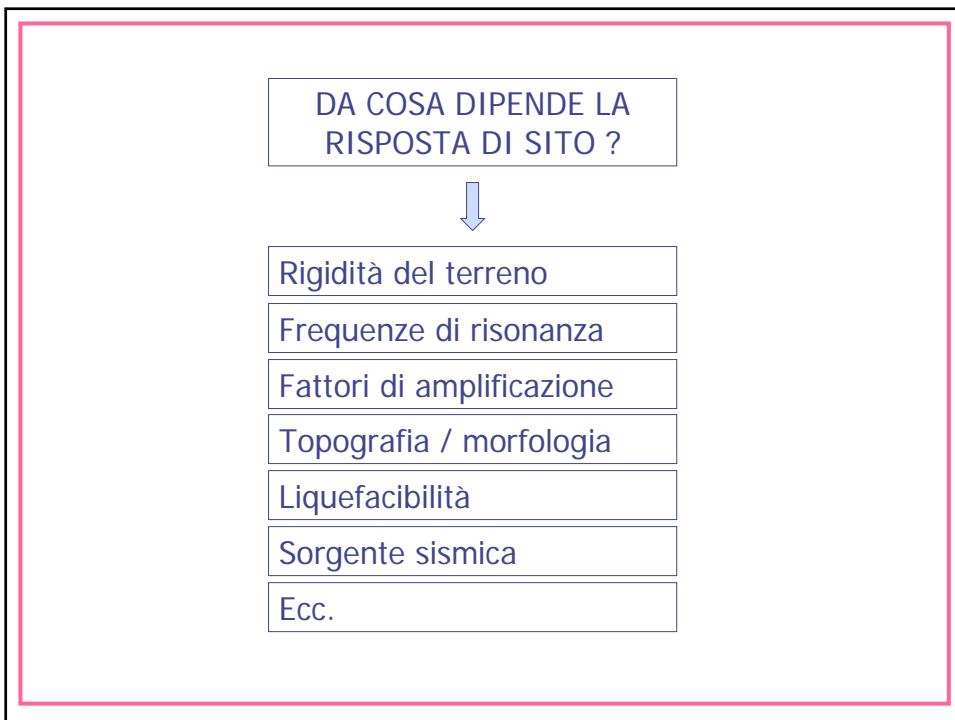


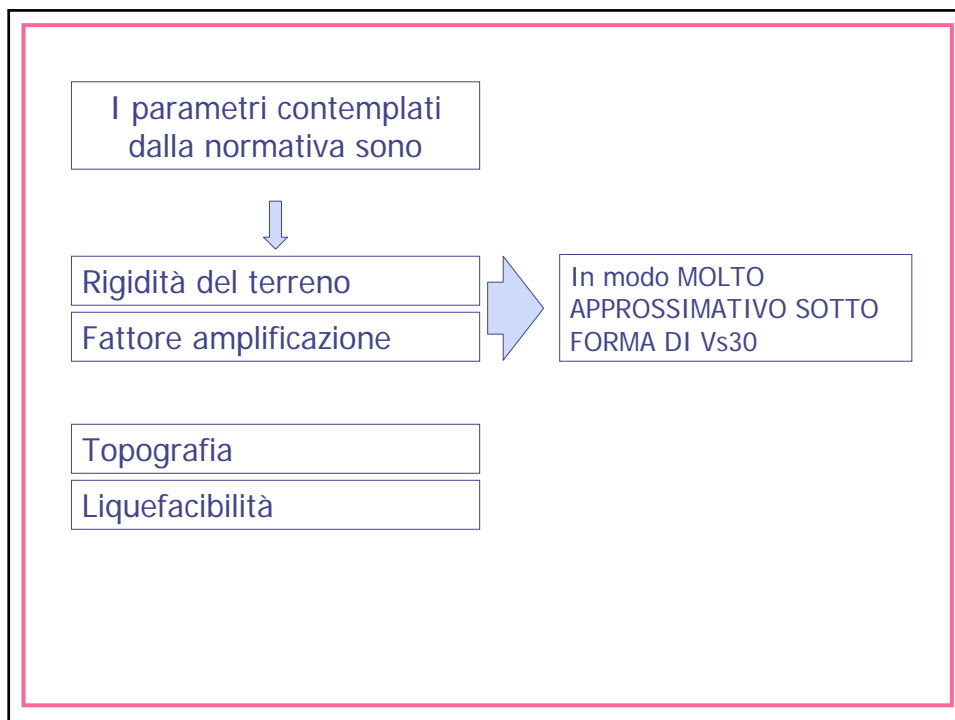


L'uso dei microtremori per la valutazione della risposta di sito

Geol. Silvia Castellaro
silvia.castellaro@unibo.it

MONITORAGGIO DINAMICO PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA DI PONTI
Udine, 18 aprile 2008



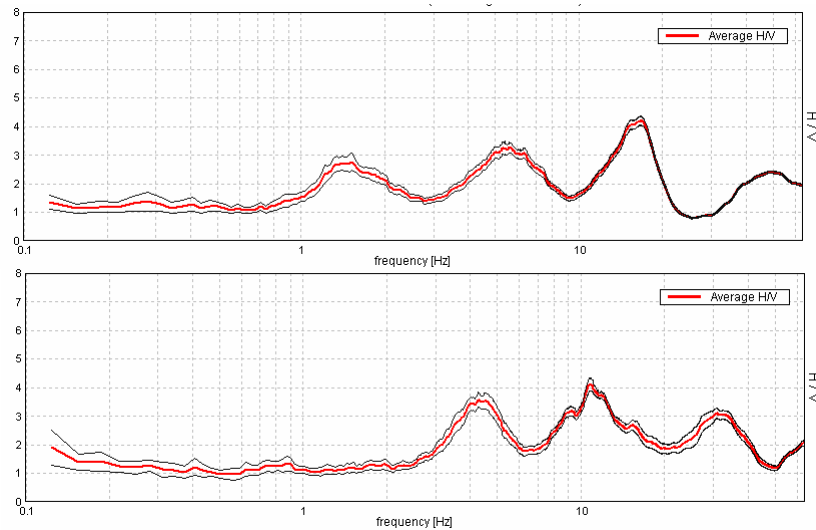


Mentre quello che conta ai fini dello sviluppo di un'amplificazione sismica locale sono, *come minimo*, i parametri seguenti:

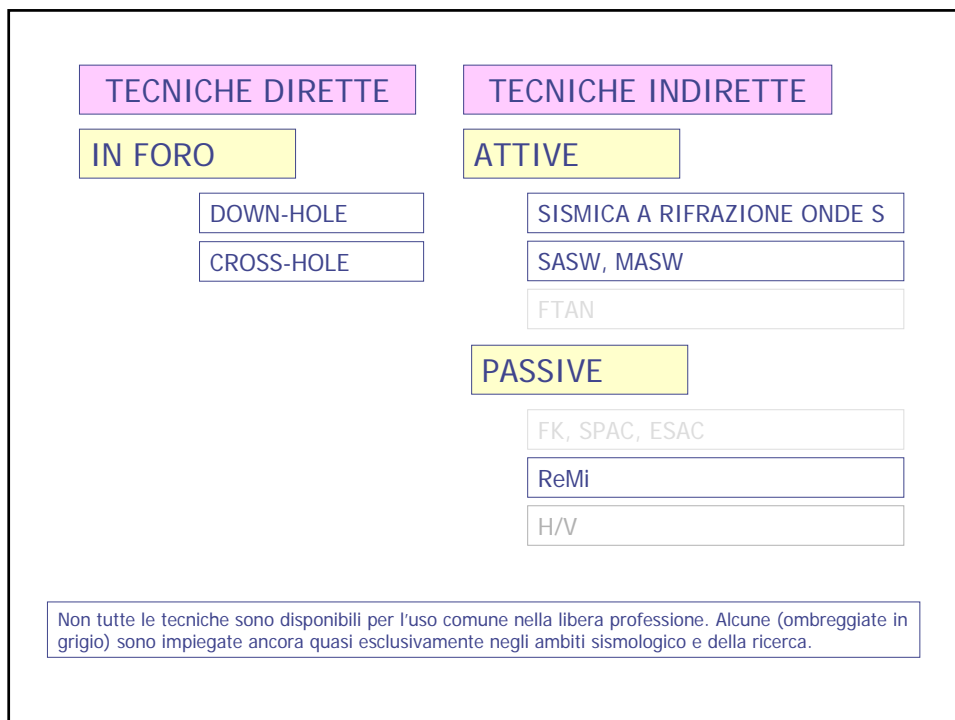
Profilo di Vs	+
profondità dei contrasti di impedenza	=
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>	
frequenze di risonanza	

Oltre al resto...

In molti terreni si sviluppano **più** risonanze nel campo di frequenze di interesse ingegneristico.



Come si misura allora Vs30 (per soddisfare la normativa), frequenze di risonanza, profili di Vs ecc.?



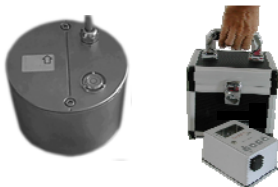
IL BELLO DELLA SISMICA PASSIVA E' CHE...

