Sismica di esplorazione in supporto alla valutazione del rischio sismico: alcune esperienze dell'OGS

Petronio Lorenzo
lpetronio@inogs.it

OGS Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

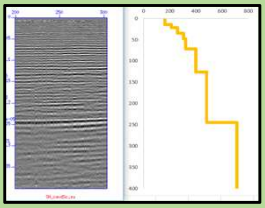
Convegno Webinar
PROGETTARE IN CONTESTO SISMICO
ASPETTI TEORICI, METODI ANALITICI E RISCHIO SISMICO
29 gennaio 2021

Obiettivo presentazione

OGS

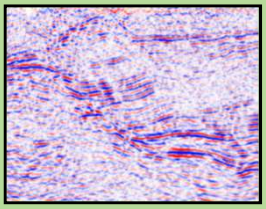
Approccio geofisico (sismica) per migliorare la conoscenza del sottosuolo propedeutico alla valutazione del rischio sismico

1- Modello geofisico attendibile



Effetto di sito

2 -Immagine del sottosuolo



Individuazione faglie

Agenda

- Introduzione ed obiettivi presentazione
- Prodotti sismica di esplorazione:
  - Effetti di sito – modello geologico «affidabile»
  - Individuazione faglie
- Geofisica di esplorazione
  - Metodi, applicabilità, risoluzione/penetrazione
- Esperienze OGS: esempi e risultati
- Conclusioni

OGS – Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

- Ente pubblico di ricerca

L'Ente opera e sviluppa la propria missione nell'Area Europea della Ricerca (ERA) e in ambito internazionale con prioritario riferimento ai settori di ricerca in:

- **O**ceanografia (fisica, chimica, biologica e geologica)
- **G**eofisica sperimentale e di esplorazione
- **S**ismologia e sismologia applicata all'Ingegneria

https://www.inogs.it/

OGS – Organizzazione della ricerca

Sismica di esplorazione: alcune esperienze OGS

Studi in siti nucleari
Krsko (Slovenja) *
Petten (Nederland) *
Vandellos (Spain) *

Microzonazione sismica
Ferrara (Italy) *
Alpago/Paludi (Italy) *
Cavezzo (Italy) *
Mirabello (Italy) *

Frane / Sinkhole
Vaiont (Italy)
Ancona (Italy) *
Quinis (Italy)

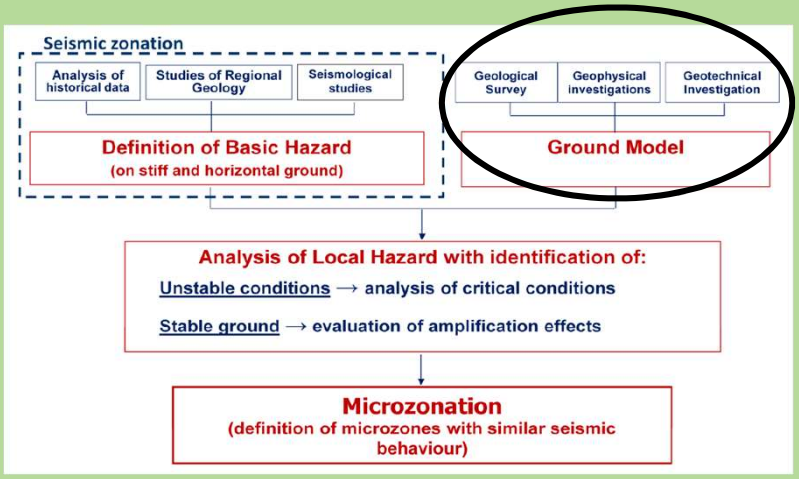
Grandi Infrastrutture
Tunnel Malta – Gozo (Malta) *

Scavo di tunnel
Premia (Italy)
Moggio Udinese (Italy) *

Geotermia / CBM
Grado (Italy) *
Nevada (USA) *
Ribolla (Italy) *

Modello geologico/Microzonazione sismica

La **microzonazione sismica** è un'operazione scientifica, complessa e **multidisciplinare**, che ha lo scopo di riconoscere, a una scala sufficientemente piccola (scala comunale o sub comunale), le condizioni geologiche, geomorfologiche e geotecniche locali del sottosuolo, che possono alterare più o meno sensibilmente le caratteristiche del movimento sismico atteso generando amplificazioni del moto sismico e/o deformazioni permanenti.

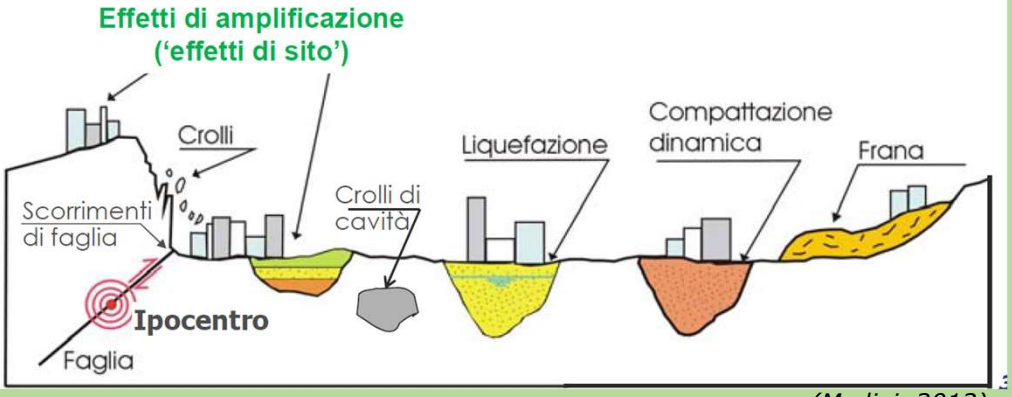


(Aversa e Crespellani, 2016)

