

Centralina per piezocono sismico, analisi vibrazionali e sismica di superficie

Nicola Tisato (a) – Giovanni Bruzzo (b)

(a) Tecno Penta s.a.s. - via G. Galilei, 7 A/2 - TEOLO (PD) - Italy – www.tecnopenta.com

(b) UNINGEO s.n.c. – via Marconi, 52 – 35122 PADOVA - Italy – www.UNINGEO.it

An instrument for seismic piezocone, vibration analysis and refraction seismology.

Nicola Tisato (a) – Giovanni Bruzzo (b)

(c) Tecno Penta s.a.s. - via G. Galilei, 7 A/2 - TEOLO (PD) - Italy – www.tecnopenta.com

(d) UNINGEO s.n.c. – via Marconi, 52 – 35122 PADOVA - Italy – www.UNINGEO.it

Abstract

Tecno Penta s.a.s., in collaboration with UNINGEO s.n.c., has been testing for some years, with good results, a seismic waves velocity measurement system. Such a method uses a seismic electric piezocone SCPTU which is a standard electric piezocone equipped with three geofones kept orthogonal among them.

The method consists on measuring seismic waves' delay from earth surface to SCPTU. Seismic waves are generated on earth surface.

The technological development of this method and the increasing demand of V_{S30} value have brought Tecno Penta to design a portable instrument for this purpose and to study the problems linked with the sensors used. The instrument realized is already used for V_{S30} measuring with SCPTU, in vibration monitoring according to UNI9916 standard and can be used in refraction seismology. The realization includes software and sensors development used in both applications.

Keywords: V_{S30} , SCPTU, UNI9916, Vibration, Electric piezocone

Riassunto

Da alcuni anni Tecno Penta s.a.s. in collaborazione con UNINGEO s.n.c. sta sperimentando, con buoni risultati, un sistema di misura della velocità delle onde sismiche nel sottosuolo. La tecnica si propone, attraverso l'utilizzo di un piezocono elettrico, nel quale sono inseriti tre geofoni ortogonali tra loro (SCPTU), la misura del tempo di arrivo alla SCPTU di un onda sismica generata in superficie.

Lo sviluppo di tale tecnologia e la richiesta sempre maggiore di stime del valore di V_{S30} ha portato Tecno Penta a progettare uno strumento portatile per tale scopo e a studiare le problematiche dei sensori impiegati. Lo strumento realizzato viene già utilizzato per misure di V_{S30} con punta SCPTU, in monitoraggio di vibrazioni secondo la normativa UNI9916 e potrà essere utilizzato anche per piccoli stendimenti di sismica di superficie. La realizzazione ha altresì richiesto lo sviluppo del software e dei sensori adatti ai vari scopi.

Parole chiave: V_{S30} , SCPTU, UNI9916, Vibrazioni, Piezocono elettrico

Introduzione

Tecno Penta s.a.s. è una piccola azienda di Teolo in provincia di Padova che si occupa di progettazione, sviluppo e produzione di strumenti per la geologia. L'organizzazione tecnico-commerciale è composta da sette persone. Dal 2003 Tecno Penta collabora con UNINGEO s.n.c. per lo sviluppo di una punta elettrica sismica (SCPTU) visto il crescente interesse per la stima del parametro V_{S30} , fondamentale per la microzonazione sismica, O.D.P.C.M. n.3274, 2003.

Nello stesso periodo il governo italiano ha emanato l'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri nr.3274 (G.U. del 08/05/2003) che assieme, alla nota esplicativa redatta dal Dipartimento della Protezione Civile – Ufficio Servizio Sismico e alla successiva ordinanza nr. 3431 (G.U. del 10/05/2005), hanno tracciato le linee guida alla classificazione territoriale in zone di pericolosità sismica.

Ad oggi sono state emanate dal Ministero delle infrastrutture e dei trasporti le Norme tecniche per le costruzioni (G.U. nr. 222 del 23/09/2005) che è il nuovo testo e la nuova legge di riferimento per l'ingegneria civile.

Tutte queste norme comunque nascono dalla necessità di dare una risposta rapida ed integrata alle esigenze poste dal rischio sismico, DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE, UFFICIO SERVIZIO SISMICO, 2003.

Analizzando l'elenco dei comuni del triveneto (grafico 1) e la relativa classe sismica imposta dalle varie leggi che si sono susseguite negli ultimi vent'anni si nota che sempre più comuni sono stati inseriti in classi ad alto rischio (classe 1 e classe 2). Ad ogni classe viene attribuito un valore rappresentativo del parametro a_g ossia l'accelerazione orizzontale massima sul suolo di tipo A , O.D.P.C.M. n.3274, 2003, (Tabella 1).

A fronte di questa suddivisione del territorio si rende necessaria una zonazione dettagliata e precisa anche perchè alcuni terreni sono più sensibili allo scuotimento. Soprattutto “quando strati densi poggiano su strati meno densi e soffici o a causa di disturbi improvvisi che provocano la fluidificazione di sabbie poco assestate o argille tissotropiche”, RICCI LUCCHI F., ????

D'altra parte anche l'O.D.P.C.M. n.3274 riporta una suddivisione dei terreni in sette categorie (A, B, C, D, F, S1, S2) ordinati dal meno sensibile al più sensibile , O.D.P.C.M. n.3274, 2003.

Metodologia

Per caratterizzare il sottosuolo esistono diverse metodologie, alcune innovative e in fase di sperimentazione come il metodo Re.Mi., VERONESE L. & GARBARI T., 2004, oppure i metodi MaSW o SaSW che utilizzano le onde di Rayleigh e Love, CHOON B. PARK & RICHARD D. MILLER & JIANGHAI XIA, 1994, oppure ancora, i metodi classici di sismica di superficie o downhole. Quasi tutti questi metodi sono implementati in software commerciali per l'interpretazione dei dati.

