 8 | 5,67 |
| 6 | 1625 | 12 | 05 | Rimini | 6 | 4,83 |
| 6 | 1911 | 03 | 26 | Rimini | 6 | 5,18 |
| 5-6 | 1473 | 02 | 02 | Rimini | 6 | 4,83 |
| 5-6 | 1591 | 07 | 10 | Forlì | 6-7 | 5,24 |

Per una stima quantitativa della pericolosità sismica del territorio di Rimini su base probabilistica si rimanda al sito web <http://zonesismiche.mi.ingv.it/> dove sono disponibili i valori di pericolosità sismica di tutto il territorio nazionale, calcolati per una griglia di $0,05^\circ$ (Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All.1b) ed espressi in termini di accelerazione massima del suolo (a_g espressa in percentuale dell'accelerazione di gravità g), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, riferita a suoli rigidi ($V_s \geq 800$ m/s; categoria di sottosuolo A, punto 3.2.1, NTC 2008).

Nell'allegato A4 degli indirizzi regionali (DAL 112/2007) sono illustrati i risultati e la sintesi di un'analisi della pericolosità sismica di base e sono forniti i valori medi di a_g stimati per ogni comune dell'Emilia-Romagna, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni; il territorio comunale di Rimini ha un valore medio di a_g pari a 0,183g.

Secondo la zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) Rimini ricade nella parte settentrionale della zona sismogenetica 917, porzione più orientale della zona in compressione dell'Appennino settentrionale, in cui sono noti anche terremoti di magnitudo superiore a 6.

I principali terremoti che interessano l'area di Rimini sembrano avere origine locale. Gli studi di sismotettonica disponibili (v. ad es. Boccaletti et al., 2004; DISS Working Group, 2007) indicano infatti che la sismicità di quest'area è dovuta soprattutto all'attività di faglie comprese nei primi 35 km di profondità, con movimenti prevalentemente di tipo compressivo, con sovrascorimenti lungo strutture parallele alla costa e faglie trascorrenti orientate trasversalmente all'asse appenninico (per maggiori approfondimenti si veda la Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, Boccaletti et al., 2004).

4 –IDENTIFICAZIONE DELLE AREE SUSCETTIBILI DI EFFETTI LOCALI (PRIMO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO)

Sulla base di quanto contenuto all'art. 4.3 delle norme del PTCP 2007, ai fini di rispondere all'esigenza della riduzione del rischio sismico, prendendo a riferimento la Tavola n. S.A.11 del Quadro Conoscitivo del PTCP, è stata elaborata la "Carta delle aree suscettibili degli effetti locali in caso di evento sismico" (vedi Tav. B.9a/b del Quadro Conoscitivo), e la "Carta di sintesi delle pericolosità sismiche" (vedi Tav. B.10a/b del Quadro Conoscitivo).

Preliminarmente alla microzonazione sismica sono state raccolte tutte le indagini geofisiche disponibili, vedi tabella 2, ed è stata effettuata un'analisi delle condizioni geologiche e morfologiche locali al fine di definire le aree suscettibili di effetti di amplificazione e instabilità in caso di eventi sismici, così come definito nella "Carta delle aree suscettibili degli effetti locali in caso di evento sismico" (vedi Tav. B.9a/b del Quadro Conoscitivo del PSC)

| TIPOLOGIA DI PROVE | QUANTITA' |
|---|------------------|
| Sondaggi a carotaggio continuo con prova "cross hole" CH | 1 |
| Sondaggi a carotaggio continuo con prova "down hole" DH | 15 |
| Prove penetrometriche statiche con cono sismico SCPT | 17 |
| Indagini refraction microtremor Re.Mi. | 6 |
| Misure di velocità delle onde di taglio Vs M.A.S. W.. | 1 |
| Misure di sismica passiva con tecnica a stazione singola H.V.S.R. | 366 |
| Misure di sismica passiva con antenna bidimensionale (array). | 20 |

Tabella 2: sintesi delle prove geognostiche, geofisiche e di laboratorio disponibili nel territorio comunale di Rimini aggiornata a dicembre 2010.

Nella Tavola B.13a/b del Quadro conoscitivo "Carta dell'ubicazione delle indagini geofisiche" sono state ubicate tutte le indagini geofisiche utilizzate per l'analisi territoriale, suddivise per tipologia secondo lo schema riportato in tabella 2 e per origine del dato.

Gli effetti locali attesi nel territorio riminese consistono prevalentemente in fenomeni di amplificazione per motivi stratigrafici, fenomeni di instabilità di pendii potenzialmente franosi e potenziali effetti di liquefazione per la presenza, lungo la fascia costiera, di sabbie sature nei primi 10 m di profondità.

Già l'inquadramento geologico descritto nel precedente capitolo fornisce indicazioni sulle aree potenzialmente soggette ad effetti locali.

Nel settore collinare per la presenza di terreni poco consolidati (Argille Azzurre, Arenarie e Argille di Savignano, Sabbie di Imola) sono attesi effetti di amplificazione. Infatti, tali depositi, sebbene costituiscano il substrato marino delle coperture continentali, sono tutti caratterizzati da basse velocità di propagazione delle onde di taglio S (Vs) che, in genere, risulta compresa tra 350 e 600 m/s, anche fino a profondità di alcune decine di metri.

Anche le coperture detritiche di spessore maggiore di 5 m, indipendentemente dalla genesi, possono determinare effetti di amplificazione. Si tratta principalmente di depositi alluvionali e depositi di versante quali i detriti di frana e le coltri eluvio-colluviali.

Inoltre, nelle aree interessate da frane attive e nelle aree di versante costituite da depositi poco consolidati o coperture detritiche con inclinazione del pendio maggiore di 15 gradi, in caso di eventi sismici, possono verificarsi anche problemi di instabilità.

Nelle aree in frana, individuate sulla base di appositi studi di carattere geomorfologico, non è di regola consentita l'espansione urbanistica; tuttavia studi di microzonazione sismica o valutazioni della risposta sismica locale possono rendersi necessari anche in questi contesti.

Infine, particolare attenzione è necessaria lungo la fascia costiera. La presenza di sabbie sature nei primi 20 m di profondità, con superficie della falda acquifera mediamente entro i primi 15 m da p.c. è condizione predisponente il fenomeno della liquefazione. Purtroppo, la sismicità storica indica che nel riminese sono presenti anche le condizioni scatenanti (terremoti $M > 5$). Il rischio di liquefazione in alcuni siti è stato anche verificato da studi specifici (Cipriani et al., 2000; Facciorusso & Vannucchi, 2009).

Nella tabella 3 sono riassunte le condizioni geologiche e morfologiche che possono determinare effetti locali nel territorio comunale di Rimini. Sono indicati anche i potenziali effetti attesi e il livello di approfondimento richiesto per gli studi di microzonazione sismica.

| Condizioni geomorfologiche | | Classe litologica | Effetti attesi | Livello di approfondimento |
|----------------------------|---|---|---|--|
| 1 | orizzonti arenacei e conglomeratici delle Argille Azzurre e lenti di conglomerati delle Sabbie di Imola | substrato rigido (probabile categoria di sottosuolo A delle NTC 2008) | nessuno | no MS |
| 2 | come 1 in condizione di pendio >15° e dislivello > 30 m | substrato rigido (probabile categoria di sottosuolo A, NTC 2008) | amplificazione topografica | secondo livello (stima amplificazione topografica) |
| 3 | membri pelitici delle Argille Azzurre, Arenarie e Argille di Savignano, Sabbie di Imola | substrato non rigido (probabile categoria di sottosuolo B, NTC 2008) | amplificazione stratigrafica | secondo livello (stima amplificazione) |
| 4 | come 3 in condizione di pendio >15° e dislivello > 30 m | substrato non rigido (probabile categoria di sottosuolo B, NTC 2008) in condizioni di potenziale instabilità | amplificazione (sia stratigrafica sia topografica) e potenziale instabilità | terzo livello (stima amplificazione e verifiche stabilità) |
| 5 | Depositi alluvionali (ghiaiosi e indistinti), detriti di versante, zone cataclastiche (zone di faglia), riporti antropici | coperture detritiche (probabili categorie di sottosuolo B, C ed E, NTC 2008) | amplificazione stratigrafica | secondo livello (stima amplificazione) |
| 6 | come 5 in condizione di pendio >15° e dislivello > 30 m | coperture detritiche (probabili categorie di sottosuolo B, C ed E, NTC 2008) in condizioni di potenziale instabilità | amplificazione (sia stratigrafica sia topografica) e potenziale instabilità | terzo livello (stima amplificazione e verifiche stabilità) |
| 7 | frane attive | coperture detritiche instabili | amplificazione e instabilità | terzo livello (stima amplificazione e verifiche stabilità) |
| 8 | corpi sabbiosi entro i primi 20 m con falda acquifera entro i primi 15 m | terreni potenzialmente liquefacibili (probabile categoria di sottosuolo S2, NTC 2008) | amplificazione e potenziale liquefazione | terzo livello (stima amplificazione e indice di liquefazione) |

Tabella 3: tabella riassuntiva degli elementi geologici e morfologici che possono determinare effetti locali nel territorio di Rimini, con indicazione degli effetti attesi e del livello di approfondimento degli studi di MS

5 –INDAGINI DI APPROFONDIMENTO

Il sottosuolo della città di Rimini è stato oggetto di varie campagne di indagini geognostiche e geofisiche e quindi sono oggi disponibili numerosi dati, in prevalenza di tipo stratigrafico, derivati soprattutto da sondaggi a carotaggio continuo, pozzi per acqua e prove penetrometriche (vedi tabella 2, Tavola B.13a/b del Quadro conoscitivo "Carta dell'ubicazione delle indagini geofisiche", Relazione Geologica e Tavola B.5a/b "Carta dell'ubicazione delle indagini geognostiche, geofisiche e delle prove di laboratorio". Sono disponibili anche pozzi e profili sismici a riflessione eseguiti per la ricerca di idrocarburi (reperibili nel sito web dell'Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse, UNMIG, del Ministero dello Sviluppo Economico: <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/dgrme/dgrme.asp>) che forniscono preziose informazioni sulla geometria dei corpi profondi, in particolare sul tetto del substrato marino dei depositi continentali (cfr. anche Allegato al foglio 256 Rimini "Geologia di sottosuolo", APAT, 2005).

Per diversi siti erano disponibili anche prove dirette di misura delle onde di taglio (V_s), soprattutto prove Down-Hole (DH) e prove penetrometriche statiche con cono sismico (SCPT).

Questa disponibilità di dati ha permesso di ottimizzare le risorse; le indagini di approfondimento sono state così indirizzate soprattutto alla definizione della frequenza fondamentale F_0 dei depositi alluvionali, costieri e delle coperture eluvio-colluviali sui depositi marini (vedi allegato 1 "Caratterizzazione dinamica del sottosuolo del Comune di Rimini attraverso indagini di sismica di superficie realizzate con tecniche di tipo "passivo"- giugno 2010 - Rapporto finale dell'Università degli Studi di Siena del Dott. Geol. Domenico Pileggi con la supervisione del Prof. Dario Albarello) e della velocità delle onde di taglio S (V_s).

In primo luogo sono state organizzate campagne di misura delle vibrazioni ambientali con misure a stazione singola.

5.1 – Le misure delle vibrazioni ambientali

Le vibrazioni ambientali sono costituite da onde sismiche di piccola ampiezza (ovvero non percepibili ai sensi) generate alla superficie del terreno da sorgenti non controllate di origine naturale (onde marine, vento, ecc.) e antropiche (traffico veicolare, attività industriali, ecc.). Le modalità di propagazione di queste onde sono le stesse di quelle relative alle onde di maggiore intensità associate ad eventi sismici potenzialmente dannosi. Pertanto, lo studio delle vibrazioni ambientali può essere utile ad individuare (in condizioni di sicurezza) le caratteristiche del moto sismico atteso in occasione di possibili futuri terremoti. In particolare, possono essere di grande utilità per identificare quelle configurazioni del sottosuolo in grado di amplificare il moto del suolo durante eventi sismici intensi e dove gli effetti di danno atteso possono essere di maggiore intensità. Inoltre possono fornire importanti indicazioni sulle velocità di propagazione delle onde sismiche potenzialmente più pericolose per le costruzioni (onde S). Aspetti essenziali delle indagini sismiche basate sulle vibrazioni ambientali sono i bassi costi di esercizio per unità di volume di sottosuolo esplorato (si tratta di tecniche passive che non richiedono l'energizzazione del sottosuolo da parte dell'operatore), relativamente grandi profondità di esplorazione a fronte di scarsa occupazione di terreno nella fase di misura, la bassissima invasività, la possibilità di

operare in contesti urbani caratterizzati da elevati fonti di disturbo che inibiscono l'impiego di tecniche tradizionali.

Per questi motivi le tecniche di esplorazione basate sullo studio delle vibrazioni ambientali sono oggetto di intensa sperimentazione soprattutto nel contesto degli studi di microzonazione sismica, come ha dimostrato la recente esperienza del terremoto aquilano.

Nelle indagini oggetto di questa relazione sono state in particolare utilizzate due tecniche di indagine basate sull'analisi delle vibrazioni ambientali. Una tecnica a stazione singola (HVSR o "di Nakamura" ed una tecnica su antenna sismica (procedure tipo ESAC). La prima è basata sulla misura delle vibrazioni ambientali registrate nelle tre direzioni dello spazio mediante una singola stazione di misura costituita da una tripletta di velocimetri. La misura viene condotta per alcune decine di minuti allo scopo di definire le caratteristiche spettrali medie delle vibrazioni ambientali presenti nel punto di misura. I rapporti di ampiezza spettrale media fra le componenti orizzontali e verticali del moto forniscono importanti indicazioni circa la presenza e le principali caratteristiche di fenomeni di risonanza sismica potenzialmente responsabili di effetti di amplificazione del moto sismico in occasione di futuri terremoti. In particolare, risulta possibile ricavare indicazioni sulla frequenza di vibrazione F_0 alla quale è ragionevole attendersi effetti di amplificazione del moto del suolo e ottenere indicazioni di massima (in termini relativi) sull'entità dei fenomeni attesi. Inoltre, dato che è possibile stabilire una relazione fra la profondità h del corpo geologico responsabile dei fenomeni di risonanza osservati ($F_0 \approx \langle V_s \rangle / 4h$ dove $\langle V_s \rangle$ è la velocità media delle onde S nelle coperture) attraverso le stime HVSR è possibile ottenere informazioni sulla stratigrafia sismica del sottosuolo fino a profondità dell'ordine di parecchie decine o anche centinaia di metri.

La tecnica dell'antenna sismica è invece basata sulla misura della componente verticale delle vibrazioni ambientali su un insieme di sensori (16 nel caso dell'attrezzatura utilizzata in questa sede) distribuiti alla superficie del terreno. Anche in questo caso vengono indagate le proprietà spettrali medie del campo d'onde delle vibrazioni ambientali utilizzando sessioni di misura di alcune decine di minuti. In questo caso vengono determinate le velocità di fase della componente in onde superficiali presente nel campo delle vibrazioni ambientali. Lo studio della variazione delle velocità di fase in funzione della frequenza di vibrazione (inversione della curva di dispersione) fornisce indicazioni sui valori delle velocità di propagazione delle onde S nel sottosuolo alle diverse profondità. Questo profilo di velocità è assai importante per lo studio dei fenomeni di amplificazione del moto sismico ed è anche fondamentale come complemento delle indagini a stazione singola.

RISULTATI

Le misure HVSR effettuate hanno messo in evidenza la presenza di possibili fenomeni di amplificazione del moto del suolo dovute a fenomeni di risonanza su gran parte del territorio urbano e urbanizzabile. E' stata però messa in evidenza una chiara differenziazione del territorio comunale. Infatti, laddove esiste una diffusa presenza di fenomeni di possibile amplificazione del moto sismico del suolo in bassa frequenza (0,2-0,5 Hz) e quindi di scarso interesse ingegneristico se non per manufatti di grandi dimensioni, è stata evidenziata anche una ampia porzione del territorio (nella parte settentrionale dell'abitato in corrispondenza delle conoide del fiume Marecchia)

caratterizzata da possibili fenomeni di amplificazione su più alte frequenze (2-3 Hz) di maggiore interesse per la pianificazione.

Nella Tavola B.14a/b "Carta degli ambiti sismici omogenei e delle misure di sismica passiva con picchi di risonanza per frequenze maggiori ad 1 Hz" e allo stesso modo nella Tavola B.15a/b "Carta degli ambiti sismici omogenei e delle misure di sismica passiva con picchi di risonanza per frequenze minori ad 1 Hz", sono riportati, suddivisi per intervalli, i valori delle frequenze di risonanza misurate in sito attraverso l'esecuzione di prove HVSR. Inoltre per la valutazione delle frequenze di risonanza si può fare riferimento all'allegato 1 "Caratterizzazione dinamica del sottosuolo del Comune di Rimini attraverso indagini di sismica di superficie realizzate con tecniche di tipo "passivo"- giugno 2010 - Rapporto finale dell'Università degli Studi di Siena del Dott. Geol. Domenico Pileggi con la supervisione del Prof. Dario Albarello.

5.2 – La prova Cross-Hole

Per una conferma dei valori di V_s disponibili da indagini precedenti e per avere indicazioni sul profilo di V_s anche a profondità maggiori di 50 m, nella zona di Viserba è stata perforata una coppia di sondaggi, fino alla profondità di quasi 100 m, in cui è stata eseguita una prova Cross-Hole.

La stratigrafia (fig. 5) indica che in questo sito sono presenti due orizzonti ghiaiosi importanti, ognuno di spessore > 10 m, il più superficiale a profondità compresa tra 23 e 40 m, quello più profondo a profondità compresa tra 83 e 96 m; la perforazione è stata fermata alla profondità di 98 m da p.c. in ghiaie separate da quelle soprastanti da appena 2 m di limi. Questa stratigrafia è in perfetto accordo con quella disponibile in aree limitrofe (cfr figg. 1 e 2) e in sintesi si può affermare che a partire dalla profondità di circa 80 m è presente un orizzonte di ghiaie prevalenti potente almeno circa 15 m. Ciò significa che nella successione continentale sono potenzialmente presenti vari corpi grossolani le cui superfici superiori possono costituire superfici di discontinuità sismica e quindi che anche nel settore di piana a sud del Marecchia il substrato rigido da considerare per la valutazione della risposta sismica potrebbe essere un orizzonte grossolano di origine continentale e non necessariamente il substrato marino.

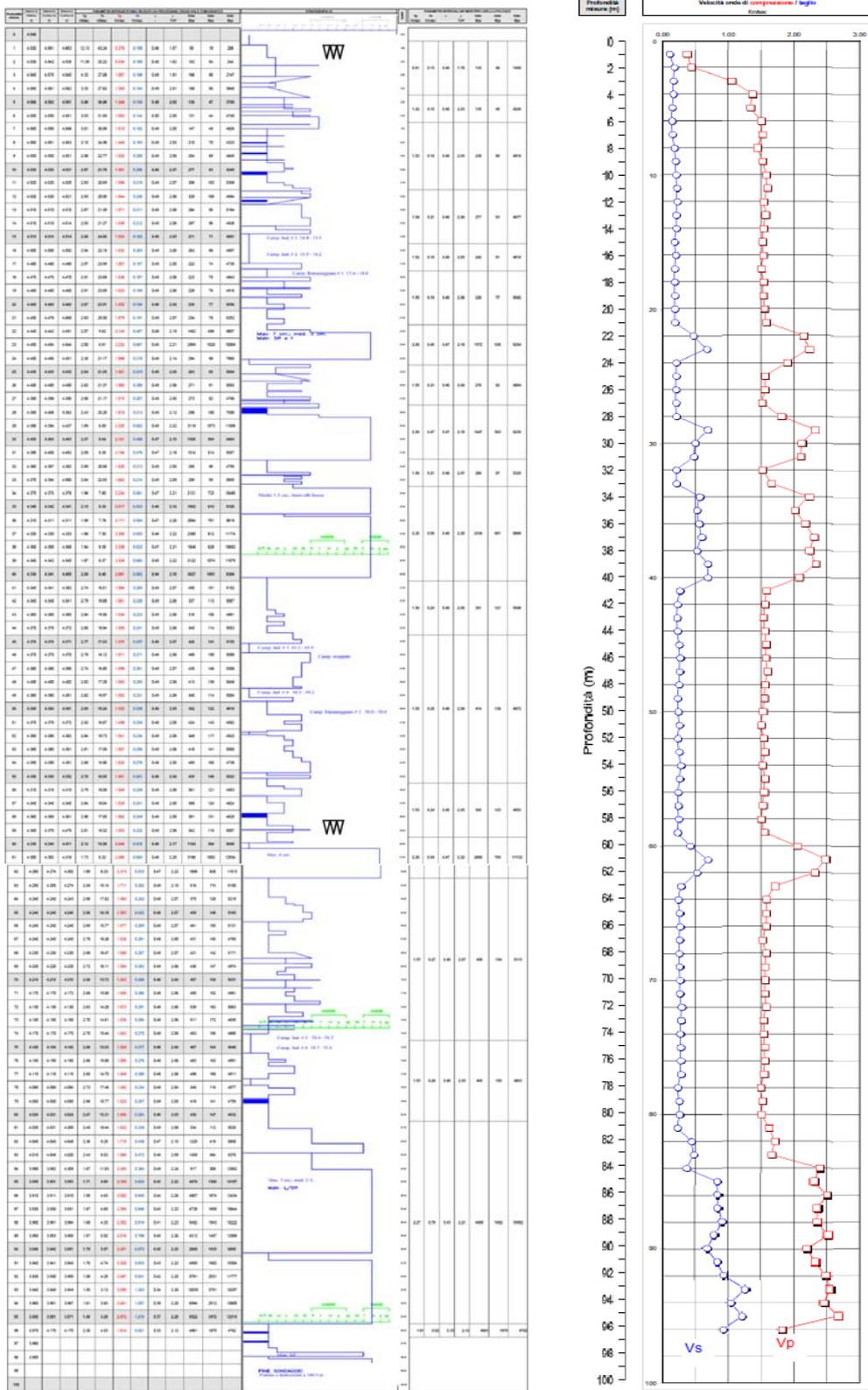


Figura 5: log stratigrafico del sondaggio eseguito a Viserba e risultati della prova cross-hole.

La prospezione sismica tra fori con tecnica "cross hole" è stata scelta in funzione della elevata profondità che si voleva indagare e della necessità di ottenere misure dirette di V_s e V_p . Per tale prospezione è stata incaricata la Ditta PROGEO S.r.l. di Forlì che nel dicembre 2010 ha realizzato la prova Cross Hole (vedi allegato 2 "Indagine geofisica in località Viserba - Comune di Rimini" - dicembre 2010 redatto dal Dott. Geol. Pulelli Gabriele).

5.3 – Sintesi dei risultati delle indagini

A partire da queste indicazioni e utilizzando dati pregressi relativi alla configurazione geologica del sottosuolo e ai valori delle velocità di propagazione delle onde S nel primo sottosuolo (dedotte da misure dirette in foro o da misure di vibrazioni ambientali su antenna sismica) è stato possibile tentare una prima identificazione dei corpi geologici responsabili dei fenomeni di risonanza sismica individuati. In particolare, visto che le velocità medie delle onde S delle coperture (dell'ordine dei 200÷250 m/s nei primi 30 m e circa 350÷400 m/s a profondità maggiori) è possibile utilizzare la relazione che lega i valori di F_0 alla profondità del substrato sismico risonante (vedi sopra) per stabilire un valore plausibile di quest'ultimo. Utilizzando questa relazione è possibile quindi associare ai valori di $F_0=2÷3$ Hz una profondità della superficie di contrasto di impedenza dell'ordine di poche decine di metri. Per quanto riguarda invece valori $F_0<1$ Hz la profondità del substrato risulta dell'ordine del centinaio di metri o superiore.

6 –SCELTA DELLE TABELLE PER LA STIMA DEI FATTORI DI AMPLIFICAZIONE

I dati stratigrafici (figg. 1, 2, 3 e 5) indicano che nel sottosuolo della piana settentrionale sono quasi sempre presenti spessori importanti (> 10 m) di ghiaie di conoide alluvionale del Pleistocene superiore–Olocene, generalmente a profondità comprese tra 15 e 30 m, mentre nel sottosuolo della piana a sud del Marecchia tali ghiaie sono assenti o hanno spessori di pochi metri. Nel settore meridionale possibili contrasti di impedenza potrebbero quindi essere costituiti dalle sommità dei corpi ghiaiosi dei cicli deposizionali precedenti, localizzati a profondità superiori di 80 m, o dal tetto del substrato marino, in questo settore localizzato a profondità superiori a 150 m (figg. 1 e 2).

I risultati delle misure di rumore sismico suggeriscono quindi che, per una corretta valutazione della risposta sismica locale, occorre tenere nella dovuta considerazione la presenza di superfici di contrasto di impedenza poco profonde (poche decine di metri). Questo implica che nella piana a nord del Marecchia le tabelle per la stima dell'amplificazione in aree di pianura dell'Allegato A2 della direttiva regionale Delibera di Assemblea Legislativa n. 112 del 02/05/2007 possono non essere le più idonee in quanto prevedono una profondità del substrato dei depositi alluvionali almeno di varie decine di metri. Considerando la prossimità del margine appenninico alla costa si è ritenuto più opportuno valutare l'amplificazione nella piana settentrionale utilizzando la tabella del margine appenninico che prevede la presenza di depositi di

copertura su substrato marino con $V_s < 800$ m/s a profondità di poche decine di metri e quindi meglio approssima le condizioni stratigrafiche locali.

Questo non deve sorprendere perché la scelta delle tabelle per la stima dell'amplificazione riportate nell'Allegato A2 delle direttive regionali DAL 112/2007 non dipende dal solo contesto morfologico ma deve essere attentamente valutata in base alla stratigrafia.

Situazioni simili a quella sopra descritta sono state riscontrate in tutti i contesti di conoide alluvionale sepolta, lungo le fasce di transizione tra rilievi e zone di pianura, finora analizzati (cfr MS di secondo livello del Comune di Bologna, dell'Associazione dei Comuni dell'Ambito faentino, dell'Unione Terre dei Castelli). Anche in questi casi gli Autori, d'intesa con le Amministrazioni, hanno ritenuto più opportuno stimare l'amplificazione considerando una copertura di poche decine di metri su un substrato caratterizzato da $V_s < 800$ m/s.

In particolare a seguito dell'indagine di approfondimento svolta, sono state sviluppate due cartografie dove si sono definiti gli ambiti territoriali per la valutazione dei fattori di amplificazione (F.A.), tenendo conto degli schemi stratigrafici riportati negli allegati A2.1.1 e A2.1.2 delle direttive regionali DAL 112/2007.

Quindi, per la valutazione dei parametri F.A., si è ritenuto di suddividere il territorio comunale in cinque ambiti territoriali, così come di seguito riportato:

- ambito costiero, caratterizzato da un profilo stratigrafico costituito da sedimenti alluvionali prevalentemente fini, sabbie costiere superficiali (con spessori fino a 10 m) e substrato poco profondo (25-60 m dal p.c.) denominato COSTA 1;
- ambito di pianura e costiero, caratterizzato da un profilo stratigrafico costituito, dall'alto, da sedimenti alluvionali fini e sabbie costiere, fino a profondità massima di 25 m, poggianti su depositi grossolani di conoide di spessore variabile tra 5 e 15 m; poiché la V_s dei depositi grossolani è paragonabile a quella di un substrato marino a bassa velocità ($V_s < 800$ m/s, es. Argille Azzurre) e l'interfaccia tra i depositi fini e quelli grossolani costituisce un contrasto d'impedenza (rilevato dalle prove geofisiche eseguite) è stato ritenuto più idoneo valutare l'amplificazione di questo settore utilizzando la tabella relativa alle coperture in ambito appenninico e di margine appenninico-padano su substrato marino caratterizzato da $V_s < 800$ m/s;
- ambito di pianura caratterizzato da profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di orizzonti di ghiaia (di spessore anche di decine di metri), con substrato profondo (>100 m da p.c.) (PIANURA 2),
- sedimenti alluvionali di spessore fino a 30 m in ambito appenninico e di margine appenninico padano su substrato marino caratterizzato da $V_s < 800$ m/s,
- substrato marino affiorante caratterizzato da $V_s < 800$ m/s anche per alcune decine di m da p.c..

La dislocazione degli ambiti suddetti è riportata nella Tavola B.14a/b "Carta degli ambiti sismici omogenei e delle misure di sismica passiva con picchi di risonanza per frequenze maggiori ad 1 Hz" e allo stesso modo nella Tavola B.15a/b "Carta degli ambiti sismici omogenei e delle misure di sismica passiva con picchi di risonanza per frequenze minori ad 1 Hz". Nelle medesime tavole si riportano, suddivisi per classi d'intervallo, i valori delle frequenze di risonanza misurate in sito.

7 – STIMA DELL'AMPLIFICAZIONE (SECONDO LIVELLO DI APPROFONDIMENTO)

Secondo quanto previsto dagli indirizzi regionali (D.A.L. 112/2007), è stata realizzata la microzonazione sismica delle porzioni di territorio comprendenti i centri urbani, le aree di riqualificazione e le aree di potenziale espansione.

Considerati l'area di studio, l'ambito di realizzazione e le finalità (PSC), nelle aree suscettibili di amplificazione prive di particolari elementi di pericolosità locale (vedi analisi di primo livello di cui alla Tav. B.9a/b – “Carta delle aree suscettibili degli effetti locali”, e alla Tav. B.10a/b - “Carta di sintesi delle pericolosità sismiche” redatte per il Quadro Conoscitivo del PSC e tab. 3), è stata realizzata una microzonazione sismica di secondo livello, approfondimento che richiede la realizzazione di indagini geotecniche e geofisiche di tipo standard e prevede la stima dei fattori di amplificazione attraverso l'utilizzo di tabelle e formule.

Come già indicato, nelle aree collinari e nelle zone di pianura in cui è presente un contrasto di impedenza a bassa profondità l'amplificazione è stata stimata con la tabella del margine appenninico su substrato a bassa velocità ($V_s < 800$ m/s) che prevede la definizione dello spessore H di copertura, o profondità del tetto del substrato, e del parametro di V_{SH} , o valore equivalente di V_s nello spessore considerato (H).

Negli altri casi in cui non è stato individuato nessun contrasto di impedenza prossimo alla superficie l'amplificazione è stata stimata con le tabelle relative ad ambiti di pianura o costa o, nelle aree collinari, con la tabella relativa alle zone appenniniche con substrato marino caratterizzato da V_s a bassa velocità direttamente affiorante. Tali tabelle richiedono la definizione del parametro V_{S30} .

I risultati di questa analisi sono sintetizzati in cartografie di dettaglio (scala 1:10.000) che individuano zone a diversa pericolosità sismica e forniscono indicazioni relative sulla maggiore o minore pericolosità in termini di fattori di amplificazione di accelerazione massima orizzontale (FA_{PGA}) e di Intensità di Housner per intervalli di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 s ($FA_{0,1-0,5s}$) e tra 0,5 e 1 s ($FA_{0,5-1s}$).

Inizialmente è stata elaborata la Tav. B.16a/b - "Carta delle velocità delle onde di taglio - V_s " ottenuta mediante elaborazione dei dati di velocità delle onde di taglio V_s , provenienti dalle prove geofisiche effettuate sul territorio. L'individuazione della V_s diventa elemento caratterizzante al fine dell'attribuzione di pericolosità di sito al territorio, che si esplica nel determinare valori dei fattori di amplificazione (F.A.), diversificato a seconda degli ambiti territoriale considerati come previsto all'allegato 2, punto A2.1 della Delibera di Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/07.