Effetti indotti dal sisma

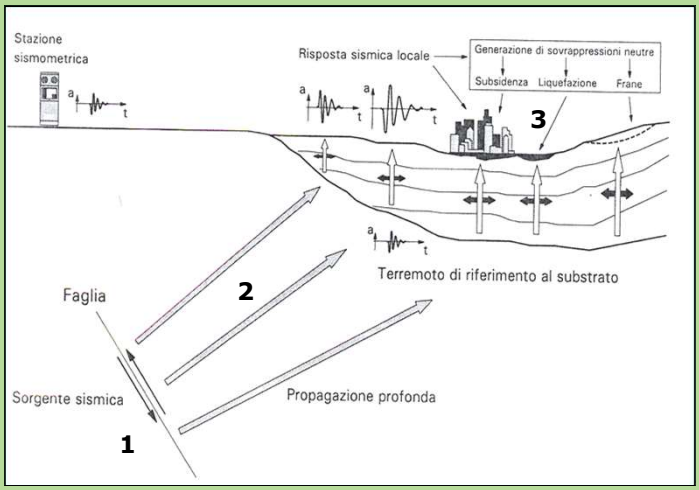
In relazione agli effetti indotti dall'azione sismica si distinguono:

- *Terreni stabili* ➡ amplificazione (modificazioni) del moto sismico
- *Terreni instabili* ➡ grandi deformazioni e instabilità (collassi locali o generalizzati) nel terreno



(Madiai, 2012)

Scuotimento - effetti di sito



(*Lanzo e Silvestri, 1999*)

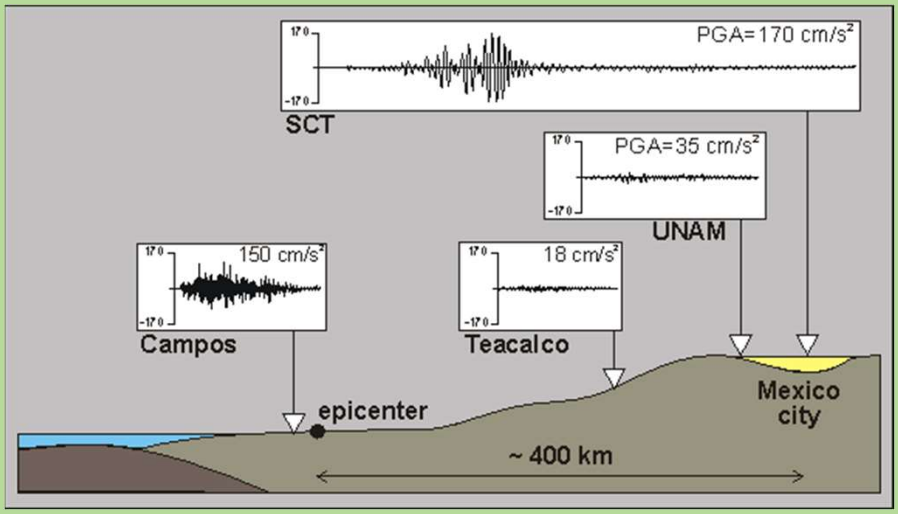
1 - Sorgenti sismiche (faglie)
Ubicazione, tassi di sismicità

2 - Propagazione
leggi di attenuazione, decremento ampiezza vs. distanza

3 - Effetti di sito
Variazione scuotimento per effetti geologici/morfologici "locali"

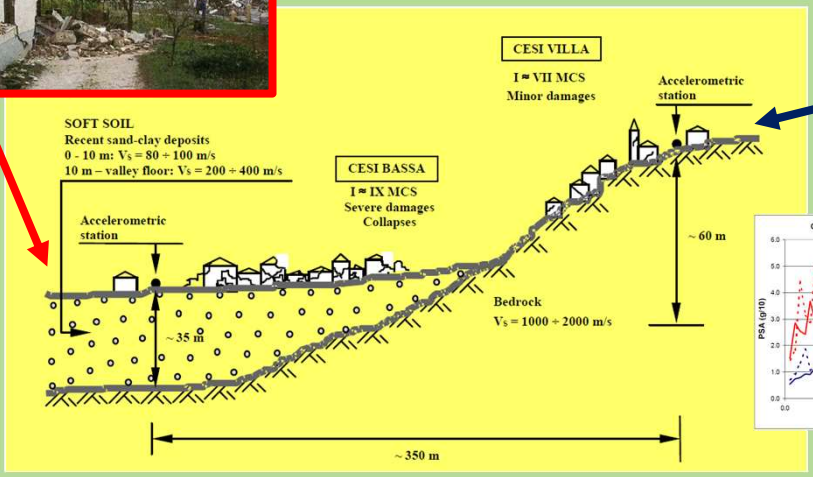
Effetti di sito - esempio 1

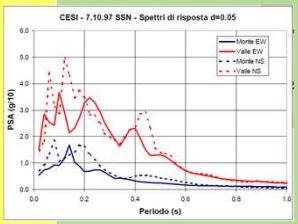
Il terremoto di Città del Messico del 19/09/1985 (M=8.1)



Effetti di sito - esempio 2

Il terremoto Umbria/Marche 1997 (M=6.0)





(*Capotorti et al. 1997 e Decanini et al. 1999*)

Calcolo risposta sismica locale

Modellazioni numeriche > valutazione della risposta sismica locale

Per una microzonazione più accurata si ricorrere ad analisi numeriche della risposta sismica locale in grado di descrivere il comportamento del terreno utilizzando modelli lineari e non lineari, monodimensionali (SHAKE, DESRAMOD, ecc.), bidimensionali e tridimensionali (QUAD4, FLUSH, ecc..). In questo caso, la complessità e la raffinatezza del modello, richiede dati il più possibile affidabili (i.e., velocità delle onde, densità, modulo di taglio massimo, etc.) e soprattutto, nel caso di analisi non lineari, la legge di variazione di tali parametri con la deformazione.

Necessità di
modelli del sottosuolo attendibili

Come esplorare il sottosuolo

OGS

Metodi diretti

Sondaggi geognostici, trincee

Misure dirette
Campioni disponibili

Invasive
Costose
1 D

Metodi indiretti

indagini geofisiche

Non invasive
2D/3D
Economiche

Indirette
Non sempre applicabili

Indagini geofisiche

OGS

Prospezioni geofisiche

Elettrica/ERT
Georadar
Elettromagnetica
Gravimetrica
Sismica

Metodi sismici

Passivi (HVSR, ReMI, Seismic array/SPAC, etc.)