Tecno Penta sta invece sperimentando da alcuni anni, con buoni risultati, una tecnica simile al downhole. Lo spunto è stato ricavato dall'esperienza del Prof. R. G. Campanella, CAMPANELLA R.G. & STEWART W.P., 1992, LUNNE T. & ROBERTSON P. K. & POWELL J. J. M., 1997.

In pratica in una punta elettrica o *Cone Penetration Test with Pore Pressure* (CPTU) vengono inseriti tre geofoni o tre accelerometri (sensori) montati parallelamente alle tre direzioni spaziali. In questo modo si ottiene una *Seismic Cone Penetration Test and Pore Pressure* (SCPTU). La punta viene spinta nel terreno con un penetrometro da 20 tonnellate. In discesa vengono eseguite le misure geotecniche: resistenza alla punta, resistenza laterale e pressione interstiziale e durante la fase di risalita ci si ferma ogni metro e si energizza il suolo con una martellata su una piastra metallica per mezzo di una mazza da 7-10 kg di peso.

I tre sensori sono collegati, attraverso il cavo della punta, agli ingressi analogici di un sismografo, mentre la piastra e la mazza rispettivamente al polo negativo e positivo del trigger dello stesso sismografo.

Le piastre sono tre e montate su una trave tenuta a contatto con il suolo da un martinetto idraulico di cui è dotato il penetrometro. La prima e la seconda sono montate alle estremità verticali della trave

mentre l'ultima sopra. Energizzando le piastre alle estremità si generano onde S in controfase mentre energizzando quella montata sopra onde P.

In questo modo si riesce a misurare il tempo di percorrenza delle onde S e P dalla superficie alla profondità a cui si trova la punta.

Tale metodologia può essere applicata solo in terreni sciolti sabbiosi e/o argillosi cioè in terreni in cui sia possibile eseguire una prova penetrometrica.

Rispetto alle indicazioni del Prof. R. G. Campanella che utilizza sei geofoni, (due gruppi distanziati di un metro circa), Tecno Penta ha deciso di utilizzare un singolo gruppo di geofoni. La tecnica del doppio gruppo di geofoni viene utilizzata per ovviare al problema del 'triggeraggio' cioè del ritardo di intervento del circuito di start rendendo non ripetibile la misura. Con tale accorgimento si ottiene infatti una misura differenziale, ma vi è bisogno anche di una frequenza di campionamento molto più elevata, adatta a misurare differenze di cammino di un metro su terreni che possono arrivare a velocità di 800 – 900 m/s. Le nostre prossime sperimentazioni saranno volte a verificare se utilizzando un solo gruppo di geofoni e un sistema di 'triggeraggio' estremamente veloce e preciso, si ottenga comunque un buon risultato. In figura 1 sono riportate 5 tracce raccolte alla stessa profondità una di seguito all'altra. Da tale figura si deduce una buona ripetibilità della misura ma questa affermazione necessita di ulteriori prove ed analisi.

Correzione geometrica e calcolo della V_{s30}

Se l'energizzazione non viene effettuata sulla verticale della perforazione è necessario apportare una correzione ai dati. L'onda infatti percorre un tratto di terreno più lungo rispetto alla verticale pura, quindi, applicando il teorema di Pitagora si ottiene la 1 dove t_m è il tempo misurato, S è la profondità della punta, D la distanza dalla verticale e t_i il valore di tempo corretto.

$$1) \quad t_i = t_m \cdot \frac{S}{\sqrt{S^2 + D^2}}$$

Tutti i tempi di arrivo possono essere inseriti in un foglio di calcolo applicando automaticamente la formula correttiva e ricalcolando le velocità di percorrenza dei singoli *step*. Infine applicando la 2 si ricava il valore V_{s30} dove h_i è lo spessore dello strato *i*esimo e V_i è la velocità misurata nello strato *i*esimo, O.D.P.C.M. N.3274, 2003. Con questa metodologia non è necessario eseguire nessuna interpretazione sul dato per ricavare il parametro V_{s30}

$$2) \quad V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_i}}$$

La descrizione dettagliata della metodologia è comunque riportata in: BRUZZO G. & BASSATO G. & ROILO F., 2003.

Strumentazione

E' necessario disporre di un sismografo con velocità di acquisizione di almeno 15 kHz pari a 0.067 ms e di un *trigger* estremamente preciso. Tecno Penta sta mettendo a punto un sismografo adatto a questa tecnica, al monitoraggio di vibrazioni secondo la UNI9916 e che può essere usato anche per la sismica di superficie. L'attrezzatura dispone di 16 canali con conversione a 12 bit, schermo a 15 pollici con risoluzione 1024x768 a 256 colori, una porta COM, una porta USB, una porta LAN 10/100. Possono essere installati due programmi di acquisizione: Eolo adatto all'acquisizione della sismica di campagna, downhole o SCPTU ed EoloVBR per l'acquisizione di vibrazioni su strutture. Inoltre è possibile installare qualsiasi altro programma compatibile con Windows 98 ad esempio per la gestione ed elaborazione delle prove penetrometriche.

Sensori

Tecno Penta sta sperimentando sia geofoni che accelerometri per la misura di onde sismiche e vibrazioni al fine di valutare approfonditamente pregi e difetti dei due tipi di trasduttori.

Geofono:

E' il classico sensore di misura delle vibrazioni. Esistono geofoni orizzontali per la misura di onde S e geofoni verticali per la misura di onde P; sono costruttivamente diversi. Fondamentalmente si tratta di un magnete montato su molle all'interno di un solenoide. La vibrazione meccanica induce un movimento oscillatorio al magnete e, secondo la 3 (legge di Faraday), MAZZOLDI P. & NIGRO M. & C. VOCI, 2001, questo genera una forza elettromotrice f.e.m. u proporzionale alla velocità e all'ampiezza di vibrazione. La 3 indica in pratica che ogni qual volta il flusso del campo magnetico ϕ (B) concatenato con un circuito (solenoidi) varia nel tempo si ha nel circuito una f.e.m. indotta data dall'opposto della derivata del flusso rispetto al tempo, MAZZOLDI P. & NIGRO M. & C. VOCI, 2001.

$$3) \quad u = - \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$4) \quad M(dB) = 20 \cdot \text{Log}_{10} \frac{Out}{In}$$

La funzione di trasferimento.