In particolare la V_s è stata calcolata:

- come $V_{sH} = H / \sum h_i / V_{si}$ dove H è lo spessore di copertura al di sopra del substrato rigido, o profondità del tetto del substrato, nei casi in cui $H \leq 30$ m;
- come $V_{s30} = 30 / \sum h_i / V_{si}$ nei casi in cui lo spessore della copertura è superiore a 30 m e le prove geofisiche non hanno evidenziato contrasti di velocità almeno per alcune decine di m da p.c. ($H > 30$ m).

I valori di V_s determinata nella cartografia provengono da:

- prove CH, DH, SCPT, Re.Mi, MASW;
- prove di sismica passiva con tecnica a stazione sismica singola (HVSR);
- prove di sismica passiva con tecnica ad antenna bidimensionale (Array).

Sono stati inseriti inoltre gli ambiti territoriali per la valutazione dei fattori di amplificazione F.A., già descritti nel capitolo precedente, di cui allegato 2, punto A2.1 della Delibera di Assemblea Legislativa della Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/07:

- ambito costiero caratterizzato da profilo stratigrafico costituito da sedimenti alluvionali prevalentemente fini, sabbie costiere superficiali (con spessori fino a 10 m e substrato poco profondo (25-60 m dal p.c.) (COSTA 1),
- ambito di pianura e costiero, (zona nord) caratterizzato da un profilo stratigrafico costituito, dall'alto, da sedimenti alluvionali fini e sabbie costiere, fino a profondità massima di 25 m, poggianti su depositi grossolani di conoide di spessore variabile tra 5 e 15 m; per questo ambito la stima dell'amplificazione è stata ottenuta utilizzando la tabella relativa alle coperture in ambito appenninico e margine appenninico padano su substrato marino caratterizzato da $V_s < 800$ m/s;
- ambito di pianura caratterizzato da profilo stratigrafico costituito da alternanze di sabbie e peliti, con spessori anche decametrici, talora con intercalazioni di orizzonti di ghiaia (di spessore anche di decine di metri), con substrato profondo (>100 m da p.c.) (PIANURA 2);
- sedimenti alluvionali di spessore fino a 30 m in ambito appenninico e di margine appenninico-padano su substrato marino caratterizzato da $V_s < 800$ m/s;
- substrato marino affiorante caratterizzato da $V_s < 800$ m/s anche per alcune decine di m da p.c..

Successivamente sono state redatte le cartografie dei fattori di amplificazione (F.A.) relativamente alle tre condizioni sopra citate (rapporto di accelerazione massima orizzontale, F_{PGA} , e di Intensità di Housner per intervalli di periodi compresi tra 0,1 e 0,5 s, $FA_{0,1-0,5s}$, e tra 0,5 e 1 s, $FA_{0,5-1s}$), identificandole come: Tav. PSC.1.3.2.a/b "Carta di microzonazione sismica: fattori di amplificazione di PGA"; PSC.1.3.3.a/b "Carta di microzonazione sismica: fattori di amplificazione dell'intensità spettrale per $0,1 \text{ s} < T_0 < 0,5 \text{ s}$ "; Tav. PSC.1.3.4.a/b "Carta di microzonazione sismica: fattori di amplificazione dell'intensità spettrale per $0,5 \text{ s} < T_0 < 1,0 \text{ s}$ ".

I risultati delle stime dei fattori di amplificazione sono diversi in funzione della stratigrafia e quindi dell'intervallo di periodi considerato.

Per i bassi periodi ($T_0 < 0,5s$) sono stati stimati valori elevati, F_{PGA} e $FA_{0,1-0,5s} > 2$, nella piana e lungo la costa a nord del vecchio corso del torrente Ausa, dove si è prevalentemente sviluppata la conoide alluvionale del fiume Marecchia e la successione alluvionale è caratterizzata da depositi fini di spessore generalmente inferiore a 25 m su un orizzonte grossolano, ghiaie e sabbie di conoide, di spessore variabile tra 5 e 15 m. Valori elevati dei fattori di amplificazione per $T < 0,5$ s sono stati stimati anche lungo la costa a sud del centro storico, dove sono presenti sabbie poco addensate nei primi 10 m da p.c.. Nelle aree di piana dove il corpo grossolano di conoide è assente o di spessore ridotto la successione stratigrafica è costituita da sedimenti prevalentemente fini (limi e sabbie) per varie decine di metri; in questi settori, i valori di amplificazione per i bassi periodi sono generalmente medio-bassi, F_{PGA} e $FA_{0,1-0,5s}$ dell'ordine di 1,5-1,8.

Per i periodi maggiori ($0,5s < T < 1s$) si osserva invece una distribuzione dei valori di amplificazione più eterogenea e articolata, che comunque evidenzia valori più elevati, $FA_{0,5-1s}$ in genere maggiori di 2, nelle aree di piana e lungo la costa che si riducono verso monte al diminuire dello spessore delle coperture continentali.

Bassi valori di amplificazione per tutti i parametri (F_{PGA} e $FA_{0,1-0,5s}$ e $FA_{0,5-1s}$) sono stati stimati nelle aree collinari, dove gli spessori delle coperture sono ridotti (< 5 m) o assenti.

Nelle aree d'interesse oggetto di MS, non essendo presenti condizioni morfologiche che possono determinare effetti di amplificazione topografica, non è stato necessario stimare il coefficiente di amplificazione topografica S_T .

Lungo la fascia costiera, dove sono presenti sabbie sature superficiali potenzialmente liquefacibili, sono richieste indagini e analisi di approfondimento di terzo livello. Come informazione indicativa del rischio di liquefazione sono stati riportati i risultati puntuali di stime del potenziale di liquefazione effettuate in occasioni di studi precedenti (Cipriani et al., 2000; Facciorusso & Vannucchi, 2009) e studi geologici per analisi di microzonazione sismica di III° livello di approfondimento realizzati per strumenti di pianificazione urbanistica (area di via Pascoli, Copioli e Carlini 2008; area sita a Viserbella, Copioli e Carlini 2009, area scolastica sita in via Parini 2008).

Infine, per agevolare il confronto tra le microzone sismiche e le aree d'interesse urbanistico e quindi supportare al meglio le scelte pianificatorie, nelle mappe di microzonazione sismica sono state cartografate anche le ipotesi di nuove realizzazioni territoriali suddivise in:

- territorio urbanizzato,
- territorio urbanizzabile,
- aree inedificate di superficie superiori a 8.000 mq negli ambiti consolidati a marcata caratterizzazione turistica,
- ambiti potenziali per nuovi insediamenti (insediamenti e nuove dotazioni territoriali),
- nuove dotazioni territoriali,
- nuovi insediamenti produttivi manifatturieri,
- nuovi insediamenti produttivi terziari,
- ambiti da riqualificare,
- nuove dotazioni ecologiche in territorio rurale: campo pozzi di Molino Ronci,
- nuove dotazioni ecologiche in territorio rurale: vasca di laminazione di Rimini nord,
- nuova area di attrezzature sportive in territorio rurale,
- localizzazione alternativa del nuovo cimitero comunale,
- itinerari primari di interesse regionale-nazionale di progetto,
- collegamento nord della nuova SS 16 e del casello nord da definire,
- asse intermedio retro-costiero: tratti proposti,
- strade urbane di penetrazione: tratti proposti,
- ipotesi alternative di collegamenti stradali ai fini della pedonalizzazione del Ponte di Tiberio,
- viabilità extraurbana secondaria: tratti proposti,
- nuovo parcheggio scambiatore,
- nuovo casello autostradale.
- trasporto rapido costiero - TRC
- fermate TRC

8 –PRESCRIZIONI PER LE SUCCESSIVE FASI DI PIANIFICAZIONE URBANISTICA COMUNALE

Lo studio di microzonazione sismica di secondo livello del Comune di Rimini in parte rientra fra gli elaborati del Quadro Conoscitivo che sono parte integrante del progetto di Piano Strutturale, ed in parte, relativamente alle tavole PSC.1.3.1.a/b "Carta dei livelli di approfondimento per gli studi di microzonazione sismica", PSC.1.3.2.a/b "Carta di microzonazione sismica: fattori di amplificazione di PGA", PSC.1.3.3.a/b "Carta di microzonazione sismica: fattori di amplificazione dell'intensità spettrale per $0,1 s < T_0 < 0,5 s$ ", Tav. PSC.1.3.4.a/b "Carta di microzonazione sismica: fattori di amplificazione dell'intensità spettrale per $0,5 s < T_0 < 1,0 s$ ", direttamente nel PSC quali tavole di piano.

Tale studio, permetterà di calibrare e normare, nel RUE e nel POC, gli indirizzi e le prescrizioni necessari nel processo pianificatorio di conoscenza e consapevolezza del territorio, con l'obiettivo di un primo passo di un percorso fatto di continui aggiornamenti e miglioramenti che permetteranno, grazie alla sostanziale omogeneità e confrontabilità delle prove raccolte e periodicamente analizzate in maniera critica, di dettagliare e aggiornare progressivamente quella cartografia che oggi suddivide il territorio in ambiti omogenei per la determinazione del fattore di amplificazione sismica.

La Tav. PSC.1.3.1 "Carta dei livelli di approfondimento per gli studi di microzonazione sismica" fornisce la caratterizzazione sismica del territorio in merito alle pericolosità di sito in funzione delle condizioni di utilizzo urbanistico del territorio.

In particolare sono stati riportati gli ambiti territoriali urbanizzati e quelli previsti di nuova urbanizzazione, oltre alle infrastrutture di interesse regionale e nazionale, quelle di interesse provinciale e comunale, i nuovi parcheggi scambiatori ed il nuovo casello autostradale.

La microzonazione sismica di secondo livello individua:

- il territorio urbanizzato dove è sufficiente la microzonazione sismica di II livello di approfondimento - analisi semplificata,
- il territorio urbanizzato dove è necessario svolgere ulteriori indagini ed effettuare studi di microzonazione sismica di III livello di approfondimento - analisi approfondita per aree soggette a liquefazione e densificazione di cui alla lettera a) del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007,
- il territorio urbanizzato dove è necessario svolgere ulteriori indagini ed effettuare studi di microzonazione sismica di III livello di approfondimento - analisi approfondita per aree soggette a liquefazione e densificazione di cui alla lettera b) del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007,
- ambiti suscettibili di nuova urbanizzazione dove è sufficiente la microzonazione sismica di II livello di approfondimento - analisi semplificata,
- ambiti suscettibili di nuova urbanizzazione dove è necessario svolgere ulteriori indagini ed effettuare studi di microzonazione sismica di III livello di approfondimento - analisi approfondita per aree soggette a liquefazione e densificazione di cui alla lettera a) del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007,
- ambiti suscettibili di nuova urbanizzazione dove è necessario svolgere ulteriori indagini ed effettuare studi di microzonazione sismica di III livello di

- approfondimento - analisi approfondita per aree soggette a liquefazione e densificazione di cui alla lettera b) del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007,
- infrastrutture di competenza regionale-statale di previsione ritenute opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile di cui all'allegato A, punti A1 e A2.3.4 della Delibera di Giunta RER n. 1661/2009. Per tali opere è necessario svolgere indagini dettagliate al fini di effettuare studi di microzonazione sismica di III livello di approfondimento - analisi approfondita per aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico di cui alla lettere d), del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa RER n. 112 del 02/05/07,
 - viabilità di interesse regionale-statale
 - nuovo parcheggio scambiatore
 - nuovo casello autostradale
 - infrastrutture di competenza regionale di previsione ritenute opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile di cui all'allegato A, punto B2.2.1. della Delibera di Giunta RER n. 1661/2009. Per tali opere è necessario svolgere indagini dettagliate al fini di effettuare studi di microzonazione sismica di III livello di approfondimento - analisi approfondita per aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico di cui alla lettere d), del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa RER n. 112 del 02/05/07,
 - viabilità di interesse provinciale-comunale
 - infrastrutture di competenza regionale di previsione ritenute opere infrastrutturali la cui funzionalità durante gli eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile di cui all'allegato A, punto B2.2.2. della Delibera di Giunta RER n. 1661/2009. Per tali opere è necessario svolgere indagini dettagliate al fini di effettuare studi di microzonazione sismica di III livello di approfondimento - analisi approfondita per aree in cui è prevista la realizzazione di opere di rilevante interesse pubblico di cui alla lettere d), del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa RER n. 112 del 02/05/07,
 - trasporto rapido costiero- TRC
 - fermate TRC

Inoltre nei punti ove è stata determinata la V_s sono riportati i valori del Fattore di Amplificazione della PGA, dell'intensità spettrale di Housner per $0,1 \text{ s} < T_0 < 0,5 \text{ s}$ e dell'intensità spettrale di Housner per $0,5 \text{ s} < T_0 < 1,0 \text{ sec}$

Nelle aree costiere dove sono presenti depositi sabbiosi, sono riportati, come elemento indicativo, i valori dell'Indice di Liquefazione (IL) definiti in precedenti studi effettuati dal Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze per la Regione Emilia-Romagna (Determina DG Ambiente, Difesa del Suolo e della Costa 19005/2005 e DGR 1944/2007, Facciorusso & Vannucchi-, 2009), dal Comune di Rimini (area di via Pascoli, Copioli e Carlini 2008; area sita a Viserbella, Copioli e Carlini 2009, area scolastica sita in via Parini 2008), e da altri soggetti in fase di presentazione di progetti di pianificazione urbanistica.

Pertanto la normativa del RUE e del POC potrà e dovrà necessariamente volgere lo sguardo verso queste diverse, ma univoche, direzioni:

- 1) la pianificazione delle nuove aree,
- 2) gli interventi sul territorio urbanizzato,

3) le nuove opere infrastrutturali.

La pianificazione delle nuove aree e le nuove opere infrastrutturali dovranno essere calibrate, sia in termini quantitativi che qualitativi, in relazione agli sviluppi e alle conclusioni urbanistiche dedotte dalle analisi di una microzonazione sismica che, come detto, andrà sempre più dettagliandosi nel tempo; sul territorio consolidato gli interventi puntuali di verifica e miglioria sismica dovranno invece essere facilitati e promossi grazie a strategie urbanistiche di dettaglio che potranno prevedere, ad esempio, accordi ed incentivazioni volumetriche a distanza .

In tutti i casi qualora intervenga la necessità di redigere studi di microzonazione sismica di III livello di approfondimento - analisi approfondita ai sensi del punto 4.2 della Delibera di Assemblea Legislativa Regione Emilia-Romagna n. 112 del 02/05/2007, questi verranno effettuati nella successiva fase di pianificazione urbanistica denominata Piano Operativo Comunale (POC).

Il PSC, per sua natura, deve stabilire gli orientamenti generali di assetto, sviluppo e tutela del territorio nel lungo periodo; troppo spesso invece si attribuisce ad esso solamente la funzione prevalente di ubicazione dei futuri ambiti di espansione e delle viabilità strutturali, dimenticando che la prima azione di intervento ed indirizzo, a cui tutte le altre devono essere subordinate, è quella di immaginare un progetto di sicurezza territoriale che deve partire dal PSC per poi svilupparsi e dettagliarsi soprattutto con il RUE e con il POC.

9 –CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio di secondo livello di approfondimento eseguito per la microzonazione sismica del territorio comunale di Rimini ha evidenziato che ampi settori, sia in collina che in pianura, sono suscettibili di amplificazione.

Situazioni che richiedono approfondimenti di terzo livello, oltre le aree dove sono previste opere ed edifici di rilevante interesse pubblico, sono presenti solo lungo la fascia costiera, dove esistono le condizioni predisponenti il fenomeno della liquefazione.

Per i bassi periodi ($T_0 < 0,5s$) sono stati stimati valori elevati, F_{PGA} e $FA_{0,1-0,5s} > 2$, nella piana e lungo la costa a nord del vecchio corso del torrente AUSA, dove si è prevalentemente sviluppata la conoide alluvionale del fiume Marecchia e la successione alluvionale è caratterizzata da depositi fini di spessore generalmente inferiore a 25 m su un orizzonte grossolano, ghiaie e sabbie di conoide, di spessore variabile tra 5 e 15 m. Valori elevati dei fattori di amplificazione per $T < 0,5 s$ sono stati stimati anche lungo la costa a sud del centro storico, dove sono presenti sabbie poco addensate nei primi 10 m da p.c.. Nelle aree di piana dove il corpo grossolano di conoide è assente o di spessore ridotto la successione stratigrafica è costituita da sedimenti prevalentemente fini (limi e sabbie) per varie decine di metri; in questi settori, i valori di amplificazione per i bassi periodi sono generalmente medio-bassi, F_{PGA} e $FA_{0,1-0,5s}$ dell'ordine di 1,5-1,8.

Per i periodi maggiori ($0,5s < T < 1s$) si osserva invece una distribuzione dei valori di amplificazione più eterogenea e articolata, che comunque evidenzia valori più elevati,

$FA_{0,5-1s}$ in genere maggiori di 2, nelle aree di piana e lungo la costa, che si riducono verso monte al diminuire dello spessore delle coperture continentali.

Bassi valori di amplificazione per tutti i parametri (F_{PGA} , $FA_{0,1-0,5s}$ e $FA_{0,5-1s}$) sono stati stimati nelle aree collinari, dove gli spessori delle coperture sono ridotti (< 5 m) o assenti.

Nelle aree di interesse urbanistico sono state riconosciute alcune condizioni di instabilità di versante.

Le indagini non hanno evidenziato inversioni di V_s significative e le caratteristiche dei terreni sembrano migliorare in maniera più o meno graduale con la profondità.

Inoltre, nel sottosuolo dei siti indagati non sono state evidenziate, alla scala delle aree d'interesse, forme sepolte che determinino rapide variazioni laterali o irregolarità geometriche del tetto del substrato rigido.

Da ciò risulta che almeno nelle aree esaminate, ad eccezione della fascia costiera dove sono presenti terreni potenzialmente liquefacibili (classe S2 delle NTC 2008), non sembrano essere presenti particolari controindicazioni all'applicazione, in fase di progettazione, delle procedure semplificate previste dalle NTC 2008 per il calcolo dell'azione sismica.

BIBLIOGRAFIA

APAT (2005) - Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 256 Rimini. Coord. scientifico: L. Martelli, P. Severi e Marco Roveri. Regione Emilia-Romagna, SGSS – APAT, SGI. S.EL.CA., Firenze.

Boccaletti M., M. Bonini, G. Corti, P. Gasperini, L. Martelli, L. Piccardi, P. Severi e G. Vannucci (2004) - Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna. Regione Emilia-Romagna, SGSS – CNR, Istituto di Geoscienze e Georisorse, Firenze. Selca, Firenze.

Carta geologica dell'Appennino emiliano romagnolo alla scala 1:10.000; Servizio geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia-Romagna. <http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia/index.htm>

D.A.L. 112/2007: Atto di indirizzo e coordinamento tecnico ai sensi dell'art.16 comma 1, della L.R. 20/2000 per "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica". Deliberazione dell'Assemblea Legislativa della Regione Emilia Romagna n.112 del 2 maggio 2007. B.U.R. Emilia-Romagna n. 64 del 17/05/2007.

DISS Working Group (2007) - Database of Individual Seismogenic Sources (version 3.0.4): a compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, <http://legacy.ingv.it/DISS/>.

Martelli L., Quagliere S., Cibirin U., Severi P., Correggiari A. e Roveri M. (2005) – Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 256 Rimini. Regione Emilia-Romagna, SGSS – APAT, SGI. S.EL.CA., Firenze.

Meletti C., Valensise G. (2004) – Zonazione sismogenetica ZS9 – App. 2 al Rapporto Conclusivo. In: Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004.

OPCM 3274/2003: Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003: "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica". G.U. n. 155, 08/05/2003.

Stucchi M., Camassi R., Rovida A., Locati M., Ercolani E., Meletti C., Migliavacca P., Bernardini F. e Azzaro R. (2007) - DBMI04, il database delle osservazioni

macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>. Quaderni di Geofisica, INGV.

SGA, Guidoboni E. e Ferrari G. (a cura di), 1986. *Il terremoto di Rimini e della costa romagnola: 25 dicembre 1786. Analisi e interpretazione*, Regione Emilia-Romagna, Provincia di Forlì e Comune di Rimini.

C.N.R. - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Postpischl D. (a cura di), 1991, *San Marino e il terremoto*, Repubblica di San Marino - Dicastero del Territorio.

ALLEGATO 1

**Caratterizzazione dinamica del sottosuolo
del comune di Rimini attraverso indagini di
sismica di superficie realizzate con tecniche
di tipo “passivo”**

Committente: Provincia di Rimini

Dott. Geologo Domenico Pileggi

Relazione Tecnica

PREMESSA

Su incarico della Provincia di Rimini, il Dott. Geologo Domenico Pileggi, con la supervisione del Prof. Dario Albarello dell'Università degli Studi di Siena, ha eseguito una campagna di misure di sismica di superficie per la caratterizzazione del sottosuolo dell'area comunale di Rimini. La fase di acquisizione dati, svolta tra i mesi di maggio e giugno del 2010, è durata all'incirca 15 giorni lavorativi nei quali sono stati studiati 20 siti ritenuti significativi ai fini della risposta sismica locale. Le metodologie d'indagine, definite di "sismica passiva", utilizzate per lo svolgimento del lavoro, si basano sullo studio delle onde superficiali attraverso acquisizioni delle vibrazioni ambientali. Nel dettaglio, in ognuno dei siti considerati, sono state eseguite sia misure con antenne bidimensionali che con tecnica a "stazione singola" (HVSF) per un totale di 75 acquisizioni. Di seguito verranno esposti i principi teorici delle tecniche adottate, la fase di lavoro legata all'elaborazione dati ed infine i risultati ottenuti.

INTRODUZIONE

L'andamento delle velocità di propagazione delle onde di taglio nel primo sottosuolo (profilo delle Vs) rappresenta in generale un'informazione importante ai fini della caratterizzazione meccanica (in campo dinamico) dei terreni.

In particolare essa risulta fondamentale negli studi della risposta sismica locale. A seguito di un terremoto, si ha spesso modo di osservare come la distribuzione dei danni sul territorio sia assai eterogenea a parità di vulnerabilità dell'edificato. Le condizioni geologico-tecniche degli strati più superficiali, nonché le caratteristiche geomorfologiche possono concorrere, infatti, ad accrescere localmente lo scuotimento indotto da un terremoto. Per un'efficace azione di prevenzione, in materia di rischio sismico, è necessario tener conto non solo, quindi, della zonazione sismica nazionale, ma anche di eventuali sfavorevoli condizioni locali, a scala intra-comunale. Particolarmente rilevanti sono i cosiddetti effetti di amplificazione di sito, ossia l'insieme delle variazioni in ampiezza, durata e contenuto in frequenza che un moto sismico, rispetto ad una formazione rocciosa di base, subisce attraversando gli strati sovrastanti, fino alla superficie. Tali effetti sono causati, essenzialmente, da un processo di intrappolamento e risonanza dell'energia del terremoto all'interno di un volume di sottosuolo costituito da materiali sedimentari a bassa impedenza sismica (IS: prodotto della velocità di propagazione

dell'onda per la densità del mezzo attraversato) e posto sopra ad un dominio con più alta IS, per esempio un substrato roccioso o un suolo particolarmente rigido. Durante la propagazione dalla sorgente al sito, il raggio sismico, per via del fenomeno della rifrazione, subisce un processo di verticalizzazione e tende ad emergere dal basso verso l'alto. Le onde compressionali (P), dunque, sollecitano all'incirca verticalmente l'edificato, tuttavia è la sollecitazione orizzontale, dovuta alle onde trasversali (S), la causa principale del danneggiamento per le costruzioni. Gli edifici e le opere architettoniche in genere sono collaudate per resistere a forti carichi statici ma quasi mai viene valutata la risposta della costruzione a carichi dinamici. Da quanto detto si deduce che studiare le modalità di propagazione ed amplificazione delle onde trasversali o di taglio (S) nel sottosuolo vuol dire prevedere, a basso costo, le sollecitazioni che una struttura dovrà sopportare durante il verificarsi di un probabile evento sismico.

Tra le metodologie che consentono di ricavare il profilo Vs del sottosuolo stanno suscitando particolare interesse quelle definite di tipo "passivo" ovvero basate sullo studio della continua vibrazione del suolo dovuta a cause sia antropiche che naturali (Vibrazioni Ambientali). Queste tipologie d'indagini presentano diversi pregi. Sono tecniche geofisiche di superficie che, non richiedendo peraltro l'impiego di alcuna strumentazione per energizzare i terreni, risultano totalmente non invasive. Le misure sono rapide e relativamente poco costose. Necessitano unicamente della disponibilità di una superficie libera su cui poter posizionare i geofoni. Sono particolarmente adatte ad essere utilizzate in contesti nei quali altri metodi geofisici (p.es. i metodi di sismica a riflessione o rifrazione) soffrono pesantemente per il basso rapporto segnale-rumore (p.es. in aree urbane). Le profondità d'indagine che possono raggiungere sono, a parità di caratteristiche degli stendimenti e dei sensori, di gran lunga superiori a qualsiasi altra tecnica sismica di superficie.

PRINCIPI TEORICI

Misure su "Antenna Sismica"

La metodologia consiste nel valutare i tempi di arrivo delle diverse onde sismiche a un insieme di sensori (geofoni) posti alla superficie del terreno. Questi sensori possono essere distribuiti secondo geometrie variabili fino a coprire distanze dell'ordine delle decine di metri (antenna sismica). Il segnale registrato, dovuto alle vibrazioni ambientali, risulta un insieme articolato di fasi sismiche dove tuttavia le onde superficiali (Sw) rappresentano la fase energeticamente prevalente e dunque più facilmente analizzabile. Oggetto di studio di tali metodi sono proprio le Sw, dunque, ed in particolare la loro caratteristica propagazione dispersiva in mezzi stratificati.

In termini qualitativi, la dispersione delle onde Sw può essere spiegata come segue. Onde superficiali di diversa frequenza (f) si propagano interessando volumi di terreno fino ad una profondità circa pari alla loro lunghezza d'onda (λ). La velocità di propagazione (v) sarà strettamente dipendente dalle proprietà fisiche degli strati coinvolti. Giacché f e λ sono correlate da una semplice relazione, si ha che onde Sw ad alta frequenza avranno tendenzialmente una minore lunghezza d'onda e si propagheranno nei livelli di terreno più superficiali, viceversa onde a bassa frequenza interesseranno strati più profondi. Ne deriva anche che differenti componenti armoniche delle onde superficiali avranno diverse velocità di propagazione. La funzione che associa la velocità di propagazione alla frequenza è detta curva di dispersione; essa è univocamente correlata alla struttura meccanico-stratigrafica del sito e può essere ricavata

attraverso differenti metodologie di elaborazione dei dati acquisiti in campagna (ESAC, FK, HR) . La figura 1 mostra nel pannello a destra un esempio di antenna sismica mentre nel pannello di sinistra è mostrata la curva di dispersione.

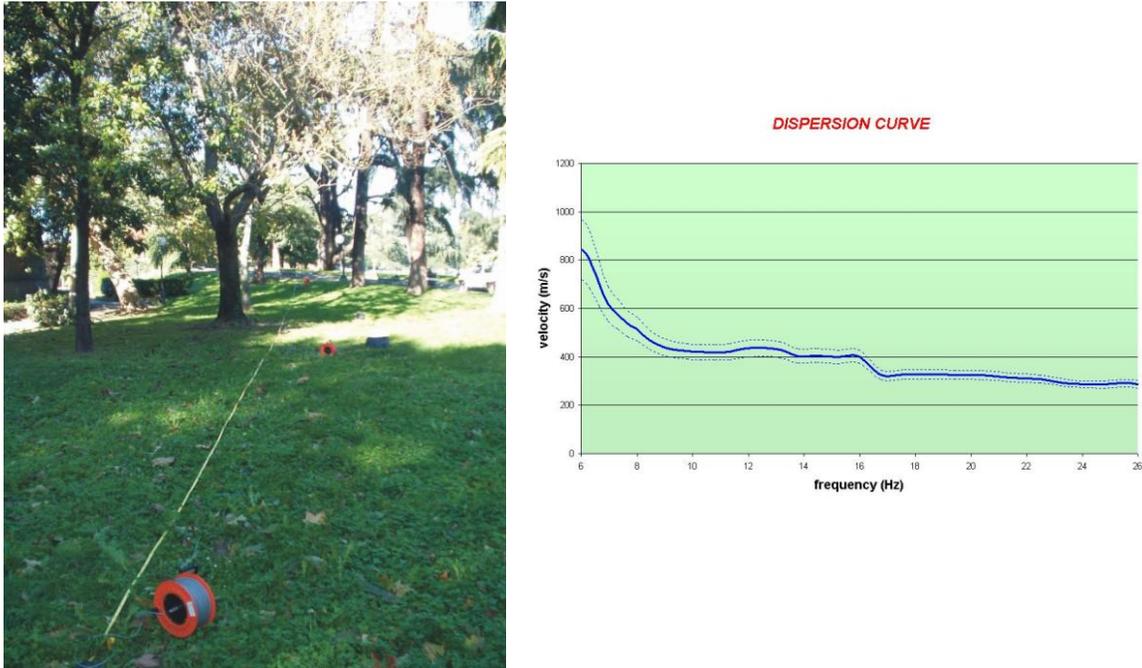


Figura 1: Esempio di misura realizzata con la tecnica dell’antenna sismica. Nel pannello di sinistra, si può osservare la disposizione dei sensori; nel pannello di destra è visualizzata la curva di dispersione.

Considerando che le onde superficiali sono essenzialmente un prodotto delle onde di volume ed in particolar modo delle onde trasversali (S), attraverso opportune procedure numeriche, definite di inversione, è possibile infine risalire al profilo di velocità V_s nel sottosuolo partendo dalla curva di dispersione ricavata dai dati acquisiti in campagna.

Metodologia a “Stazione Singola”(HVSR)

Accanto alle tecniche basate sull’impiego di una antenna sismica esistono altre tecniche basate sull’uso di una singola stazione di misura. In questo caso vengono misurate le vibrazioni ambientali nelle tre direzioni dello spazio attraverso un unico sensore tridirezionale posto sulla superficie del terreno. In particolare viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios”). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno. In particolare è possibile individuare la frequenza f di questa vibrazione definita di “Risonanza”. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra f , lo spessore della parte più soffice del terreno e la velocità media delle onde sismiche nel sottosuolo (ricavata per esempio dai metodi con antenna), attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. In figura 2 viene mostrato nel pannello di sinistra un esempio di misura a stazione

singola mentre nel pannello a destra la curva HVSR corrispondente. Il massimo della curva HVSR indica la frequenza fondamentale di risonanza del sito.



Figura 2: Esempio di misura realizzata con la tecnica a stazione singola. Nel pannello di sinistra, si può osservare il sensore tridirezionale ; nel pannello di destra è visualizzata la curva dei rapporti spettrali.

Questa tipologia di misure può contribuire, inoltre, a ridurre la variabilità dovuta alla non unicità della soluzione del problema inverso realizzando una procedura d'inversione congiunta della curva di dispersione e della curva HVSR.

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL SOTTOSUOLO DI RIMINI

Durante i mesi di maggio e giugno del 2010 sono state realizzate 75 acquisizioni di vibrazioni ambientali in 20 siti del Comune di Rimini. Si tratta di 35 acquisizioni su antenna sismica bidimensionale (la cui ubicazione è riportata in figura 3) e 40 registrazioni a stazione singola



Figura 3: Ubicazione dei siti . I colori rappresentano i gruppi di misure che sono state in fase di elaborazione dati associate per caratteristiche geografiche e risultati

(2 per sito), posizionate a pochi metri di distanza da ogni antenna. Per le misure su antenna si è usato un acquirente a 16 canali e 24 bit equivalenti (Brainspy, Micromed) ed esse sono quindi state elaborate con la procedura ESAC per la ricostruzione della curva di dispersione di ogni singolo sito.