Attivi (rifrazione, <u>riflessione</u>, <u>pozzo</u>, MASW)

Parametri per modelli

Geometrie sepolte, Vs, Vp, densità, Q, modulo di taglio, etc.

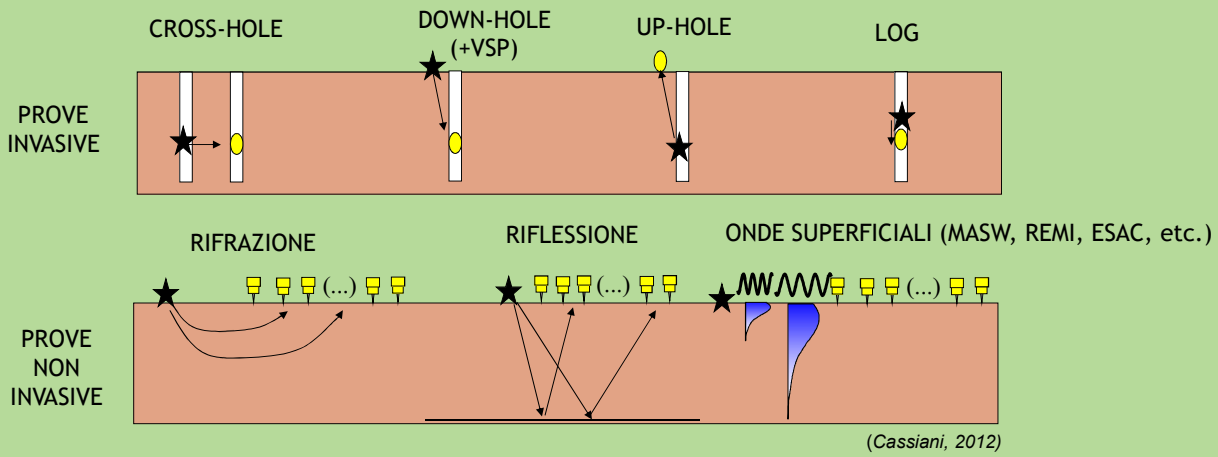
Distribuzione Vs in profondità

Shear-wave velocity is related to the stiffness of the material, and therefore this parameter has an important role, as it controls the ground-motion amplification and, locally, the ground-motion variability (e.g., Shearer and Orcutt, 1987; Cranswick *et al.*, 1990; Semblat and Pecker, 2009).

The shear wave velocity (V_S) profile is a fundamental requirement for conducting seismic ground response analyses (GRAs).

The shear wave velocity (Vs) profile has a large influence on the amplitude and frequency content of predicted ground surface motions derived from site response simulations. Therefore, the development of appropriate Vs profiles for use in site-specific site response analyses is of paramount importance.

Misurare la Vs in situ



(Cassiani, 2012)

Le prove di tipo INVASIVO richiedono la perforazione di uno o più fori di sondaggio (da cui si possono estrarre informazioni aggiuntive dirette stratigrafiche litologiche, geotecniche, etc).
Le tecniche non invasive prevedono l'acquisizione di dati dalla superficie

Limitazioni nell'applicabilità dei metodi geofisici

Non tutti i metodi geofisici funzionano in tutti contesti geologici e logistici!

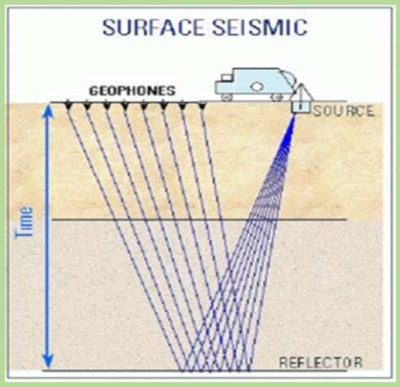
H/V (HVRS) > http://sesame.geopsy.org/Papers/HV_User_Guidelines.pdf

Analisi onde di superficie > https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-017-0206-7

Sismica a riflessione > https://library.seg.org/doi/pdf/10.1190/1.1437543

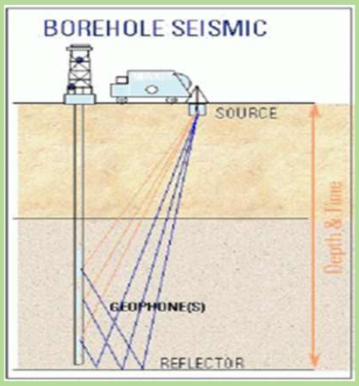
Prospezioni sismiche

Sismica a riflessione



Geometrie sepolte
Indicazioni sulle velocità sismiche

Sismica di pozzo



Velocità sismiche
Calibrazione sismica di superficie
Conversione tempi/profondità
Assorbimento Q

Linee guida sismica alta risoluzione

A workshop examination of shallow seismic reflection surveying

DON W. STEEPLES, The University of Kansas, Lawrence, Kansas
ALAN G. GREEN, ETH Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland
THOMAS V. MCEVILLY, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California
RICHARD D. MILLER, Kansas Geological Survey, Lawrence, Kansas
WILLIAM E. DOLL, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee
JAMES W. RECTOR, University of California, Berkeley, California

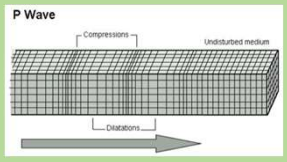
In September 1996 the Office of Basic Energy Sciences of the U.S. Department of Energy (DOE) sponsored a research workshop in Berkeley, California, where approximately 20 participants analyzed the potential and limitations of near-surface seismic-reflection methods.

https://doi.org/10.1190/1.1437543

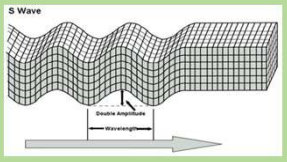
Tratta aspetti tecnici e contrattuali

Onde P e S

P - compressione



S - taglio



Valori indicativi per sedimenti sciolti/poco consolidati

Velocità (m/s):	350 – 2200	50 - 1000
Frequenze (Hz):	10 – 250	10 – 100

- In condizioni "near-surface" risoluzione onde S >> onde P (1.5 – 8)
- Onde S correlate ai parametri elastici (valore ingegneristico)