La funzione di trasferimento FdT o $G(s)$, di un sistema LTI (Lineari Tempo Invarianti) cioè sistemi che non variano i loro parametri fisici con il tempo è definita dal rapporto tra la trasformata di Laplace della risposta (Uscita), $Y(s)=L[y(t)]$, e la trasformata di Laplace del segnale d'ingresso, $U(s)=L[u(t)]$, BIONDO G. & SACCHI E., 1987. E' una funzione complessa di variabile complessa e nelle formule qui riportate j indica l'operatore complesso. Numericamente la FdT, per un qualsiasi dispositivo, è il rapporto tra l'uscita e l'ingresso nel dominio della frequenza espresso in decibel (dB); si veda la 4 dove M è la magnitudo, Out il segnale in uscita e In il segnale di ingresso. La FdT di un geofono esprime quindi il rapporto tra la tensione in uscita dai morsetti e la vibrazione in ingresso nel dominio della frequenza. Indica cioè se al variare della frequenza il geofono attenua o amplifica o lascia invariato il movimento in ingresso. La FdT tipica di un geofono e ha un andamento come quello riportato in figura 2. Come si può osservare il geofono attenua il segnale per frequenze di ingresso minori della sua frequenza naturale, ciò è dovuto dalla sovrapposizione di effetti delle due funzioni di trasferimento delle parti che costituiscono il geofono, la 5 rappresenta la FdT della massa su molle, la 6 quella del solenoide e la 7 quella del geofono completo.

$$5) \quad G(s) = \frac{1}{s^2 + 2s\zeta\omega_n + \omega_n^2}$$

$$6) \quad G(s) = -s^2$$

$$7) \quad G(s) = \frac{-s^2}{s^2 + 2s\zeta\omega_n + \omega_n^2}$$

Nelle 5, 6, 7 s indica la pulsazione ($j\omega$), ω_n la pulsazione naturale del geofono che può essere ricavata dalla 9 dove k è la costante elastica della molla ed m la massa del magnete, infine ζ indica lo smorzamento che modifica significativamente la forma della FdT, (figura 2). Nel geofono è possibile variare lo smorzamento variando il valore della resistenza collegata in parallelo all'uscita del geofono stesso. Nella 8 f indica la frequenza in Hertz alla quale si calcola il valore della FdT.

$$8) \quad s = j2\pi \cdot f$$

$$9) \quad \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$10) \quad \omega_n = 2\pi \cdot f_n$$

In verità la pulsazione naturale del geofono è ricavabile secondo la 10 dalla sua frequenza naturale f_n che è un dato di targa del sensore. Oltre all'attenuazione la FdT esprime anche uno sfasamento del segnale in ingresso, che si ricava dal rapporto tra la parte reale e la parte immaginaria del valore della FdT stessa ad una data frequenza (figura 3).

In pratica il geofono distorce la vibrazione in ingresso se questa ha una frequenza inferiore alla sua frequenza naturale, GRECCHI M., 1987, cioè la sensibilità del geofono non è costante nel dominio della frequenza. La sensibilità esprime il rapporto tra la velocità della vibrazione e la tensione prodotta dal sensore si esprime solitamente in V/m/s.

Tecno Penta ha sviluppato un equalizzatore che rettifica la FdT del geofono tra 2 e 300 Hz rendendo così costante la sensibilità del geofono in questo campo (figura 4). Tale circuito va posto tra geofono e sismografo, permette di utilizzare i geofoni per il monitoraggio di vibrazioni su costruzioni generate ad esempio da attività antropica. Abbiamo inoltre prodotto un geofono 3D equalizzato da parete o pavimento con banda 2-300 Hz dimensioni 150x150x80 mm (figura 5).

Accelerometro:

L'accelerometro a differenza del geofono possiede una funzione di trasferimento costante in tutta la banda di interesse (0-300 Hz) cioè in questo range la sua sensibilità è costante. La funzione di trasferimento è data dalla 5 in quanto l'accelerometro non utilizza una bobina per generare una f.e.m. ma bensì utilizza altri metodi modulando una tensione fornita esternamente. Solitamente gli accelerometri sfruttano le proprietà piezoelettriche dei materiali con cui sono costruiti. Nella FdT finale non viene quindi introdotta la 6 che porta ad una FdT tipo "filtro passa alto" (figura 2) ma lascia una FdT tipo "filtro passa basso" (figura 8). In questo modo si ottiene anche un altro vantaggio: è possibile impiegare masse molto piccole perchè (formula 9) più piccola è la massa più alta è la frequenza naturale del sistema massa-molla e quindi più a destra si sposterà il ginocchio di figura 8, aumentando così la banda di risposta e diminuendo gli ingombri.

Ad oggi esistono numerosi accelerometri ospitati in *package* elettronici standard anche SMD, questi dispositivi sono chiamati *MEMS*, sono estremamente piccoli e hanno dimensioni dell'ordine dei millimetri.

L'accelerometro emette un segnale elettrico, solitamente una tensione, proporzionale all'accelerazione della vibrazione applicata. Se tale sensore è impiegato in monitoraggio di vibrazioni, fedeli ad esempio alla normativa UNI9916, UNI ENTE NAZIONALE DI UNIFICAZIONE. COMMISSIONE "VIBRAZIONI", 2004, è necessario procedere con l'integrazione del segnale per ottenere la velocità di vibrazione. Tale operazione può essere svolta sia via *hardware* sia via *software*.

Tecno Penta ha messo a punto un'accelerometro 3D (figura 6) per affissione a pavimento o a muro di dimensioni 100x100x60 mm (figura 8) dotato di integratore *hardware* e basato sull'integrato ST® LIS3L02AS4; adatto quindi all'utilizzo in accordo con normative che richiedano la misura di velocità.