Per le misure HVSR è stato impiegato un tromografo digitale modello Tromino (Micromed).

I dati di vibrazioni ambientali acquisiti con questa tecnica d'indagine sono stati successivamente elaborati con il software "Grilla" in dotazione al tromografo.

Le curve di dispersione e le curve HVSR di ogni sito sono infine state invertite congiuntamente attraverso una procedura agli algoritmi genetici per risalire al profilo di velocità delle onde di taglio V_s . In appendice alla relazione sono sinteticamente riportati i risultati ottenuti per ogni singolo sito in studio.

Interpretazioni preliminari

Prima di realizzare le procedure d'inversione è stata eseguita una serie di confronti tra le curve di dispersione dei singoli siti di studio. In figura 4 è possibile osservare la somiglianza tra le curve A2, A3, A14 ed A19, tutte ubicate all'incirca nell'area nord del comune ed evidenziate in figura 3 dai pallini colorati in blu. Per quanto riguarda le curve di dispersione dei siti A1 ed A4, ubicate anch'esse nella medesima zona (pallini color magenta in figura 3), non è stato possibile effettuare alcun tipo di considerazione poiché, per via di forti disturbi, sono state giudicate non interpretabili.

Considerando la vicinanza geografica dei siti in studio, nonché l'uniformità della geologia dell'area, il risultato del confronto realizzato sembrerebbe indicare un unico modello interpretativo.

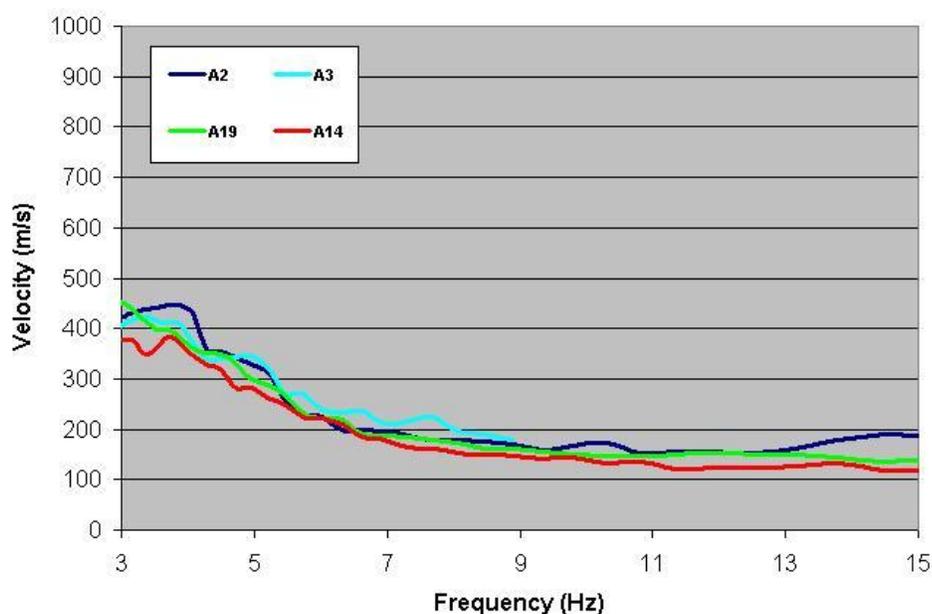


Figura 4: Confronto tra le curve di dispersione dei punti di misura A2, A3, A14 ed A19

Tale ipotesi è, inoltre, confermata dalle misure HVSR che, come si osserva in figura 5, mostrano tutte un massimo compreso tra 2 e 3 Hz circa (per tale confronto è stato possibile utilizzare le misure a stazione singola dei siti A1 ed A4).

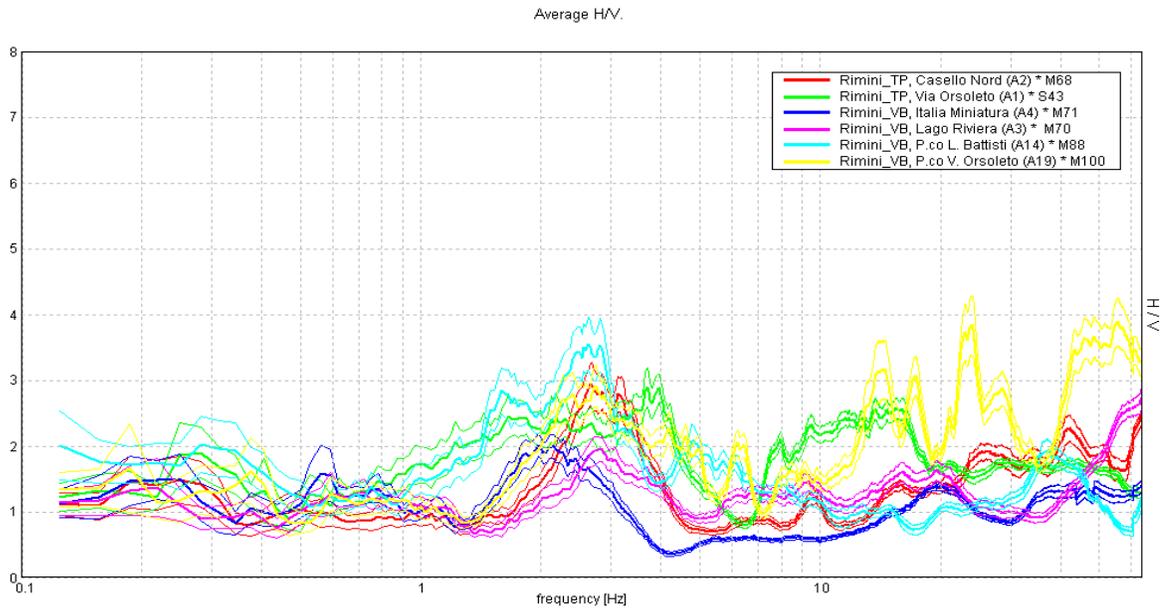


Figura 5: Confronto tra le curve di rapporti spettrali dei punti di misura A1, A2, A3, A4, A14 ed A19

Anche buona parte delle antenne ubicate nell'area centro-sud di Rimini mostra curve di dispersione confrontabili. In figura 6 è possibile osservare le curve riferite ad i siti A5, A8, A9, A10, A11, A16 ed A17 (questi siti sono indicati con pallini di colore giallo in figura 3).

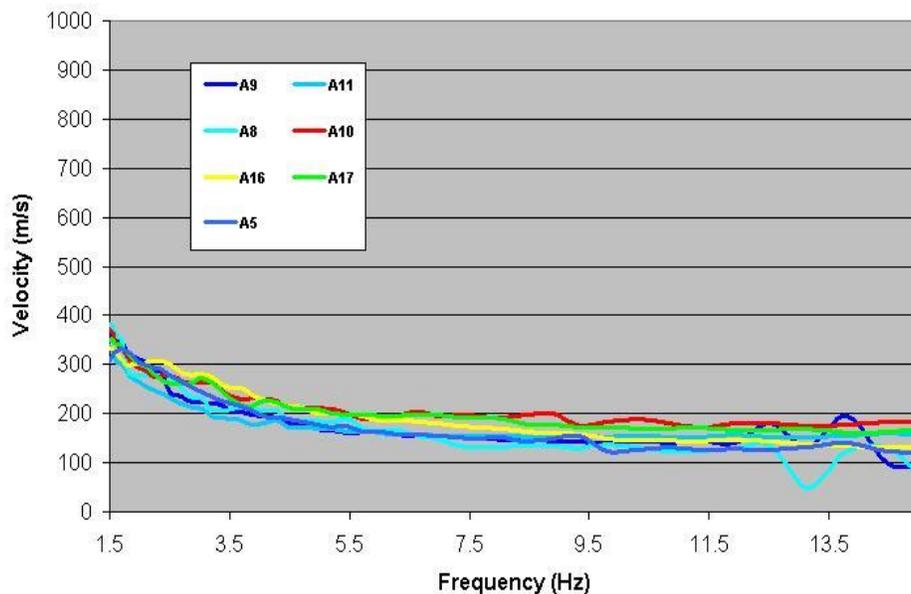


Figura 6: Confronto tra le curve di dispersione dei punti di misura A5, A8, A9, A10, A11, A16 ed A17

Tutte le curve rappresentate in figura 6 mostrano in bassa frequenza (da circa 1 a 5 Hz) il medesimo andamento. In particolar modo le curve A5, A8, A9 ed A11 (rappresentate in figura 6 con diverse tonalità di celeste) hanno un andamento complessivamente molto somigliante sia in alta che bassa frequenza. Differentemente, le restanti curve A10, A16 ed A17 sembrano discostarsi leggermente dalle altre a partire da 5 Hz in poi, disponendosi su valori di velocità lievemente più elevati.

In generale, anche in questo caso il modello interpretativo del sottosuolo di quest'area potrebbe essere unico. Le sole differenze, probabilmente, risiedono negli strati superficiali dei siti A10, A16 ed A17, che dimostrano velocità di poco maggiorate rispetto agli altri.

Anche in questo caso le misure HVSR sembrano confermare quanto ipotizzato, non rilevando, per nessuno dei siti, indicati in giallo in figura 3, particolari massimi risonanti nell'intervallo di frequenze ingegneristico (le misure risultano praticamente piatte tra 1 e 10 Hz, confronto in figura 7).

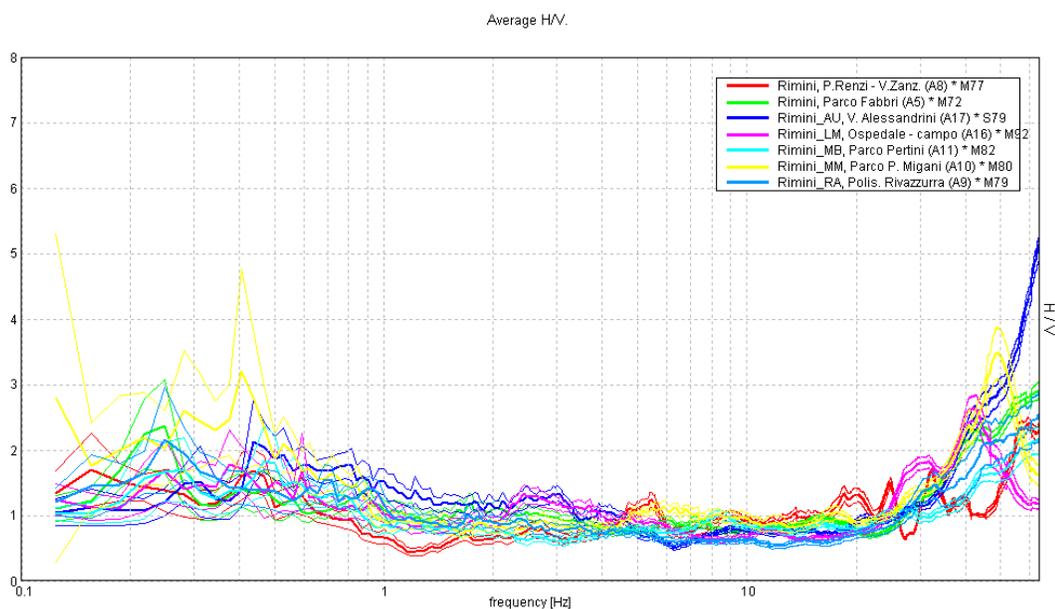


Figura 7: Confronto tra le curve di rapporti spettrali dei punti di misura A5, A8, A9, A10, A11, A16 ed A17

Contrapponendo, infine, le curve di dispersione dei siti rimanenti (indicati in figura 3 con i pallini di colore verde), si osserva come presentino tutte andamenti abbastanza diversi (figura 8). Per tale ragione non è possibile ipotizzare, come fatto per gli altri casi, un unico modello interpretativo per l'area che va da Rivabella a Marina Centro. La curva A18 è stata inserita in questo raffronto poiché, nonostante la distanza geografica, sembra avere caratteristiche in alta frequenza molto più simili alle curve A15 e A7 ed A20 piuttosto che a quelle dell'area nord, precedentemente osservata. Le misure svolte nell'area di Covignano (A13) non sono state considerate in alcun raffronto, poiché le caratteristiche geologiche di questa zona risultano molto differenti dal restante contesto.

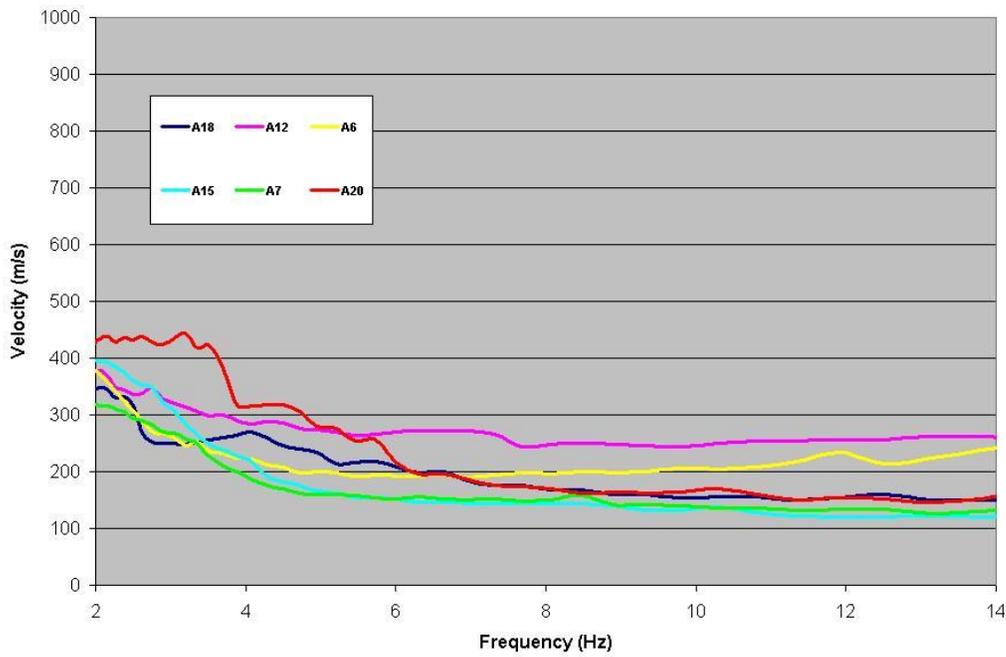


Figura 8: Confronto tra le curve di dispersione dei punti di misura A6, A7, A12, A15, A18, ed A20

Un'altra importante considerazione che è possibile effettuare, osservando le misure HVSR sia in figura 5 che in figura 7, riguarda la presenza, in bassissima frequenza (0.2-0.3 Hz circa), di un massimo con ampiezza variabile da misura a misura. In generale tale massimo è presente in tutte le acquisizioni a stazione singola realizzate nel Comune di Rimini. Inoltre, se si osserva attentamente la figura 5, si noterà la presenza di un altro massimo compreso tra 0.6 e 0.7 Hz. Quest' altro picco in frequenza, che compare unicamente nelle misure realizzate nell'area nord ed in alcuni siti dell'area Marina Centro.

Inversione congiunta

Per tutti i siti esaminati, eccetto A1 ed A4, è stata realizzata un'inversione congiunta delle curve HVSR e di dispersione con lo scopo di ottenere il profilo di velocità V_s delle onde di taglio nel sottosuolo. Le considerazioni effettuate sia sulle curve dei rapporti spettrali che sulle curve ricavate dalle antenne hanno permesso di suddividere l'area comunale in 3 zone principali:

- Area Rimini Nord: si estende da Torre Pedrera a Viserba e comprende i siti A1, A2, A3, A4, A14, A18 ed A19.
- Area Rimini Centro-Sud: si estende da Miramare a Marina Centro e comprende i siti A5, A8, A9, A10, A11, A16 ed A17.
- Area Rimini Centro: Si estende da Rivabella sino alla parte più a nord di Marina Centro e comprende i siti A6, A7, A12, A15 ed A19.

Il sito A13 ubicato presso la frazione di Covignano, che presenta caratteristiche geologiche e geografiche differenti dalle aree appena definite, non è stato inserito in questa suddivisione.

Area Rimini Nord

In base a quanto esposto nel paragrafo sulle “Interpretazioni Preliminari” è stato possibile attribuire ai siti ubicati nell’area nord un unico modello interpretativo. In pratica è stato realizzato un unico profilo V_s per i punti di misura A2, A3, A14 ed A19. Nei due pannelli di figura 9 viene mostrata la correlazione tra le curve sperimentali e le curve teoriche che meglio riproducono il dato osservato.

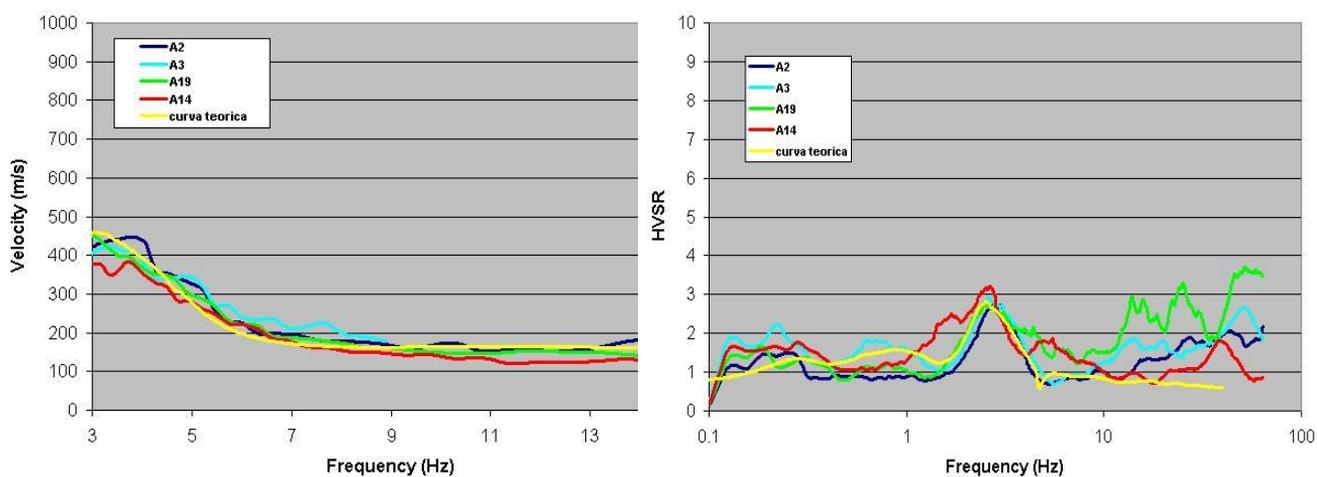


Figura 9: Correlazioni tra curve sperimentali e teoriche riferite ai punti di misura A2, A3, A14 ed A19 (curve di dispersione nel pannello di sinistra; curve dei rapporti spettrali nel pannello di destra).

Poiché la curva di dispersione A18 non presenta caratteristiche compatibili con il resto dei siti in studio in quest’area, è stato scelto di trattare singolarmente i dati acquisiti per tale punto di misura. La figura 10 mostra le correlazioni tra curve sperimentali e teoriche realizzate.

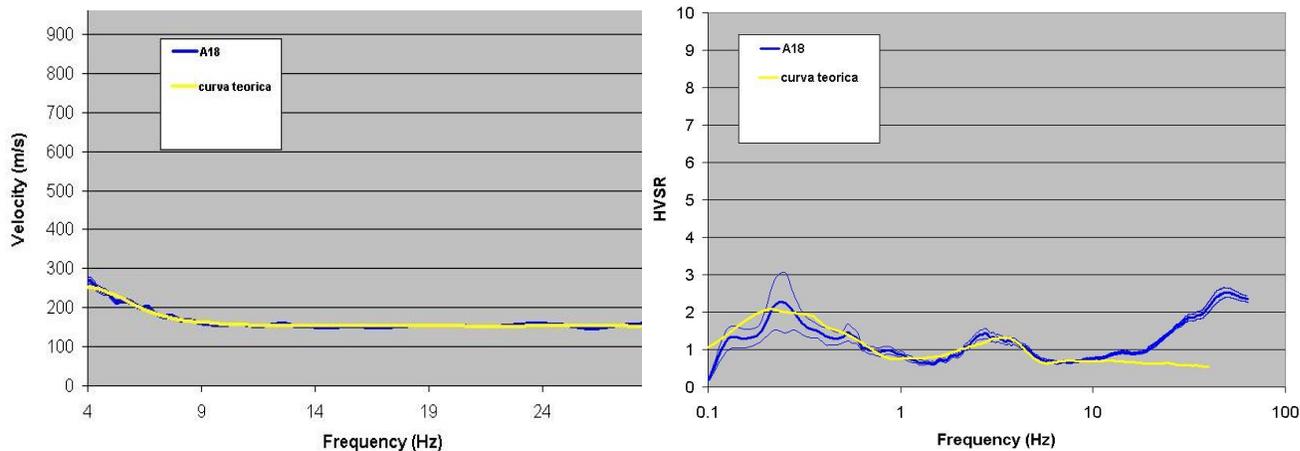


Figura 10: Correlazioni tra curve sperimentali e teoriche riferite al punto di misura A18 (curve di dispersione nel pannello di sinistra; curve dei rapporti spettrali nel pannello di destra).

Sia in figura 9 che 10 è possibile verificare come la curva teorica HVSR riproduca il massimo a circa 0.2-0.3 Hz presente nelle acquisizioni sperimentali. Questo picco potrebbe rappresentare una variazione nelle caratteristiche fisico-meccaniche del sottosuolo ad elevate profondità (300-400 metri circa), tuttavia per ragioni legate alla risoluzione dei metodi utilizzati ed agli scopi di questo lavoro si è scelto di rappresentare i modelli V_s sino alla ragionevole profondità di 160 m. In figura 11 è possibile visualizzare sia il profilo V_s riferito ai punti di misura A2, A3, A14 ed A19 sia il profilo V_s del sito A18.

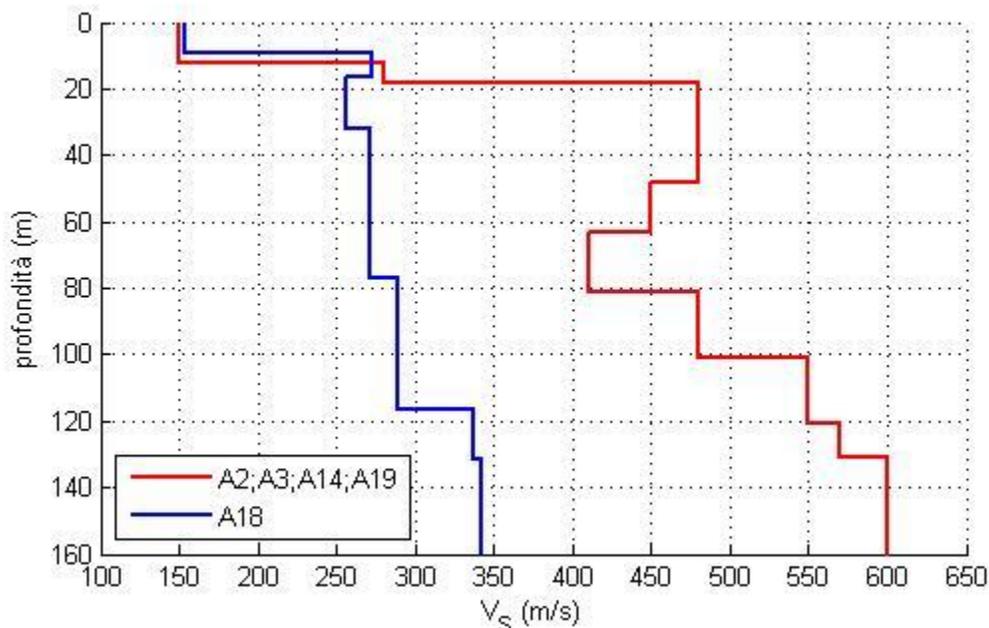


Figura 11: Profili V_s dell'area nord di Rimini. In blu è visualizzato il profilo riferito al sito A18. In rosso il profilo riferito ai punti A2, A3, A14 ed A19.

Nonostante la distanza relativamente breve del sito A18 dai restanti, i risultati evidenziati nella figura sopra, mostrano decise differenze tra le velocità Vs. Senza scendere troppo nel dettaglio le diversità tra i due profili potrebbero essere attribuite ad un cambiamento delle caratteristiche del sottosuolo sul margine nord dell'area in esame. Il punto di misura A18 è infatti posizionato sull'estremo bordo nord di Torre Pedrera, nei pressi del confine territoriale del Comune di Rimini.

Area Rimini Centro-Sud

Anche per l'area comunale centro-sud è stata seguita, alla luce delle considerazioni effettuate sull'andamento delle curve, una strategia interpretativa simile a quella appena commentata. In pratica è stato scelto di attribuire un unico profilo Vs ai siti A5, A8, A9 ed A11 (in figura 12 è possibile visualizzare le correlazioni tra curve sperimentali e teoriche per tali punti di misura). Le velocità dei siti A10, A16 ed A17 sono state ricavate dal profilo Vs riferito ai punti di misura A5, A8, A9 ed A11. Riadattando, per ogni singolo caso, negli strati superficiali questo profilo, sono state calcolate le curve HVSR e di dispersione teoriche per i punti A10, A16 ed A17. Le correlazioni ottenute per le curve di dispersione sono mostrate in figura 13. Non sono invece riportate le correlazioni tra curve HVSR poiché le variazioni realizzate sul modello di velocità principale non hanno influenzato in nessuno dei 3 casi in esame l'andamento della curva HVSR teorica mostrata nel pannello di destra di figura 12.

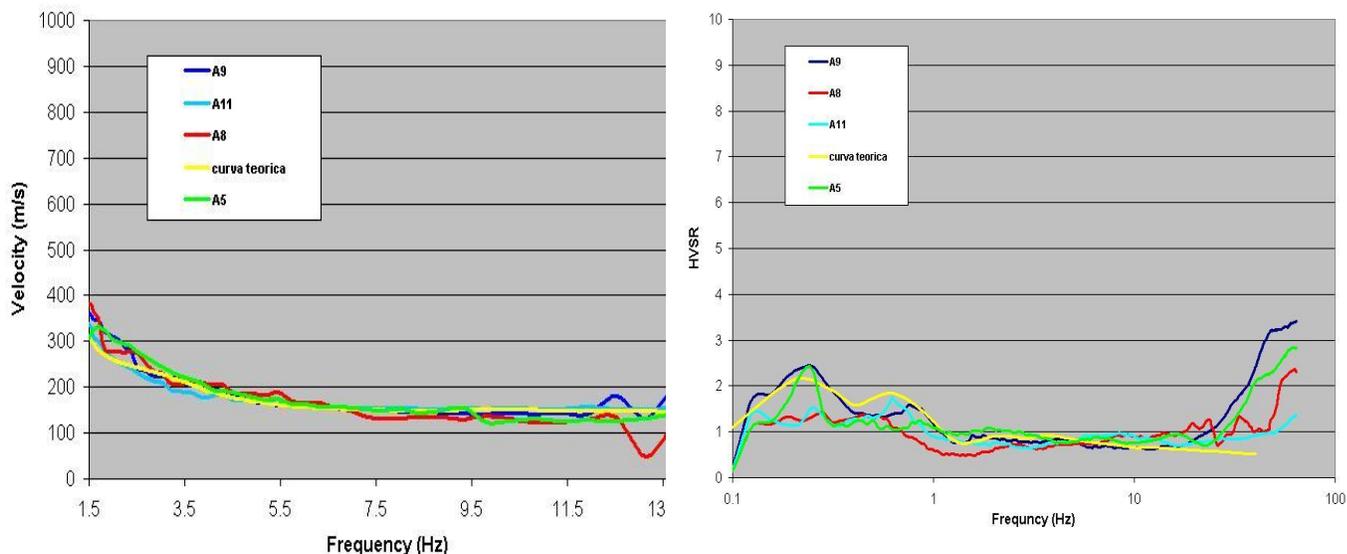


Figura 11: Correlazioni tra curve sperimentali e teoriche riferite ai punti di misura A5, A8, A12 ed A11 (curve di dispersione nel pannello di sinistra; curve dei rapporti spettrali nel pannello di destra).

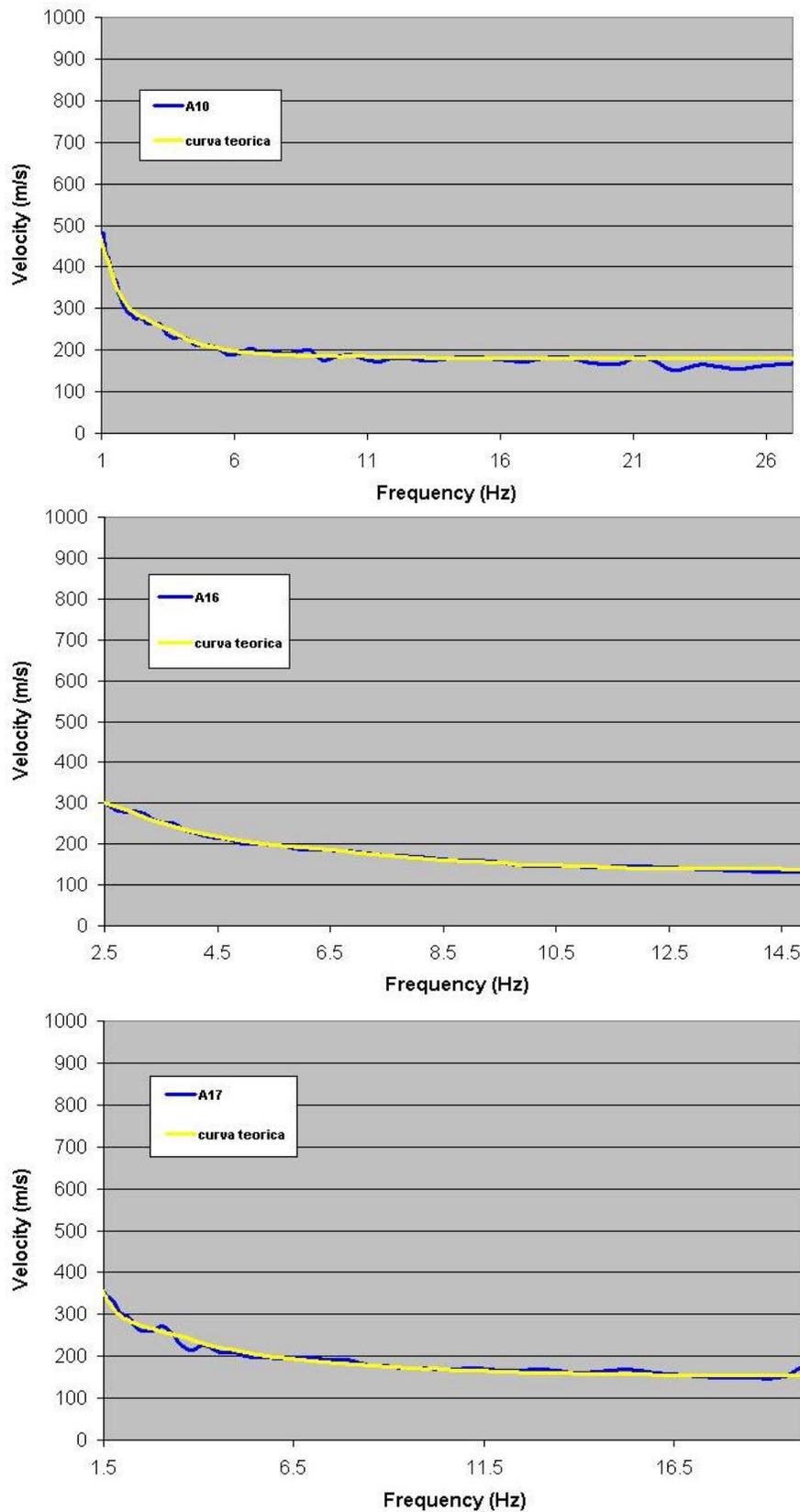


Figura 12: Correlazioni tra curve di dispersione sperimentali e teoriche per i punti di misura A10, A16 ed A17 (in quest'ordine dall'alto verso il basso).

