

GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## PREMESSA

L'indagine è avvenuta con lo scopo di avere informazioni sulla stratigrafia e sulle caratteristiche sismiche di un terreno nel comune di PISA in via S.Jacopo.

L'indagine è avvenuta su commissione e sotto la direzione tecnica del Laboratorio SIGMA srl (rif. V.A. 301/2162 del 13.07.2011), per conto del Comune di Pisa.

Per la determinazione del rischio sismico si sono effettuati un MASW ed un rilievo tromometrico.

### *Ubicazione dell'indagine*



## METODOLOGIA USATA PER L'ANALISI DEI DATI

Per analizzare la risposta di sito e determinare la pericolosità sismica in base alla normativa vigente si sono utilizzati due distinti metodi geofisici:

MASW-Tramite lo studio della dispersione delle onde superficiali si è determinato un primo modello monodimensionale del suolo tramite spessori e velocità

H/V-dalla curva di dispersione dell'H/V ci si ricava lo spettro di risposta (analisi del tutto indipendente dal precedente MASW)

IL modello sismo stratigrafico ottenuto con il masw viene applicato ad i dati ottenuti dall' H/V, modellando quindi uno spettro sintetico e fittandolo con i dati dello spettro dell'H/V si potrà ricostruire una sismo stratigrafia che soddisfi al meglio i risultati sperimentali ottenuti.

Il masw , infatti, molto valido entro i primi 10 metri, al disotto di tale profondità sovente risulta non molto accurato nella ricostruzione sismo stratigrafica.

Di contro, i dati del tomografo risultano avere un maggior dettaglio anche in profondità , ma , ragionando in frequenze ( $T^0=4H/VS$ ) necessitano di informazioni aggiuntive sulle velocità o gli spessori, altrimenti si potrebbero evincere un numero infinito di modelli validi che mi generano sempre la stessa risposta.

Vincendo i dati ottenuti dall'H/V e il MASW ottengo così un modello valido sia nei primi metri che in profondità, e che mi riuscirà a intercettare variazioni di compattezza del terreno attraversato ben oltre i 30 metri previsti dalla normativa.

Si potranno inoltre avere informazioni aggiuntive (rispetto ad un classico MASW) sulla reale pericolosità del sito in esame, come spettro di risposta e periodo fondamentale di risonanza.



GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## STRUMENTAZIONE USATA PER I RILIEVI

### MASW

Sismografo PASi 16GN24  
Geofoni verticali da 4,5 hz  
Massa battente (mazza)



### CARATTERISTICHE TECNICHE SERIE 16S-N

Processore	Intel Celeron M o superiore
Trattamento dati	Floating Point 32-bit
Ambiente operativo	Windows XP
Interfaccia multilingue	Italiano, Inglese, Francese, Spagnolo, etc.
Numero canali	12 / 24
Display	VGA a colori in LCD-TFT 10.4", touch screen
Supporto di memorizzazione	Hard-Disk 80 Gb (o superiore)
Risoluzione di acquisizione	24bit con sovracampionamento e post-processing
Stampante (opzionale)	Windows standard (solo su richiesta)
Porte dati esterne	LPT, 2xUSB2, LAN
Sensore ambiente interno	temperatura
Protezioni termiche	prevenzione e controllo surriscaldamenti interni (warning sul display e blocco)
Compatibilità dati acquisiti	SEG-2 e PASI standard
Connettori cavo geofoni	standard NK-27-21C
Alimentazione	batteria esterna 12VDC
Temperatura di funzionamento	da 0°C a +55°C
Temperatura di immagazz.	da -55°C a +150°C
Umidità	da 5% a 90%, non condensante
Dimensioni fisiche	486x392x192 mm
Peso	10 kg (12 canali), 11 kg (24 canali)

GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## RILIEVI TROMOMETRICI

### Tromino Micromed



Number of channels	3+1 analog
Amplifiers	all channels with differential inputs
Noise	< 0.5 $\mu\text{V}$ r.m.s. @128 Hz sampling
Input impedance	$10^6$ Ohm
Frequency range	DC - 360 Hz
Sampling frequency	16384 Hz per channel
Oversampling frequency	32x, 64x, 128x
A/D conversion	$\geq 24$ bit equivalent
Max analog input	51.2 mV (781 nV/digit)

GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## SOFTWARE USATO PER LA VISUALIZZAZIONE L'ACQUISIZIONE, IL FILTRAGGIO E L'ELABORAZIONE DEI DATI

### Acquisizione dei dati

*SISMOPC 1.0-PASI*  
*AMROGEO*

### Elaborazione e filtraggio

<i>Visual Sunt 20</i>	<i>Wgeosoft -filtraggio dati (sismica a riflessione)</i>
<i>Seismic Unix</i>	<i>Software libero-filtraggio dati (sismica a riflessione)</i>
<i>WinMasw Pro</i>	<i>Eliosoft-elaborazione Masw-Remi-H/V-Attenuazione</i>
<i>Grilla</i>	<i>Tromino-H/V</i>
<i>Geopsy</i>	<i>Software Libero-H/V</i>

### Modelli 1 D e rischio sismimico

<i>Deep Soil</i>	<i>software libero-Risposta di sito modellazione 1D</i>
<i>Rexel</i>	<i>software libero-risposta di sito-terremoto di progetto</i>
<i>Shake 2000</i>	<i>Geo Motions-risposta di sito -modellazione 1D -liquefazione ecc.</i>
<i>Ciclic 1D</i>	<i>software libero-liquefazione</i>

TUTTI I SOFTWARE COMMERCIALI IN NOSTRO POSSESSO SONO ORIGINALI E DOTATI DI ORIGINALE LICENZA



## CENNI TEORICI

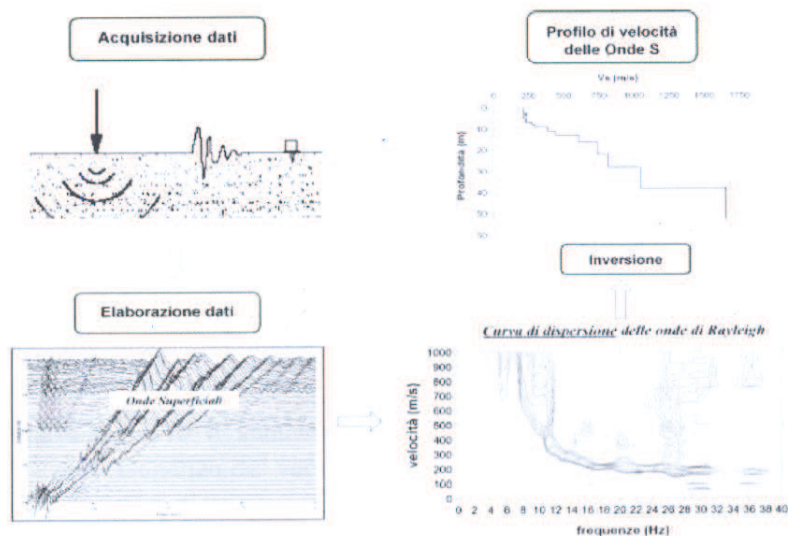
## MASW

La conoscenza dell'andamento nel primo sottosuolo della velocità di propagazione delle onde di taglio è, come noto, importante negli studi di microzonazione sismica dedicati alla stima di possibili effetti di sito, capaci di amplificare il moto del terreno durante un terremoto.

Negli ultimi anni hanno avuto ampio sviluppo tecniche geofisiche basate sull'analisi della propagazione delle onde superficiali ed, in particolare, delle onde di Rayleigh. Le proprietà dispersive di tali onde in mezzi stratificati, nonché la stretta relazione esistente tra la loro velocità di propagazione e quella delle onde di taglio, consentono di risalire al profilo di velocità delle onde S.

Il metodo di indagine attivo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è basato su un artificiale energizzazione sismica del suolo e sull'analisi spettrale delle onde superficiali presenti nel segnale (Nazarian e Stokoe, 1984; Park et al., 1999).