La figura 7 riporta una prova di fedeltà dell'integratore *hardware*, tale apparecchio necessita ancora di prove e tarature che ne stimino gli errori di misura.

Misure di vibrazioni metodologia

Normativa UNI9916:

La normativa UNI9916 traccia le linee guida per il monitoraggio di vibrazioni su strutture e fornisce nozioni tecniche sulle vibrazioni, sui sensori e sui sistemi di acquisizione, riporta inoltre una serie di tabelle di soglie. Queste tabelle indicano la massima ampiezza in velocità (mm/s) a cui una data struttura può essere sottoposta in un determinato campo di frequenza e di tipo di stress (tabella 2).

Acquisizione:

L'acquisizione della vibrazione avviene attraverso un sismografo su cui sia possibile installare il software EoloVBR, ad esempio quello messo a punto da Tecno Penta, e uno o più sensori con risposta in frequenza possibilmente tra 1-2 e 300 Hz. Sono necessari quindi geofoni equalizzati o accelerometri.

L'acquisizione del segnale con il software EoloVBR sviluppato da Tecno Penta avviene al superamento di una soglia nel caso di monitoraggio in continuo oppure alla chiusura di un contatto manuale o automatico.

Se si sceglie un'acquisizione per superamento di soglia è necessario stabilire dei limiti in base al metodo prescelto.

Sono disponibili due differenti metodi di confronto tra soglia e segnale:

Il primo metodo chiamato calcolo di M non è fedele alla UNI9916 ed è la radice ennesima della media dei valori assoluti dei singoli campioni elevati alla n di un intervallo significativo del segnale campionato. Nella formula 11 M indica la media calcolata, m il numero di campioni, n la potenza ennesima e d_i il valore del campione i -esimo.

$$11) \quad M = \frac{1}{m} \cdot \sqrt[n]{\sum_{i=1..m} |d_i|^n}$$

Se tale media supera il valore di soglia impostato, comune per tutta la banda di frequenza, inizia l'acquisizione e il salvataggio su file di testo delle tracce raccolte. L'elevamento a potenza serve a dare più o meno enfasi ai picchi di segnale.

Il secondo metodo, fedele alla UNI9916, consiste nel confronto tra una soglia, variabile nel dominio della frequenza, e la trasformata di Fourier calcolata come Fast Fourier Transform (FFT) di un intervallo significativo del segnale campionato. Il superamento della soglia può avvenire sia per un picco di segnale misurato come *Peak Particle Component Velocity (P.C.P.V.)* cioè lungo una delle tre direzioni spaziali X , Y o Z che come *Peak Particle Velocity (P.P.V.)* cioè come sommatoria vettoriale delle tre componenti lungo le tre direzioni spaziali.

Se anche un solo picco dello spettro della FFT supera la soglia in qualsiasi punto della banda di frequenza inizia l'acquisizione e il salvataggio su file di testo delle tracce.

Utilizzando quest'ultima tecnica è necessario disporre di un geofono o di un accelerometro tridimensionale,

Conclusioni

Tecno Penta nell'ultimo periodo si è dedicata alla ricerca e allo sviluppo di soluzioni per la misura di onde sismiche e vibrazioni in generale.

In particolar modo ha sviluppato un sismografo a 16 canali adatto all'utilizzo con piezocono sismico SCPTU, per analisi di vibrazioni su strutture e per sismica di campagna. Ad oggi l'unico campo non ancora esplorato con questo sismografo è la sismica di campagna, ma, a tempo debito, Tecno Penta conta di testare tale strumento anche per queste metodologie.

Sono stati sviluppati inoltre due nuovi sensori per misure di vibrazione; un geofono 3D equalizzato e un accelerometro 3D con uscita in velocità.

Ringraziamenti

Ringraziamo per il supporto tecnico i titolari e collaboratori di Tecno Penta s.a.s., il Prof. Vittorio Iliceto per la disponibilità dimostrata e i preziosi consigli.

Si ringrazia inoltre la Dr.sa Fabiana Zandonai.

Elenco Bibliografico

BRUZZO G. & BASSATO G. & ROILO F., 2003 – Prova penetrometrica statica con piezocono sismico: esecuzione ed elaborazione dati di una prova effettuata alla bocca di porto di Lido – Canale S.Nicolò – Venezia. ????.

CAMPANELLA R.G. & STEWART W.P., 1992 – Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29 No. 3, pagg. 477-486.

CHOON B. PARK & RICHARD D. MILLER & JIANGHAI XIA, 1994 - Multichannel analysis of surface waves. *GEOPHYSICS*, VOL. 64, No. 3 (Maggio-Giugno 1999); Pagg 800–808, 7 figg.

DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE, UFFICIO SERVIZIO SISMICO, 2003 - Nota esplicativa dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, recante “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica” (G.U. n. 105 del 8/5/2003).

GRECCHI M., 1987 – Geoelettronica. *Ghedini Editore Milano*.

LUNNE T. & ROBERTSON P. K. & POWELL J. J. M., 1997 – Cone Penetration Testing. *Blackie academic e professional, London*.

MAZZOLDI P. & NIGRO M. & C. VOCI, 2001 – Elementi di fisica elettromagnetismo. *Edises*.
BIONDO G. & SACCHI E., 1987 - Manuale di elettronica e telecomunicazioni. *HOEPLI*.

ORDINANZA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI N. 3274 DEL 20 MARZO 2003, 2003 - “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica”. (G.U. n. 105 del 8/5/2003).

RICCI LUCCHI F., ??? - Sedimentografia – *Zanichelli*.

VERONESE L. & GARBARI T., 2004 – Esperienze di misura Vs30 con la tecnica refraction microtremor (ReMi). *Provincia di Udine Convegno. La geofisica e la nuova normativa sismica*.

UNI ENTE NAZIONALE DI UNIFICAZIONE. COMMISSIONE “VIBRAZIONI”, 2004 - UNI9916:2004 Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici. *UNI Milano*.