E' LEGGERA

E' VELOCE

- In funzione della profondità da raggiungere e della tecnica impiegata le misure possono richiedere da 10 minuti ad un'ora, inclusa la messa in posto degli strumenti

ESEMPI DI STRUMENTAZIONE PER STAZIONE SINGOLA o ARRAY A LARGA SCALA



ESEMPI DI STRUMENTAZIONE PER ARRAY A PICCOLA/MEDIA SCALA



IL BELLO DELLA SISMICA PASSIVA E' CHE...

SI PUO' APPLICARE OVUNQUE

- Ha bisogno di spazi molto ridotti rispetto alla sismica tradizionale,
- Non necessita di energizzazioni al di fuori del rumore sismico ambientale sempre presente,
- Permette di raggiungere grandi profondità, anche a scala crostale, senza bisogno di esplosioni o terremoti.

IL BRUTTO DELLA SISMICA PASSIVA E' CHE...

E' DI INTERPRETAZIONE
PIU' COMPLESSA

- Necessita di modelli molto più complicati (campo d'onde completo in sistemi multistrato non necessariamente 1D),
- Ci sono ancora molte questioni aperte a livello scientifico.
- Va fatta bene!

Mai utilizzare passivamente i software
ma comprendere a fondo le tecniche che si usano

STAZIONE SINGOLA

TECNICHE INDIRECTE

PASSIVE

H/V

E' una tecnica a stazione singola, si effettua cioè per mezzo di un singolo sismometro tricomponente a larga banda e alta sensibilità che viene posto sul terreno e campiona il rumore sismico per alcuni minuti.

Con strumenti opportuni è la tecnica di applicazione più rapida esistente.

TECNICHE INDIRECTE

PASSIVE

H/V

Queste tecniche nacquero nell'ambiente ingegneristico giapponese alla fine degli anni '70 e furono rese popolari alla fine degli anni '80 da Nakamura.

Si scoprì ben presto che il rapporto tra le componenti orizzontali (H) del moto del suolo e le componenti verticali (V), da cui H/V o HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio), mette in luce le

frequenze di risonanza di un terreno

TECNICHE INDIRECTE

PASSIVE

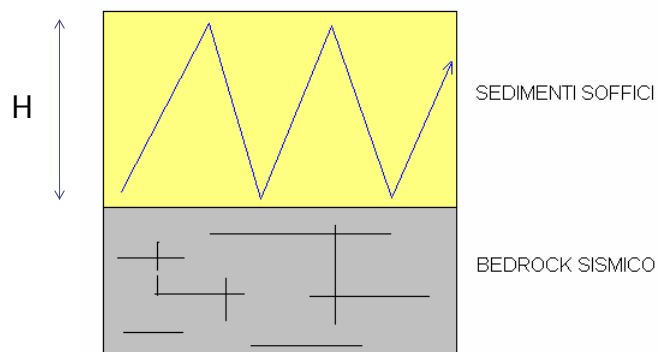
H/V

Da allora:

- la spiegazione della teoria alla base del fenomeno data dai primi autori è stata abbandonata
- a favore di teorie in cui sono le onde superficiali (Rayleigh e Love e in modo minore le onde di volume S) a giocare un ruolo fondamentale nel processo.

TECNICHE PASSIVE A STAZIONE SINGOLA

Si basano sul concetto di risonanza. La risonanza è dovuta all'intrappolamento delle onde tra due superfici in cui si verifica una variazione di impedenza acustica (ρV).



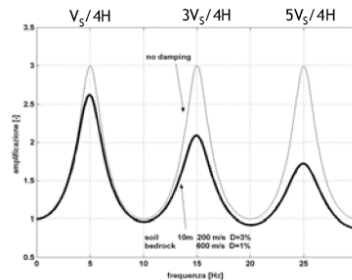
Frequenza naturale (o fondamentale). E' la frequenza a cui un sistema, eccitato da un impulso, vibra con maggior ampiezza. E' il reciproco del periodo fondamentale.

INTERPRETAZIONE SEMPLIFICATA DI TECNICHE PASSIVE A STAZIONE SINGOLA

- La frequenza fondamentale di risonanza f del sedimento dipende dallo spessore H del sedimento e dalla velocità media V delle onde nel sedimento.

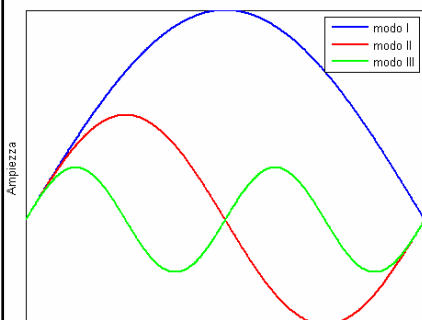
$$f = \frac{V}{4H}$$

SOLO NEI CASI
SEMPLICI DI SISTEMI
OMOGENEI-ISOTROPI
A 2 STRATI



- Conoscendo lo spessore H del sedimento è possibile avere informazioni sulla velocità media delle onde S .
- Alternativamente, conoscendo quest'ultima è possibile definire lo spessore H dello strato sedimentario.

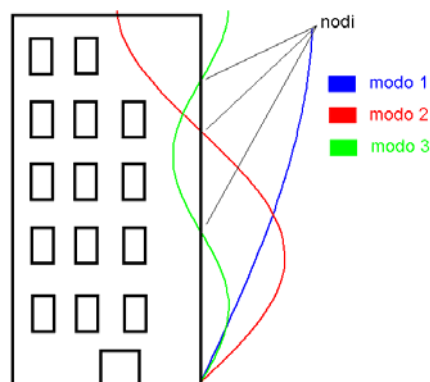
QUANTI SONO I MODI DI VIBRARE?

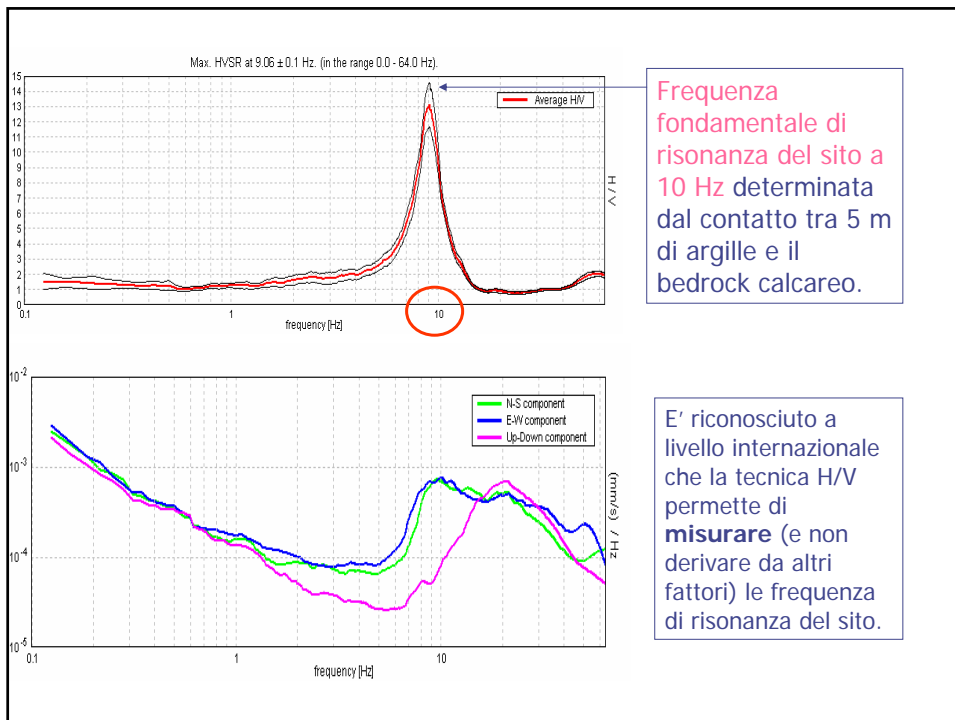


Esempio di corda vincolata alle estremità

Virtualmente infiniti ma nei sistemi reali si smorzano, all'aumentare della frequenza.

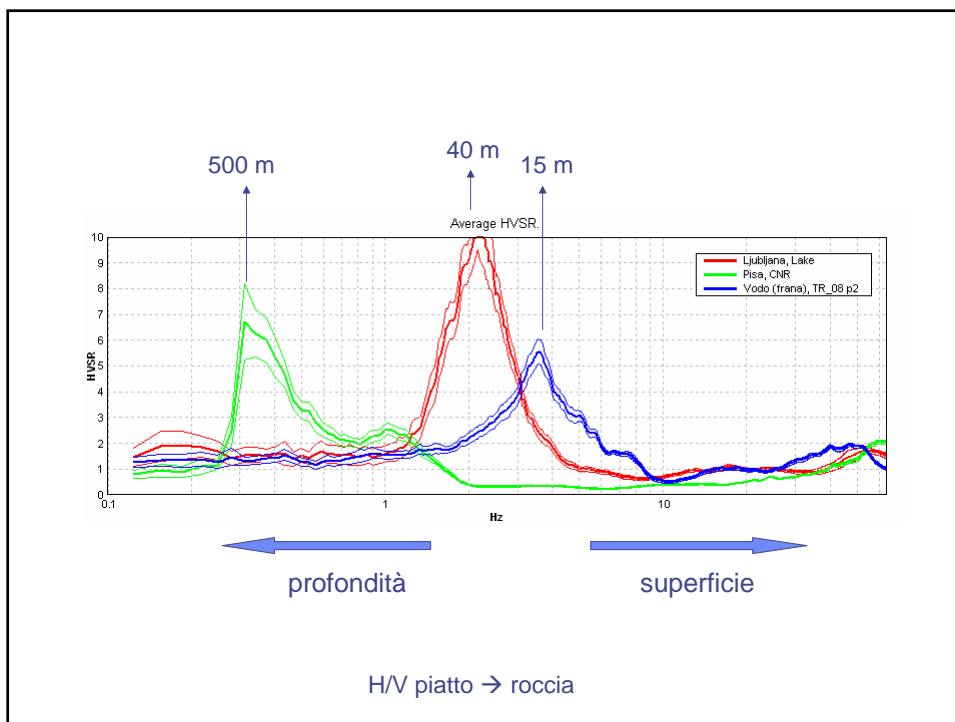
Esempio di edificio vincolato alla base





Frequenza fondamentale di risonanza del sito a 10 Hz determinata dal contatto tra 5 m di argille e il bedrock calcareo.