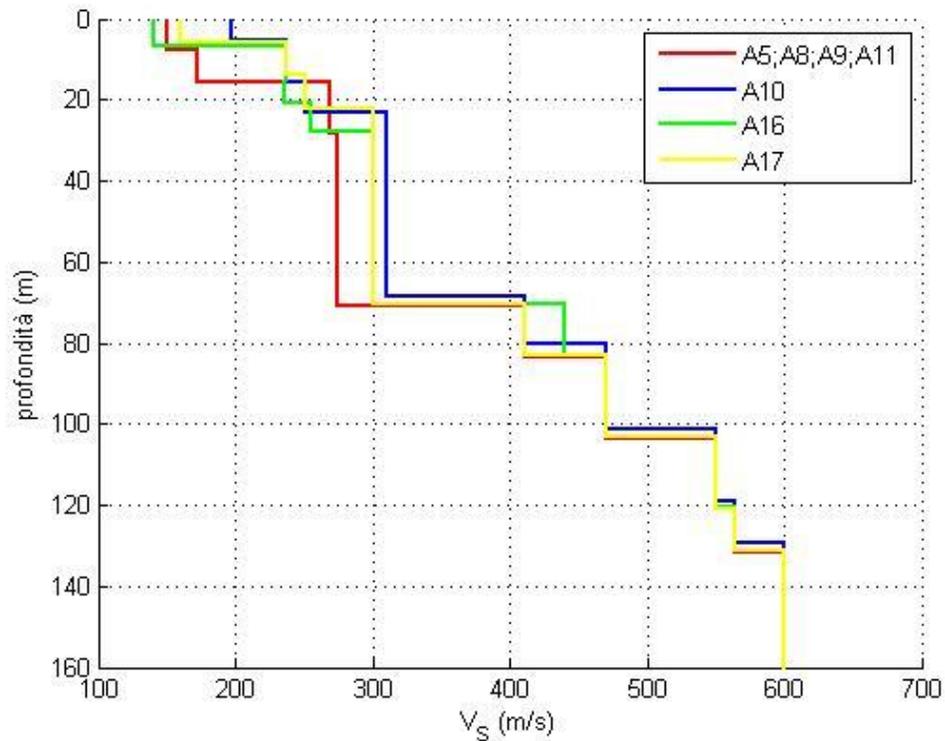


Figura 13: Profili Vs dell'area centro-sud di Rimini.

In figura 13, infine, è possibile osservare tutti i profili riferiti all'area centro-sud di Rimini. Come si nota le caratteristiche del sottosuolo restano più o meno costanti per tutta la zona.

Area Rimini Centro

Per quanto riguarda l'area che va da Rivabella al bordo nord di Marina Centro, non essendovi particolari congruenze tra le curve, i differenti siti sono stati analizzati singolarmente. I risultati ottenuti (figura 14) dimostrano una forte variabilità delle caratteristiche del sottosuolo in quest'area.

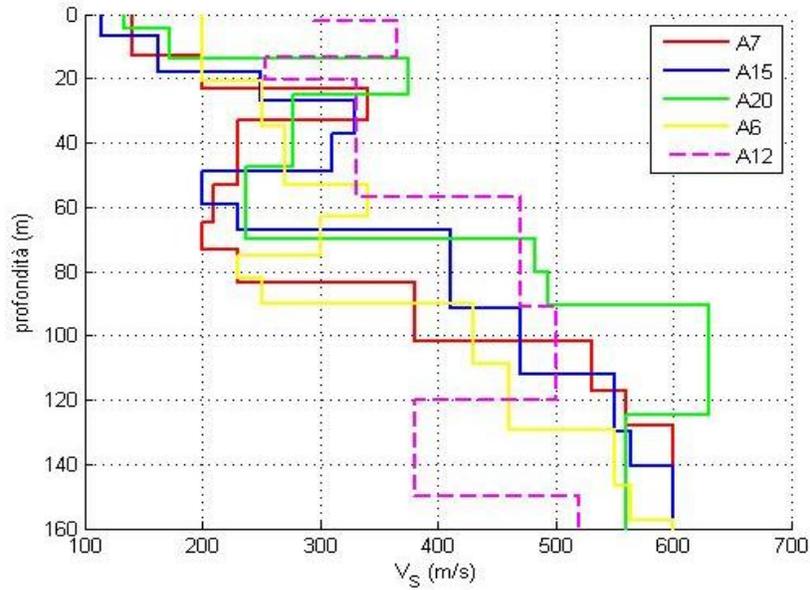


Figura 14: Profili Vs dell'area centrale di Rimini

Gli unici profili Vs che sembrano avere qualche caratteristica comune risultano quelli riferiti ai punti di misura A7 ed A15 (rispettivamente ubicati a San Giuliano Mare e Rivabella). Questi due modelli, seppur con velocità complessivamente differenti, sembrano avere un andamento piuttosto simile. Entrambi dimostrano a circa 30 metri di profondità un'inversione delle Vs che passa da 340 m/s circa a poco più di 200 m/s, inoltre, oltre i 100 metri di profondità, gli andamenti sembrano assestarsi su velocità abbastanza confrontabili (risultati visualizzabili in figura 15).

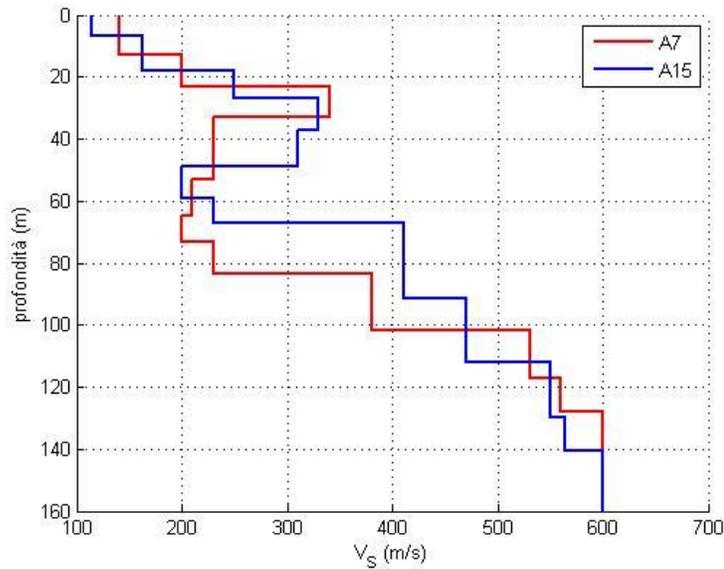


Figura 15: Confronto tra i profili Vs dei punti di misura A7 ed A15

Di seguito vengono riportate le correlazioni tra le curve teoriche e sperimentali per questi due siti (figura 16).

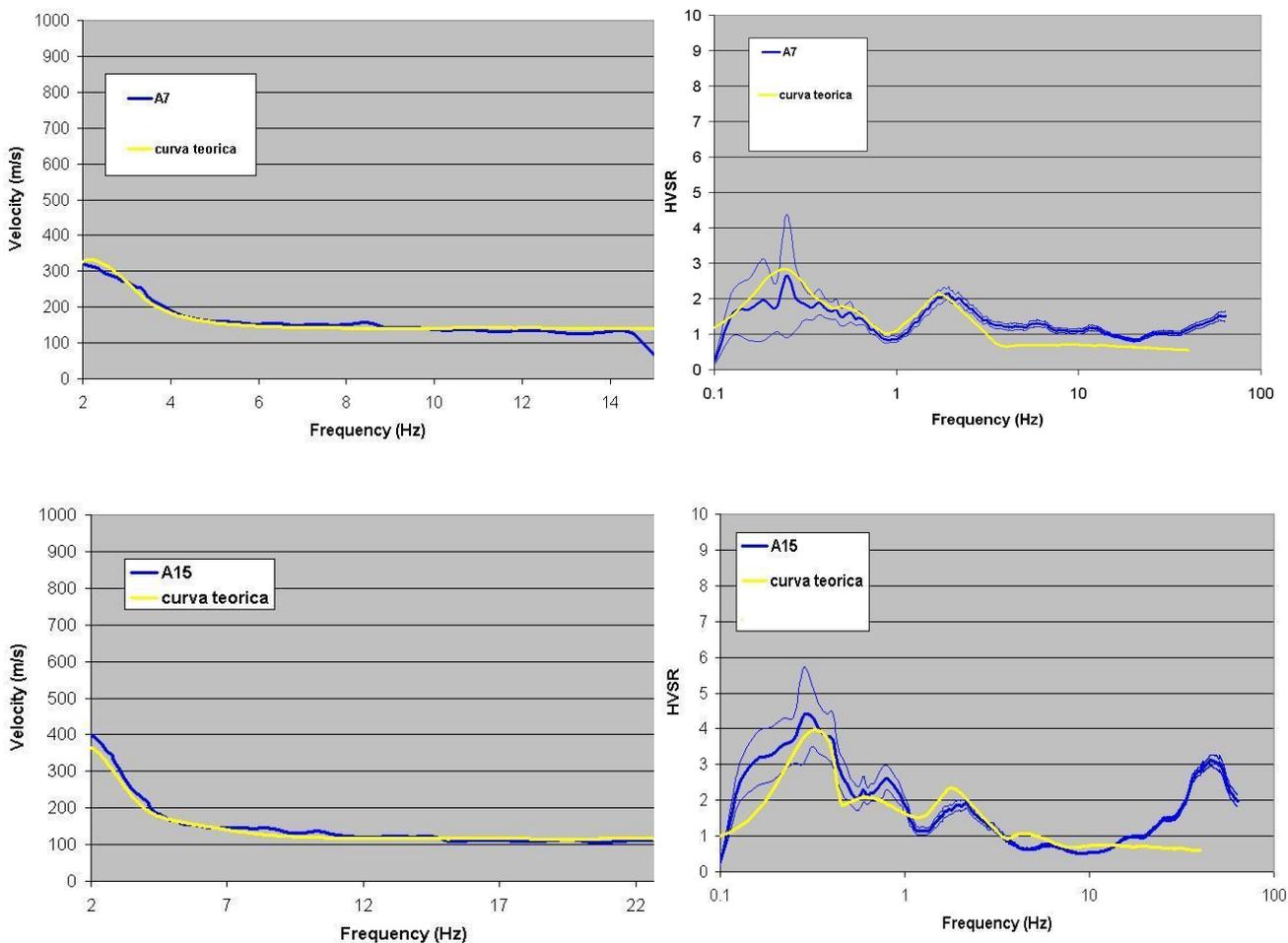


Figura 16: Correlazioni tra curve di dispersione sperimentali e teoriche per i punti di misura A7 ed A15 (in quest'ordine dall'alto verso il basso).

Nelle figure delle pagine (figure 17, 18 e 19) successive vengono mostrati i risultati e le correlazioni tra le curve dei siti rimanenti nell' area centrale di Rimini.

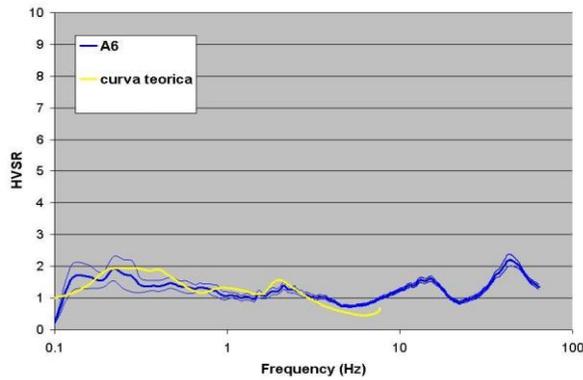
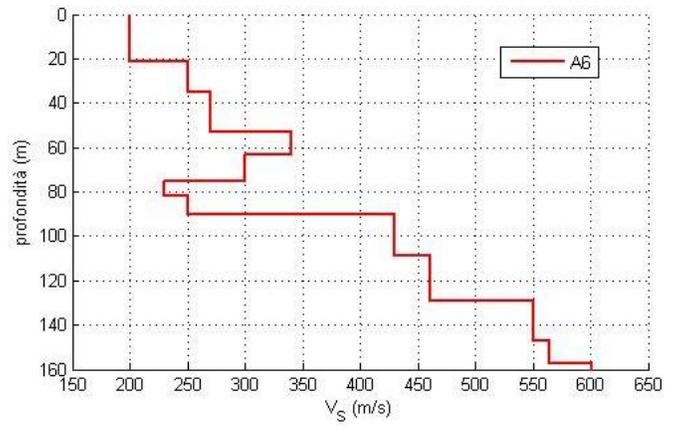
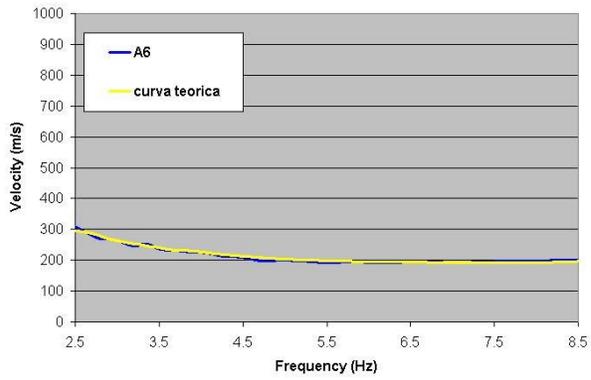


Figura 17: I pannelli di destra mostrano la correlazione tra le curve teoriche e sperimentali riferite al sito A6. Nel pannello di sinistra è possibile osservare il profilo V_s .

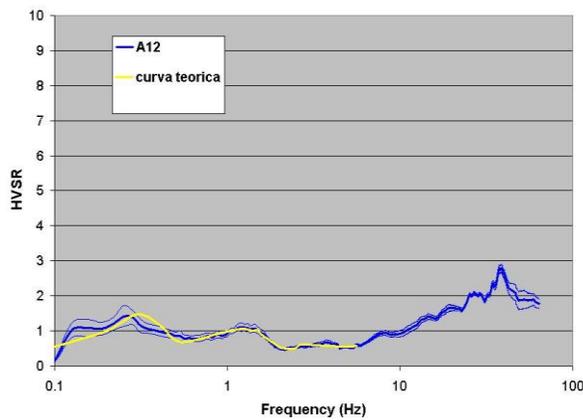
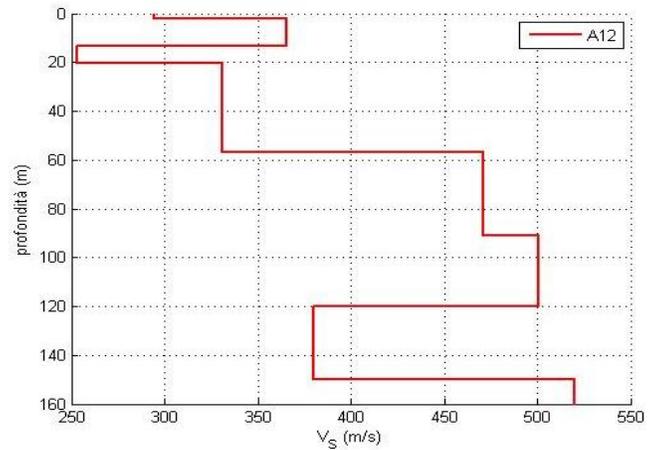
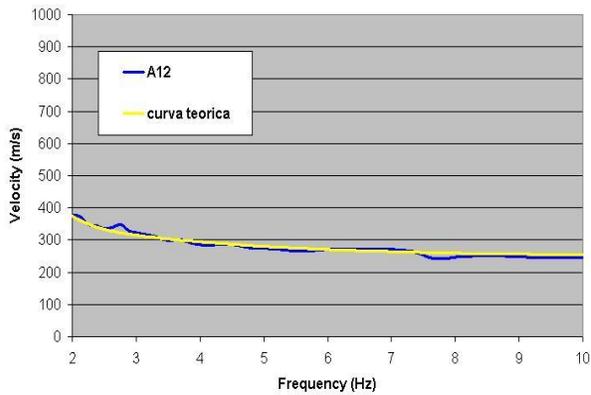


Figura 18: I pannelli di destra mostrano la correlazione tra le curve teoriche e sperimentali riferite al sito A12. Nel pannello di sinistra è possibile osservare il profilo V_s .

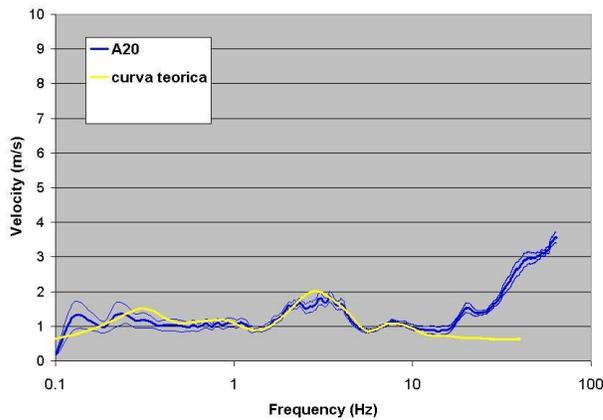
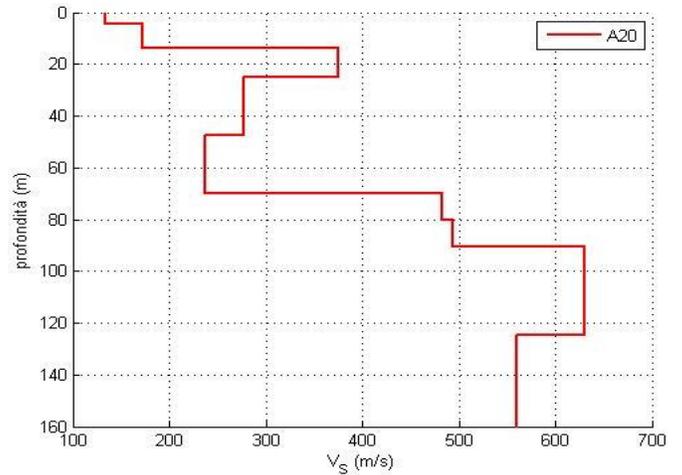
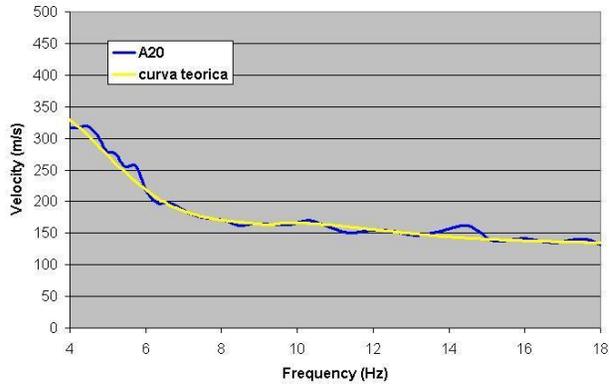


Figura 19: I pannelli di destra mostrano la correlazione tra le curve teoriche e sperimentali riferite al sito A20. Nel pannello di sinistra è possibile osservare il profilo V_s .

Covignano

Per concludere, vista l'ubicazione geografica ed il contesto geologico differente, riportiamo i risultati ottenuti per il sito A13, ubicato a Covignano. Nei due pannelli di figura 20 vengono mostrate le correlazioni tra le curve sperimentali e quelle teoriche, ricavate dai procedimenti d'inversione. In figura 21, invece, è mostrato il profilo V_s del sito.

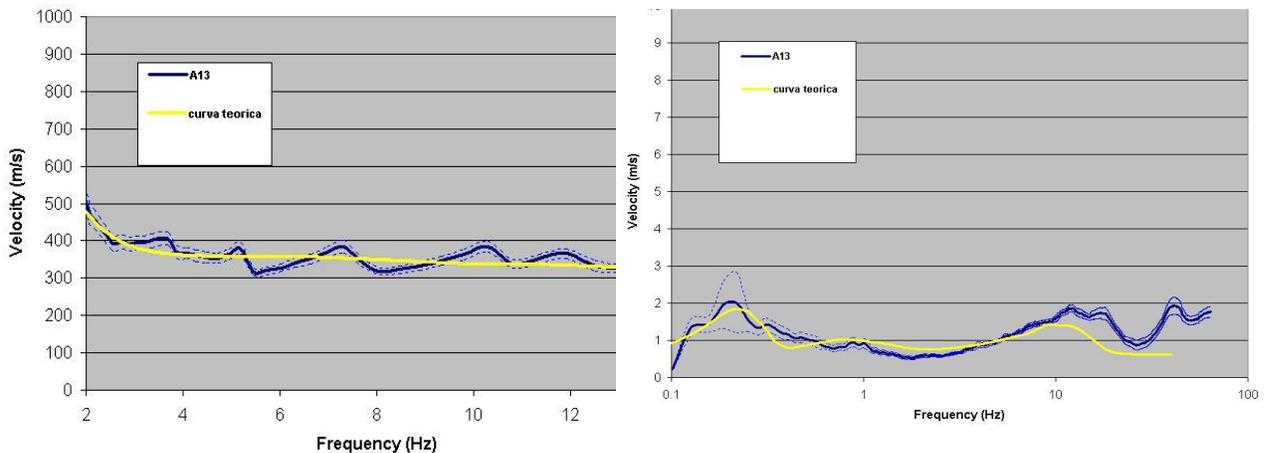


Figura 20: Correlazioni tra curve sperimentali e teoriche riferite al punto di misura A13 (curve di dispersione nel pannello di sinistra; curve dei rapporti spettrali nel pannello di destra).

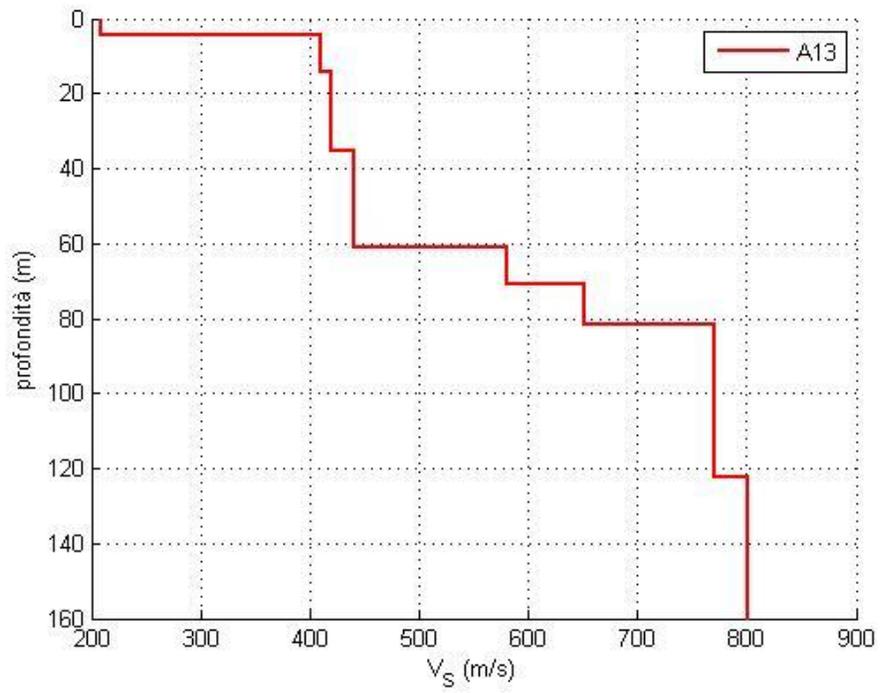


Figura 21: Profili V_s del sito A13 ubicato nei pressi di Covignano.

CONCLUSIONI

Il territorio comunale di Rimini, che si estende con andamento pianeggiante in direzione Nord-Ovest Sud-Est da Torre Pedrera a Miramare, è essenzialmente caratterizzato da una alternanza ciclica tra corpi sedimentari a granulometria prevalentemente fine con corpi sedimentari a granulometria prevalentemente grossolana. La presenza di tali litologie è dovuta alle fasi ad alta e bassa energia del fiume Marecchia che, durante il corso degli anni, ha costruito un esteso sistema deltizio, essenzialmente composto da un'alternanza tra sabbie, argille e ghiaie con matrice sia argillosa che sabbiosa. I differenti cicli deposizionali Pleistocenici sono organizzati in 3 Sub-Sintemi sovrapposti che dal più superficiale al più profondo sono: Sub-Sintema di Ravenna, Sub-Sintema di Villa Verucchio e Sub-Sintema di Bazzano.

Una tale situazione geologica può, al verificarsi di un terremoto, dare origine a pericolosi effetti di risonanza dovuti alla presenza in profondità di corpi sedimentari ghiaioso-conglomeratici che, con caratteristiche meccaniche meno scadenti rispetto agli strati sovrastanti, fungerebbero da sub-strato sismico.

Attraverso le tecniche di simica passiva si è cercato di individuare, all'interno di tutto il territorio comunale di Rimini, aree con caratteristiche simili alla situazione descritta e dunque soggette a probabili fenomeni di amplificazione locale.

In generale, i risultati da noi ottenuti sembrano accordarsi con la situazione geologica precedentemente descritta. In figura 21 è possibile visualizzare il confronto tra 4 profili V_s ritenuti significativi nel descrivere le caratteristiche del sottosuolo per diverse aree comunali. Il profilo V_s in rosso, per esempio, è rappresentativo della zona che si estende da Torre Pedrera a Viserba, mentre quello in giallo mostra le caratteristiche dell'area centro-sud che va da Marina Centro a Miramare.

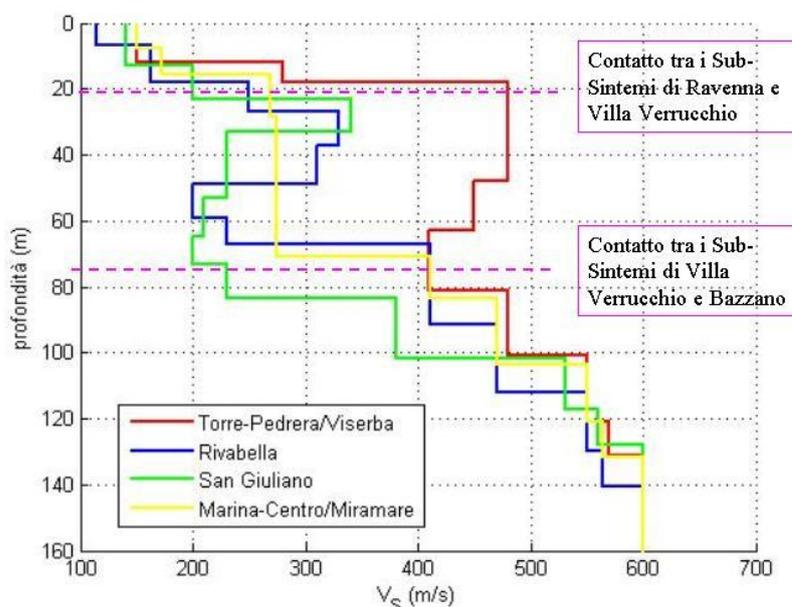


Figura 21: Confronto tra profili di velocità

Come si osserva, i modelli rappresentati mostrano due significativi incrementi delle velocità V_s all'incirca alle medesime profondità. La prima interfaccia, posta tra 18 e 28 metri, potrebbe rappresentare il passaggio tra il Sub-Sistema di Ravenna (rappresentato da una velocità media di 150 m/s) e il Sub-Sistema di Villa Verucchio. Mentre la seconda interfaccia, posta all'incirca tra 70 e 90 metri, potrebbe rappresentare il passaggio dal Sub-Sistema di Villa Verucchio a quello di Bazzano (caratterizzato da velocità medie di circa 500 m/s).

L'andamento dei modelli realizzati è simile nella parte superficiale (fino a 20 m) e nella parte profonda (da 90 m in poi), mentre si discosta nella parte centrale. Molto probabilmente le differenze di velocità, che si manifestano tra i 20 ed i 90 metri circa, sono dovute alla presenza o meno di una coltre di ghiaia con caratteristiche meccaniche differenti dal resto del contesto.

Le misure HVSR realizzate nell'area che va da Torre Pedrera a Viserba mostrano, infatti, tutte un massimo compreso tra 2 e 3 Hz, con ampiezze dei rapporti spettrali all'incirca comprese tra 2 e 3.5. Questo picco potrebbe rappresentare una variazione delle caratteristiche fisico meccaniche dei materiali dovuta alla presenza di una spessa coltre ghiaiosa in profondità, che spiegherebbe il salto di velocità da 150 m/s ad oltre 450 m/s, mostrato dal modello in rosso. Inoltre, si osserva come le velocità si mantengano costanti tra 20 e 50 metri, evidenziando il probabile spessore delle ghiaie in quest'area.

In base a quanto esposto, dunque, il territorio comunale di Nord-Ovest potrebbe essere soggetto a possibili effetti di sito.

Esaminando le curve riferite alle zone di San Giuliano e Rivabella, si nota come lo strato ghiaioso tenda probabilmente ad assottigliarsi spostandosi da nord verso sud. Le variazioni di velocità meno marcate rispetto alla curva in rosso potrebbero essere dovute al fatto che lo spessore dello strato di ghiaie, immerso in sedimenti argilloso-limosi e probabilmente esso stesso condizionato da una forte matrice a granulometria fine, non contribuisca ad un deciso incremento delle velocità.

Per quanto riguarda il profilo in giallo in figura 21, riferito all'area centro-sud del Comune Rimini, si osserva un progressivo incremento delle velocità con le profondità. In generale, non sembrano esservi in quest'area, composta essenzialmente da sedimenti argilloso-sabbiosi, particolari tracce di materiali a componente grossolana, che avrebbero dovuto dare origine, come per i casi precedenti, a vistose inversioni di velocità. Alla luce delle considerazioni fatte e delle misure HVSR realizzate (piatte nell'intervallo ingegneristico per tutta l'area) l'intera zona non sembra essere soggetta ad effetti di risonanza sismica.

Un'ultima precisazione riguarda la presenza, in tutte le misure HVSR realizzate sulla piana costiera di Rimini, di un massimo a 0.2-0.3 Hz. Tale picco, dai risultati delle inversioni realizzate, sembra essere correlato ad una variazione delle velocità V_s che oltre i 300-400 metri di profondità raggiungono valori di circa 800 m/s.