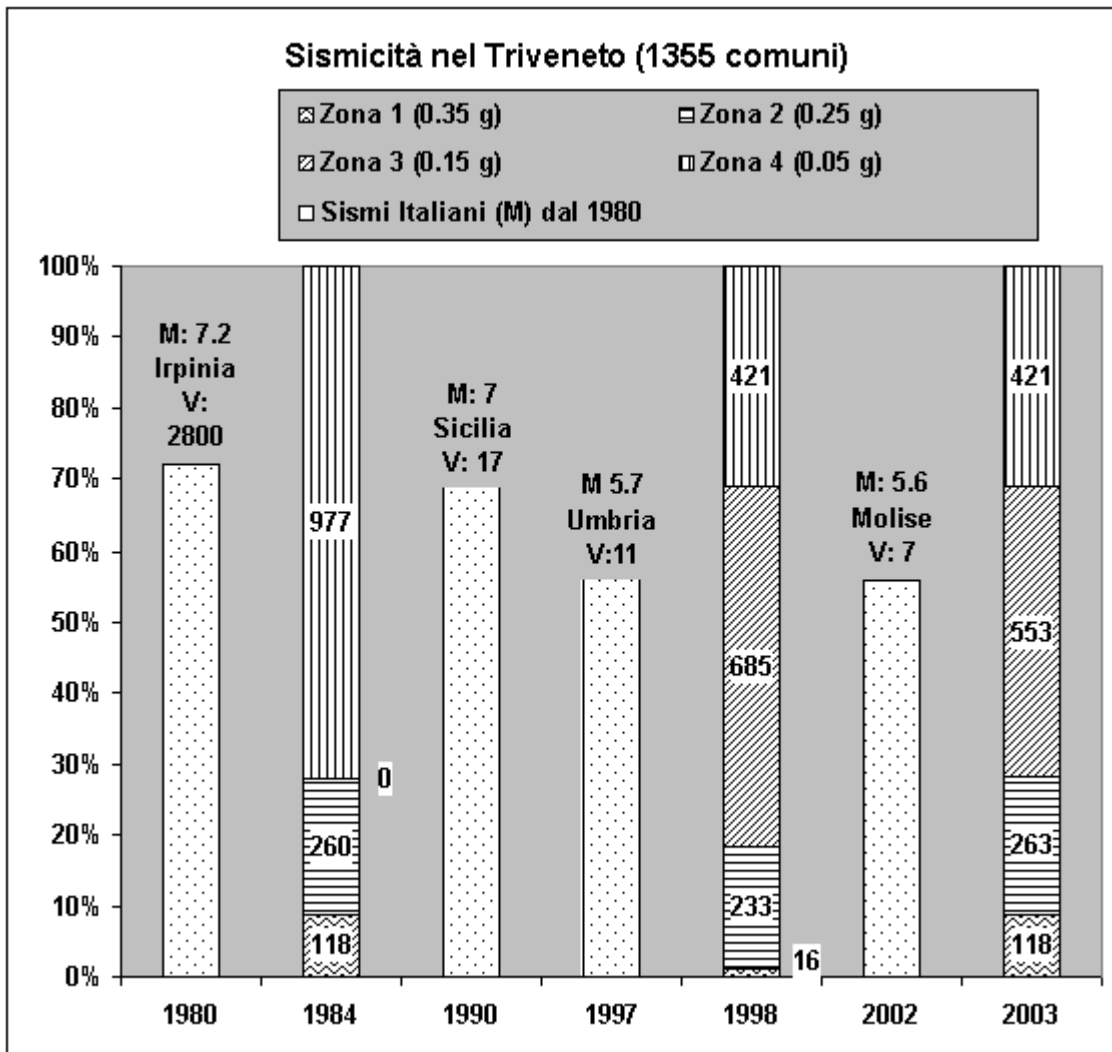


Grafico 1. Zonazione sismica del triveneto. Le colonne multiserie indicano la suddivisione del territorio in classi di pericolosità in base ai decreti. Le colonne puntinate riportano invece i maggiori sismi italiani dal 1984, M indica la magnitudo nella scala R

Zona	Valore di a_g
1	0,35g
2	0,25g
3	0,15g
4	0,05g

Tabella 1. Valori di riferimento di a_g e relative zone sismiche, O.D.P.C.M. N.3274, 2003.