Risoluzione e penetrazione

Risoluzione

Capacità di "distinguere" l'obiettivo (strato)

→ Frequenza della sorgente, velocità del mezzo e caratteristiche area di studio

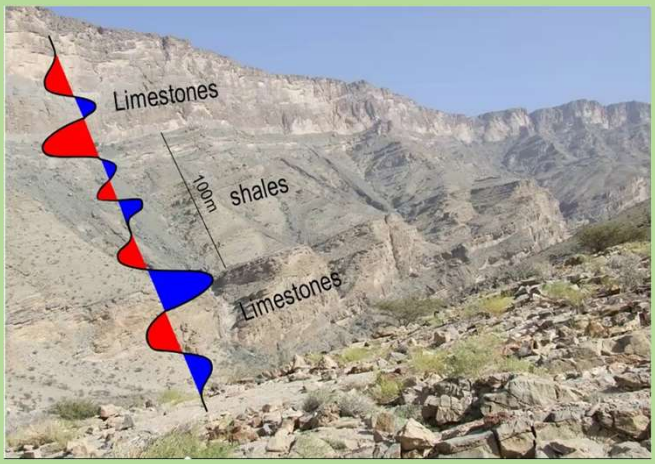
$\lambda = V / f$

Penetrazione

Capacità di "illuminare" obiettivi via via più profondi

→ Energia della sorgente e caratteristiche area di studio

Risoluzione



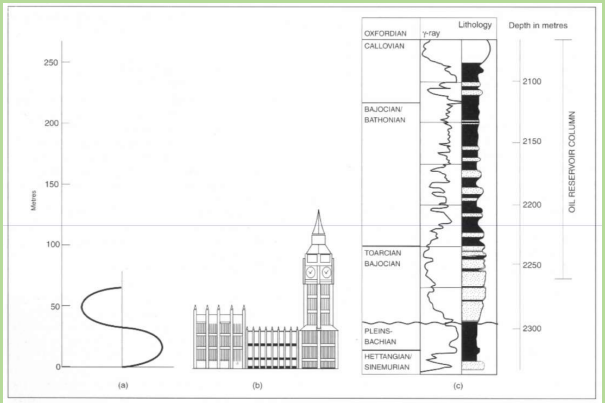


Fig. 3.2 A comparison of resolution of interpretation tools for the Beatrice Field, North Sea. (a) A single cycle sine wave of 30 Hz in medium of velocity 2000 ms^{-1} (or 60 Hz; 4000 ms^{-1}); (b) Big Ben, London, c. 380 ft; (c) A γ-ray log through the Beatrice Oil Field

Sorgenti sismiche onde P e S

OGS

Vibroseis Prakla VVCA/E

Manufacturer: Prakla Geomechanik
Model: VVCA/E
Peak Force: 125000 N
Piston Area 59.55 cm²
Mass Weight: 4300 lbs
Driven Weight 135000 N
Usable Stroke: ±35 mm
Frequency band: 6 to 250Hz
Length: 7.350m
Width: 2.500 m
Height: 3.250 m
Wheelbase: 4.100 m
Turning Radius: 6.75 m
Speed: Up to 40 Km /h
Slope Capacity: 60%
Weights: 16000 Kg
Hold – Down: 28000 lbs
Base Plate: 3500 lbs
Shape: 4x4 Crab Tractor
Area: All terrain

Typical applications
- Reflection seismic (P)
- Borehole seismic (P)

Target depth: 300 – 2500 m

IVI MiniVib T-2500

Manufacturer: IVI
Model: T - 2500
Peak Force: 11120 N
Piston Area 9.7 cm²
Mass Weight: 141 kgf
Frequency Limit 10 to 550Hz
Length: 5.400 m
Width: 2.500 m
Height: 2.800 m
Speed: Up to 90 Km /h
Slope Capacity: 60%
Weights: 7000 Kg
Hold –Down: 1134 kgf
Base Plate: 168 kgf
Shape: 4x4 Unimog
Area: All terrain

P- and S-waves

Typical applications
- Reflection seismic (P and S)
- Borehole seismic (P and S)

Target depth: 50 – 1000 m

Sorgenti sismiche onde P e S

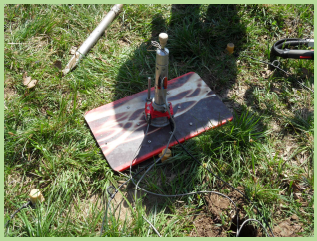
OGS

Minivibroseis Elvis VII

Manufacturer: Geosym GmbH
Model: Elvis VII
Power supply: 12 V DC
Drive system: Cascade linear motor
Peak force: approx. 1100 N
Frequency range (SH): 20 – 320 Hz
Investigation depth (SH): up to 100 – 150 m
Source weight: 35 kg
Total weight: 130 kg