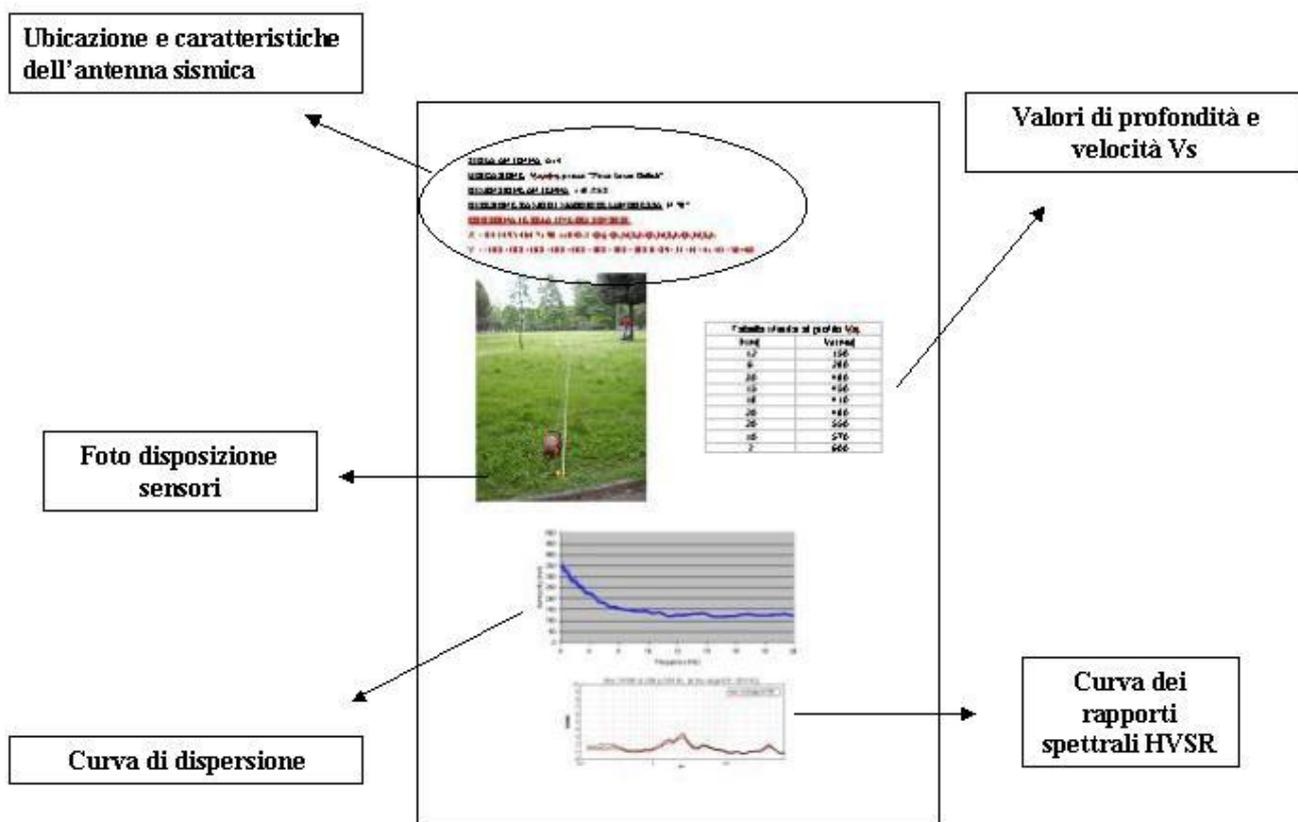
Infine, considerando le colline alle spalle della piana alluvionale-costiera, troviamo in affioramento, nella parte sommitale di Covignano, sabbie gialle debolmente cementate appartenenti alla formazione delle Sabbie di Imola (Pleistocene medio). I risultati delle misure HVSR realizzate in quest'area (sito A13) non mostrano alcun massimo nell'intervallo di frequenze ingegneristico, e dunque anche questa zona non dovrebbe essere soggetta a particolari fenomeni di risonanza. Il profilo V_s realizzato (figura 21) mostra un notevole incremento delle velocità con la profondità che a circa 80 metri raggiungono quasi gli 800 m/s.

Appendice

- *Ubicazione dei punti di misura*
- *Schede di sintesi relative alle misure svolte nell'area Rimini Nord*
- *Schede di sintesi relative alle misure svolte nell'area Rimini Centro-Sud*
- *Schede di sintesi relative alle misure svolte nell'area Rimini Centro + Covignano*



Struttura delle schede di sintesi realizzate per ogni singola misura



Rimini Nord

SIGLA ANTENNA: A2

UBICAZIONE : Torre Pedrera nei pressi del casello autostradale Rimini-Nord

DIMENSIONE ANTENNA: 110 X 50

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 290°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

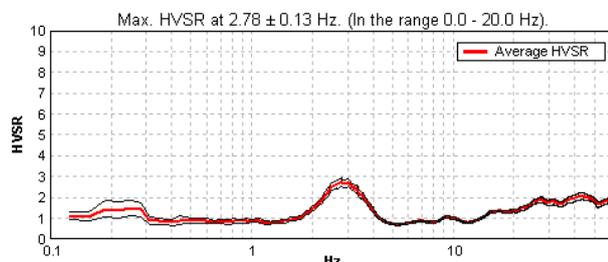
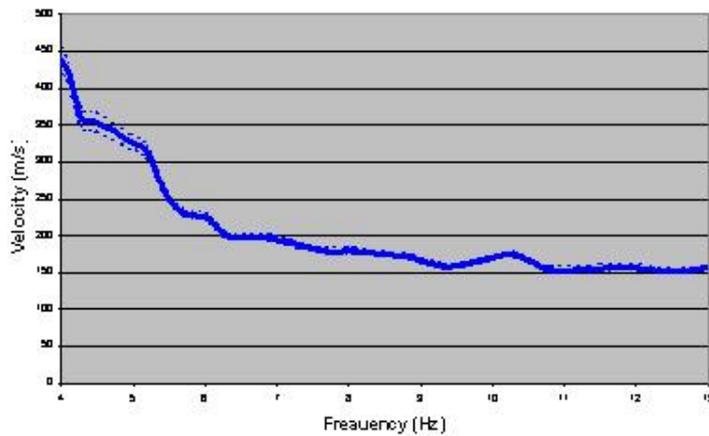
X = 0 7 10 25 38 55 90 110 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1 1.1

Y = 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0.3 0 2 7 17 18 27 39 50



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 12 | 150 |
| 6 | 280 |
| 30 | 480 |
| 15 | 450 |
| 18 | 410 |
| 20 | 480 |
| 20 | 550 |
| 10 | 570 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A3

UBICAZIONE : Viserba presso “Pesca sportiva lago Riviera”

DIMENSIONE ANTENNA: 110 X 98

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 160°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

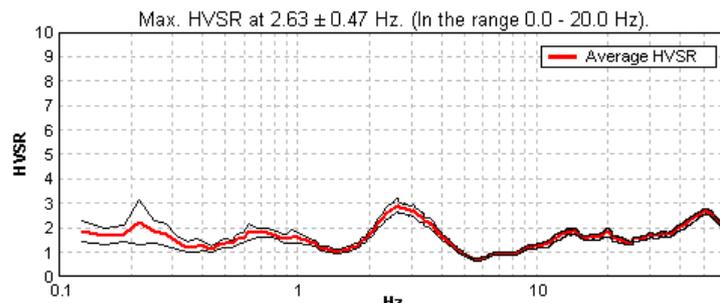
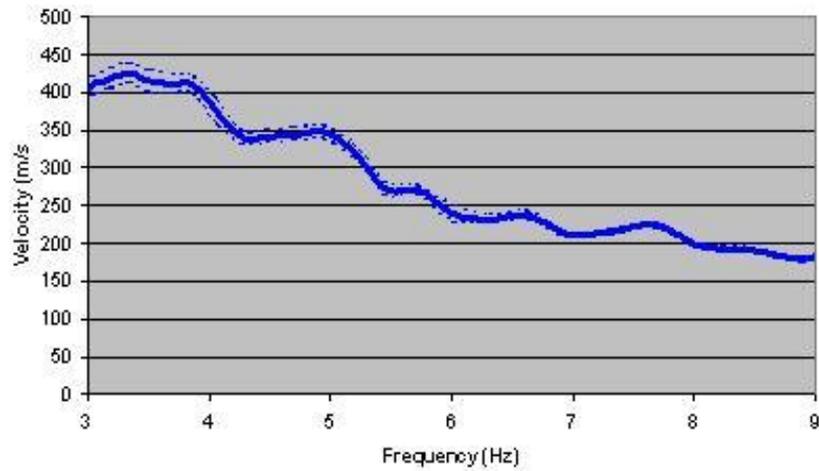
X = 110 95 89 84 81 51 37 0 105.5 105.5 105.5 105.5 105.5 105.5 105.5 105.5

Y = 2.2 2.2 2.2 2.2 2.2 2.2 2.2 2.2 0 11 18 23.5 30.5 70 88 98



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 12 | 150 |
| 6 | 280 |
| 30 | 480 |
| 15 | 450 |
| 18 | 410 |
| 20 | 480 |
| 20 | 550 |
| 10 | 570 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A14

UBICAZIONE : Viserba presso "Parco Lucio Battisti"

DIMENSIONE ANTENNA: 110 X 68

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 70°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

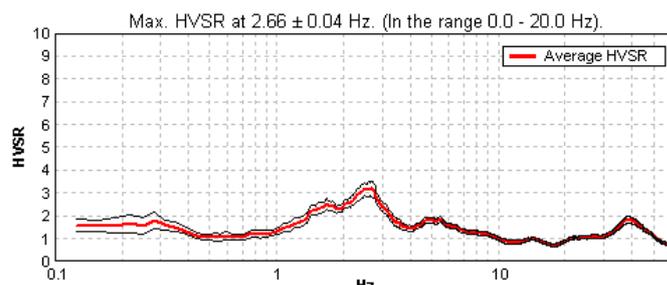
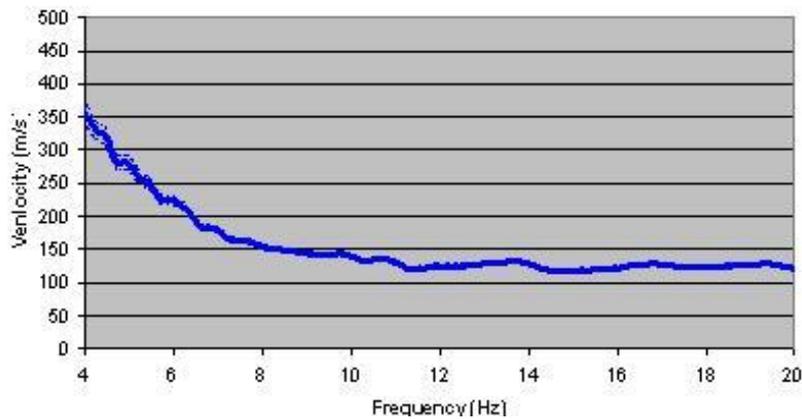
X = 0 43 49 54 64 71 90 110 48.3 48.3 48.3 48.3 48.3 48.3 48.3 48.3

Y = -30.8 -30.8 -30.8 -30.8 -30.8 -30.8 -30.8 -30.8 0 -29 -33 -34 -41 -43 -50 -68



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 12 | 150 |
| 6 | 280 |
| 30 | 480 |
| 15 | 450 |
| 18 | 410 |
| 20 | 480 |
| 20 | 550 |
| 10 | 570 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A19

UBICAZIONE : Viserba presso “Parco via Orsoleto”

DIMENSIONE ANTENNA: 100 X 90

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 0°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

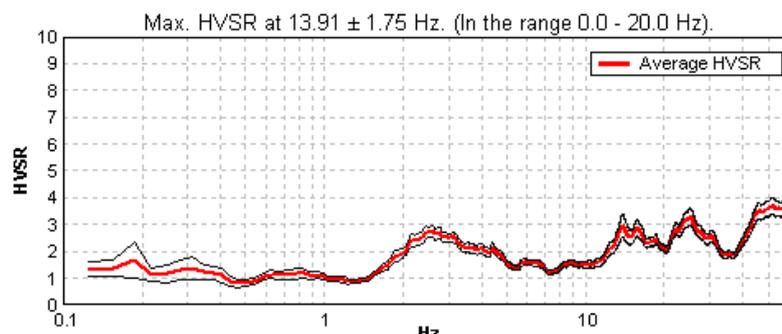
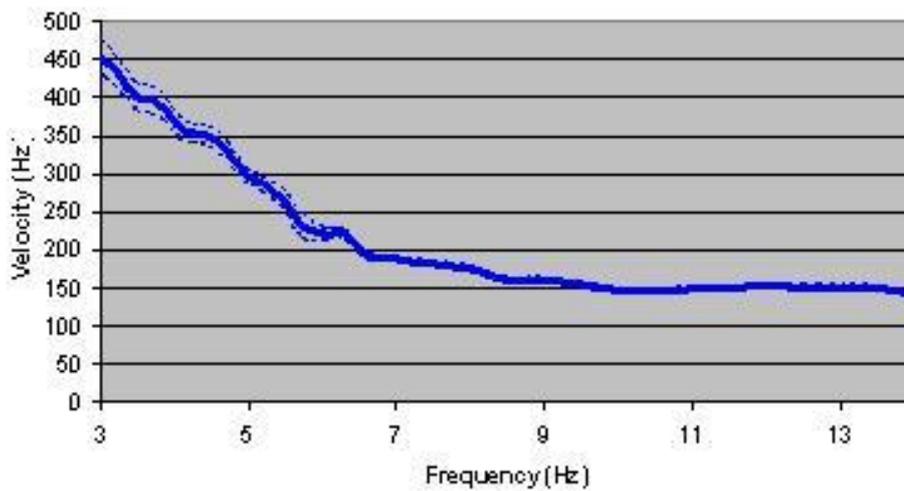
X = 0 11 29 36 40 52 69 100 18.2 18.2 18.2 18.2 18.2 18.2 18.2 18.2

Y = -24.3 -24.3 -24.3 -24.3 -24.3 -24.3 -24.3 -24.3 0 -15 -18 -23 -25-35 -61 -90



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 12 | 150 |
| 6 | 280 |
| 30 | 480 |
| 15 | 450 |
| 18 | 410 |
| 20 | 480 |
| 20 | 550 |
| 10 | 570 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A18

UBICAZIONE : Torre Pedrera via Tolemaide

DIMENSIONE ANTENNA: 90X70

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 255°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

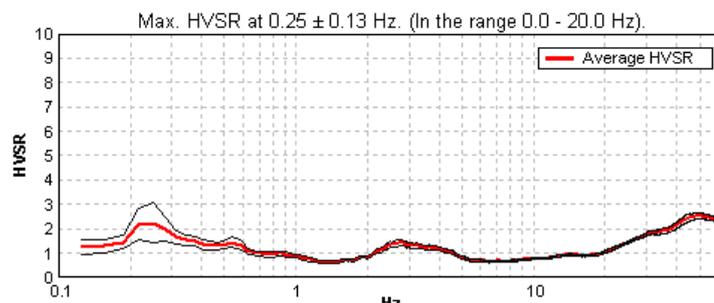
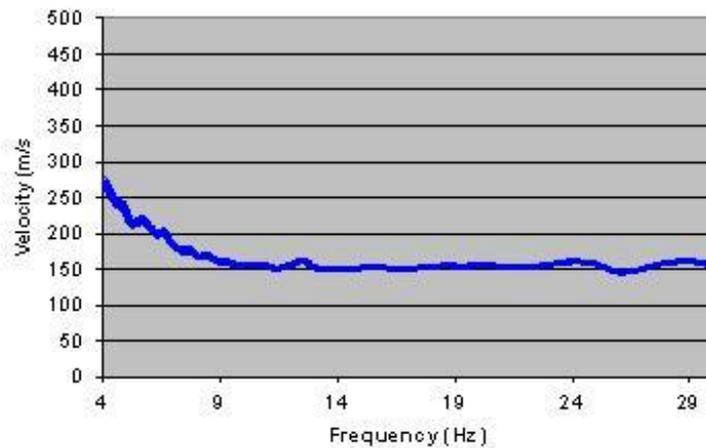
X = 0 21 24 29 35 45 57 90 30 30 30 30 30 30 30 30

Y = 0 0 0 0 0 0 0 0 -1 -8 -12 -23 -32 -50 -70



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 9 | 154 |
| 7 | 273 |
| 15 | 256 |
| 45 | 271 |
| 40 | 288 |
| 15 | 337 |
| 39 | 343 |
| 18 | 345 |
| 44 | 680 |
| ? | 550 |



Rimini Centro-Sud

SIGLA ANTENNA: A5

UBICAZIONE : Maina Centro presso "Parco Fabbri"

DIMENSIONE ANTENNA: 110 X 90

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 70°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

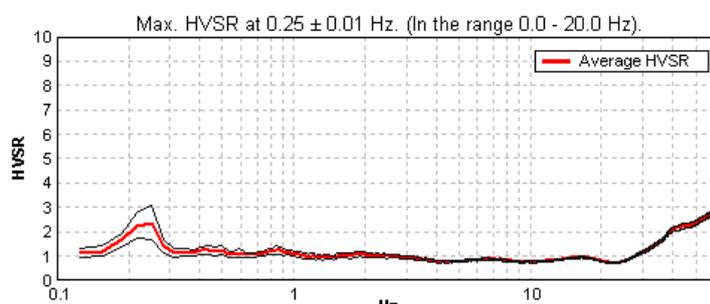
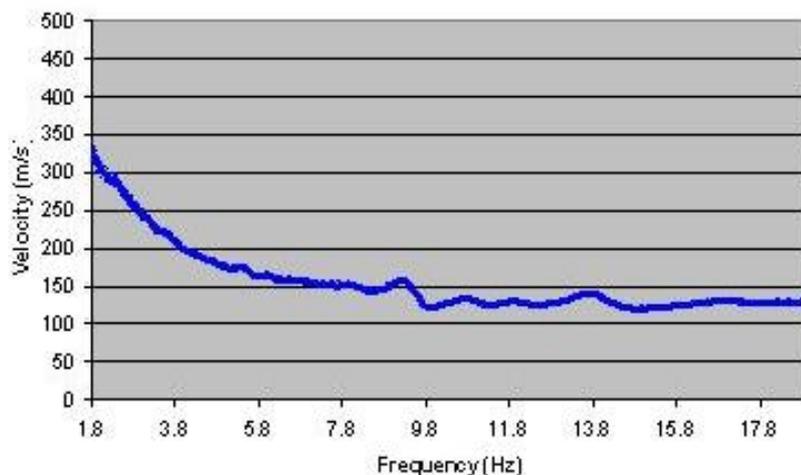
X = 0 29 34 37 52 80 93 110 30.7 30.7 30.7 30.7 30.7 30.7 30.7 30.7

Y = -36.5 -36.5 -36.5 -36.5 -36.5 -36.5 -36.5 -36.5 0 -25 -26 -33.5 -36 -60 -79 -90



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 8 | 150 |
| 8 | 170 |
| 13 | 270 |
| 43 | 275 |
| 13 | 410 |
| 20 | 470 |
| 18 | 550 |
| 11 | 566 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A8

UBICAZIONE : Marina Centro presso “Parco Renzi”

DIMENSIONE ANTENNA: 130 X 90

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 0°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

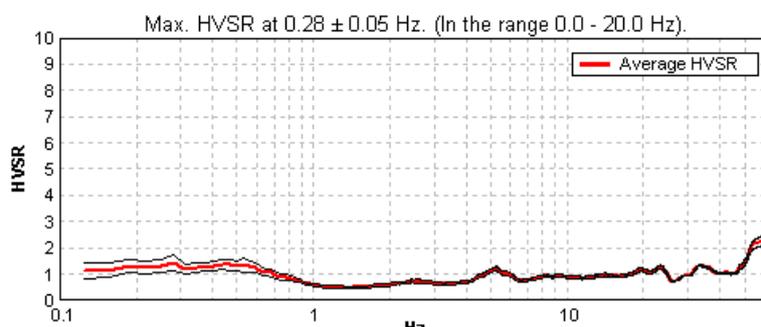
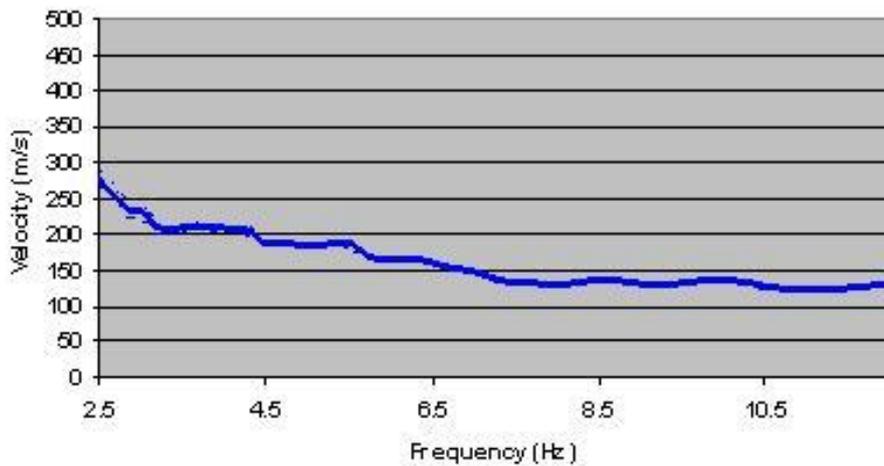
X = 0 5 9 40 57 102 115 130 13 13 13 13 13 13 13 13

Y = -1.2 -1.2 -1.2 -1.2 -1.2 -1.2 -1.2 -1.2 0 -6 -7 -12.5 47 70 73 90



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 8 | 150 |
| 8 | 170 |
| 13 | 270 |
| 43 | 275 |
| 13 | 410 |
| 20 | 470 |
| 18 | 550 |
| 11 | 566 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A11

UBICAZIONE : Marebello presso “Parco Sandro Pertini”

DIMENSIONE ANTENNA: 112 X 110

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 37°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

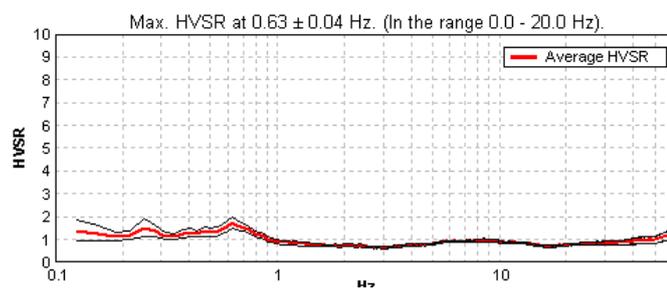
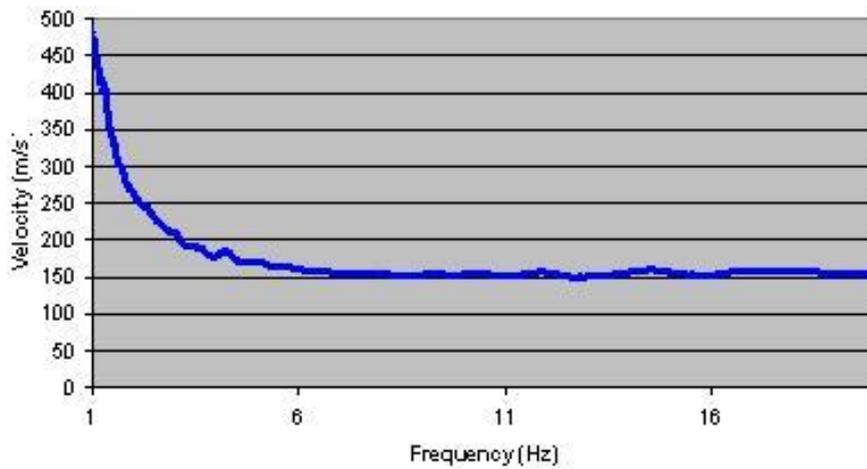
X = 0 5 9 15 32 44 76 112 6.4 6.4 6.4 6.4 6.4 6.4 6.4 6.4

Y = -3.4 -3.4 -3.4 -3.4 -3.4 -3.4 -3.4 -3.4 0 -7 -10 -12 -27 -50 -83 -110



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 8 | 150 |
| 8 | 170 |
| 13 | 270 |
| 43 | 275 |
| 13 | 410 |
| 20 | 470 |
| 18 | 550 |
| 11 | 566 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A10

UBICAZIONE : Miramare presso “Parco Piazza Migani, via Mosca”

DIMENSIONE ANTENNA: 110 X 90

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 260°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

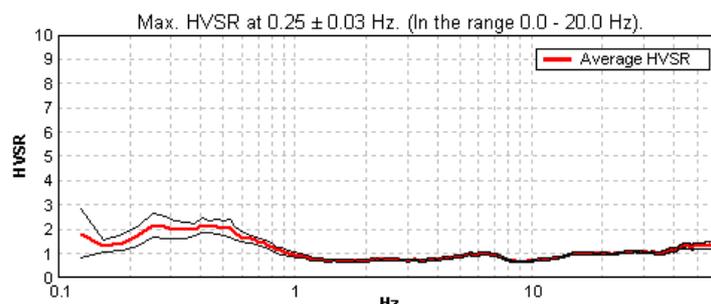
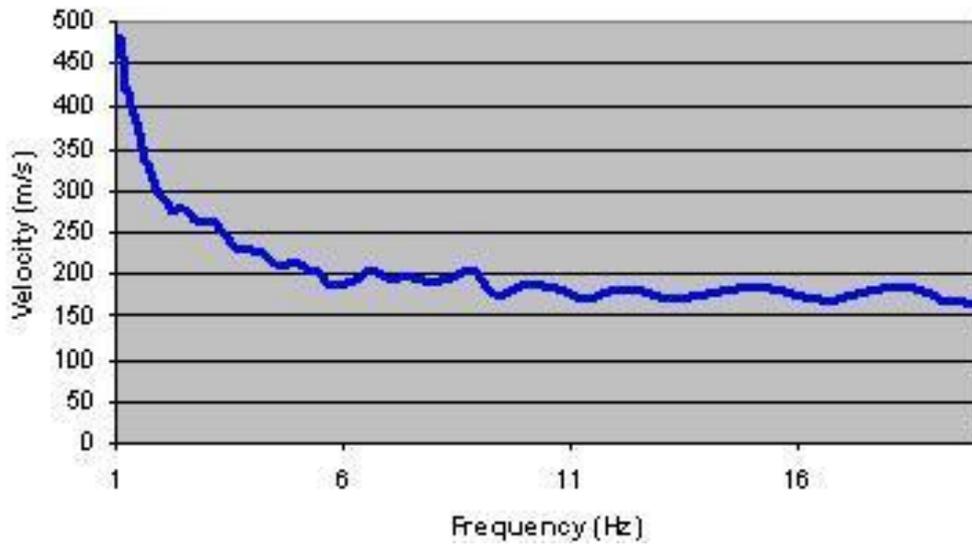
X = 0 29 34 37 55 80 93 110 29.6 29.6 29.6 29.6 29.6 29.6 29.6 29.6

Y = -37.1 -37.1 -37.1 -37.1 -37.1 -37.1 -37.1 -37.1 0 -25 -26 -33 -36 -60 -79 -90



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 6 | 200 |
| 10 | 240 |
| 8 | 250 |
| 46 | 310 |
| 12 | 410 |
| 21 | 470 |
| 18 | 550 |
| 11 | 566 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A16

UBICAZIONE : Bellariva ,Via Settembrini vicino Ospedale

DIMENSIONE ANTENNA: 100 X 70

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 10°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

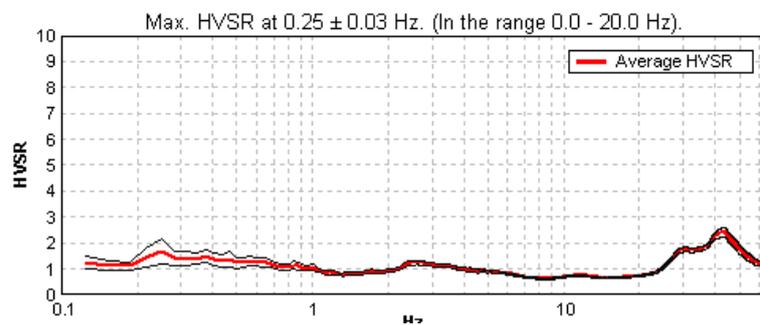
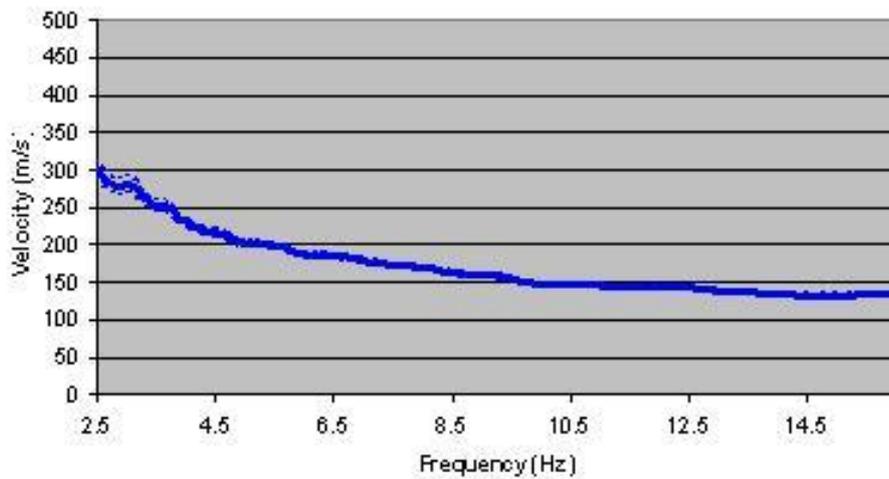
X = 0 20 25 28 32 47 73 100 34.1 34.1 34.1 34.1 34.1 34.1 34.1 34.1

Y = 29.2 29.2 29.2 29.2 29.2 29.2 29.2 29.2 0 17 18 24 26 49 61 70



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 7 | 140 |
| 8 | 238 |
| 6 | 236 |
| 7 | 255 |
| 43 | 301 |
| 13 | 440 |
| 20 | 470 |
| 18 | 551 |
| 11 | 564 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A17

UBICAZIONE : Parco di via Alessandrini

DIMENSIONE ANTENNA: 100 X 69

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 70°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

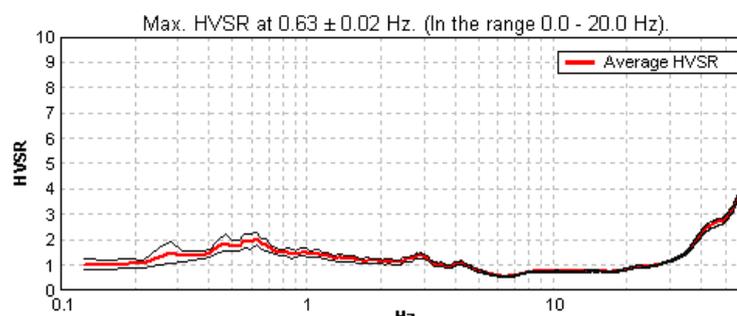
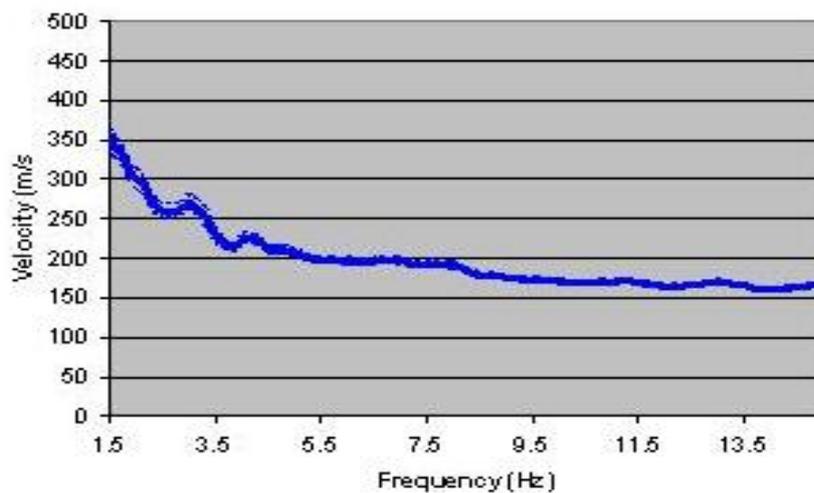
X = 0 21 26 29 35 45 73 110 22.9 22.9 22.9 22.9 22.9 22.9 22.9 22.9