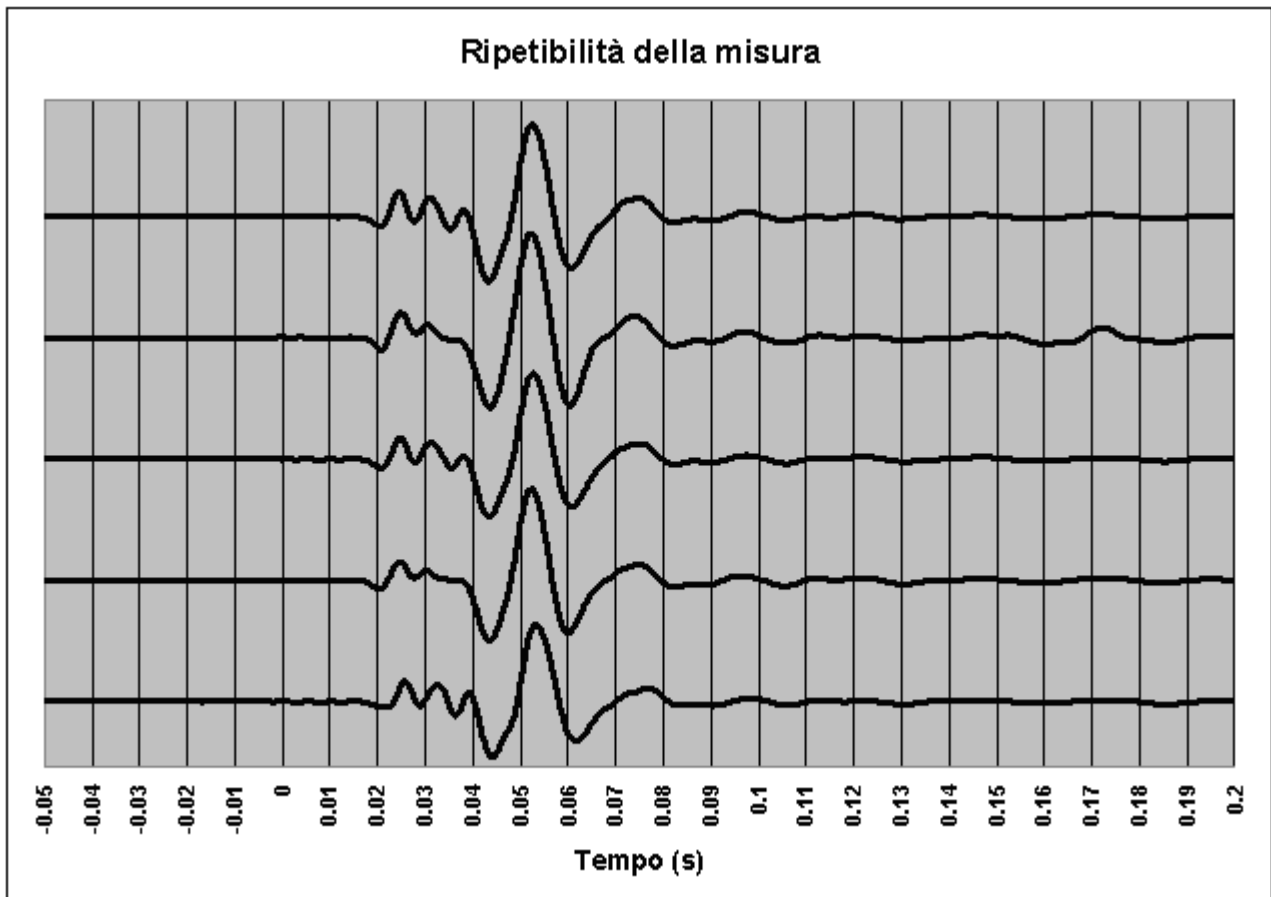


Figura 1. Cinque prove alla medesima profondità che mostrano una buona ripetibilità nella misura. Il pitching può essere posizionato a 20 ms per 4 misure mentre per la quinta a 22-23 ms.

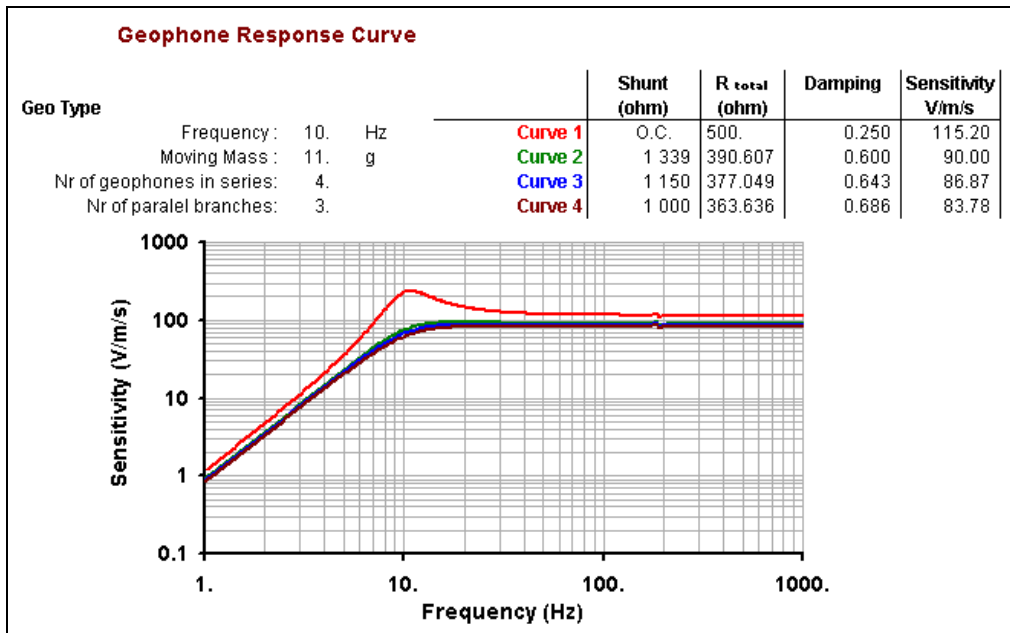


Figura 2. Esempio di FdT di un geofono. Modulo.