Nel metodo di indagine passivo si registra il rumore di fondo.



La curva di dispersione delle onde di Rayleigh rappresenta la variazione di velocità di fase che tali onde hanno al variare della frequenza. Tali valori di velocità sono intimamente legati alle proprietà meccaniche del mezzo in cui l'onda si propaga (velocità delle onde S, delle onde P e densità). Tuttavia, diversi studi hanno in realtà messo in evidenza che la velocità delle onde P e la densità sono parametri di second'ordine rispetto alle onde S nel determinare la velocità di fase delle onde di Rayleigh. Quindi, dato che le onde superficiali campionano una porzione di sottosuolo che cresce in funzione del periodo dell'onda e che la loro velocità di fase è fortemente condizionata in massima parte dalle velocità delle onde S dello strato campionato, la forma di questa curva è essenzialmente condizionata dalla struttura del sottosuolo ed in particolare dalle variazioni con la profondità delle velocità delle onde S. Pertanto, utilizzando

appositi formalismi è possibile stabilire una relazione (analiticamente complessa ma diretta) fra la forma della curva di dispersione e la velocità delle onde S nel sottosuolo. Tale relazione consente il calcolo di curve di dispersione teoriche a partire da modelli del sottosuolo a strati piano-paralleli.

L'operazione d'inversione, quindi, consiste nella minimizzazione, attraverso una procedura iterativa, degli scarti tra i valori di velocità di fase sperimentali della curve di dispersione e quelli teorici relativi ad una serie di modelli di prova "velocità delle onde S - profondità".

## HVSR

La caratterizzazione sismica dei terreni tramite la tecnica di indagine sismica passiva HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio - Metodo di Nakamura) è finalizzata all'individuazione delle frequenze caratteristiche di risonanza di sito. Esse sono correlabili ai cambi litologici presenti sia all'interno della copertura che nell'ammasso roccioso.

Le basi teoriche dell'HVSR sono relativamente semplici in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D). Consideriamo un sistema dove gli strati si distinguono per diverse densità e velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ). Un'onda che viaggia nel primo mezzo viene (parzialmente) riflessa dall'orizzonte che separa i due strati. L'onda così riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a :

$$f_r = VP1/(4 h)$$

mentre quella relativa alle onde S è

$$f_r = VS1/(4 h)$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati. Questo, insieme ad una stima delle velocità, è in grado di fornire previsioni sullo spessore  $h$  degli strati.

Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto

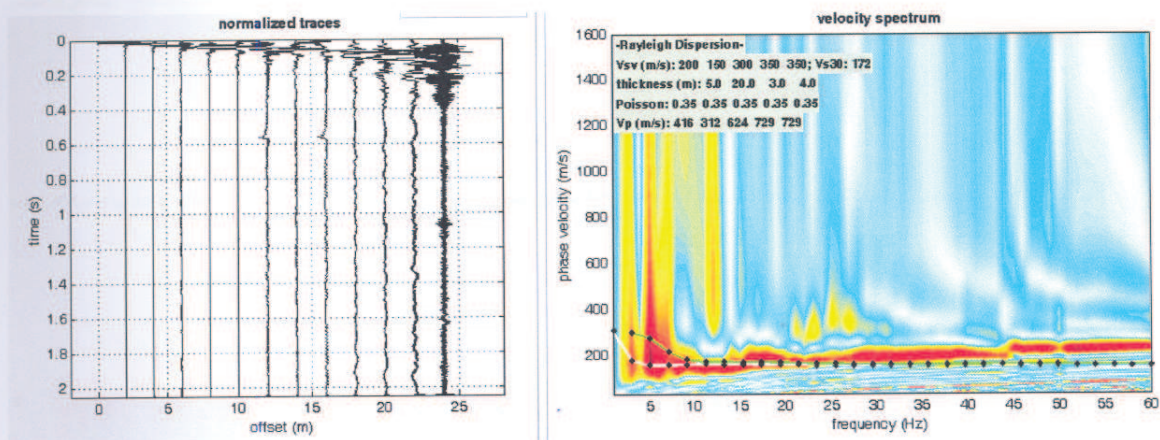


GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Battli

## MODALITA' OPERATIVA

### MASW

Si sono disposti i geofoni sul terreno quindi si è energizzato tramite mazza da 8 kg.  
Si sono effettuate registrazioni di 1 sec.  
Si sono disposti 12 geofoni da 4,5 hz alla distanza di 2 metri ottenendo una traccia di 24 metri  
L'eneraizzazione è avvenuta a 2 metri dal primo geofono