E' riconosciuto a livello internazionale che la tecnica H/V permette di **misurare** (e non derivare da altri fattori) le frequenza di risonanza del sito.

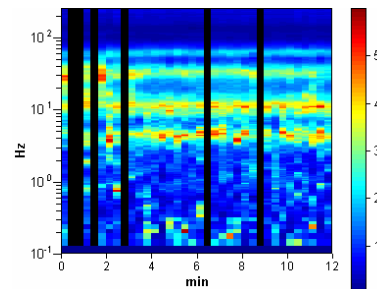
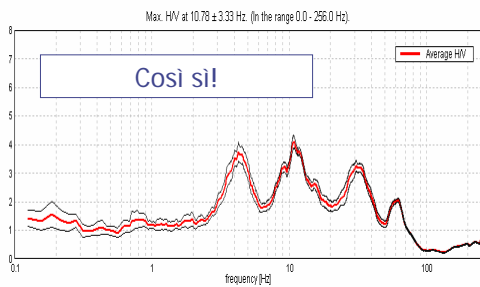
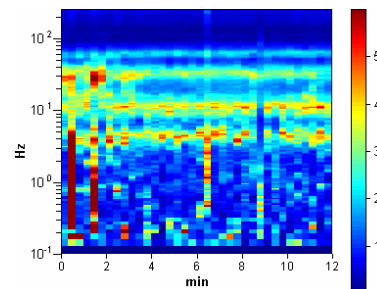
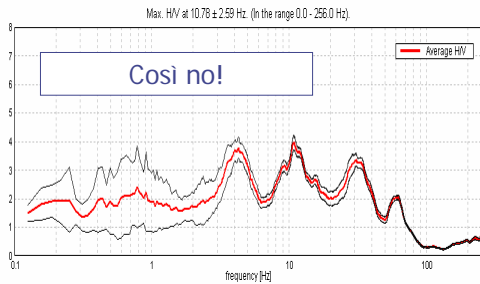


Necessita però di un numero di accortezze nelle procedure di esecuzione e di analisi (in parte elencate nelle linee guida del progetto europeo SESAME (2005) e in parte da altri autori) che rispettino questi e **altri** criteri!



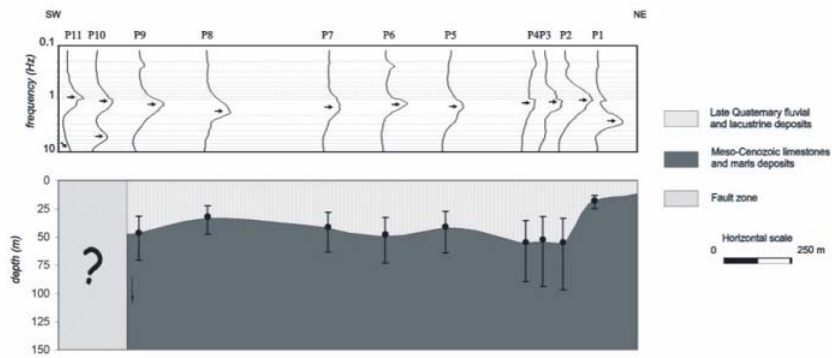
Max. HVSR at 9.06 ± 0.1 Hz. (in the range 0.0 - 64.0 Hz).			
Criteria for a reliable HVSR curve <small>[All 3 should be fulfilled]</small>			
$f_0 > 10 / L_{vj}$	9.06 > 0.33	OK	
$n_c(f_0) > 200$	6796.9 > 200	OK	
$\sigma_d(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_d(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 436 times	OK	
Criteria for a clear HVSR peak <small>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]</small>			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$	7.469 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$	10.594 Hz	OK	
$A_0 > 2$	13.12 > 2	OK	
$f_{peak}[A_{HV}(f) \pm \sigma_d(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.00524 < 0.05	OK	
$\sigma_f < \sigma(f_0)$	0.04747 < 0.45313	OK	
$\sigma_d(f_0) < \theta(f_0)$	0.6963 < 1.58	OK	

Implementazione criteri SESAME in *Grilla*[®]

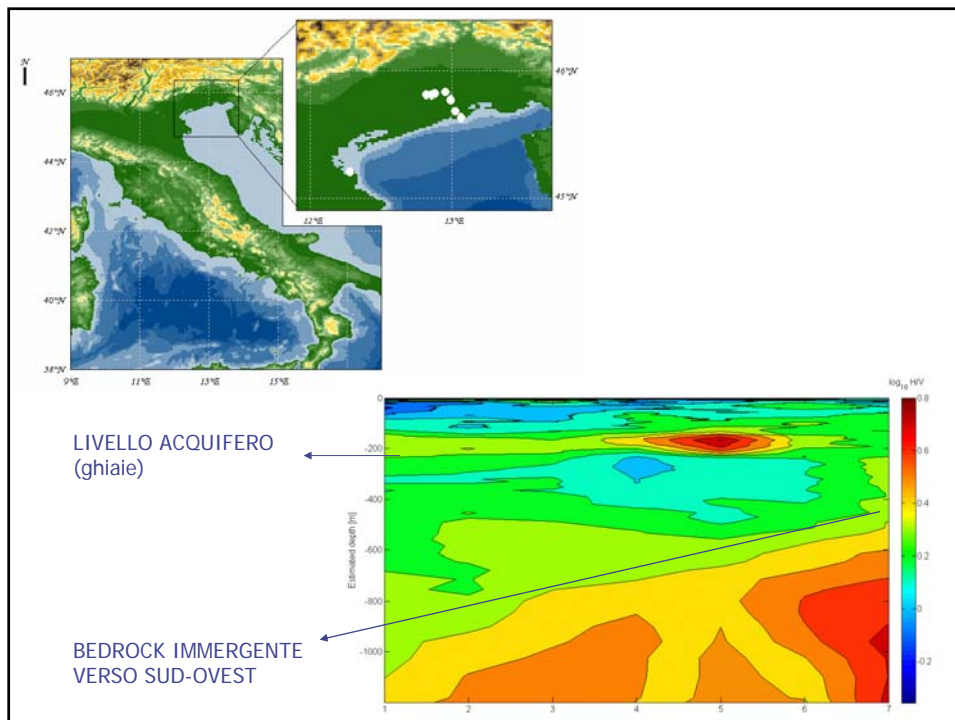


Prima applicazione stratigrafica della sismica passiva a stazione singola (1999)

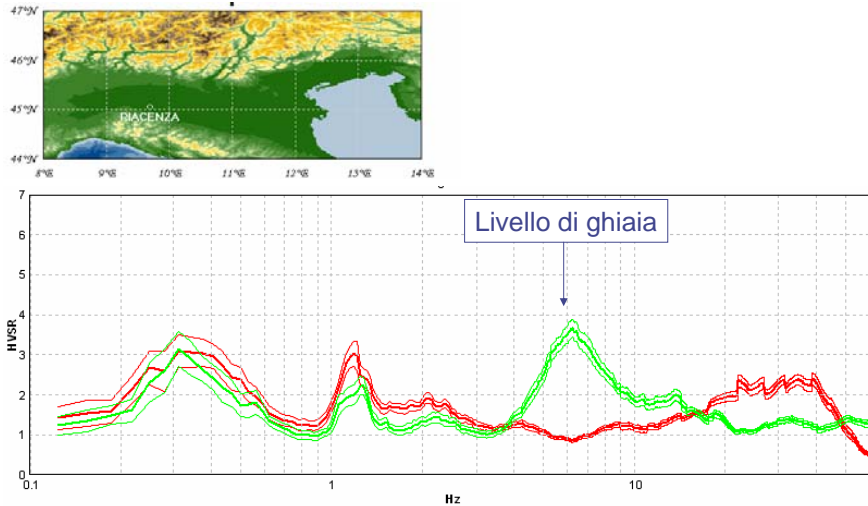
DETERMINAZIONE DELLA PROFONDITA' DI UN BEDROCK



[Ibs –von Seht e Wohlenberg (1999), BSSA, 89, 250-259]



DISCONTINUITA' STRATIGRAFICHE



Due siti a 50 m di distanza.
Registrazioni effettuate contemporaneamente (stesse sorgenti di tremore).