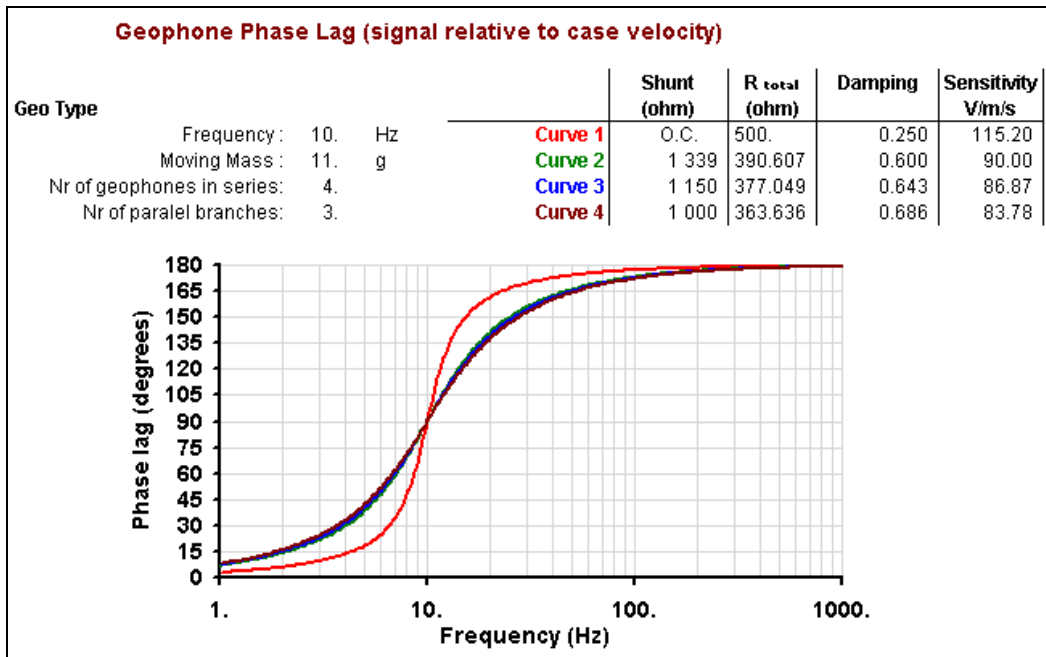


Figura 3. Esempio di FdT di un geofono. Sfasamento tra ingresso e uscita.

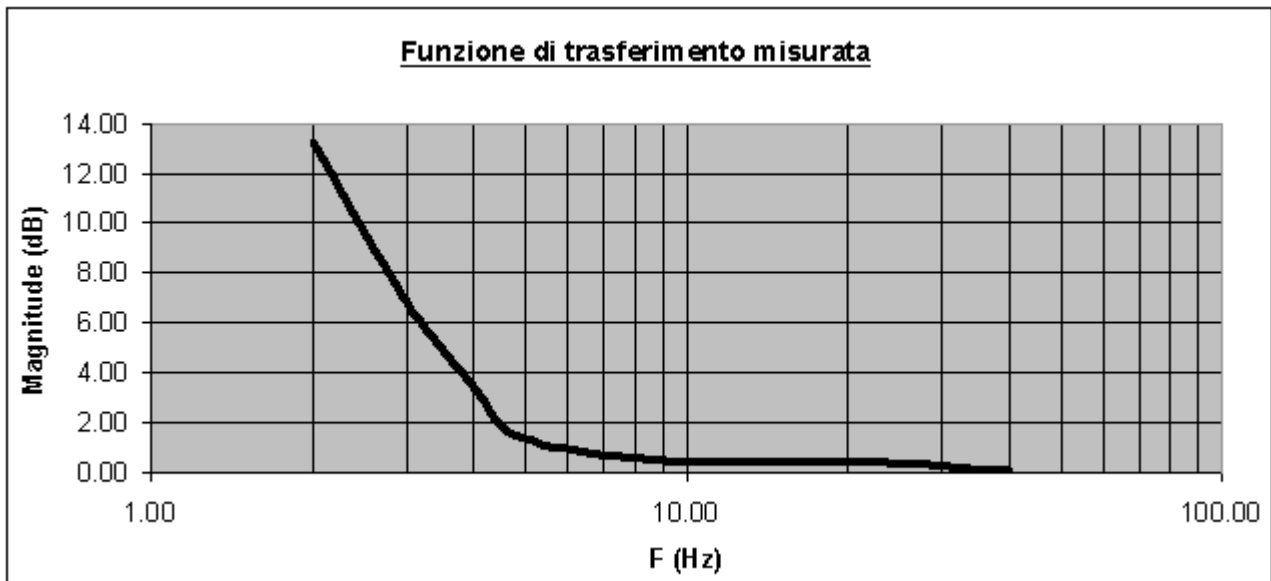


Figura 4. FdT misurata sperimentalmente di un equalizzatore per geofono DTCC 20-DX 4.5 Hz e smorzamento 0.7 realizzato da Tecnopenta.

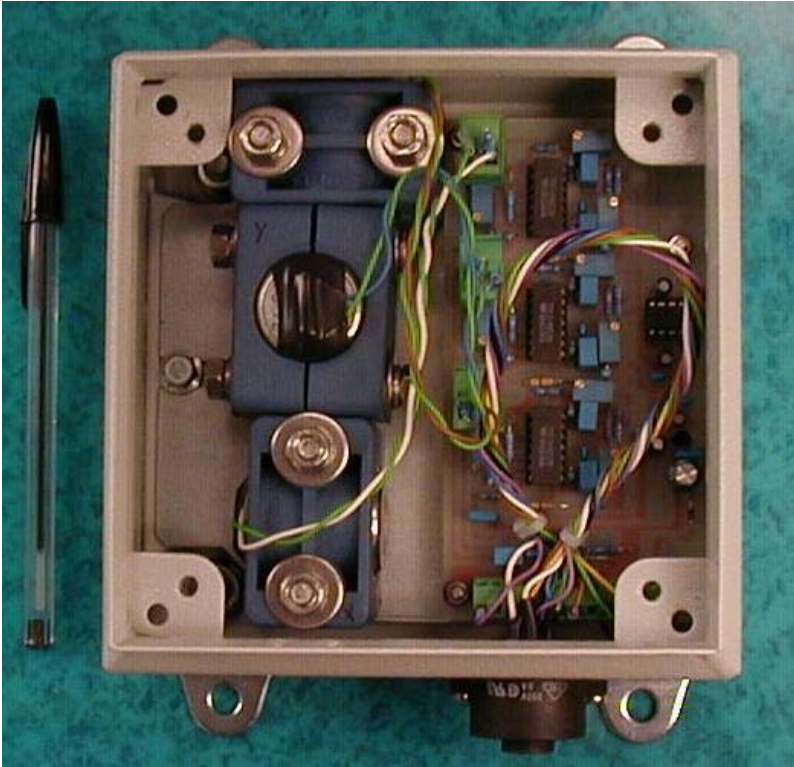


Figura 5. Geofono 3D Equalizzato prodotto da Tecnopenta banda di frequenza 2-300Hz alimentazione 12V consumo 10mA.