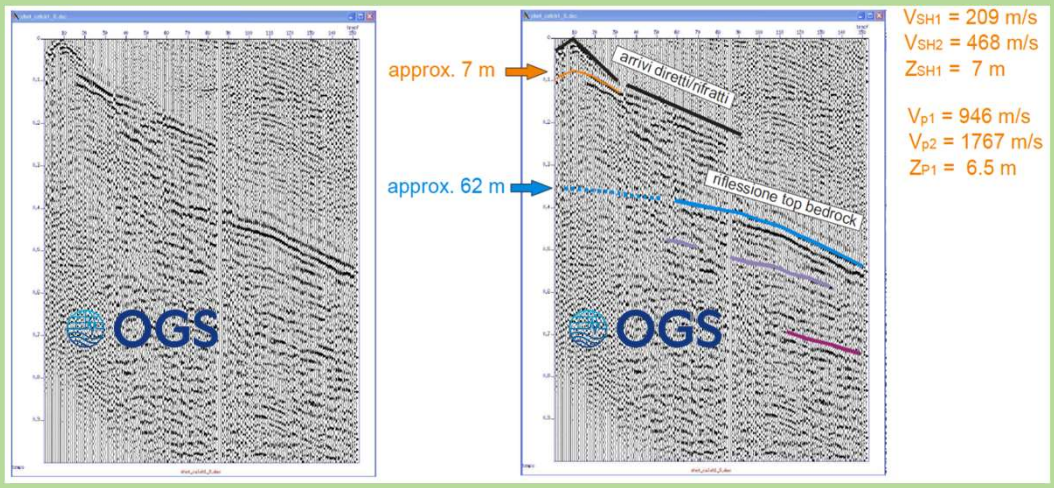
OGS-Raptor

Fucile sismico



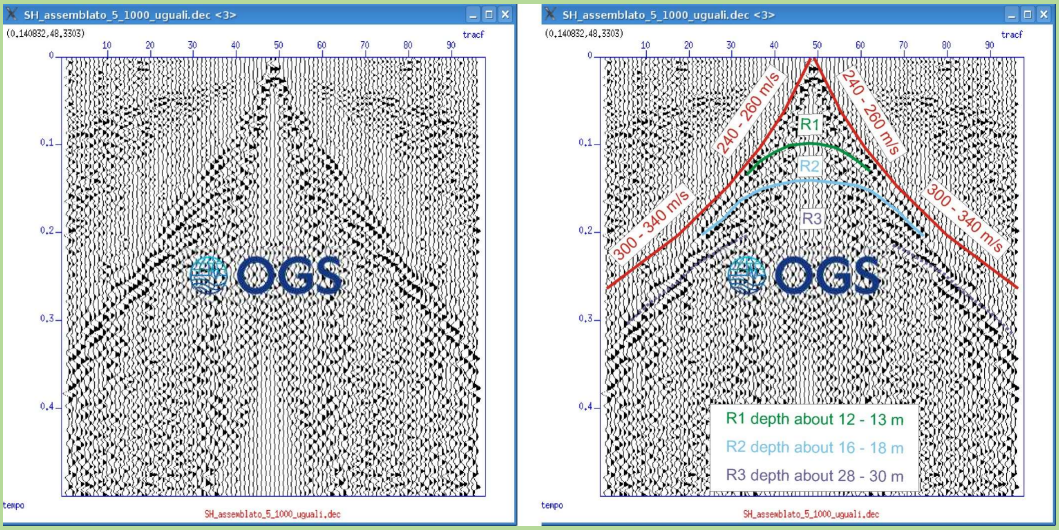
Quanto vicini alla superficie?

Bedrock (calcari) con copertura alluvionale

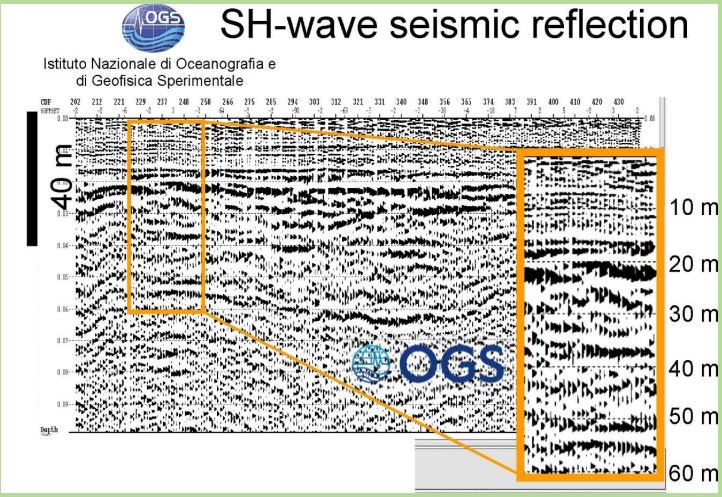


Quanto vicini alla superficie?

Sedimenti alluvionali



Risoluzione onde S ed informazioni vicino alla superficie



Dato propedeutico all'ubicazione di trincee per studi paleosismologici

Risoluzione metrica, intervallo di esplorazione: 7 – 60 m

Applicabilità metodo sismico a riflessione

La riflettività sismica dipende dalla risposta del singolo sito

Punti chiave:

- esiste un contrasto di impedenza acustica?
- rumore coerente ed incorente consentono di vedere le riflessioni?

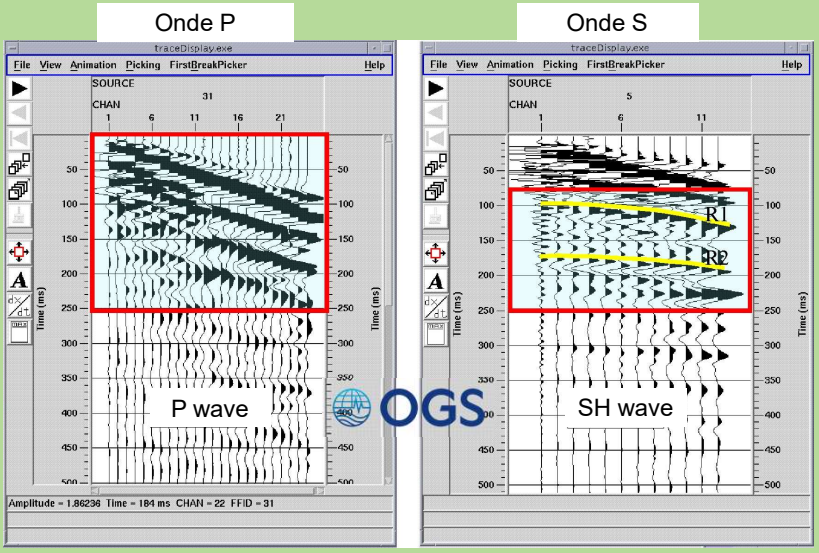
Conoscenza del metodo ed esperienza aiutano ma