IN ARRAY

Con l'espressione "in array" intendiamo misure a stazione sismica
in posizione diversa effettuate contemporaneamente e sincronizzate.

**UNENDO PIU' MISURE A STAZIONE SINGOLA
SINCRONIZZATE E DISTANTI km SI POSSONO
OTTENERE IMMAGINI ANCHE A SCALA CROSTALE**

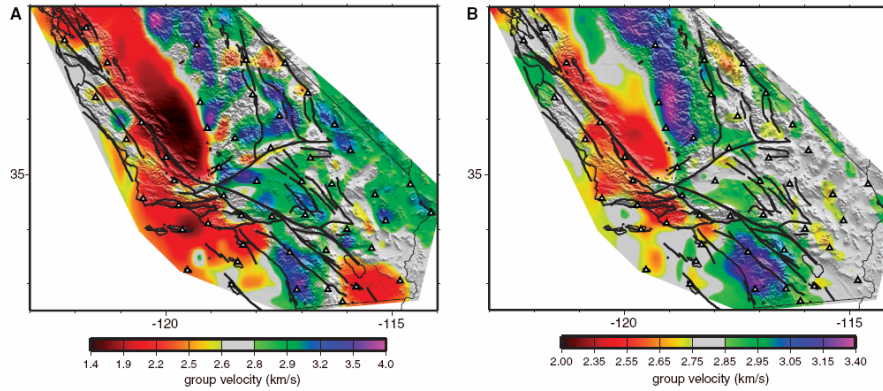


Fig. 2. Group-speed maps constructed by cross-correlating 30 days of ambient noise between USArray stations. (A) 7.5-s-period Rayleigh waves. (B) 15-s-period Rayleigh waves. Black solid lines show known active faults. White triangles show locations of USArray stations used in this study. Similar maps from a different single month of data are shown in the supporting online material.

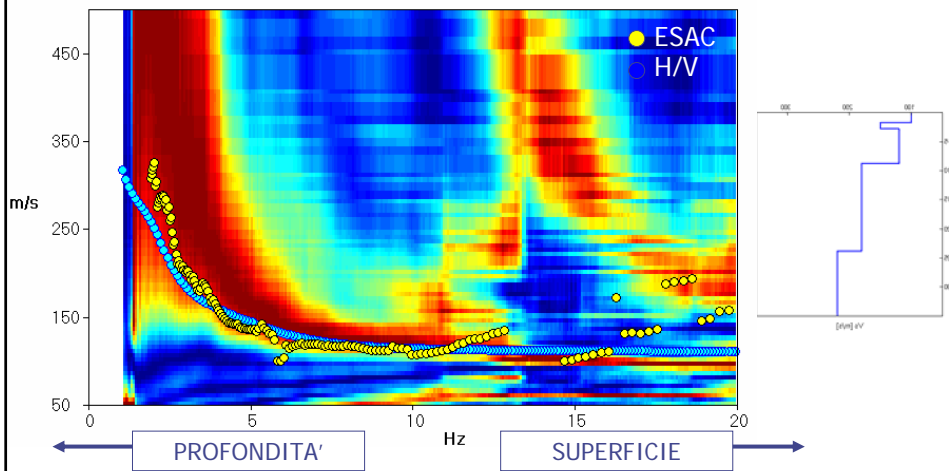
< 10 km

≈ 20 km

Science, 307, 1615 (2005)

**A SCALA MOLTO PIU' PICCOLA (100 m o meno) SI
OTTENGONO CURVE DI DISPERSIONE
DELLE ONDE DI SUPERFICIE**

CHE RACCONTANO COME VARIANO LE VELOCITA' DELLE ONDE DI SUPERFICIE IN PROFONDITA'



PROBLEMI DELLE TECNICHE IN ARRAY

- Riconoscimento dei MODI SUPERIORI (o simili)
- Assunzione di struttura 1D (no eterogeneità laterali)
- Limiti di leggibilità in bassa frequenza
- Velocità apparenti (per stendimenti passivi 1D)

TECNICHE A STAZIONE SINGOLA E IN ARRAY
POSSONO ESSERE USATE INSIEME

La relazione esistente tra $f_{\text{risonanza}}$, V_s e h consente,

1. quando sia nota la profondità di un orizzonte stratigrafico riconoscibile anche nella curva H/V,
2. e con un metodo di inversione opportuno

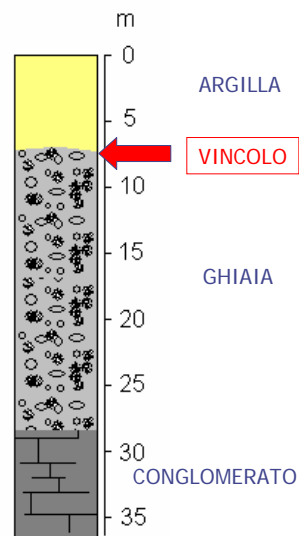
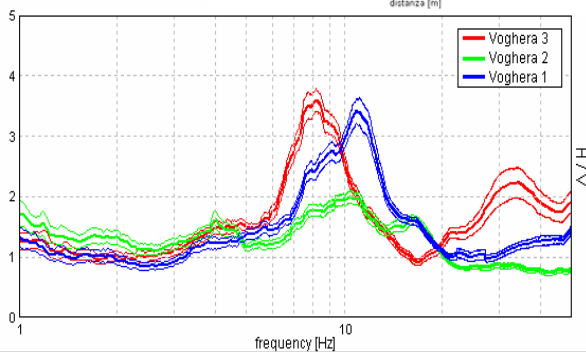
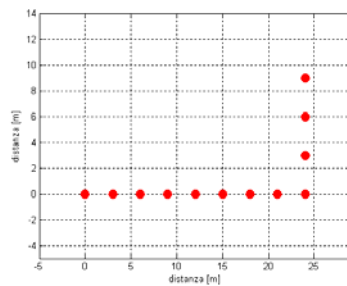
di stimare l'andamento delle V_s nel sottosuolo a partire da una curva H/V **VINCOLATA**.

N.B.: il vincolo è che si conosca la profondità di un orizzonte qualsiasi e si riconosca il rispettivo marker nella curva H/V.

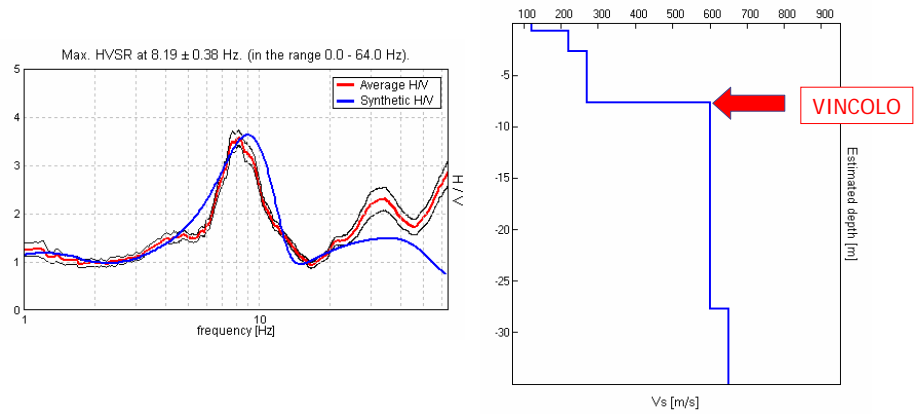
Senza questo vincolo l'inversione **non** ha senso ed esistono infinite soluzioni!

ESEMPIO 1

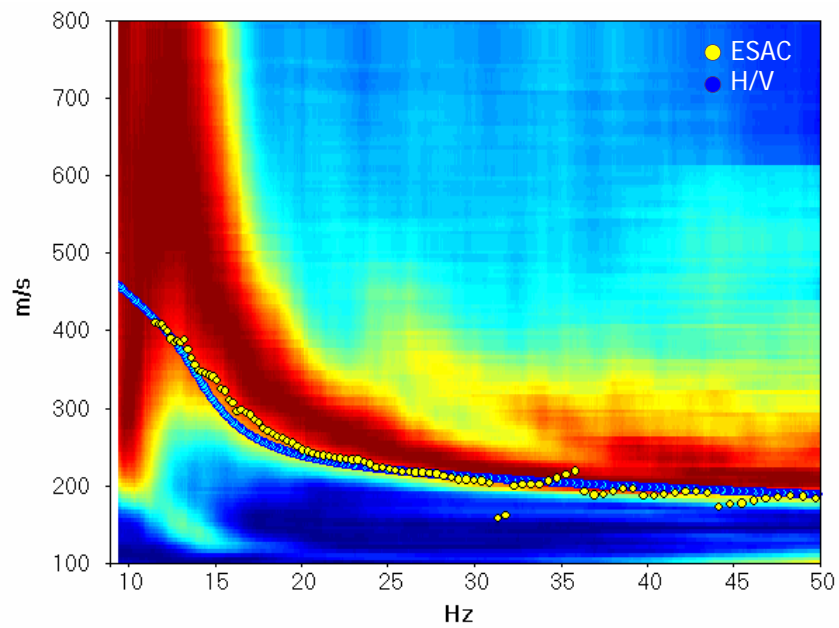
A distanza di meno di 25 m l'assetto stratigrafico superficiale non è assimilabile a modello 1D.