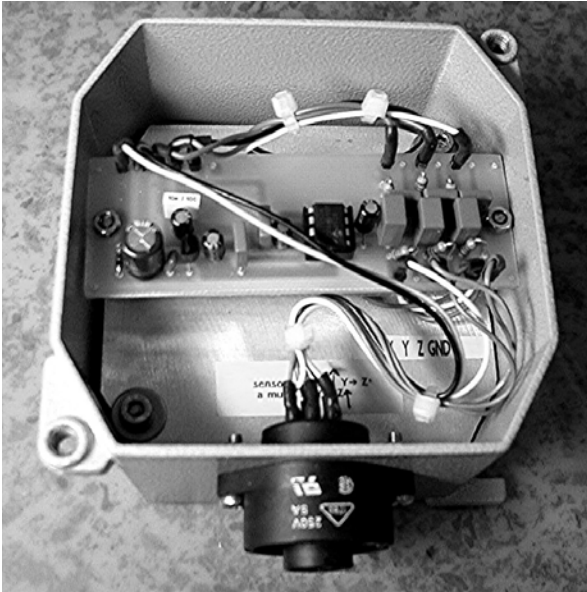


Figura 6. Accelerometro 3D integrato prodotto da Tecnopenta banda di frequenza 2-300Hz alimentazione 12V.

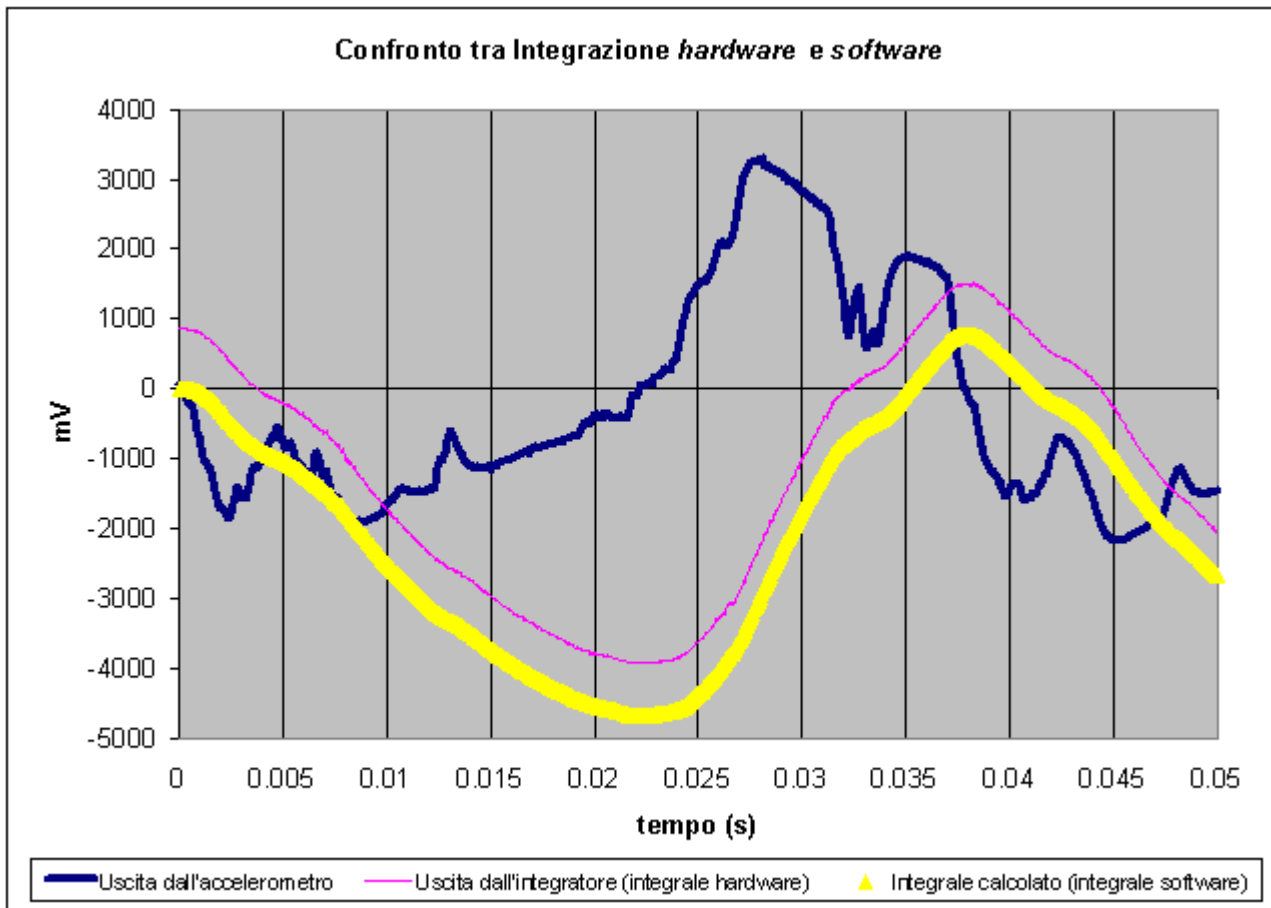


Figura 7. Confronto tra i due metodi di integrazione hardware e software. L'integrale hardware è stato *shiftato* di 1000 punti verso l'alto per evitare la sovrapposizione tra le due curve.

Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v in mm/s			
		Fondazioni			Piano alto
		Da 1 Hz fino a 10 Hz	Da 10 Hz fino a 50 Hz	Da 50 Hz fino a 100 Hz ¹⁾	Per tutte le frequenze
1	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili	20	Varia linearmente da 20 ($f=10$ Hz) fino a 40 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 40 ($f=50$ Hz) fino a 50 ($f=100$ Hz)	40
2	Edifici residenziali e costruzioni simili	5	Varia linearmente da 5 ($f=10$ Hz) fino a 15 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 15 ($f=50$ Hz) fino a 20 ($f=100$ Hz)	15
3	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	3	Varia linearmente da 3 ($f=10$ Hz) fino a 8 ($f=50$ Hz)	Varia linearmente da 8 ($f=50$ Hz) fino a 10 ($f=100$ Hz)	8

Tabella 2. Esempio di tabella di soglie nella normativa UNI9916.