*MASW-segnale nel dominio dei tempi e delle frequenze*

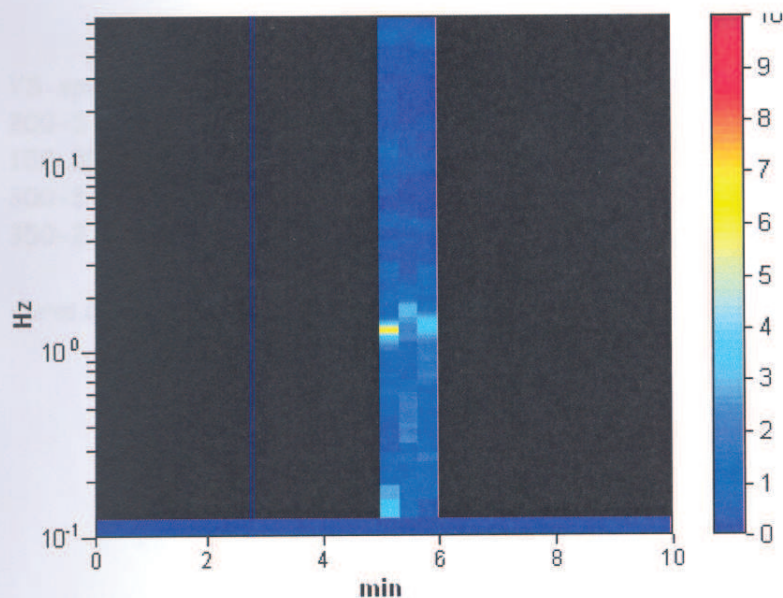
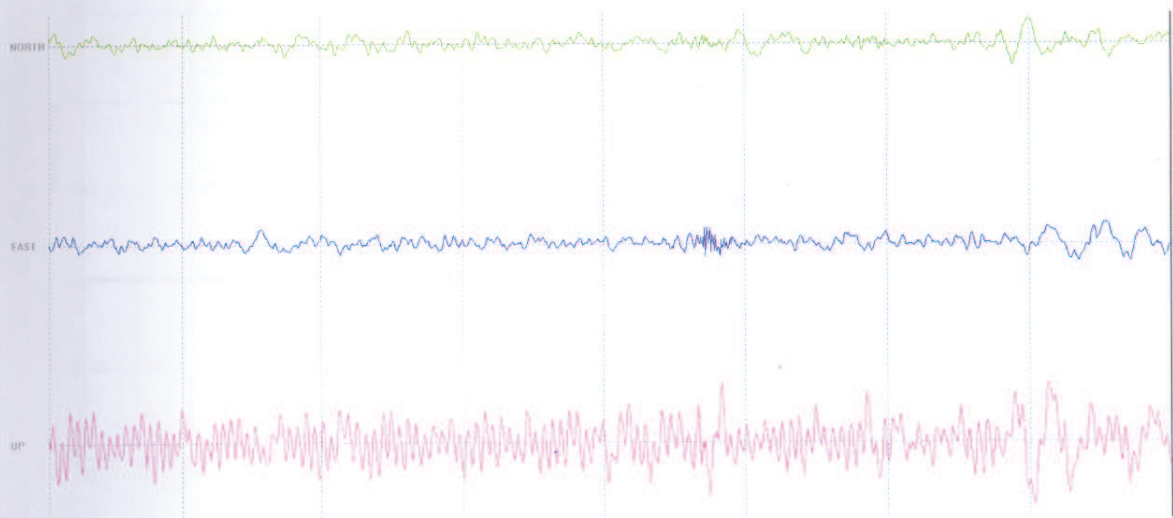


GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## H/V

Si è disposto il tromino mettendolo in bolla ed allineandolo con il nord geografico.  
Si sono effettuate quindi una registrazione del rumore di fondo per 20 minuti.