"Prova in campo/walkaway test" è fondamentale *

* Conseguenze aspetti contrattuali

Applicabilità metodo sismico a riflessione

Dipendenza dal sito



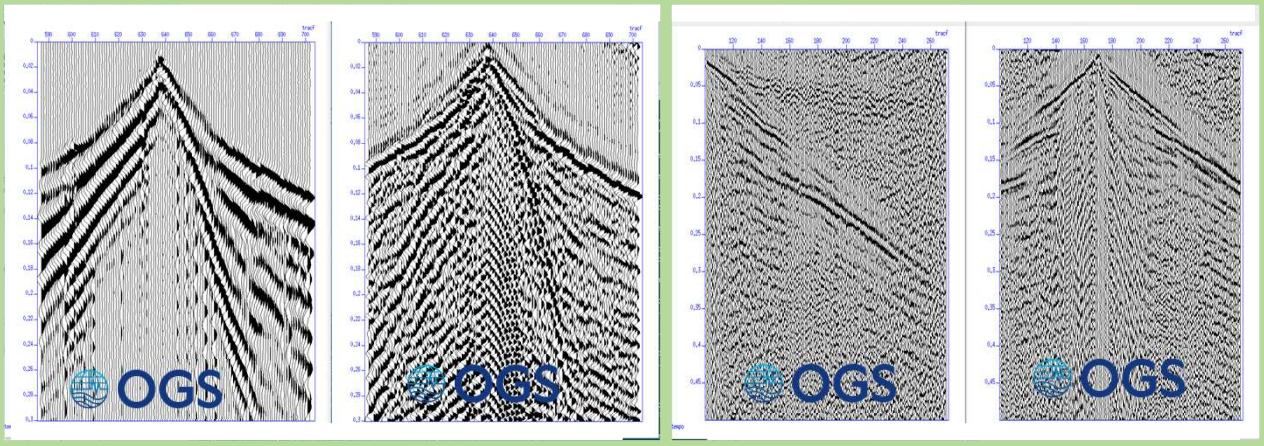
(Forlin, 2010)

Applicazioni sismica a riflessione

Onde S in due siti molto vicini

No riflessioni

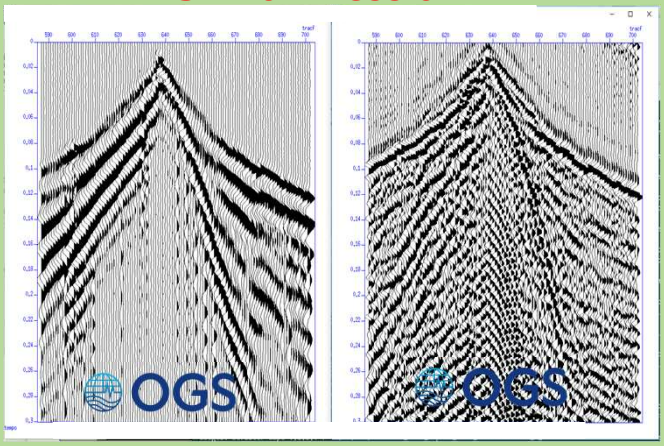
Riflessioni presenti



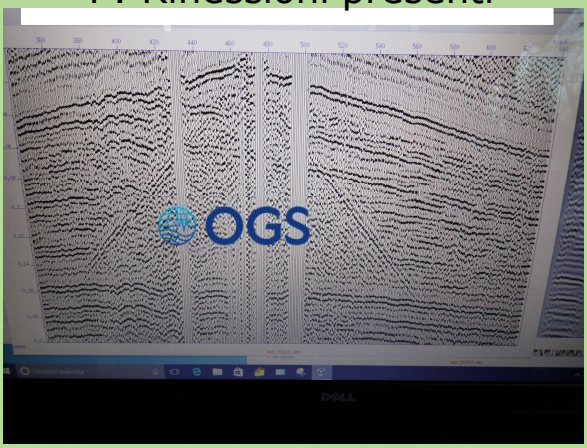
Applicazioni sismica a riflessione

In questo sito: onde S no ma onde P sì

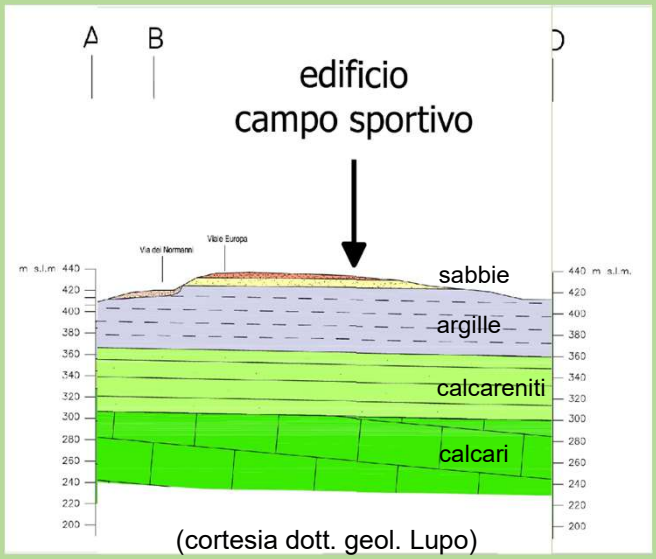
S: No riflessioni



P: Riflessioni presenti



Integrazione dati: onde S + onde P



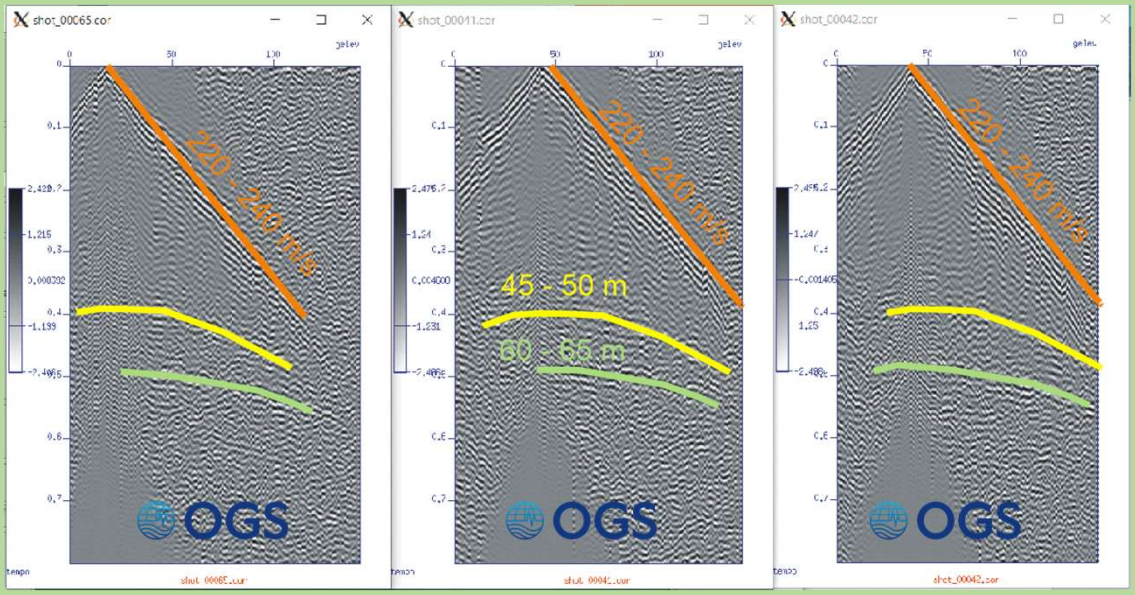
(cortesia dott. geol. Lupo)