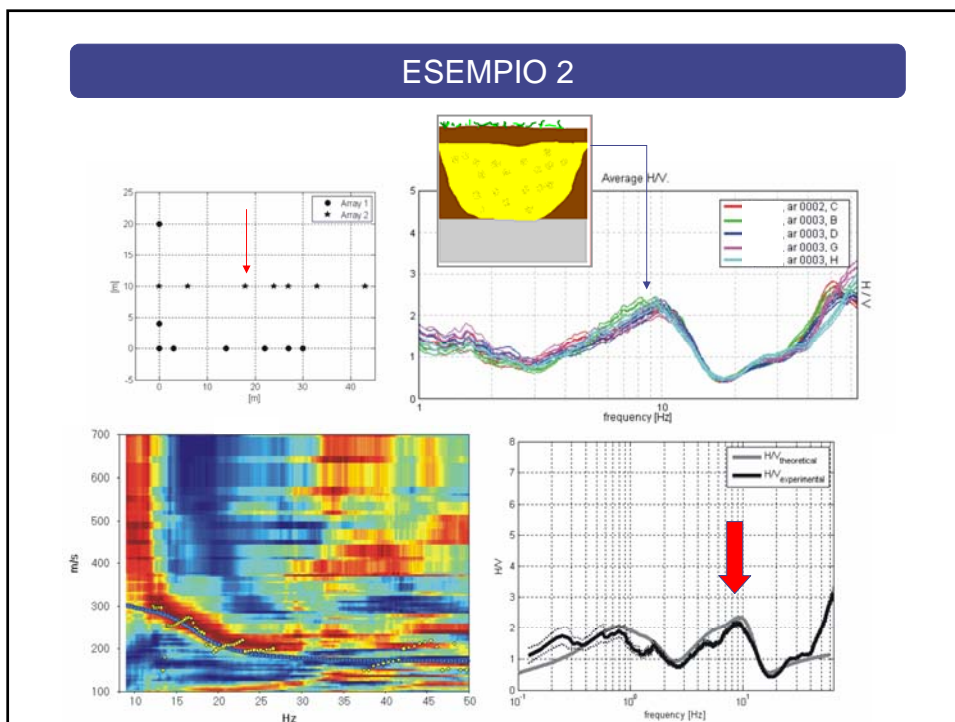
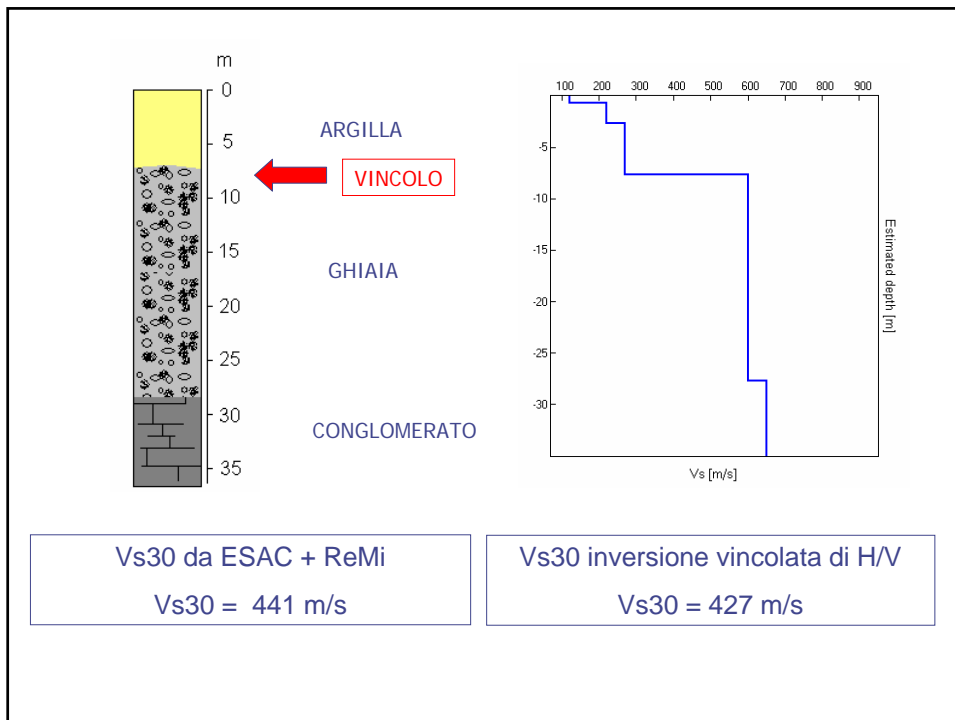


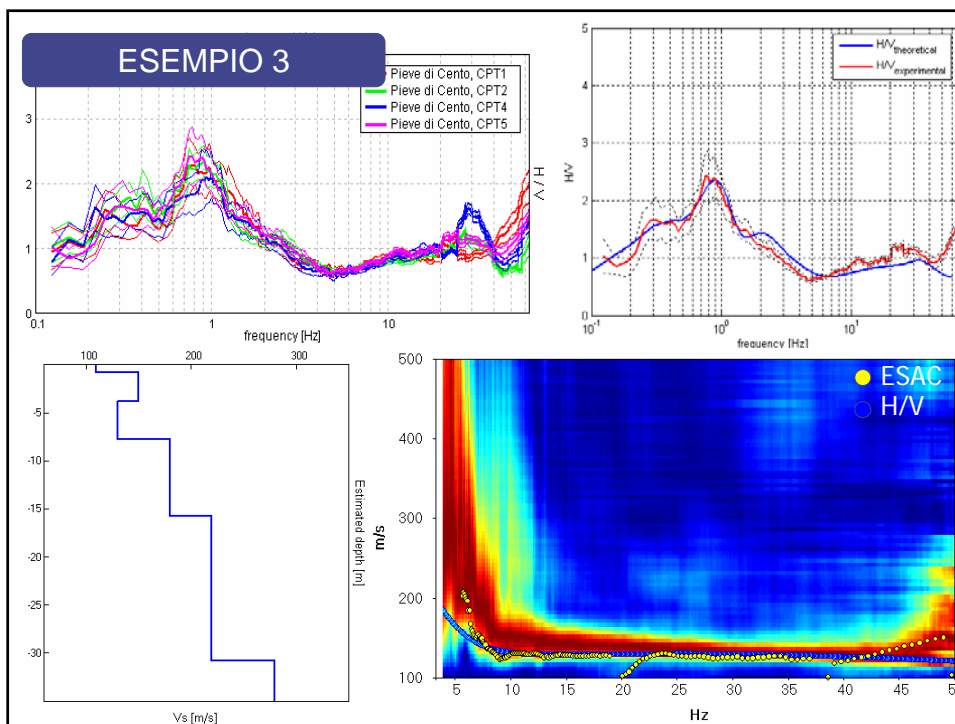
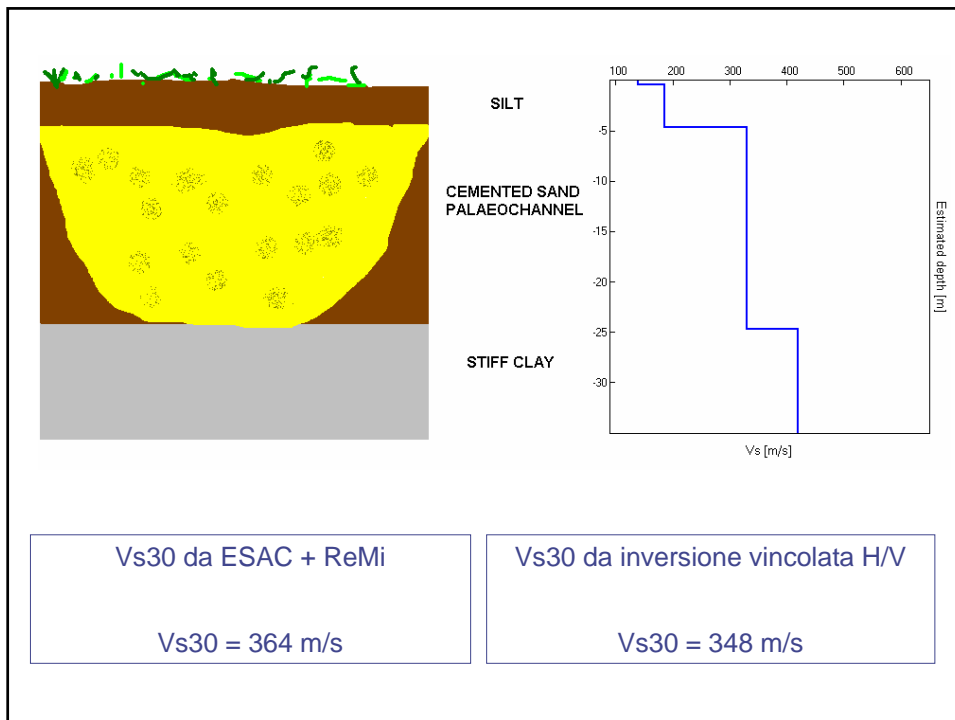
Inversione dell'H/V