*Segnale nel dominio dei tempi registrato con il Tromino nel dominio delle frequenze e del tempo*

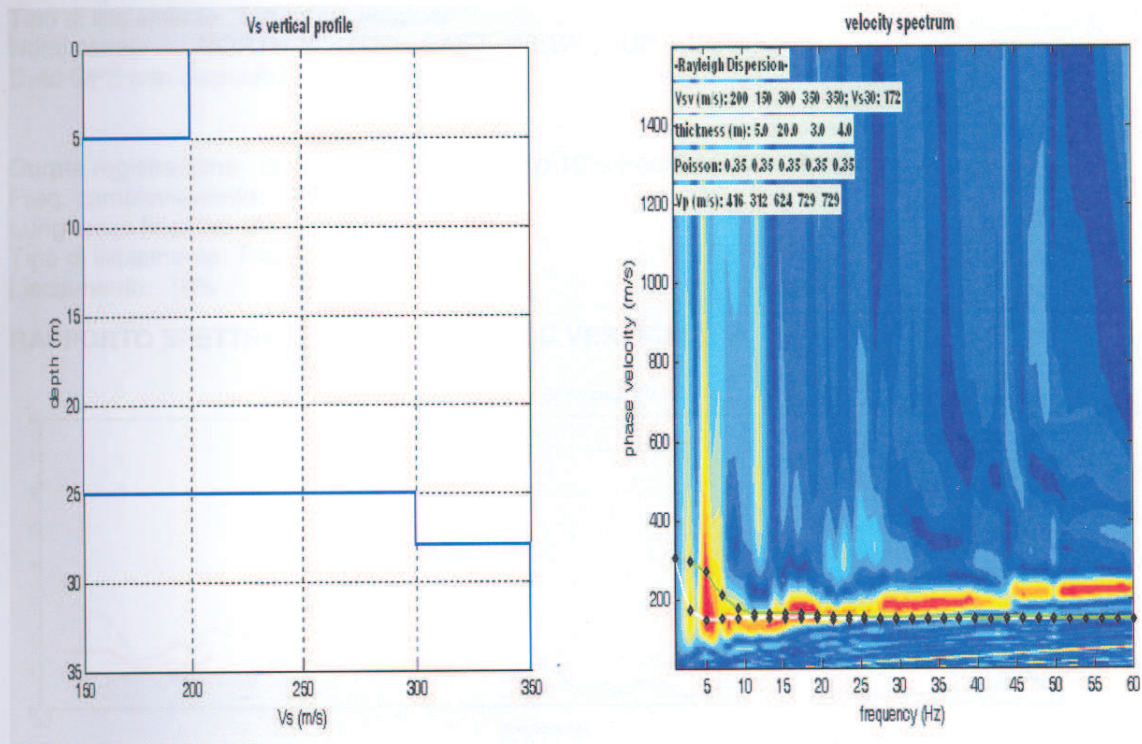


## FASE INTERPRETATIVA

### 1) Elaborazione dei dati MASW

GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

I dati sono stati analizzati nel dominio delle frequenze, si è ricavato quindi la curva di dispersione ed il modello sismo stratigrafico preliminare in SV



**VS-spessori**

200-5

150-20

300-3

350-2

*Curva di dispersione e modello preliminare in sv*



GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Battli

## PICAC1,

Strumento: TRZ-0135/01-11

Inizio registrazione: 12/07/11 11:14:20 Fine registrazione: 12/07/11 11:24:20

Tipo di lisciamento: Triangular window

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h10'00". Analizzato 10% tracciato (selezione manuale)