Y = -31.3 -31.3 -31.3 -31.3 -31.3 -31.3 -31.3 -31.3 0 -20 -23 -30 -31 -44 -60 -69



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 6 | 160 |
| 8 | 238 |
| 8 | 250 |
| 49 | 300 |
| 13 | 410 |
| 20 | 470 |
| 18 | 551 |
| 11 | 564 |
| ? | 600 |



Rimini Centro + Covignano

SIGLA ANTENNA: A6

UBICAZIONE : Maina Centro presso "Parco XXV Aprile"

DIMENSIONE ANTENNA: 110 X 90

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 340°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

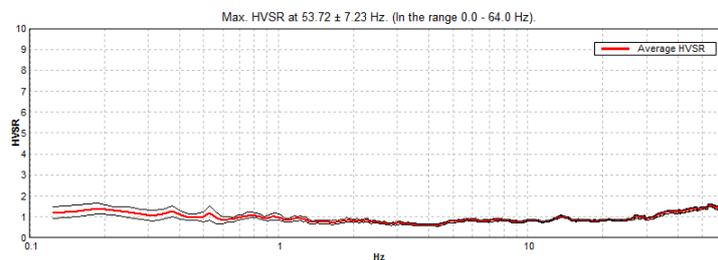
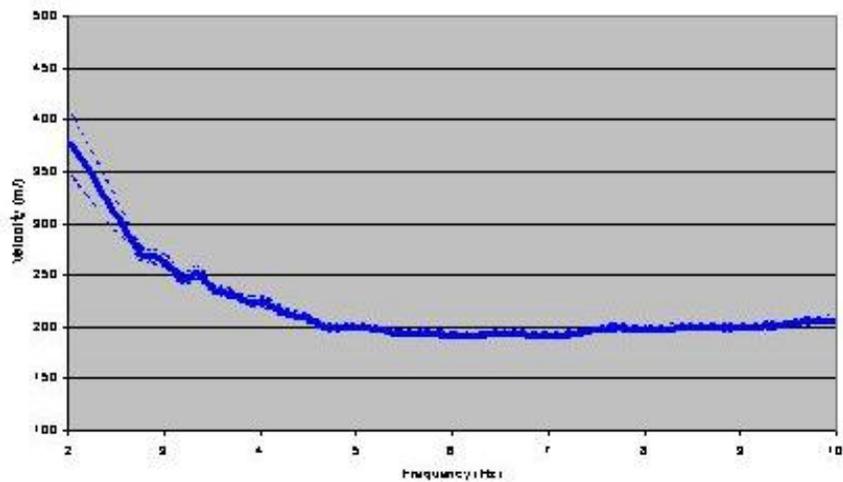
X = 0 13 17 23 43 94 101 110 17.8 17.8 17.8 17.8 17.8 17.8 17.8

Y = 0 50 50 50 50 50 50 0 45 46 48 54 66 81 90



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 21 | 200 |
| 14 | 250 |
| 18 | 270 |
| 10 | 340 |
| 12 | 300 |
| 7 | 230 |
| 8 | 250 |
| 18 | 430 |
| 20 | 460 |
| 18 | 550 |
| 10.5 | 564 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A12

UBICAZIONE : Stadio di Baseball, Via Monaco

DIMENSIONE ANTENNA: 90 X 65

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 300°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

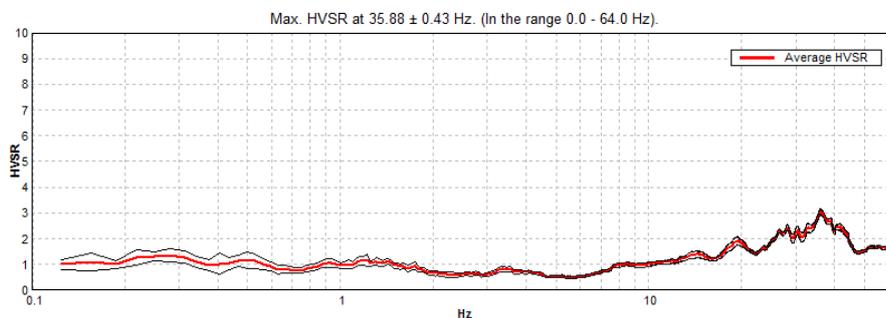
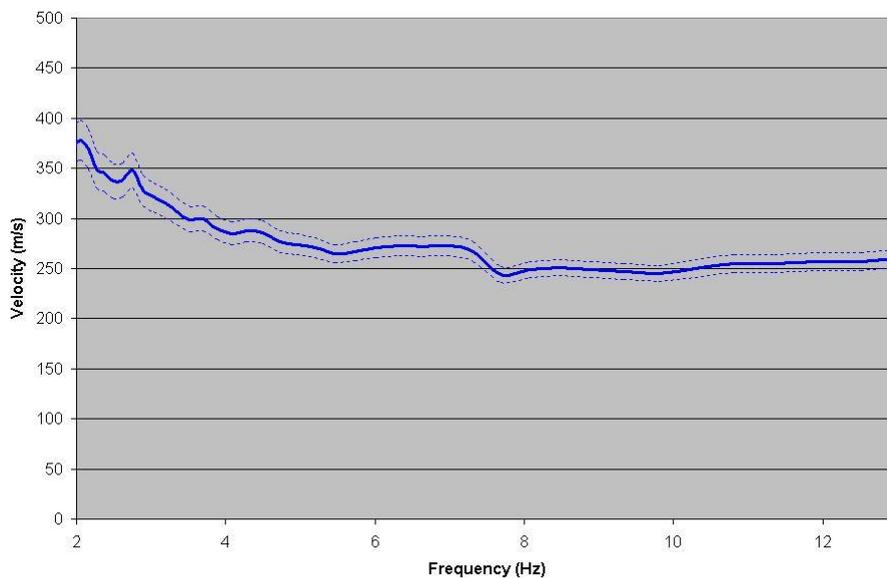
X = 0 30 32 36 39 53 70 90 33.7 33.7 33.7 33.7 33.7 33.7 33.7

Y = -16.9 -16.9 -16.9 -16.9 -16.9 -16.9 -16.9 -16.9 0 -8 -9 -11 -20 -33 -43 -65



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 2 | 295 |
| 11 | 365 |
| 7 | 253 |
| 37 | 331 |
| 34 | 471 |
| 29 | 501 |
| 30 | 380 |
| 13 | 520 |
| 13 | 621 |
| 33 | 531 |
| ? | 650 |



SIGLA ANTENNA: A7

UBICAZIONE : San Giuliano Mare, presso “Parco di via Briolini”

DIMENSIONE ANTENNA: 110 x 90

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 90°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

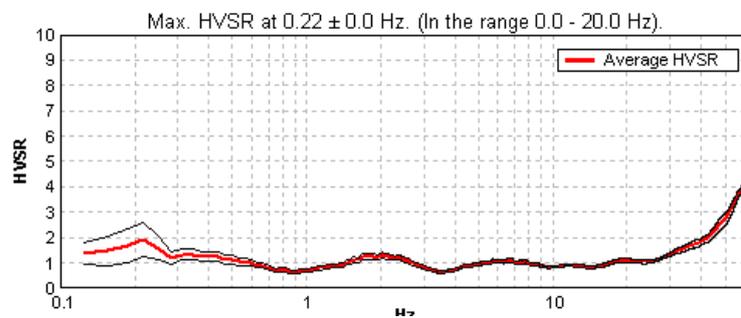
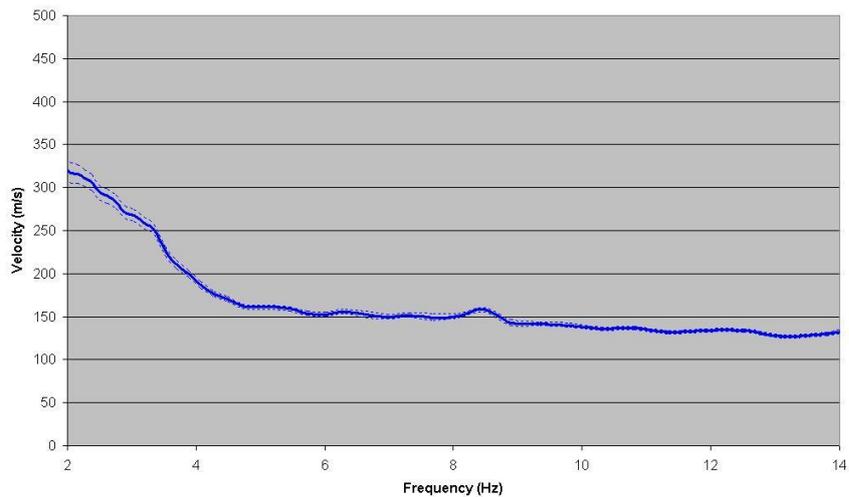
X = 0 25 30 37 61 74 98 110 41 41 41 41 41 41 41

Y = 44.8 44.8 44.8 44.8 44.8 44.8 44.8 44.8 0 27 28 31 37 43 75 90



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 13 | 140 |
| 10 | 200 |
| 10 | 340 |
| 20 | 230 |
| 12 | 210 |
| 8 | 200 |
| 11 | 230 |
| 18 | 380 |
| 16 | 530 |
| 11 | 560 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A15

UBICAZIONE : Rivabella, presso “Parco Lucio Battisti”

DIMENSIONE ANTENNA: 110 x 68

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 72°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

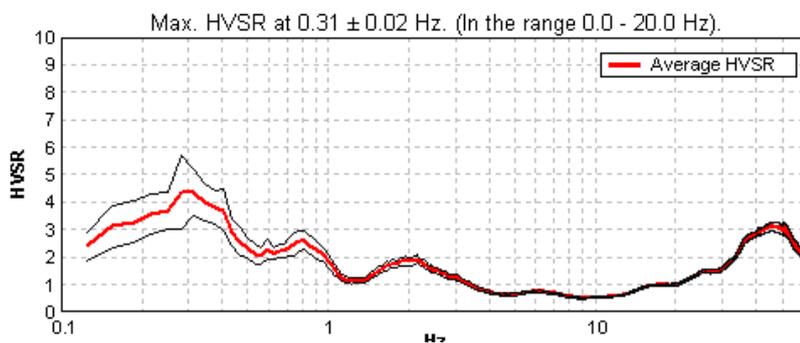
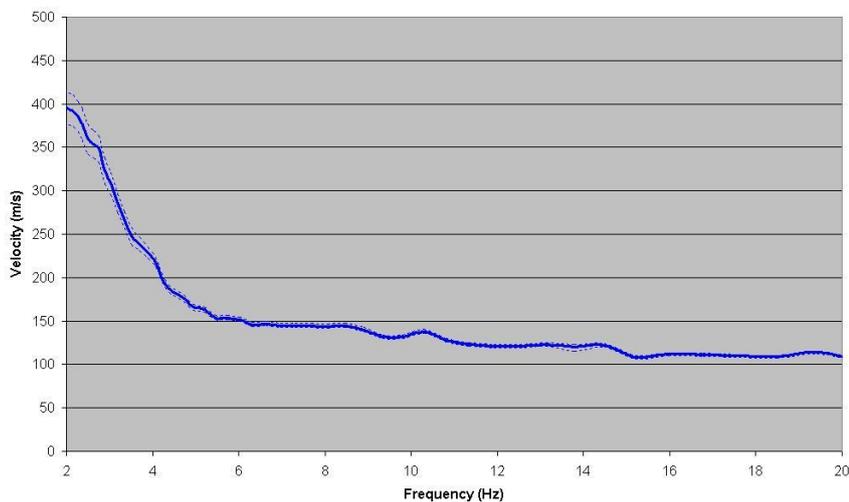
X = 0 16 20 25 35 42 73 90 15 15 15 15 15 15 15

Y = -51.8 -51.8 -51.8 -51.8 -51.8 -51.8 -51.8 -51.8 0 -32 -40 -43 -44 -50 -61 -78

FOTO MANCANTE

Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 7 | 115 |
| 11 | 163 |
| 9 | 250 |
| 10 | 330 |
| 12 | 310 |
| 10 | 200 |
| 8 | 230 |
| 25 | 410 |
| 21 | 470 |
| 18 | 551 |
| 11 | 564 |
| ? | 600 |



SIGLA ANTENNA: A20

UBICAZIONE : Parco di via Quagliati traversa via Fontemaggi

DIMENSIONE ANTENNA: 110 x 90

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: N 310°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

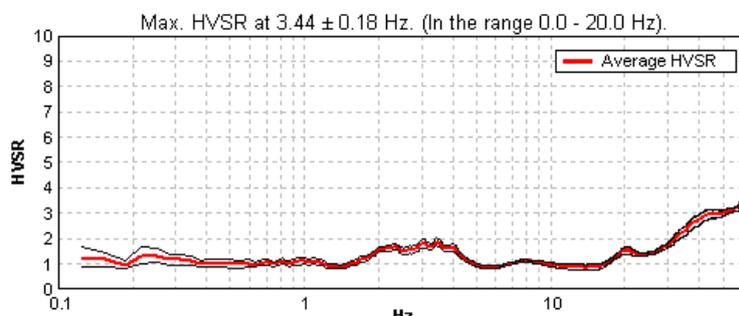
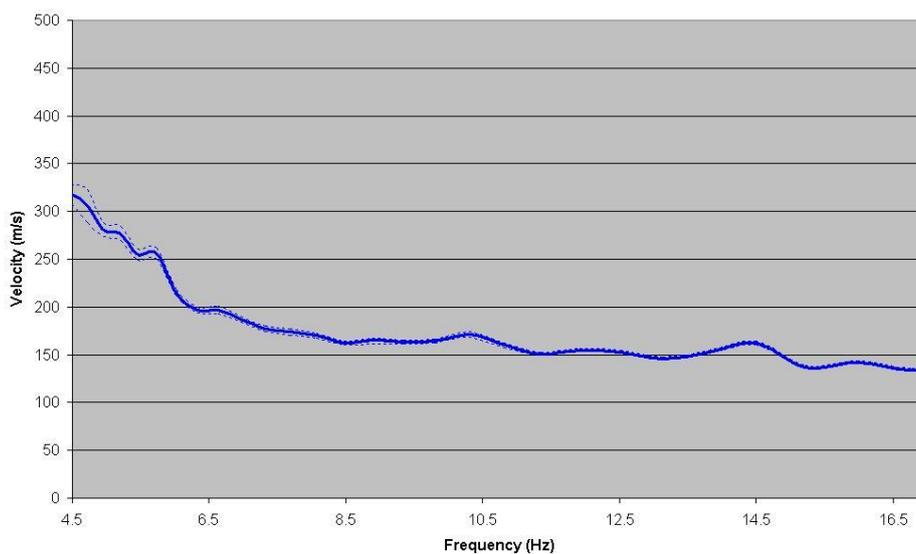
X = 0 2 6 16 38 50 72 110 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5 7.5

Y = -7.2 -7.2 -7.2 -7.2 -7.2 -7.2 -7.2 -7.2 0 -1 -3 -8 -19 -39 -73 -90



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 4.5 | 133 |
| 9 | 172 |
| 11 | 375 |
| 22 | 277 |
| 22 | 238 |
| 10 | 480 |
| 10 | 495 |
| 34 | 630 |
| ? | 560 |



SIGLA ANTENNA: A13

UBICAZIONE : Covignano, Seminario Vescovile

DIMENSIONE ANTENNA: 130 x 50

DIREZIONE RAMO DI MAGGIORE LUNGHEZZA: 127°

COORDINATE RELATIVE DEI SENSORI:

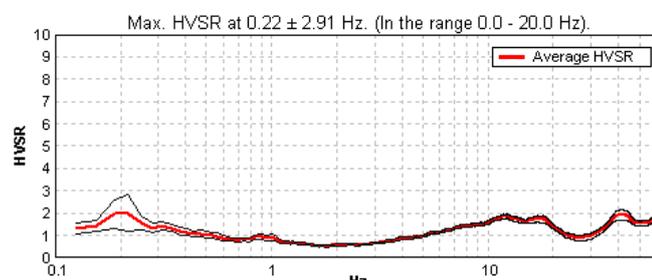
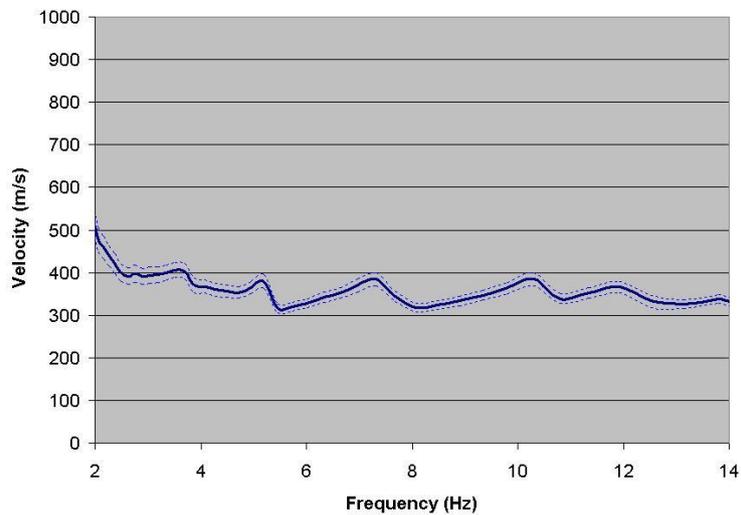
X = 0 21 27 30 55 73 96 130 24.5 24.5 24.5 24.5 24.5 24.5 24.5 24.5

Y = -30.3 -30.3 -30.3 -30.3 -30.3 -30.3 -30.3 -30.3 0 -15 -19 -20 -25 -36 -43 -50



Tabella riferita al profilo Vs

| h(m) | Vs(m/s) |
|------|---------|
| 4 | 208 |
| 10 | 410 |
| 21 | 420 |
| 26 | 440 |
| 10 | 580 |
| 11 | 651 |
| 41 | 770 |
| ? | 800 |



ALLEGATO 2

**INDAGINI GEOFISICHE
IN LOCALITA'
VISERBA
(Comune di Rimini)**

**PROSPEZIONE GEOFISICA
CROSS HOLE**

RELAZIONE TECNICA

Data: Dicembre 2010

Archivio 996

996-Relazione tecnica.Doc

Impresa esecutrice:



PROGEO S.r.l.
Via Talete 10/8
47100 Forlì
tel. 0543 723580
fax. 0543 721486
Email: mail.progeo@gmail.com
Web: www.progeo.info



Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2000 n° 2619-A

Il Direttore Tecnico per l'impresa:



INDICE

| | |
|---|-----------|
| 1. INDICAZIONI GENERALI | 3 |
| 2. ELABORATI CARTOGRAFICI | 4 |
| 3. PROSPEZIONE SISMICA TRA FORI CON TECNICA CROSS HOLE | 5 |
| 3.1. Generalità | 5 |
| 3.2. Controllo della verticalità | 5 |
| 3.3. Misure Cross Hole | 5 |
| 3.3.1. Strumentazione | 5 |
| 3.3.2. Elaborazione dati | 7 |
| 3.4. Indicazioni generali sulla elasticità dei materiali | 12 |
| 3.4.1. Generalità | 13 |
| 3.4.2. Principi sulla Elasticità | 13 |
| 3.4.2. Parametri elastici | 14 |
| 4. ANALISI SINTETICA DELLE RISULTANZE SISMICHE | 17 |

REGIONE EMILIA ROMAGNA SERVIZIO GEOLOGICO

INDAGINI CROSS-HOLE VISERBA (Rn)

1. INDICAZIONI GENERALI

Il presente rapporto viene emesso per documentare gli esiti della campagna di indagini geofisiche condotta dalla Progeo S.r.l. nell'ambito della caratterizzazione dinamica dei materiali in sito nella zona di Viserba (Rn).

La finalità delle indagini è la caratterizzazione dei materiali del sottosuolo fino ad una profondità di circa 100 metri dal piano campagna.

La campagna geofisica è stata svolta nel periodo Novembre – dicembre 2010.

Questa è consistita in una prospezione sismica tra fori con tecnica cross hole, finalizzata alla determinazione, della velocità delle onde di compressione e di taglio nonché dei principali moduli elastici dinamici fino alla massima profondità raggiungibile dalla strumentazione.

Seguono alcune immagini delle fasi di acquisizione dati in campagna.



2. ELABORATI CARTOGRAFICI

In allegato alla presente relazione sono presentati gli elaborati cartografici delle risultanze ottenute dalla prospezione sismica tomografica.

I 5 elaborati cartografici (clinometria, sismogrammi, tabelle e log) della prova sismica tra fori con tecnica cross hole tra i sondaggi denominati S1 e S2 sono riportati al termine della presente relazione.

Nella corografia allegata qui di seguito è riportata la planimetria delle indagini geofisiche realizzata sul supporto cartografico digitale con indicata l'ubicazione di massima dei due sondaggi stratigrafici nei quali si sono effettuate le prove.



L'elenco degli elaborati cartografici presentati è quindi il seguente:

- Fig.1 Rilievo clinometrico della distanza fra tubi verticali dei sondaggi S1 e S2 utilizzati per la prova cross hole;
- Fig.2 Sismogrammi cross hole onde di compressione e onde di taglio;
- Fig.3 Tabella dati sismici parametrici cross hole 0-60 m;
- Fig.4 Tabella dati sismici parametrici cross hole 60-95 m;
- Fig.5 Log cross hole delle velocità delle onde di compressione e di taglio e dei moduli elastici dinamici.

3. PROSPEZIONE SISMICA TRA FORI CON TECNICA CROSS HOLE

3.1. Generalità

Questo tipo di indagine viene eseguita per la caratterizzazione fisico-dinamica della porzione di terreno compresa tra due o più fori di sondaggio.

La tecnica si basa sulla misura dei tempi di tragitto delle onde elastiche tra la sorgente posta in un foro e il geofono/i posto in un altro foro/i alla stessa profondità.

Il cross hole si realizza ponendo all'interno di uno dei fori l'energizzatore sismico da foro e il geofono (o i geofoni) tridimensionali in un altro/i foro/i, atto/i a ricevere il segnale sismico in arrivo dalla sorgente alla stessa quota.

Da questa prova è possibile ricavare i moduli elastici e le attenuazioni del mezzo interposto ai fori.

Per l'esecuzione della prova si è provveduto alle seguenti misurazioni utilizzando le strumentazioni di cui si allegano schede tecniche:

1. controllo della verticalità;
2. misure cross hole;
3. processing dei dati.

3.2. Controllo della verticalità

La prova cross hole deve utilizzare informazioni corrette relativamente alla distanza tra i fori di misura.

In questo caso specifico per le misure di verticalità e quindi di determinazione della distanza tra i fori, si sono utilizzati i dati forniti dalla sonda BHTV.

3.3. Misure Cross Hole

La prova Cross Hole prevede l'emissione di un'impulso (shot) generato ad intervalli regolari (1.0 m) lungo l'intera profondità di un foro (definito di "shot"), con ricezione delle onde elastiche di compressione (P) e di taglio (S) in uno o più fori alla medesima quota.

3.3.1. Strumentazione

I sistemi di energizzazione normalmente utilizzati sono stati di due tipi:

- sistema "Sparker" per la generazione delle sole onde di compressione il quale produce onde di volume non polarizzate;
- sistema "Elettrodinamico" per la generazione delle onde di taglio S_v . Questa viene effettuata con polarizzazione verso l'alto e verso il basso (generazione di onde S_v) allo scopo di valutare e determinare con accuratezza l'arrivo delle onde di taglio.

Il sistema di energizzazione elettrodinamica, sviluppato dalla Progeo, è costituito da un generatore di onde P e Sv (immagine a fianco).

All'interno dello strumento sono alloggiati n° 2 sensori di cui uno di triggering ed uno accelerometrico di raccolta del segnale di input.

Per l'accoppiamento alla parete del foro è presente un sistema a molla ad espansione controllata da una centralina simile a quella la cui immagine è riportata di seguito la quale comanda il sistema di ricevitori 3D.

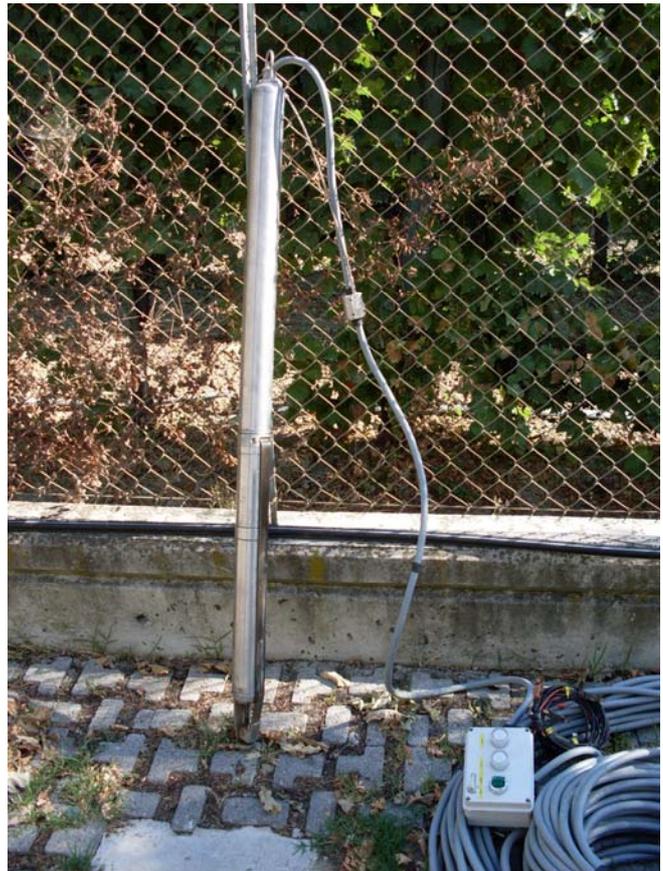
La registrazione dei dati avviene con l'utilizzo di una sonda 3D a frequenza variabile (da 10 Hz) disposti tridimensionalmente rispetto all'asse del foro, posizionati nel foro adiacente a quello di energizzazione alla stessa quota del punto di origine dell'energia oppure mediante sistemi idrofonici per la sola misura delle velocità delle onde di compressione.

La strumentazione di registrazione dei segnali deve possedere chiaramente un campionamento adeguato alla frequenza della sorgente di energia ed un campionamento tale da risolvere le frequenze caratteristiche dei segnali sismici del sito.

Nel caso in esame si è utilizzato n° 1 sismografo "Geode" della Geometrics collegato ad un p.c. portatile.

Per quanto riguarda i sensori, per misure differenziali, si utilizzano normalmente sonde 3D costituite da sensori Mark da 10 Hz di cui uno verticale e due orizzontali posizionati tridimensionalmente.

La sonda 3D utilizzata è provvista di un sistema elettromeccanico per l'espansione della molla per il contatto alla parete del foro, controllata da una centralina elettronica con la quale si gestiscono fino a 4 3D simultaneamente.



Altri sensori utilizzati sono stringhe di 12 idrofoni inderdistanti 1 m per la misure delle sole onde di compressione.

3.3.2. Elaborazione dati

Gli aspetti elaborativi del procedimento analitico si possono sintetizzare in:

- display sismogrammi,
- fast fourier transform (F.F.T.),
- convoluzione,
- cross correlazione,
- lettura first break,
- processing dati in velocità lineare,
- processing dati in velocità tomografica,
- analisi delle varianze,
- analisi qualitative.

Vengono riportati qui di seguito i principali step dell'elaborazione.

Prima fase

In questa fase sono utilizzati programmi originali della Progeo per l'analisi delle tracce sismiche (Seisview) sia codici di calcolo tomografici per le analisi di velocità del cross hole.

a) Traduzione tracce sismiche

Questa fase di preprocessing permette di convertire il formato con cui i dati sismici sono registrati dal sismografo EG&G GEOMETRICS GEODE in quello dei programmi elaborativi.

b) Analisi spettrale (F.F.T.)

Vengono realizzate le analisi spettrali in frequenza (F.F.T.) di alcune tracce campione a finestre sia nei settori con rumore di fondo sia in quelli con segnale utile (onda P ed onda S). Note queste frequenze fondamentali si procede alla costruzione di appositi filtri digitali i quali operano nella riduzione del rumore di fondo e nell'esaltazione dei segnali utili.

c) Analisi dei first break (primi arrivi) delle onde di compressione e taglio (Metodica visuale o mediante CROSS CORRELAZIONE)

Per rilevare l'arrivo delle onde di taglio può essere impiegata una determinazione visuale oppure la tecnica della Cross Correlazione tra i canali fra loro ortogonali dei geofoni orizzontali associata all'analisi dell'ologramma prodotto dalle medesime tracce applicando la metodologia proposta da Willis e Toksoz (1983) per definire la polarità dell'onda stessa.

Questa consiste in una serie di passaggi di Cross Correlazione a finestre variabili tra le varie tracce allo scopo di individuare la massima rassomiglianza tra gli arrivi omologhi.

Individuata la massima verosimiglianza tra le tracce dei canali omologhi si procede all'analisi dell'hodogramma il quale valuta se tale tempo di arrivo è conforme ed appropriato.

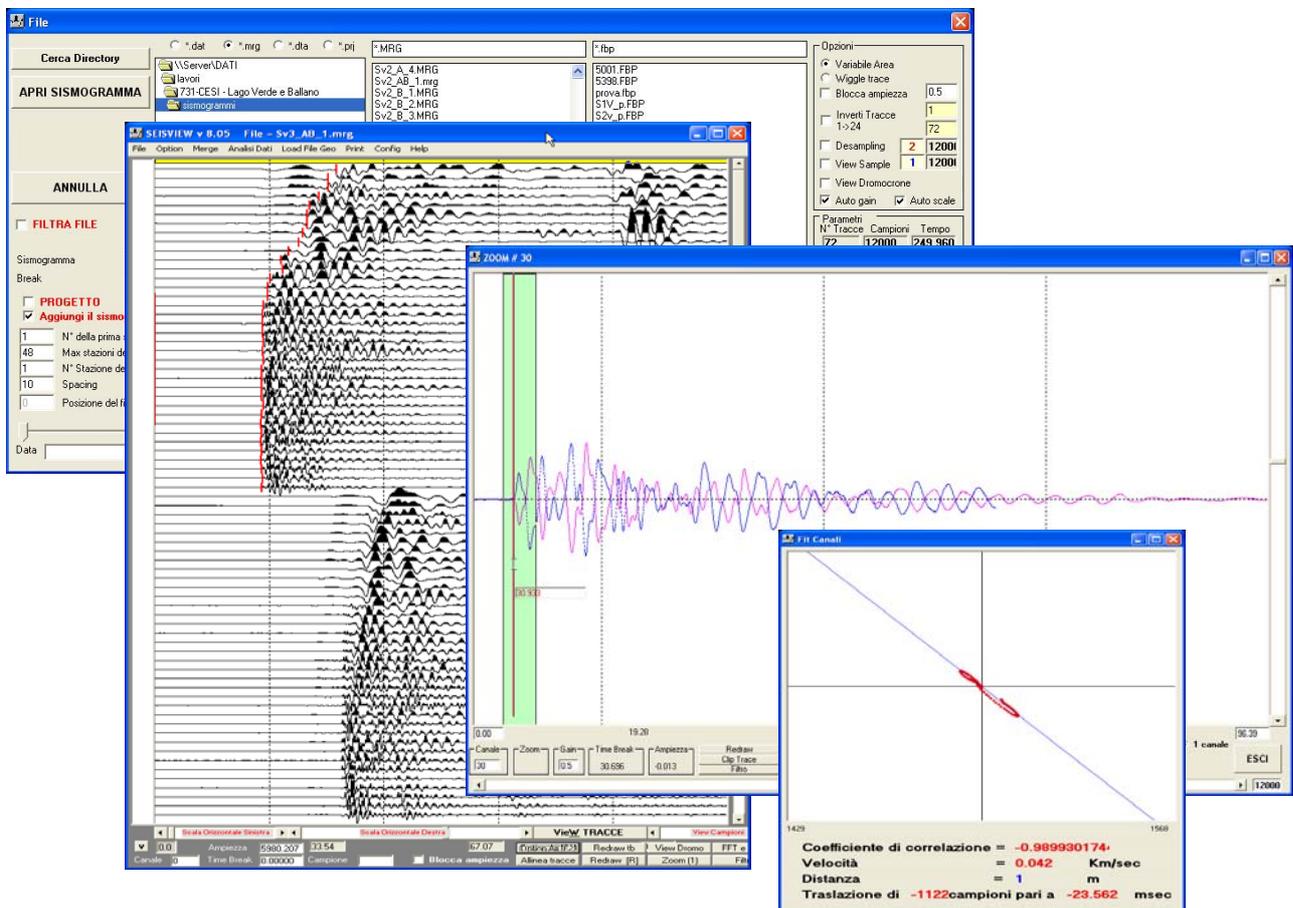
Oltre al sistema del Cross Correlazione, utilizzabile solo nel caso di prova su tre sondaggi in linea, è validamente impiegata, come in questo caso, l'analisi visuale dei break.