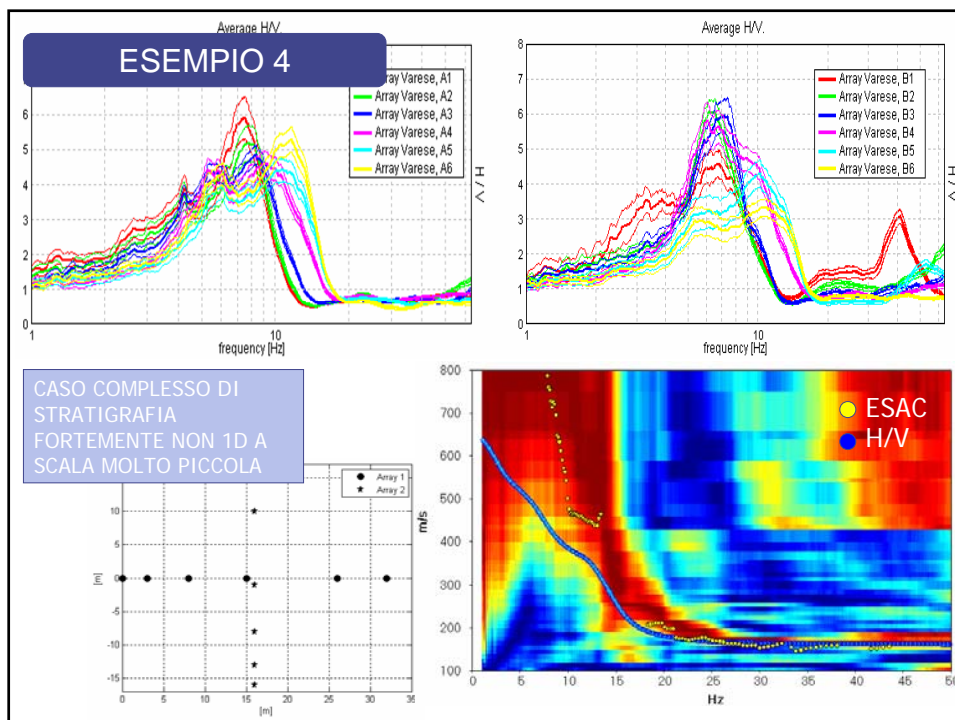
ESAC + ReMi + H/V sintetico







- ◆ La prospezione H/V in siti molto vicini (anche meno di 5 m e in aree di pianura) mostra che l'assetto stratigrafico **non** è piano, parallelo e dunque non trattabile, in via teorica, come 1D.
- ◆ Questo ha implicazioni importanti in modo particolare per le tecniche a stendimento (MASW, ReMi, ESAC, SPAC), che spesso coprono anche più di 100 m.
- ◆ Anche l'inversione dell'H/V assume un modello 1D del sottosuolo ma il volume che influenza dell'H/V a basse frequenze è più ridotto di quello di uno stendimento.
- ◆ Un'indagine intensiva eseguita su un centinaio di siti nel nord-Italia, impiegando stendimenti con aperture massime di 60 m ed eseguendo prove H/V contemporanee lungo tutti i nodi degli stendimenti, ha mostrato che l'assunto 1D per il sottosuolo cade nel 70% dei casi.



◆ L'inversione dell'H/V vincolata alla conoscenza di un orizzonte stratigrafico superficiale (Castellaro e Mulargia, BSSA, 2008) ha alcuni vantaggi:

- Fornisce stime di Vs30 adeguate ai fini di legge (che sono blandi e accettano come stimatori del Vs30 parametri quali N_{SPT} e c_u che sono persino meno correlati al Vs30),
- Fornisce le frequenze di risonanza del sottosuolo (che sono più importanti del Vs30 ai fini della definizione degli effetti di sito),
- Permette di riconoscere eterogeneità laterali.

◆ Ha ovviamente dei limiti

- Poiché la composizione del microtremore è ancora dibattuta, tutte le procedure di inversione (incluse quelle di tutte le tecniche passive in array) sono discutibili.
- L'ampiezza dei picchi H/V dipende da un numero di fattori ma per l'inversione nei primi 30 m e ai fini della precisione richiesta dalla legge, questo disturba i risultati marginalmente.

Fin dagli studi di Gutenberg (1958) e Asten (1978, 1984) è noto che:

1. a basse frequenze (< 0.5 Hz) il microtremore sismico è generato da perturbazioni meteorologiche a grande scala (vento, onde oceaniche, nel qual caso si propaga per molte migliaia di km all'interno delle coste)
2. ad alte frequenze (> 0.5 Hz) il microtremore sismico è generato da rumore antropico (traffico, attività antropiche ecc.)

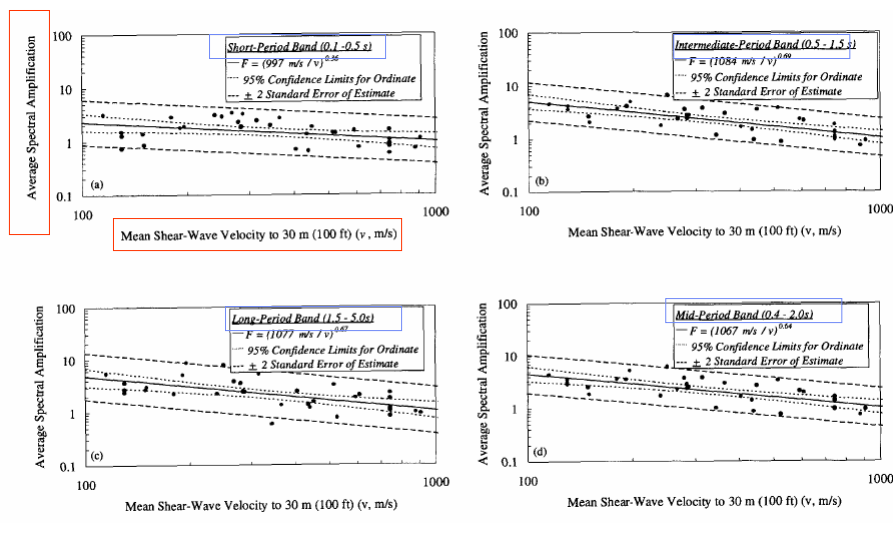
A livello stratigrafico ne consegue una dipendenza della curva H/V a bassa frequenza dalle condizioni meteo.

**FINO A CHE PUNTO HA SENSO CERCARE MISURE
RAFFINATE DI V_{s30} ?**

Fa – Vs30: esiste una relazione?

- ◆ L'esigenza di trovare una relazione di qualche tipo tra il fattore di amplificazione e una qualche proprietà del terreno (nel caso in questione il Vs30) è stata così forte da portare a presentare i dati in una forma grafica che enfatizza relazioni inesistenti.

Tutto nasce da un lavoro di Borchardt (*Earthq. Spectra*, 1994) in cui furono pubblicate alcune relazioni tra Vs100 ft (~ Vs30 m) e l'amplificazione sismica registrata in diversi siti a seguito del terremoto di Loma Prieta (California, 1989).



Borcherdt analizzò i dati fino a 30 m (100 piedi) perché mediamente disponeva di dati fino a quella profondità e NON perché vi fosse o vi sia evidenza del fatto che la Vs nei primi 30 m abbia una relazione con il fattore di amplificazione.

In altri termini, è stata la disponibilità di dati e non la loro reale significatività a determinare la scelta del Vs30 come parametro di riferimento.

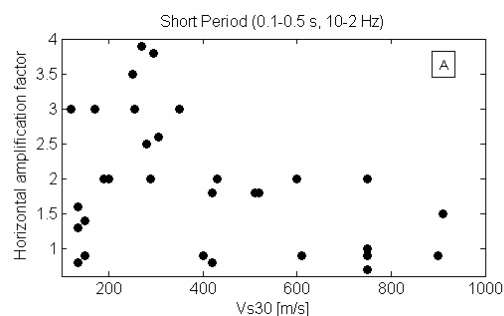
Borcherdt lavora per lo USGS, servizio geologico statunitense, pertanto il suo lavoro fu prodotto per e recepito da le agenzie locali di rischio sismico.

L'EuroCodice ha recepito questa parte delle direttive statunitensi in merito alla classificazione di sito (e così la normativa italiana).

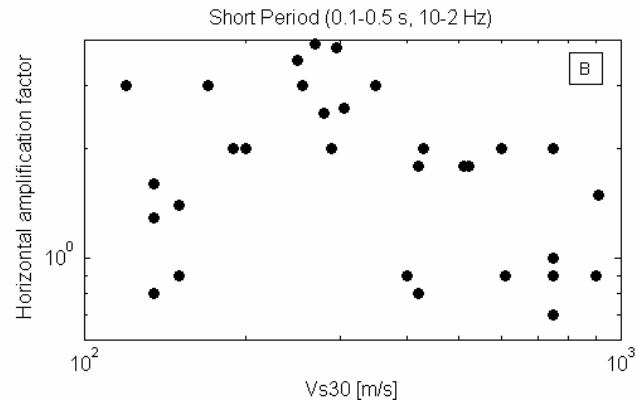
Questa è la stessa figura di Borcherdt (1994) ridisegnata in scala lineare.