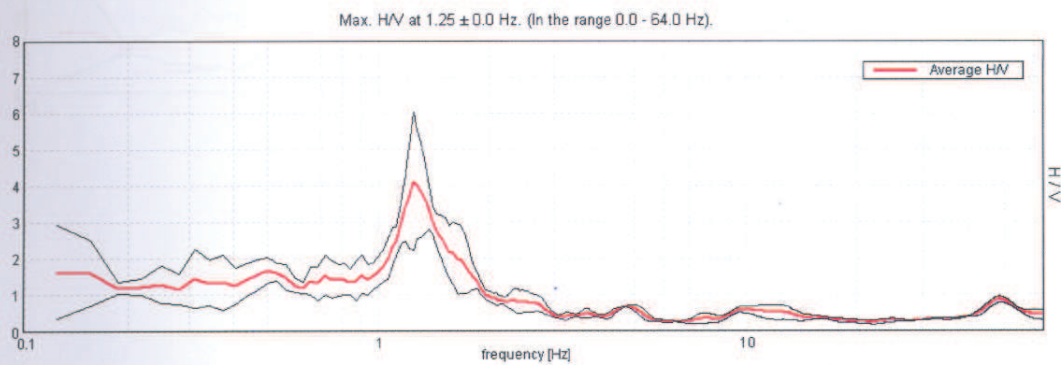
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

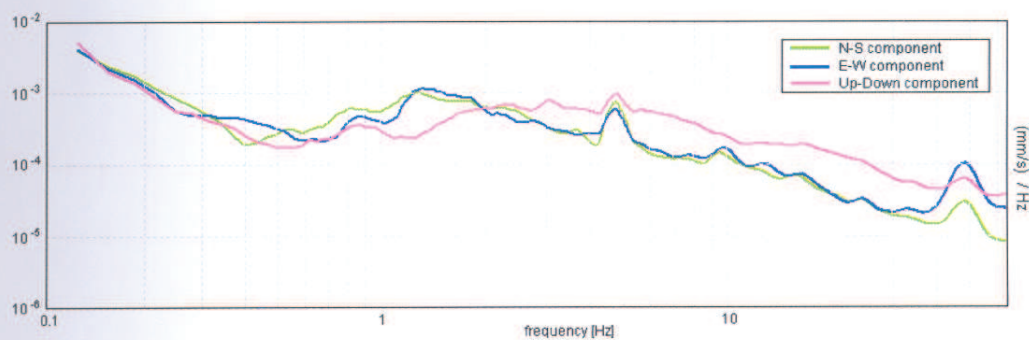
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

## RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



## SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## RISULTATI OTTENUTI

VS-spessori

200-5

150-20

300-3

350-2

PERIODO FONDAMENTALE DI RISONANZA  $T=1.25$  hz

*PROFONDITA D'INDAGINE-*

Oltre i 50 metri



GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE SUL RISCHIO SISMICO

Non si rileva bedrock sismico entro i 30 metri, la vs 30 e' minore di 180 metri al secondo sia con la tromometria che con il masw.

**VS30=172 m./sec CLASSE D**

A - Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di Vs30 superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 3 m.

B - Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero resistenza penetrometrica media NSPT > 50, o coesione non drenata media  $c_u > 250$  kPa).

C - Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di Vs30 compresi tra 180 e 360 m/s ( $15 < \text{NSPT} < 50$ ,  $70 < c_u < 250$  kPa).

**D - Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di Vs30 < 180 m/s (NSPT < 15,  $c_u < 70$  kPa).**

E - Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di VS simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con VS > 800 m/s.

S1 - Terreni che includono uno strato di almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ( $PI > 40$ ) e contenuto di acqua, con  $10 < c_u < 20$  kPa e caratterizzati da valori di Vs30 < 100 m/s.

S2 - Terreni soggetti a liquefazione, argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti.

AREZZO 24-07-2011

GALILEO GEOFISICA



GALILEO GEOFISICA – Piazza Giotto 8, AR  
Dott. Simone Secci – Dott. Lorenzo Batti

## COLONNA SISMOSTRATIGRAFICA