Mentre per la valutazione delle onde di compressione si fa riferimento al primo arrivo significativo dell'onda di compressione, per le onde di taglio, essendo presenti due serie di misure per ogni quota a polarità invertita si opera con la visualizzazione contemporanea dei segnali e con la valutazione del break mediante hodogramma.

Le clip sottostanti fanno riferimento ad un esempio di processing standard relativo alla lettura dei tempi delle onde di taglio Sv.

La procedura è rappresentata dalle clip sottostanti dove sono aperti contemporaneamente i record relativi alle registrazioni (onde S) sul foro di ricezione secondo una generazione Sv verso l'alto (prima serie) e verso il basso (seconda serie) dal generatore elettromagnetico.

L'analisi di Cross Correlazione tramite la visualizzazione "a farfalla" delle tracce coniugate porta a valutare (ultimo grafico in basso) il coefficiente di correlazione e definire il tempo di arrivo ottimizzando il fit.



Esempio di Software "Progeo" per analisi dei segnali da Cross Hole (Seisview)

e) Muting

Operazione che attenua il segnale sismico dal tempo 0 al time-break letto sulle singole tracce al passo precedente e che accentua visivamente i primi arrivi.

Viene così ridotto il disturbo aleatorio costituito da rumore di fondo non eliminabile dall'operatore in fase di filtraggio in quanto caratterizzato dalle stesse frequenze del segnale utile.

f) Plot

Eventuale stampa finale delle tracce sismiche relative alle onde di compressione e taglio per analisi visiva tra più set di dati.

Seconda fase

Questa consiste nell'interpretazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione P e di taglio S.

Il procedimento di calcolo si sviluppa secondo i seguenti step.

g) Definizione della geometria della ricerca

- posizionamento punti di shot in foro,
- posizionamento 3D nei fori,
- dimensionamento sezione cross hole.

h) Input tempi di arrivo onde P ed S

Realizzazione dei file numerici dei tempi-distanze (dromocrone) rilevati per le analisi tra i fori stessi.

i) Input modello di velocità

In base all'omogeneità dei dati delle varie tracce sismiche o alle conoscenze stratigrafiche del carotaggio, vengono definiti degli intervalli a velocità costante lungo l'asse del foro in funzione dei quali viene realizzato il calcolo automatico delle geometrie di tracciato dei raggi sismici (ray tracing).

j) Ray tracing

Vengono create le traiettorie dei raggi sismici in base ai modelli di velocità lungo la sezione definiti allo step precedente.

Per il calcolo si sono utilizzati i seguenti parametri:

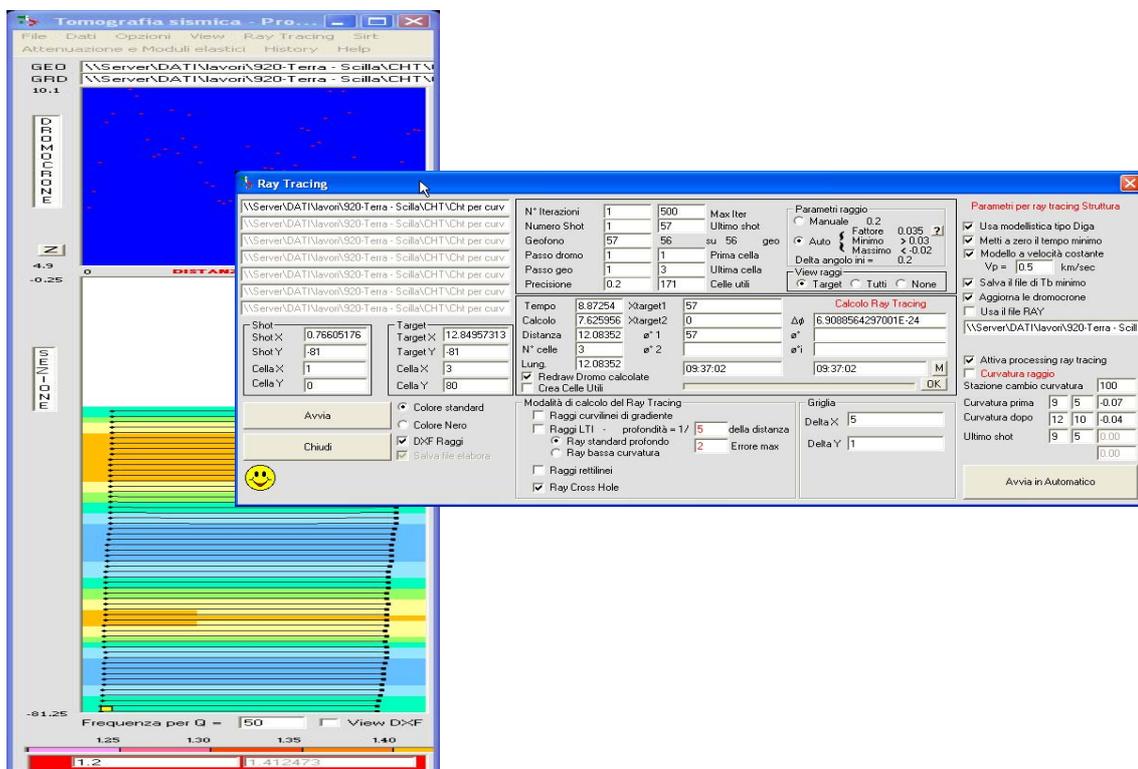
- anisotropia ellittica (gradiente principale di velocità in senso orizzontale)
- tolleranza lineare (.05%)
- tolleranza angolare (1")
- numero di iterazioni (50)
- multi pathing (on)
- plane layer (on)

k) Definizione dei parametri di calcolo

Il programma necessita, per il successivo calcolo della sezione in velocità tra le verticali delle due coppie di fori dei seguenti parametri di calcolo:

- definizione tipo di griglia
- tipo di anisotropia del mezzo investigato (orizzontale)
- numero di iterazioni (mediamente 50)
- algoritmo di calcolo (S.I.R.T.)

L'algoritmo S.I.R.T. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) crea un'immagine di velocità apprezzabile, in particolare, quando i dati sperimentali dei tempi sono sufficientemente corretti.



Esempio di Clip di una sezione cross hole con tracciamento dei raggi curvilinei e la finestra relativa al calcolo di ray tracing.

l) Analisi delle risultanze

Questa viene inizialmente valutata dal punto di vista statistico attraverso gli scarti quadratici e le varianze dei tempi calcolati rispetto a quelli definiti in input.

In base alla correttezza o meno dei valori ottenuti, possono essere modificati i parametri di calcolo per una migliore ottimizzazione e per ricavare un modello di velocità più adeguato e più simile ai valori di input.

Il calcolo riprende perciò dallo step i) con l'input del nuovo modello di velocità e si procede fino a quando gli scarti e le varianze divengono minimi.

m) Predisposizione di tabelle e grafici dei dati

I dati calcolati al punto precedente vengono riportati in un foglio elettronico appositamente predisposto allo scopo di calcolare i moduli elastici relativi e graficizzare le risultanze.

n) Analisi delle varianze

L'assunzione che le onde sismiche si propagano in linea retta tra lo shot ed il ricevitore è fondata sull'ipotesi di un terreno stratificato orizzontalmente.

Pur nell'ambito di validità di tale ipotesi può tuttavia accadere in situazioni stratigrafiche dove esistono forti contrasti di impedenza meccanica che si verifichi il fenomeno della rifrazione critica oppure la curva dell'onda.

E' ovvio che quando una sezione sismica presenta importanti gradienti sismici allora i raggi sono calamitati verso i settori a maggiore velocità curvando la loro traiettoria e allontanandosi da quella rettilinea.

Questa situazione risulta tanto più significativa quanto maggiore è il gradiente e la distanza tra i fori ed occorre quindi un processing tomografico a raggi curvilinei per stabilire quanto questo gradiente faccia incurvare i raggi e valutare con una maggiore approssimazione le velocità sismiche.

Una valutazione dello scostamento dalla linearità dei raggi e quindi un maggiore o minore avvicinamento dei dati ad un modello matematico più reale viene segnalata negli elaborati delle tabelle cross hole mediante analisi delle varianze i cui dati sono riportati in colonne sia per le onde P sia per le onde S con indicazione numerica dello scarto percentuale e dello scarto assoluto in m/sec tra le velocità tomografiche e quelle rettilinee.

o) Qualità del dato

E' la sintesi finale del valore di velocità riportato in tabella che tiene conto della variabilità della lettura del punto di break: questo risulterà tanto meno variabile quanto più evidente e determinato è l'arrivo del segnale.

La presenza di rumore ambientale, di scattering per un non adeguato accoppiamento tubo-ammasso, di basse frequenze per attenuazione del segnale dovuto a fratturazione della roccia oppure a ridotto addensamento producono incertezza nella determinazione del break.

Procedendo a varie letture (almeno 3) variando filtri ed approcci visuali, si ottiene un set di dati tramite i quali, attraverso un'analisi statistica, si stabilisce la variabilità del break.

Tre sono gli intervalli ritenuti significativi:

| | |
|---------|----------------------------|
| Ottimo | $\varepsilon < 2\%$ |
| Medio | ε tra 2-4% |
| Ridotto | ε tra 4 e 10%. |

Questi intorno sono evidenziati con check colorati sulla tabella delle velocità e possono fornire un'utile indicazione sulle misure effettuate.

q) Rapporti

I dati dei parametri elastici di una generica prova Cross Hole si riferiscono all'intervallo spaziale tra due o tre fori a parità di quota.

Dalla prova si ottengono quindi i valori medi dei parametri elastici tra i due punti di misura per cui se interviene un cambio di litologia tra i due sondaggi è ovvio che la misura non può riferirsi né ad un materiale né all'altro ma è comunque un indice di consistenza ed elasticità media che ha un valore locale.

Per l'analisi numerica dei cross hole si rimanda alle tabelle ed ai grafici riportati nelle figure presentate al termine della relazione dalla cui osservazione di dettaglio è possibile trarre informazioni relativamente alle caratteristiche geofisiche del terreno investigato.

Il rapporto conclusivo della prova cross hole è rappresentato dai seguenti elaborati.

Fig. 1 - Rilievo clinometrico della distanza tra tubi verticali.

Fig. 2 - Sismogrammi onde di compressione e onde di taglio.

Figg. 3-4 - Tabella parametri numerici Cross Hole; in questa tabella per ogni metro di profondità di ciascuna colonna i valori numerici si riferiscono ai seguenti parametri:

| | |
|---------------------------|--|
| Prof misura | Quota della misura dal piano campagna; |
| Distanza fori rettilinea | Distanza relativa ottenuta dalle misure clinometriche; |
| Distanza fori tomografica | Distanza relativa ottenuta da processing tomografico; |
| T_p | Tempi di arrivo delle onde di compressione; |
| T_s | Tempi di arrivo delle onde di taglio; |
| V_p | Velocità onde di compressione tomografica; |
| V_s | Velocità onde di taglio tomografica; |
| ν | Coefficiente di Poisson; |
| γ | Peso di volume; |
| E_{din} | Modulo di Elasticità; |
| G_{din} | Modulo di Taglio o Rigidità; |
| K_{din} | Modulo di Compressibilità. |

Nella porzione intermedia dell'elaborato è altresì riportata la colonna stratigrafica sintetica estratta dal profilo geotecnico di progetto per analisi e correlazioni di massima litostratigrafiche e geosismiche.

I dati rilevati ad ogni metro di profondità sono poi stati indicativamente accorpati per livelli litostratigrafici omogenei ed i parametri medi di ciascun intervallo considerato sono riportati in ulteriori colonne distintive.

Da ultimo sono riportate le colonne relative all'analisi delle varianze delle onde di compressione e di taglio e la qualità del dato.

Fig. 5 – Log parametri cinematici e moduli elastici dinamici:

| |
|---|
| Velocità onde di compressione; |
| Velocità onde di taglio; |
| Coefficiente di Poisson; |
| Modulo di Elasticità dinamico E_{din} ; |
| Modulo di Taglio dinamico G_{din} o G_0 ; |
| Modulo di Compressibilità K_{din} . |

3.4. Indicazioni generali sulla elasticità dei materiali

3.4.1. Generalità

L'elasticità di un corpo dipende soprattutto da tre fattori: isotropia, omogeneità e continuità.

Per isotropia si intende uguaglianza delle proprietà vettoriali di un corpo in tutte le direzioni; per omogeneità si intende la distribuzione spaziale uniforme dei vari costituenti del materiale nella sua struttura interna; per continuità si intende l'assenza di interruzioni nei legami che uniscono tra loro i vari costituenti del materiale.

Da ciò si deduce che l'elasticità non può essere che una schematizzazione teorica perché nessun corpo reale può rispondere ai requisiti richiesti di isotropia, omogeneità e continuità.

Nei corpi reali ogni deformazione provoca nell'interno un assetamento strutturale che è irreversibile, per cui non ci può essere un recupero istantaneo e totale della deformazione al cessare della sollecitazione.

Tuttavia questa schematizzazione teorica può avere una sua validità reale se considerata entro certi limiti di intensità e durata dell'applicazione della sollecitazione.

Nel campo delle indagini sismiche con generazione di onde p ed s tutti i materiali rientrano nel campo delle deformazioni elastiche essendo sia l'intensità della forza applicata ed il tempo in cui questa agisce ridotta ad alcuni millisecondi.

Le onde sismiche si propagano nell'interno della terra con velocità, frequenza e ampiezza che dipendono dalle proprietà elastiche delle rocce.

3.4.2. Principi sulla Elasticità

Vengono qui di seguito richiamati alcuni principi sulla elasticità per comprendere le relazioni che legano le velocità delle onde sismiche alle caratteristiche elastiche dei materiali.

Si definisce come *sforzo* S il rapporto tra la forza applicata ad una piccola superficie e l'area di tale superficie.

Se la forza viene applicata normalmente all'area lo sforzo è di *trazione* o di *compressione* se in direzione opposta.

Quando invece la forza è parallela all'area lo sforzo è *tangenziale* o di *taglio*.

Lo sforzo di compressione provoca un accorciamento del corpo, quello di trazione un allungamento e quello di taglio una deformazione angolare.

La *deformazione longitudinale* (ϵ_i) è il rapporto tra l'allungamento (o l'accorciamento) e la lunghezza originale del corpo.

L'angolo di cui ruota il corpo in seguito ad uno sforzo di taglio è la *deformazione tangenziale* (ϵ_ω).

Per piccole deformazioni, lo sforzo longitudinale è proporzionale alla deformazione ϵ_i , e la costante di proporzionalità è il *Modulo di Young* o di *Elasticità normale*.

Lo stesso dicasi per lo sforzo di taglio la cui deformazione tangenziale è proporzionale al *Modulo di Taglio* o di *Rigidità*.

Se lo sforzo viene applicato tridimensionalmente (lungo tutti tre gli assi cartesiani) applicando una pressione idrostatica uniforme si avranno componenti dello sforzo uguali e la deformazione sarà rappresentata da una variazione di volume indicata numericamente dal coefficiente di compressibilità σ , inversamente, dal *Modulo di Compressibilità* o *Modulo di Volume*.

Da un punto di vista bidimensionale, uno sforzo di trazione o compressione, causa sia un allungamento o raccorciamento e contemporaneamente una contrazione o dilatazione; la costante che lega tali variazioni è il *coefficiente di Poisson*.

E' fondamentale comprendere che le velocità delle onde di compressione e di taglio sono parametri qualitativamente molto differenti in quanto hanno origine da una sollecitazione elastica decisamente diversa.

Le onde di compressione fanno riferimento ad un comportamento deformativo longitudinale, le relative onde sismiche si trasmettono mediante deformazioni di compressione ed estensione.

Le onde di taglio sono invece di origine distorsionale e le vibrazioni sono perpendicolari alla direzione di propagazione del moto.

E' ovvio quindi che le velocità delle onde di compressione forniscono indicazioni sulla compressibilità dei materiali mentre quelle di taglio sulla rigidità e deformabilità trasversale.

3.4.2. Parametri elastici

Per la caratterizzazione del sito e del terreno in esame, specialmente in termini di deformabilità dei materiali in associazione ai dati geotecnici ricavati dalle prove geomeccaniche, può essere opportuno fornire al Progettista altri parametri (oltre ai singoli valori di velocità sismica) contemporaneamente alla rilevazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche (V_p e V_s) nel sottosuolo.

Si tratta dei Moduli elastici dinamici del terreno i quali possono contribuire ad una migliore definizione dei carichi e delle spinte da parte del manufatto sul terreno di fondazione.

Attraverso la determinazione sia delle velocità delle onde di compressione sia delle velocità delle onde di taglio è possibile ricavare vari parametri (per ulteriori dettagli si veda, tra i più recenti, "The rock physics handbook – tools for seismic analysis in porous media" di G. Mavko, T. Mukerji e J. Dvorkin, Cambridge University Press, UK, pp. 1-329, 1998);

| | | |
|--------------------------------------|--------------------|--------------|
| - Coefficiente di Poisson | (ν) | |
| - Peso di volume | (γ_{din}) | in t/m^3 |
| - Modulo di Elasticità dinamico | (E_{din}) | in Kg/cm^2 |
| - Modulo di Taglio dinamico | (G_{din}) | in $Kgcm^2$ |
| - Modulo di Compressibilità dinamico | (K_{din}) | in $Kgcm^2$ |

Il *Coefficiente di Poisson* (ν), noto come la costante che lega le deformazioni in un corpo, può essere collegato, da un punto di vista bidimensionale, ad uno sforzo di trazione, che causa nel corpo stesso un allungamento in una direzione e un raccorciamento nell'altra, o ad uno sforzo di compressione che, analogamente, determina una contrazione in una direzione e una dilatazione nella direzione opposta.

Tale parametro può presentare un range di variazione compreso tra un massimo di 0.5 ed un minimo di 0; il valore di 0.5 è caratteristico di materiali che si deformano senza cambiamenti di volume (es. acqua), valori leggermente inferiori (0.47 - 0.49) sono tipici di argille o materiali molto saturi; valori inferiori sono indicativi di materiali da poco consolidati a sovraconsolidati.

Per le rocce si presentano range di variazioni molto ampi collegati in particolare sia al grado di fratturazione sia alla presenza di cavità, stratificazioni e litologie e comunque tra (0.46 e 0.20).

In funzione di V_p e di V_s il parametro è definito dalla seguente relazione:

Coefficiente di Poisson

$$\nu = \frac{Vp^2 - 2 \cdot Vs^2}{2 \cdot (Vp^2 - Vs^2)}$$

Il *Peso di volume* (γ_{din}) del terreno può essere indicativamente ricavato, in via empirica, anche dalla velocità delle onde di compressione sulla base della seguente relazione:

Peso di volume

$$\gamma_{din} = 0.51 \cdot Vp_{m/sec}^{0.19} \quad (\gamma_{din} \text{ in T/m}^3).$$

Da tale relazione si può ottenere anche la densità geofisica, intesa come:

Densità geofisica

$$\delta_{din} = \frac{\gamma}{g} \quad (g = 9.8 - \text{accelerazione di gravità m/sec}),$$

la quale viene utilizzata come parametro nelle formule per ricavare i moduli di elasticità e di taglio.

Il *Modulo di Young* o di *Elasticità normale* E_{din} , definisce la *deformazione longitudinale* di un corpo, intesa come il rapporto tra l'allungamento (o l'accorciamento) e la lunghezza originale del corpo stesso; in funzione dei valori della velocità delle onde di compressione Vp , della densità geofisica e del coefficiente di Poisson il parametro è definito dalla seguente relazione:

Modulo di Elasticità

$$E_{din} = Vp^2 \cdot \delta_{din} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (E_{din} \text{ in Kg/cm}^2).$$

Il *Modulo di Taglio* o di *Rigidità* G_{din} definisce invece la *deformazione tangenziale* di un corpo, intesa come l'angolo di cui ruota il corpo stesso in seguito ad uno sforzo di taglio; in funzione dei valori della velocità delle onde di taglio Vs e della densità geofisica il parametro è definito dalla seguente relazione:

Modulo di Taglio

$$G_{din} = \delta_{din} \cdot Vs^2 \quad (G_{din} \text{ in Kg/cm}^2).$$

Infine, il *Modulo di Compressibilità* o *Modulo di Volume* è quel parametro ottenibile se lo sforzo viene applicato tridimensionalmente (lungo tutti i tre assi cartesiani) generando una pressione idrostatica uniforme con la quale si avranno componenti dello sforzo uguali e con deformazione rappresentata da una variazione di volume la quale può essere indicata numericamente dall'inverso del coefficiente di compressibilità; utilizzando i valori del modulo di elasticità e del coefficiente di Poisson il parametro è definito dalla seguente relazione:

Modulo di Compressibilità

$$K_{din} = \frac{E_{din}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \quad (K_{din} \text{ in Kg/cm}^2).$$

I moduli dinamici così calcolati risultano comunque sempre più elevati di quelli statici forniti da prove di carico in situ in quanto gli impulsi sismici sono di breve durata e le sollecitazioni ad essi associate sono relativamente modeste e rientrano nel campo delle deformazioni istantanee.

Il modulo di taglio G_{din} , oltre ad essere utilizzato nel campo geotecnico per lo studio delle resistenze al taglio dei materiali detritici e lapidei, viene impiegato nello studio di microzonazioni sismiche in particolare nel calcolo delle seguenti relazioni relative alla valutazione dei parametri caratteristici sia di spessori (H) sia di interfacce stratigrafiche (nel qual caso vengono utilizzati i parametri elastici di G_{din} dei due strati):

| | | |
|-----------------------|---|--------------------------------|
| Rigidità sismica | $R = \delta_{din} \sqrt{\frac{G_{din}}{\delta_{din}}}$ | (R in t/(m ² *sec)) |
| Periodo proprio | $T = \frac{4H}{\sqrt{\frac{G_{din}}{\delta_{din}}}}$ | (T in sec) |
| Rapporto di Impedenza | $\lambda = \frac{\delta_{din1} \cdot G_{din1}}{\delta_{din2} \cdot G_{din2}}$ | (λ adimensionale) |

Il modulo di compressibilità K_{din} o di deformabilità volumetrica è confrontabile con quello ottenuto da prove di compressione idrostatica realizzabili mediante prove triassiali non drenate nella fase iniziale del carico (fase elastica) e quindi è comparabile al modulo idrostatico di compressibilità geotecnico B o, inversamente, al coefficiente o indice di compressibilità C_c .

4. ANALISI SINTETICA DELLE RISULTANZE SISMICHE

In base all'analisi degli elaborati dell'indagine cross hole si possono distinguere 2 principali unità sismostratigrafiche.

Unità sismostratigrafica caratterizzata da terreni litologicamente medio fini (limi e argille con episodi sabbiosi) da poco a debolmente addensati.

Tali unità appaiono più estese nella porzione più superficiale (tra 0 e 21 m dal p.c.) e intermedia (da 40 a 60 m sal p.c.) mentre con minore potenza nella porzione più profonda (da 63 a 81 m dal p.c.).

Tali unità sono caratterizzate da velocità delle onde di compressione mediamente inferiori a 1.6 Km/sec e velocità delle onde di taglio inferiori a 0.27 Km/sec. In effetti la porzione più superficiale (0-21 m dal p.c.) presenta una Vs media decisamente inferiore a 0.20 km/sec

Unità sismostratigrafica caratterizzata da terreni litologicamente grossolani (sabbie e ghiaie) anche con considerevoli consistenze.

Tali unità sono predominanti nella porzione compresa fra 22 e 40 m dal p.c. e da 82 fino quasi a fondo foro. Sono caratterizzate da velocità delle onde di compressione mediamente superiori a 2.0 km/sec e velocità media delle onde di taglio generalmente maggiore di 0.5 km/sec.

Si rimanda per i dettagli all'osservazione diretta degli elaborati cartografici presentati per la prova cross hole (Figg.1-5).

PROGEO

Dott. Maurizio Furani

Dott. Gabriele Pulelli



Hanno collaborato:
Dott. Stefano Tomidei
Dott. Andrea Fabbri

RILIEVO DELLA DISTANZA FRA TUBI VERTICALI



PROGEO s.r.l.
Via Taleste 10/8
47100 Forlì
tel. 0543 723580
fax. 0543 721456
mail. progeo@gmail.com
www.progeo.info

orientamento:



ver. 07/04/07

Committente..... Regione Emilia Romagna
 ubicazione..... Viserba (Rn)
 coppia / terna..... S1 - S2
 scheda di elaborazione su.....
 data del rilievo..... 17/11/2010
 distanza tra le teste tubo (metri @ piano campagna) 4.54
 azimut della base tra i tubi (angolo antiorario sul N magnetico) 230 °
 quota di riferimento..... Testa Tubo
 rilevatore Progeo

note:

| prof. m | TUBO S1 | | TUBO S2 | | legenda: | | Distanza fra la base dei tubi S1 - S2 cm |
|---------------------------------------|---------|-------|---------|-------|-------------------------------|---|--|
| | m | 98.0 | m | 98.0 | profondità max del tubo; | (1): profondità dalla quota di riferimento; | |
| (1) | 0 | | 0 | | fuori terra della testa tubo; | (2): spostamento asse tubo sui piani N+S- e E+W-; | |
| T.T. | / | | / | | quote assolute della T.T.; | (3): componenti NS ed EW della distanza tra i tubi; | (4): distanza orizzontale tra i tubi alla profondità indicata. |
| DISTANZA FRA LA BASE DEI TUBI S1 - S2 | | | | | | | |
| spostamento | NS | EW | NS | EW | NS | EW | distanza |
| cm | cm | cm | cm | cm | cm | cm | cm |
| (2) | (2) | (2) | (2) | (2) | (3) | (3) | (4) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -292 | 348 | 454 |
| 2 | -3.3 | 0.5 | 1.7 | 2.8 | -287 | 350 | 453 |
| 4 | -2.6 | 0.0 | 1.5 | 5.8 | -288 | 354 | 456 |
| 6 | -3.0 | 2.1 | 2.5 | 8.1 | -286 | 354 | 455 |
| 8 | 0.0 | 0.9 | 6.6 | 8.9 | -285 | 356 | 456 |
| 10 | -2.5 | -0.6 | 6.5 | 5.6 | -283 | 354 | 453 |
| 12 | -3.2 | 1.9 | 3.0 | 4.0 | -286 | 350 | 452 |
| 14 | -1.1 | 1.2 | 2.7 | 0.2 | -288 | 347 | 451 |
| 16 | -3.1 | 0.4 | 3.6 | 1.2 | -285 | 349 | 450 |
| 18 | -2.8 | 1.9 | 6.3 | -0.2 | -283 | 346 | 447 |
| 20 | -5.3 | 0.4 | 4.2 | -2.0 | -282 | 345 | 446 |
| 22 | -6.5 | -1.8 | 3.8 | -6.3 | -282 | 343 | 444 |
| 24 | -6.6 | -2.8 | 5.1 | -4.6 | -280 | 346 | 445 |
| 26 | -7.7 | -0.3 | 7.8 | -5.3 | -276 | 343 | 440 |
| 28 | -4.8 | -1.4 | 10.3 | -9.0 | -277 | 340 | 439 |
| 30 | -7.3 | -2.9 | 11.0 | -6.5 | -274 | 344 | 440 |
| 32 | -6.9 | -0.3 | 12.0 | -5.8 | -273 | 342 | 438 |
| 34 | -6.1 | -2.9 | 13.1 | -9.0 | -273 | 342 | 437 |
| 36 | -7.9 | -2.1 | 14.3 | -13.2 | -270 | 337 | 431 |
| 38 | -7.8 | -4.5 | 15.3 | -10.4 | -269 | 342 | 435 |
| 40 | -10.3 | -6.0 | 18.1 | -10.1 | -263 | 344 | 433 |
| 42 | -6.1 | -10.3 | 21.2 | -13.7 | -265 | 344 | 434 |
| 44 | -6.8 | -14.1 | 20.8 | -13.7 | -264 | 348 | 437 |
| 46 | -3.1 | -10.0 | 23.6 | -11.0 | -265 | 347 | 437 |
| 48 | 2.7 | -13.9 | 25.2 | -14.5 | -269 | 347 | 440 |
| 50 | 0.2 | -15.5 | 24.7 | -18.9 | -267 | 344 | 436 |
| 52 | 3.6 | -15.2 | 24.9 | -18.4 | -271 | 345 | 438 |
| 54 | 6.3 | -18.3 | 27.8 | -20.8 | -270 | 345 | 439 |
| 56 | 7.8 | -15.8 | 29.6 | -27.5 | -270 | 336 | 431 |
| 58 | 12.8 | -17.9 | 28.1 | -28.2 | -277 | 338 | 436 |
| 60 | 10.4 | -19.4 | 31.9 | -28.5 | -270 | 339 | 433 |
| 62 | 13.6 | -18.4 | 36.1 | -35.5 | -269 | 331 | 426 |
| 64 | 16.1 | -16.8 | 37.9 | -38.1 | -270 | 326 | 424 |
| 66 | 19.3 | -16.5 | 38.1 | -39.7 | -273 | 325 | 424 |
| 68 | 22.2 | -16.4 | 39.3 | -41.9 | -275 | 322 | 423 |
| 70 | 19.8 | -17.9 | 43.1 | -41.6 | -268 | 324 | 421 |
| 72 | 19.9 | -14.3 | 47.0 | -45.1 | -265 | 317 | 413 |
| 74 | 24.7 | -13.5 | 46.8 | -43.3 | -270 | 318 | 417 |
| 76 | 25.6 | -12.6 | 51.4 | -42.3 | -266 | 318 | 415 |
| 78 | 26.9 | -9.9 | 55.0 | -46.8 | -264 | 311 | 408 |
| 80 | 24.4 | -11.4 | 55.3 | -53.5 | -261 | 306 | 402 |
| 82 | 27.0 | -11.8 | 56.4 | -53.1 | -262 | 307 | 404 |
| 84 | 30.3 | -12.4 | 62.5 | -57.6 | -260 | 303 | 399 |
| 86 | 32.4 | -9.2 | 68.0 | -61.2 | -256 | 296 | 391 |
| 88 | 36.3 | -10.7 | 67.8 | -60.5 | -260 | 298 | 396 |
| 90 | 33.8 | -12.2 | 69.2 | -60.7 | -256 | 299 | 394 |
| 92 | 37.0 | -11.9 | 69.7 | -64.1 | -259 | 296 | 393 |
| 94 | 39.9 | -11.0 | 68.3 | -63.7 | -264 | 295 | 396 |
| 96 | 42.5 | -9.6 | 68.9 | -61.8 | -265 | 296 | 397 |
| 98 | 44.5 | -7.0 | 70.2 | -63.0 | -266 | 292 | 395 |
| 100 | | | | | | | |