E' palese che:

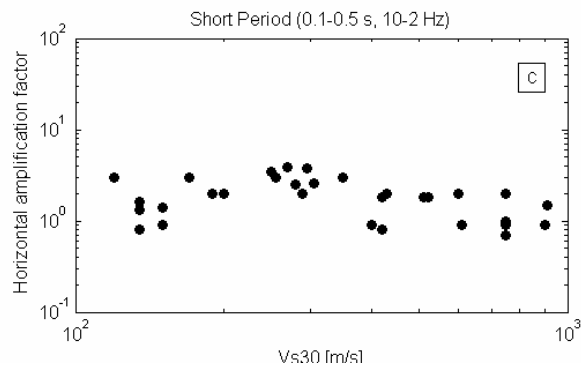
- non esiste relazione lineare tra Vs30 e amplificazione (lo scatter dei dati è enorme)
- sembra addirittura che l'amplificazione massima non si abbia per Vs30 basse ma per Vs30 intermedie (280-350 m/s).



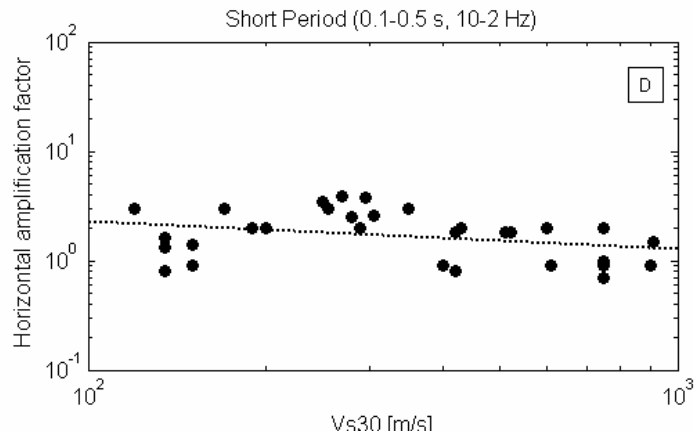
Passando alla scala logaritmica ancora non sembra proponibile una relazione tra Fa e Vs30



Se però estendiamo la scala delle ordinate fino a coprire 3 ordini di grandezza anziché l'1 scarso che i dati coprono, allora l'occhio viene ingannato e percepisce una relazione che non esiste.

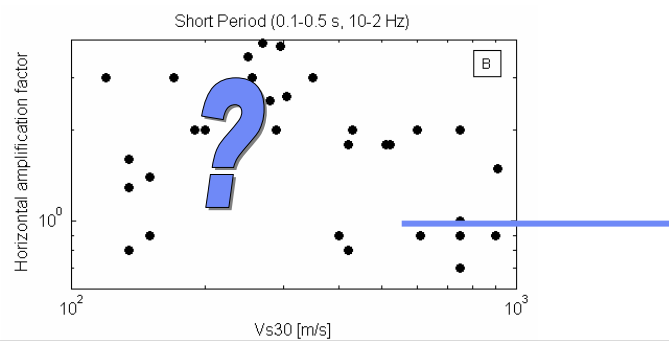


Se poi aggiungiamo una retta di regressione... et voilà, il famoso Fa-Vs30!



C'è anche un altro problema...

- ◆ Sopra Vs di 600 m/s possiamo essere già nel dominio delle rocce (per molte rocce sedimentarie in Italia e non solo). Quindi (indicativamente) per $Vs_{30} > 600 \text{ m/s} \rightarrow Fa = 1$
- ◆ E la relazione $Fa - Vs_{30}$ (ammesso che esista) non andrebbe cercata in tutto il dominio di Vs_{30} perché il trend atteso dovrebbe semmai essere bi-lineare

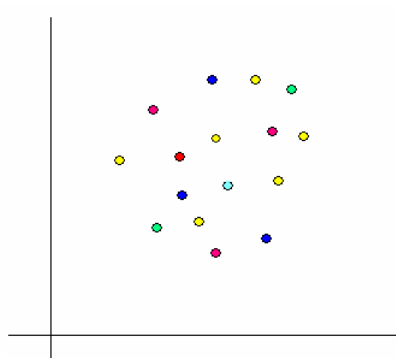


In conclusione

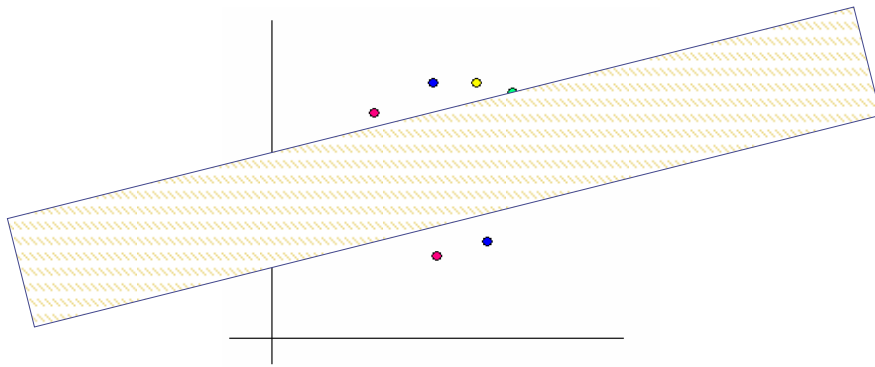
- ◆ La relazione $F_a - V_{s30}$ non regge nemmeno ad un'analisi statistica elementare sul set di dati in cui è stata sviluppata (Castellaro et al., SRL, 2008).
- ◆ Nonostante la sua larghissima applicazione, il V_{s30} è un parametro poco affidabile per stimare l'amplificazione di sito.
- ◆ Nessuno può negare che la rigidità del sottosuolo, e quindi il profilo di V_s vicino alla superficie, abbia un ruolo negli effetti di sito.
- ◆ Ma l'amplificazione sismica locale è evidentemente troppo complessa (topografia, effetti di sorgente, profilo di rigidità fino al bedrock sismico ecc.) per essere descritta adeguatamente da un parametro sintetico come il V_{s30} .

O in alternativa:

“Qual è la retta che interpola questi punti?”



"Una retta GROSSA!"



TECNICHE A STAZIONE SINGOLA E/O IN ARRAY
POSSONO ESSERE ACCOPPIATE
A MISURE SU STRUTTURE

MISURA DEI MODI DI VIBRARE DI UNA STRUTTURA

Esistono essenzialmente tre tipi di test per la caratterizzazione strutturale dinamica di un edificio:

- test in condizioni di vibrazioni forzate,
- test in condizioni di vibrazioni libere,
- test in condizioni di vibrazioni ambientali.

Nei primi due casi la struttura viene sollecitata da mezzi artificiali, come degli oscillatori o la caduta di pesi. Nell'ultimo caso la vibrazione è indotta dall'eccitazione ambientale, sempre presente in natura, e fornita dal traffico e dalle perturbazioni atmosferiche.

La pratica di caratterizzare dinamicamente una struttura sfruttando le vibrazioni ambientali è recente.

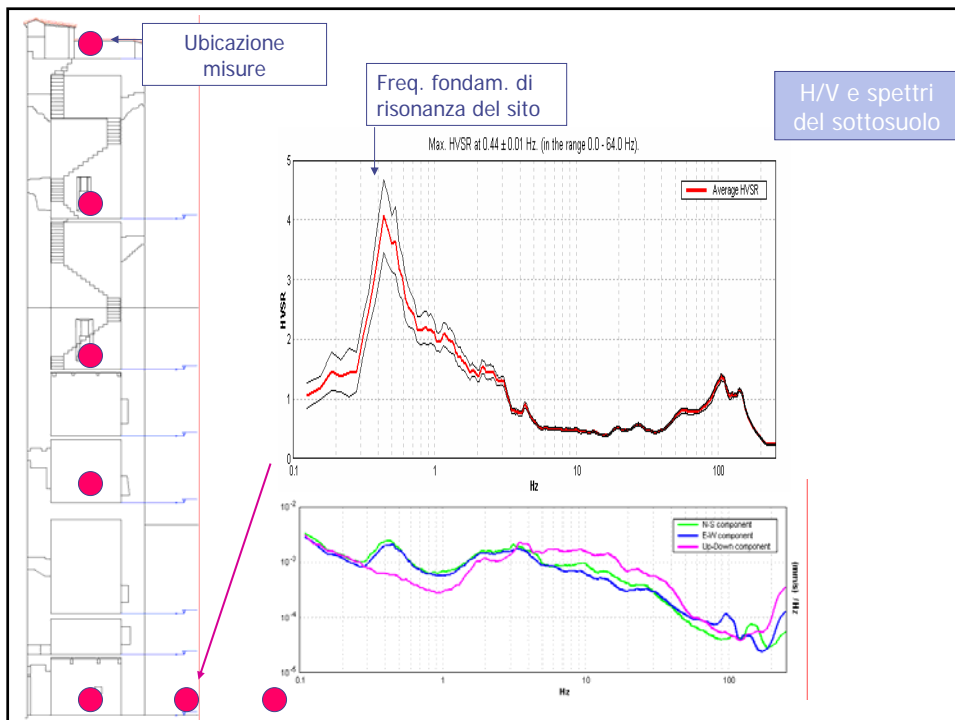
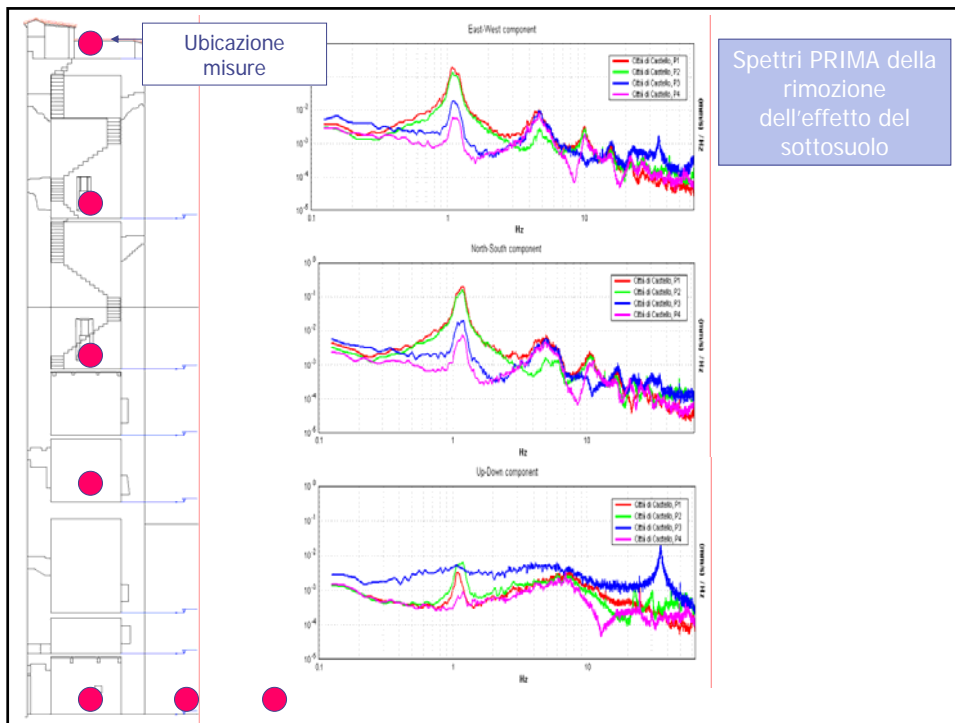
MISURA DEI MODI DI VIBRARE DI UNA STRUTTURA