Progetto Smart Cities

Sito test Matera

- 0 – 10 m sabbie
- 10 – 70 m argille
- 70 – 130 m calcareniti
- 130 - … m calcari

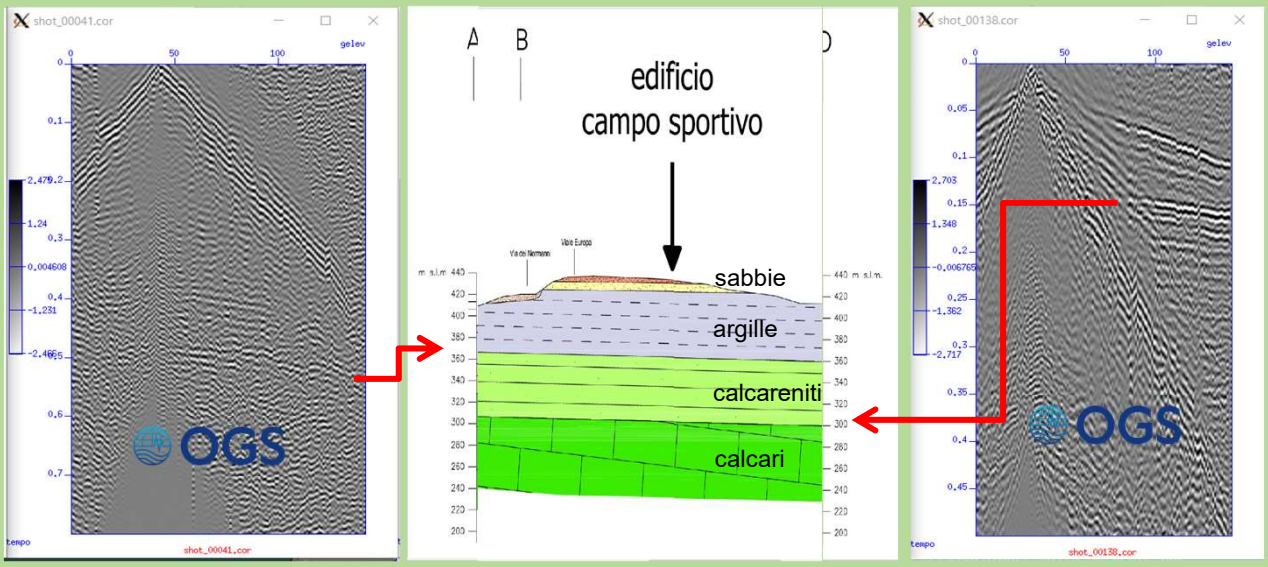
Sito test Matera: onde S



Integrazione dati: onde S + onde P

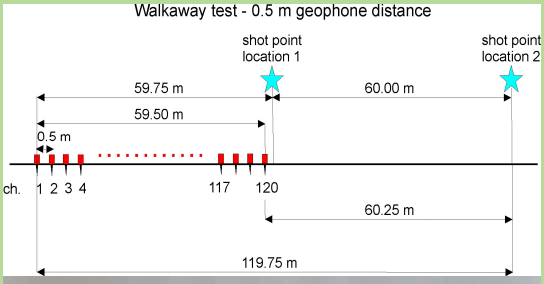
Riflessione onde S

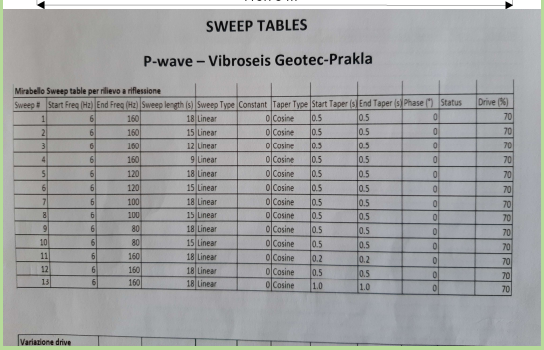
Riflessione onde P



Test pre-rilievo

- Geometrie acquisizione
- Sensori
- Parametri acquisizione
- Sorgente





SWEEP TABLES

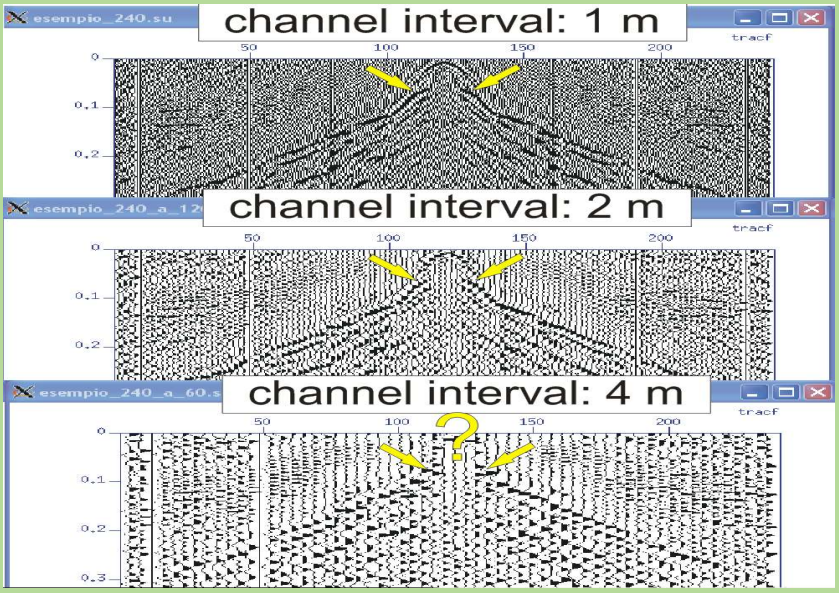
P-wave – Vibroseis Geotec-Prakla

Mirabello Sweep table per rilievo a riflessione

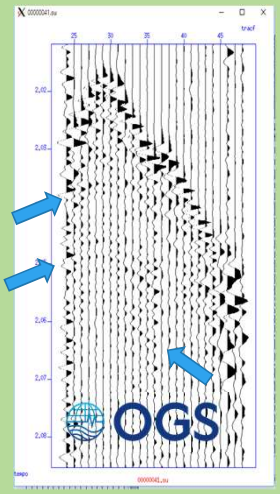
Sweep #	Start Freq (Hz)	End Freq (Hz)	Sweep length (s)	Sweep Type	Constant	Taper Type	Start Taper (s)	End Taper (s)	Phase (°)	Status	Drive (%)
1	6	160	18	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
2	6	160	15	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
3	6	160	12	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
4	6	160	9	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
5	6	120	18	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
6	6	120	15	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
7	6	100	18	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
8	6	100	15	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
9	6	80	18	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
10	6	80	15	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
11	6	160	18	Linear	0	Cosine	0.2	0.2	0		70
12	6	160	18	Linear	0	Cosine	0.5	0.5	0		70
13	6	160	18	Linear	0	Cosine	1.0	1.0	0		70

Variazione drive

Scelta parametri ottimali



Nuove idee/approcci?



Costi sismica a riflessione

Tecnica un tempo onerosa ora molto meno

Acquisizione

- sorgenti non invasive
- acquisitori
- landstreamer

Elaborazione

- PC
- molti software disponibili (anche freeware e open source)

Esempio contratto ad hoc per rilievi sismici

OGS

Field test & Feasibility study

NO.	WORK ITEM	REMARKS	QUANTITY	UNIT COST (EUROS)	COST (EUROS)
1	Mobilization and Demobilization of all personnel and equipment	Subcontractor to obtain own accommodations and to arrange for own travel	1		
2	On-site pre-survey tests	For each site	3		
5	On-field QC, data analysis and report preparation		1		
6	Field Standby (due to weather, etc.)	Provide Hourly Standby Rate	Hourly		
7	Project Management		1		
				Total for on-site tests and data analysis	

Survey

NO.	WORK ITEM	REMARKS	QUANTITY	UNIT COST (EUROS)	COST (EUROS)
1	Mobilization and Demobilization of equipment	Subcontractor to arrange for own travel	1		