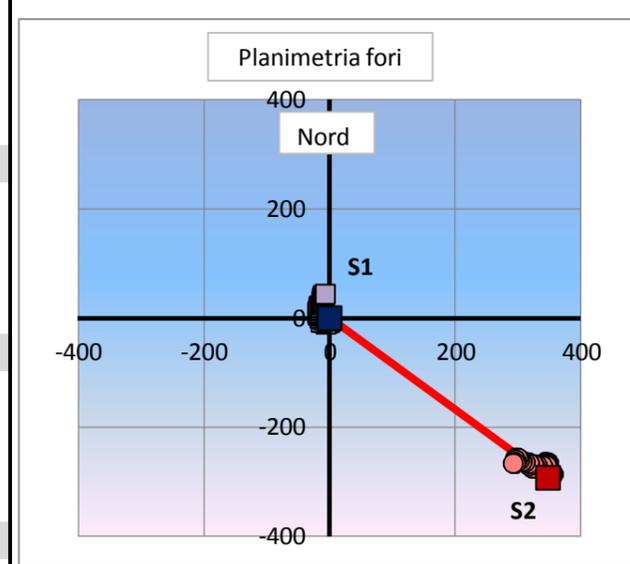
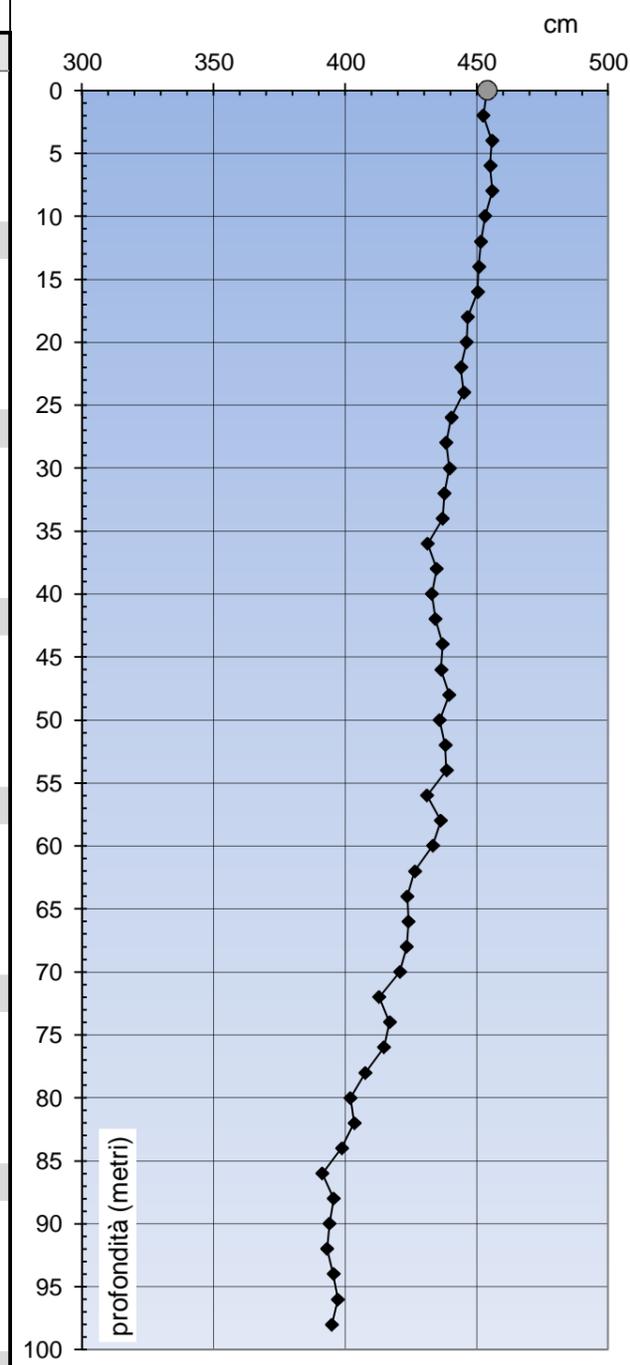


Fig. 1

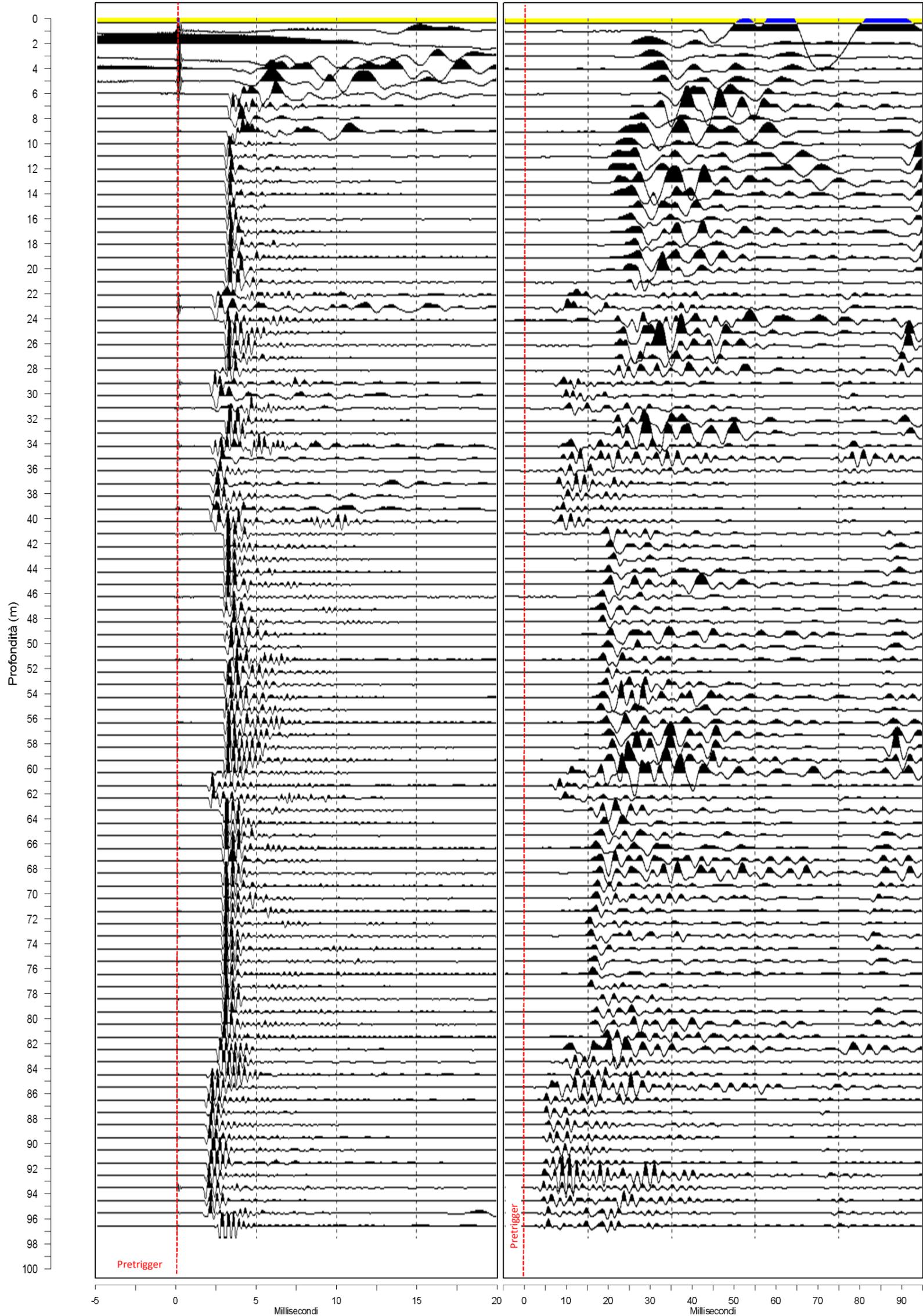
| | |
|--------------------------|--|
| COMMITTENTE | REGIONE EMILIA ROMAGNA - SERVIZIO GEOLOGICO |
| CROSS HOLE | S1 - S2 |
| Località | VISERBA (Rn) |
| Data acquisizione | 17 novembre 2010 |
| Commessa | 996/2010 |



Sismogrammi post-processing

| | | |
|--------------------------|--|--|
| Profondità misura | SISMOGRAMMI ONDE DI COMPRESSIONE (SHOT SPARKER) | SISMOGRAMMI ONDE DI TAGLIO (SHOT ELETTRODINAMICO) |
|--------------------------|--|--|

Nota: Per i sismogrammi delle onde di taglio viene visualizzata una sola registrazione delle due acquisite



Sismogrammi CROSS HOLE S1 - S2

COMMITTENTE

REGIONE EMILIA ROMAGNA - SERVIZIO GEOLOGICO



CROSS HOLE

S1 - S2

Località

VISERBA (Rn)

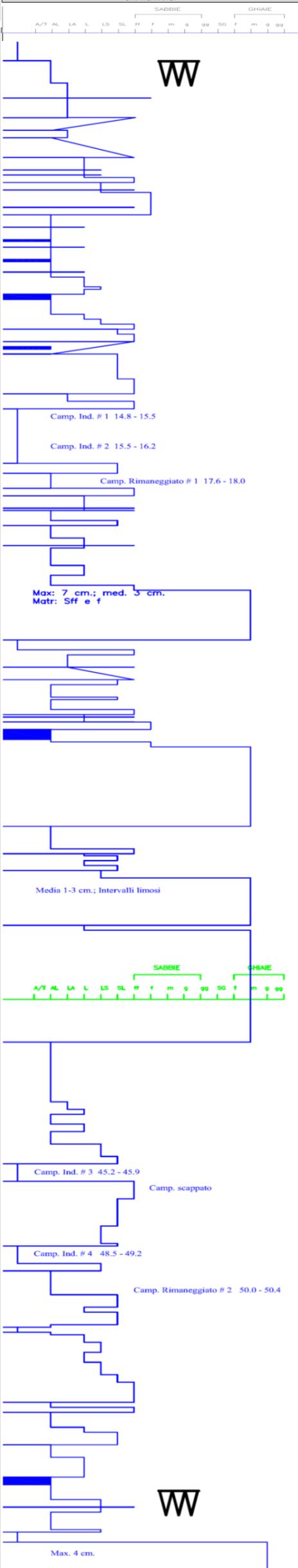
Data acquisizione

17 novembre 2010 Comessa 996/2010

SHOT S1

REC S2

| Profondità misura | Distanza fori | | | PARAMETRI INTERGEOFONICI RICAVATI DA PROCESSING CROSS HOLE TOMOGRAFICO | | | v | γ | Edin Mpa | Gdin Mpa | Kdin Mpa | |
|-------------------|---------------|--------------|-------|--|-----------|-----------|-------|------|----------|----------|----------|-------|
| | Rettineo m | Curvilineo m | Tip m | Ts millsec | Vp Km/sec | Vs Km/sec | | | | | | |
| 0 | 4.540 | | | | | | | | | | | |
| 1 | 4.530 | 4.561 | 4.663 | 12.13 | 43.24 | 0.376 | 0.108 | 0.46 | 1.57 | 55 | 19 | 206 |
| 2 | 4.530 | 4.942 | 4.535 | 11.39 | 25.22 | 0.434 | 0.180 | 0.40 | 1.62 | 152 | 54 | 244 |
| 3 | 4.540 | 4.575 | 4.540 | 4.33 | 27.08 | 1.057 | 0.168 | 0.49 | 1.91 | 166 | 56 | 2147 |
| 4 | 4.560 | 4.561 | 4.562 | 3.33 | 27.82 | 1.369 | 0.164 | 0.49 | 2.01 | 168 | 56 | 3840 |
| 5 | 4.560 | 4.563 | 4.561 | 3.40 | 30.48 | 1.344 | 0.150 | 0.49 | 2.00 | 139 | 47 | 3700 |
| 6 | 4.550 | 4.550 | 4.551 | 3.03 | 31.69 | 1.502 | 0.144 | 0.50 | 2.05 | 131 | 44 | 4740 |
| 7 | 4.560 | 4.560 | 4.568 | 3.01 | 30.06 | 1.515 | 0.152 | 0.49 | 2.05 | 147 | 49 | 4826 |
| 8 | 4.560 | 4.561 | 4.563 | 3.15 | 24.98 | 1.446 | 0.183 | 0.49 | 2.03 | 210 | 70 | 4323 |
| 9 | 4.550 | 4.550 | 4.551 | 2.98 | 22.77 | 1.525 | 0.200 | 0.49 | 2.05 | 254 | 85 | 4845 |
| 10 | 4.530 | 4.530 | 4.531 | 2.87 | 21.78 | 1.581 | 0.208 | 0.49 | 2.07 | 277 | 93 | 5245 |
| 11 | 4.520 | 4.520 | 4.520 | 2.83 | 20.69 | 1.598 | 0.219 | 0.49 | 2.07 | 306 | 103 | 5358 |
| 12 | 4.520 | 4.520 | 4.521 | 2.93 | 20.00 | 1.544 | 0.226 | 0.49 | 2.06 | 325 | 109 | 4954 |
| 13 | 4.510 | 4.510 | 4.510 | 2.87 | 21.39 | 1.571 | 0.211 | 0.49 | 2.06 | 284 | 95 | 5164 |
| 14 | 4.510 | 4.510 | 4.514 | 2.93 | 21.27 | 1.538 | 0.212 | 0.49 | 2.06 | 287 | 96 | 4928 |
| 15 | 4.510 | 4.510 | 4.514 | 2.96 | 24.80 | 1.524 | 0.182 | 0.49 | 2.05 | 211 | 71 | 4861 |
| 16 | 4.500 | 4.500 | 4.502 | 2.94 | 22.19 | 1.532 | 0.203 | 0.49 | 2.05 | 262 | 88 | 4897 |
| 17 | 4.480 | 4.480 | 4.480 | 2.97 | 23.99 | 1.507 | 0.187 | 0.49 | 2.05 | 222 | 74 | 4735 |
| 18 | 4.470 | 4.470 | 4.470 | 2.91 | 23.89 | 1.536 | 0.187 | 0.49 | 2.06 | 223 | 75 | 4943 |
| 19 | 4.460 | 4.460 | 4.460 | 2.91 | 23.59 | 1.533 | 0.189 | 0.49 | 2.06 | 228 | 76 | 4916 |
| 20 | 4.460 | 4.460 | 4.460 | 2.87 | 23.51 | 1.552 | 0.190 | 0.49 | 2.06 | 230 | 77 | 5056 |
| 21 | 4.450 | 4.476 | 4.868 | 2.83 | 25.50 | 1.579 | 0.191 | 0.49 | 2.07 | 234 | 78 | 5252 |
| 22 | 4.440 | 4.442 | 4.491 | 2.07 | 9.62 | 2.145 | 0.467 | 0.48 | 2.19 | 1462 | 496 | 9807 |
| 23 | 4.450 | 4.454 | 4.544 | 2.00 | 6.81 | 2.232 | 0.667 | 0.45 | 2.21 | 2959 | 1020 | 10069 |
| 24 | 4.450 | 4.456 | 4.451 | 2.35 | 21.17 | 1.898 | 0.210 | 0.49 | 2.14 | 294 | 98 | 7885 |
| 25 | 4.430 | 4.430 | 4.430 | 2.84 | 21.05 | 1.561 | 0.210 | 0.49 | 2.06 | 283 | 95 | 5094 |
| 26 | 4.400 | 4.400 | 4.400 | 2.82 | 21.37 | 1.560 | 0.206 | 0.49 | 2.06 | 271 | 91 | 5092 |
| 27 | 4.390 | 4.398 | 4.390 | 2.90 | 21.17 | 1.515 | 0.207 | 0.49 | 2.05 | 273 | 92 | 4766 |
| 28 | 4.390 | 4.406 | 5.362 | 2.43 | 25.20 | 1.810 | 0.213 | 0.49 | 2.12 | 298 | 100 | 7090 |
| 29 | 4.390 | 4.394 | 4.427 | 1.89 | 6.50 | 2.320 | 0.682 | 0.45 | 2.22 | 3118 | 1073 | 11008 |
| 30 | 4.400 | 4.400 | 4.403 | 2.07 | 8.84 | 2.121 | 0.498 | 0.47 | 2.19 | 1658 | 564 | 9464 |
| 31 | 4.390 | 4.405 | 4.452 | 2.09 | 9.35 | 2.104 | 0.476 | 0.47 | 2.18 | 1514 | 514 | 9357 |
| 32 | 4.380 | 4.387 | 4.382 | 2.89 | 20.68 | 1.520 | 0.212 | 0.49 | 2.05 | 285 | 96 | 4795 |
| 33 | 4.370 | 4.394 | 4.900 | 2.64 | 22.93 | 1.662 | 0.214 | 0.49 | 2.09 | 295 | 99 | 5855 |
| 34 | 4.370 | 4.375 | 4.378 | 1.96 | 7.80 | 2.234 | 0.561 | 0.47 | 2.21 | 2121 | 723 | 10485 |
| 35 | 4.340 | 4.342 | 4.341 | 2.15 | 8.30 | 2.017 | 0.523 | 0.46 | 2.16 | 1802 | 616 | 8328 |
| 36 | 4.310 | 4.311 | 4.311 | 1.99 | 7.78 | 2.171 | 0.554 | 0.47 | 2.20 | 2054 | 701 | 9819 |
| 37 | 4.330 | 4.330 | 4.333 | 1.88 | 7.30 | 2.305 | 0.593 | 0.46 | 2.22 | 2380 | 812 | 11174 |
| 38 | 4.350 | 4.350 | 4.368 | 1.94 | 8.35 | 2.238 | 0.523 | 0.47 | 2.21 | 1848 | 628 | 10652 |
| 39 | 4.340 | 4.342 | 4.340 | 1.87 | 6.37 | 2.326 | 0.682 | 0.45 | 2.22 | 3122 | 1074 | 11075 |
| 40 | 4.330 | 4.341 | 4.405 | 2.09 | 6.46 | 2.081 | 0.682 | 0.44 | 2.18 | 3027 | 1051 | 8394 |
| 41 | 4.340 | 4.341 | 4.382 | 2.74 | 16.51 | 1.584 | 0.265 | 0.49 | 2.07 | 450 | 151 | 5192 |
| 42 | 4.340 | 4.340 | 4.341 | 2.78 | 18.88 | 1.561 | 0.230 | 0.49 | 2.06 | 337 | 113 | 5067 |
| 43 | 4.360 | 4.360 | 4.360 | 2.84 | 19.56 | 1.534 | 0.223 | 0.49 | 2.06 | 316 | 106 | 4881 |
| 44 | 4.370 | 4.370 | 4.372 | 2.80 | 18.94 | 1.559 | 0.231 | 0.49 | 2.06 | 340 | 114 | 5053 |
| 45 | 4.370 | 4.370 | 4.371 | 2.77 | 17.03 | 1.578 | 0.257 | 0.49 | 2.07 | 420 | 141 | 5155 |
| 46 | 4.370 | 4.370 | 4.370 | 2.78 | 16.12 | 1.571 | 0.271 | 0.48 | 2.06 | 468 | 158 | 5088 |
| 47 | 4.380 | 4.380 | 4.380 | 2.74 | 16.80 | 1.599 | 0.261 | 0.49 | 2.07 | 435 | 146 | 5308 |
| 48 | 4.400 | 4.400 | 4.402 | 2.82 | 17.28 | 1.563 | 0.255 | 0.49 | 2.06 | 413 | 139 | 5048 |
| 49 | 4.380 | 4.380 | 4.381 | 2.82 | 18.97 | 1.552 | 0.231 | 0.49 | 2.06 | 340 | 114 | 5004 |
| 50 | 4.360 | 4.360 | 4.361 | 2.85 | 18.26 | 1.528 | 0.239 | 0.49 | 2.05 | 362 | 122 | 4818 |
| 51 | 4.370 | 4.370 | 4.372 | 2.92 | 16.87 | 1.498 | 0.259 | 0.48 | 2.05 | 424 | 143 | 4582 |
| 52 | 4.380 | 4.380 | 4.382 | 2.84 | 18.73 | 1.541 | 0.234 | 0.49 | 2.06 | 348 | 117 | 4923 |
| 53 | 4.380 | 4.380 | 4.381 | 2.81 | 17.09 | 1.557 | 0.256 | 0.49 | 2.06 | 418 | 141 | 5005 |
| 54 | 4.390 | 4.390 | 4.391 | 2.88 | 15.80 | 1.525 | 0.278 | 0.48 | 2.05 | 489 | 165 | 4738 |
| 55 | 4.350 | 4.350 | 4.352 | 2.79 | 16.65 | 1.561 | 0.261 | 0.49 | 2.06 | 435 | 146 | 5023 |
| 56 | 4.310 | 4.310 | 4.310 | 2.79 | 18.09 | 1.546 | 0.238 | 0.49 | 2.06 | 361 | 121 | 4953 |
| 57 | 4.340 | 4.340 | 4.340 | 2.84 | 18.04 | 1.529 | 0.241 | 0.49 | 2.05 | 368 | 124 | 4824 |
| 58 | 4.360 | 4.360 | 4.361 | 2.90 | 17.55 | 1.502 | 0.249 | 0.49 | 2.05 | 391 | 131 | 4625 |
| 59 | 4.350 | 4.370 | 4.479 | 2.81 | 19.32 | 1.553 | 0.232 | 0.49 | 2.06 | 342 | 115 | 5007 |
| 60 | 4.330 | 4.340 | 4.411 | 2.12 | 10.56 | 2.049 | 0.418 | 0.48 | 2.17 | 1164 | 394 | 8949 |
| 61 | 4.300 | 4.302 | 4.318 | 1.73 | 6.32 | 2.480 | 0.683 | 0.46 | 2.25 | 3186 | 1092 | 12934 |

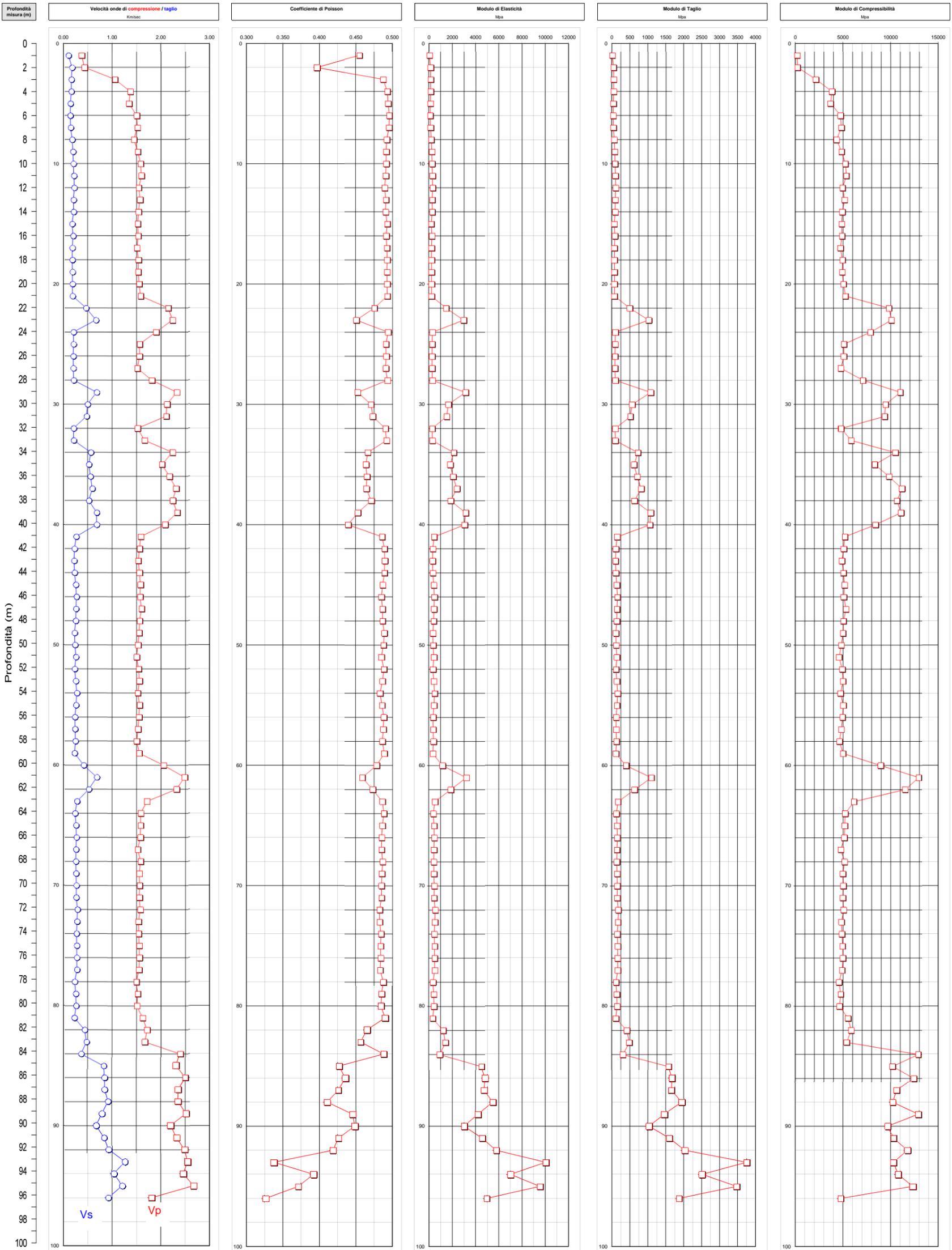


| Profondità | PARAMETRI INTERVALLARI MEDI PER LIVELLI LITOLOGICI | | | Edin Mpa | Gdin Mpa | Kdin Mpa |
|------------|--|-----------|------|----------|----------|----------|
| | Vp Km/sec | Vs Km/sec | v | | | |
| 0.81 | 0.15 | 0.46 | 1.78 | 135 | 46 | 1609 |
| 1.42 | 0.15 | 0.49 | 2.03 | 135 | 45 | 4220 |
| 1.53 | 0.19 | 0.49 | 2.05 | 239 | 80 | 4919 |
| 1.54 | 0.21 | 0.49 | 2.06 | 277 | 93 | 4977 |
| 1.52 | 0.19 | 0.49 | 2.05 | 242 | 81 | 4816 |
| 1.55 | 0.19 | 0.49 | 2.06 | 229 | 77 | 5042 |
| 2.09 | 0.45 | 0.47 | 2.18 | 1572 | 538 | 9254 |
| 1.55 | 0.21 | 0.49 | 2.06 | 276 | 92 | 4984 |
| 2.09 | 0.47 | 0.47 | 2.18 | 1647 | 563 | 9230 |
| 1.59 | 0.21 | 0.49 | 2.07 | 290 | 97 | 5325 |
| 2.20 | 0.59 | 0.46 | 2.20 | 2336 | 801 | 9990 |
| 1.56 | 0.24 | 0.49 | 2.06 | 361 | 121 | 5048 |
| 1.55 | 0.25 | 0.49 | 2.06 | 414 | 139 | 4972 |
| 1.53 | 0.24 | 0.49 | 2.05 | 365 | 123 | 4853 |
| 2.28 | 0.54 | 0.47 | 2.22 | 2069 | 705 | 11132 |

ANALISI DELLE VARIANZE (Rettilineo - Curvilineo)

| Profondità | Vp | | Vs | | QUALITA' DEL DATO ONDE DI TAGLIO | | |
|------------|---------|-------------|---------|-------------|----------------------------------|-------|------|
| | ΔVp (%) | ΔVp (m/sec) | ΔVs (%) | ΔVs (m/sec) | C-24% | C-24% | C-2% |
| 0.68 | -2.54 | 2.95 | -3.09 | -3.09 | | | ✓ |
| 9.09 | -36.16 | 0.12 | -0.21 | -0.21 | | | ✓ |
| 0.77 | -8.04 | 0.01 | -0.01 | -0.01 | | | ✓ |
| 0.02 | -0.25 | 0.03 | -0.05 | -0.05 | | | ✓ |
| 0.06 | -0.81 | 0.02 | -0.03 | -0.03 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.06 | 0.01 | -0.02 | -0.02 | | | ✓ |
| 0.01 | -0.14 | 0.18 | -0.27 | -0.27 | | | ✓ |
| 0.01 | -0.19 | 0.07 | -0.13 | -0.13 | | | ✓ |
| 0.01 | -0.13 | 0.02 | -0.03 | -0.03 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.03 | 0.01 | -0.02 | -0.02 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.08 | 0.01 | -0.02 | -0.02 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.04 | 0.02 | -0.05 | -0.05 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.01 | 0.09 | -0.19 | -0.19 | | | ✓ |
| 0.00 | 0.00 | 0.08 | -0.15 | -0.15 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.02 | 0.04 | -0.07 | -0.07 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | ✓ |
| 0.00 | -0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | | | ✓ |
| 0.58 | -9.04 | 9.38 | -16.37 | -16.37 | | | ✓ |
| 0.05 | -1.04 | 1.14 | -5.27 | -5.27 | | | ✓ |
| 0.10 | -2.24 | 2.11 | -13.76 | -13.76 | | | ✓ |
| 0.14 | -2.69 | 0.01 | -0.02 | -0.02 | | | ✓ |
| 0.001 | -0.010 | 0.002 | -0.004 | -0.004 | | | ✓ |
| 0.004 | -0.060 | 0.001 | -0.002 | -0.002 | | | ✓ |
| 0.174 | -2.625 | 0.003 | -0.006 | -0.006 | | | ✓ |
| 0.362 | -6.522 | 22.130 | -38.545 | -38.545 | | | ✓ |
| 0.086 | -1.996 | 0.843 | -5.699 | -5.699 | | | ✓ |
| 0.003 | -0.071 | 0.074 | -0.370 | -0.370 | | | ✓ |
| 0.352 | -7.376 | 1.403 | -6.586 | -6.586 | | | ✓ |
| 0.164 | -2.492 | 0.047 | -0.100 | -0.100 | | | ✓ |
| 0.543 | -8.980 | 12.129 | -23.112 | -23.112 | | | ✓ |
| 0.114 | -2.548 | 0.194 | -1.087 | -1.087 | | | ✓ |
| 0.038 | -0.768 | 0.020 | -0.105 | -0.105 | | | ✓ |
| 0.020 | -0.441 | 0.023 | -0.128 | -0.128 | | | ✓ |
| 0.008 | -0.180 | 0.065 | -0.384 | -0.384 | | | ✓ |
| 0.007 | -0.161 | 0.423 | -2.202 | -2.202 | | | ✓ |
| 0.051 | -1.195 | 0.000 | -0.002 | -0.002 | | | ✓ |
| 0.263 | -5.452 | 1.723 | -11.541 | -11.541 | </ | | |

| | |
|-------------------|---|
| COMMITTENTE | REGIONE EMILIA ROMAGNA - SERVIZIO GEOLOGICO |
| CROSS HOLE | S1 - S2 |
| Località | VISERBA (Rn) |
| Data acquisizione | 17 novembre 2010 |
| Commessa | 996/2010 |



Log CROSS HOLE S1 - S2