Per mettere in luce i fattori di amplificazione del moto ai vari piani dell'edificio vanno effettuate:

- Misure sulla stessa verticale, ai vari piani
- Allineando gli assi dello strumento agli assi della struttura
- Va sempre effettuata una misura al piano di fondazione dell'edificio e una immediatamente fuori dall'edificio stesso.

Una regola empirica poco rispettata imporrebbe di effettuare misure in esterno ad una distanza dall'edificio pari alla sua altezza, per evitare di registrare - fuori - vibrazioni indotte dalla struttura sul terreno. Il problema è che allontanandosi molto dalla struttura di rischia fortemente di investigare un suolo molto diverso da quello di fondazione. La rimozione dell'effetto di sito diventa allora problematica.

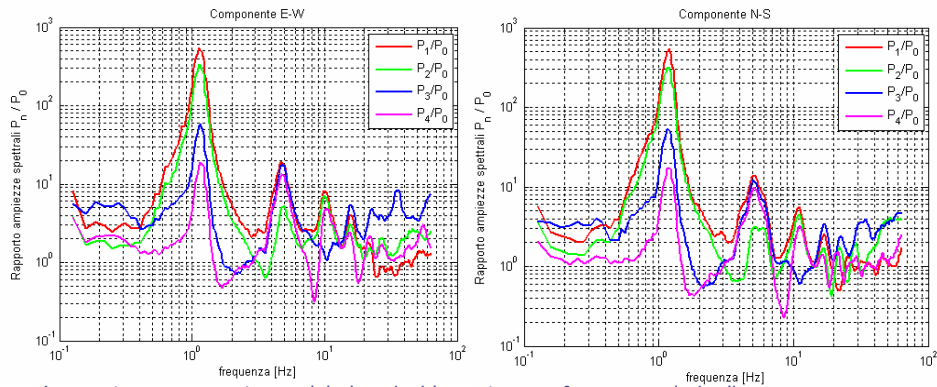
- Edifici complessi hanno modi di vibrare altrettanto complessi e la risposta ai vari piani può cambiare da punto a punto.



Spettri DOPO della rimozione dell'effetto del sottosuolo

Su questi e solo su questi si possono valutare:

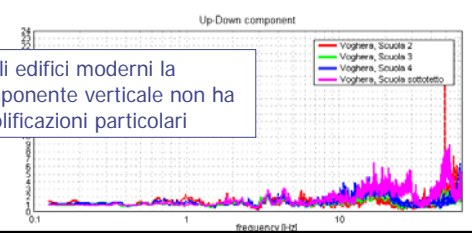
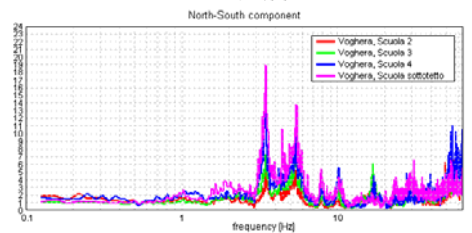
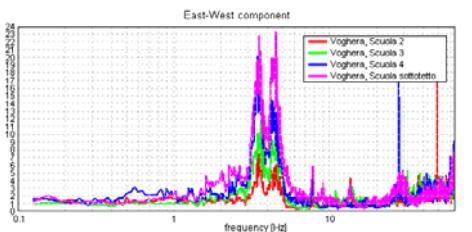
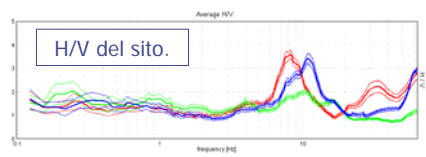
1. i veri modi di vibrare della struttura e
2. le amplificazioni del moto ai vari piani.



In questo caso non c'è una debole coincidenza tra una freq. secondaria di risonanza del sottosuolo e il modo fondam. della struttura

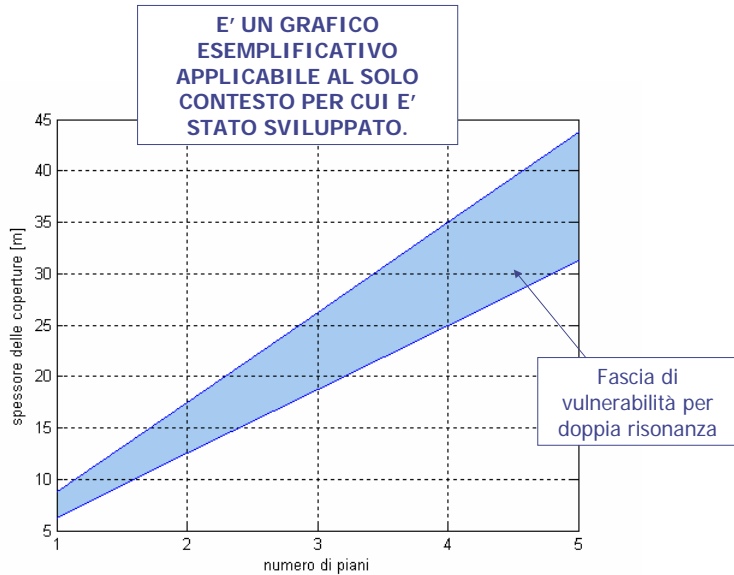
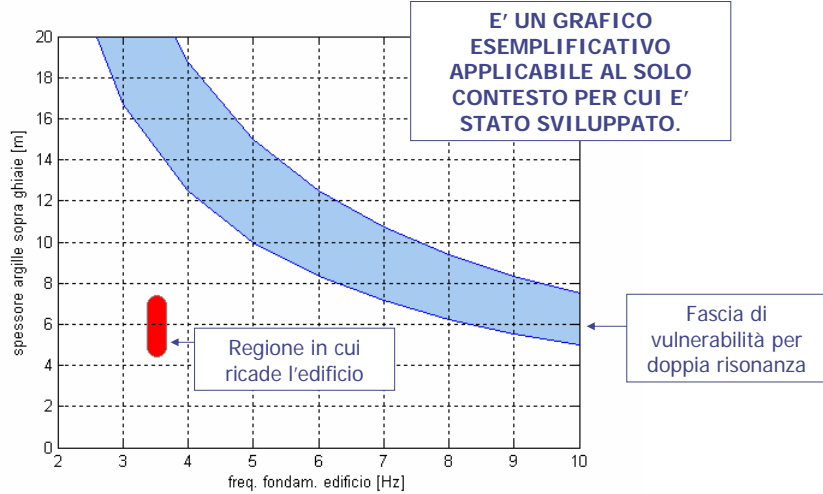
Altro esempio.

Edificio di 4 piani. Già rimosso l'effetto del sottosuolo.



Negli edifici moderni la componente verticale non ha amplificazioni particolari

In questo caso, per ciascuna coppia sito-struttura, si possono produrre curve di vulnerabilità simili a quelle sottostanti.



E VISTO CHE PARLIAMO DI PONTI...

Max. HVV at 0.44 ± 0.02 Hz. (In the range 0.0 - 62.5 Hz)