2	Mobilization and Demobilization of all personnel	Subcontractor to obtain to arrange for own travel and accommodation	1		
3	SH-wave HRS Surveys to define subsurface geological structure-	Assume up to 2 Km of survey lines	Approx 1.0 Km		
4	Data Processing				
5	On-field QC, data analysis and report preparation		1		
6	Field Standby (due to weather, etc.)	Provide Hourly Standby Rate	Hourly		
7	Project Management		1		
				Total for 1.0 Km SH-wave HRS acquisition, QC and data processing	

Esempio contratto – Trial test

OGS

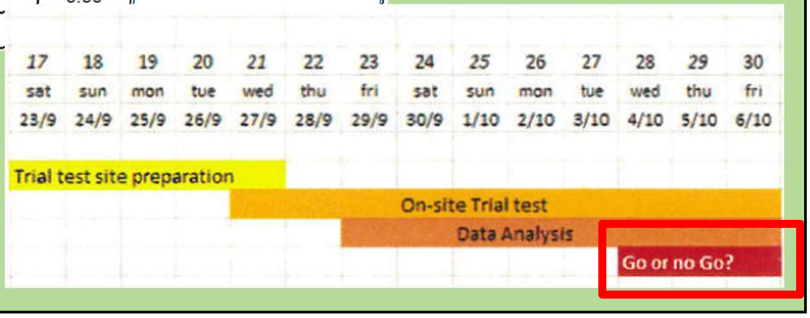
To achieve the depth and resolution requirements defined by has developed an approach that focuses on significantly enhancing the signal-to-noise ratio, the key parameter for producing high-quality, HRS data. To ensure the prescribed level of resolution for the onshore investigation, a comprehensive Pre-Survey Trial has been developed that considers P-wave and SH-wave (if shallow resolution is necessary) analyses, multiple impulse and vibratory seismic sources, and different types of sensors to define the best acquisition configuration required to achieve the Project objective. The P-wave data allow penetration to about 400 m to 600 m, wavelength of about 10 m (i.e., a resolution of 2.5 m using lambda/4 criterion) and shallower information from about 20 m to 25 m below ground surface: SH-wave data allow for penetration of about 200 m to 300 m, wavelength of about 4 m to 5 m (i.e., a resolution of 1 m to 1.25 m using lambda/4 criterion) and shallower information from about 8 to 10 m below ground surface. These expectations will be evaluated in the trial phase data analysis.

The configuration and parameters for the main execution survey will be finalized during the Pre-Survey Trial. This approach has been proven successful in areas with thick soft sediment similar to the Site.

Contratti ad hoc per geofisica

OGS

LN	ITEM #	DESCRIPTION / SCOPE of SERVICES	QTY	UNIT PRICE	TOTAL
1		Meeting support	1.00		
2		Onshore mobilization	1.00		
3		Onshore trial general costs	1.00		
4		Onshore trial positional control & data acquisition	150.00		
5		Onshore trial data processing & analysis	150.00		
6		Onshore main study positional control & data acquisition	900.00		
7		Onshore main study data processing & analysis	900.00		
8		Onshore reporting	1.00		
9		Equipment stand by costs	0.00		
10		Field staff stand by costs			



Esperienze OGS

OGS

Progetti/servizi di sismica di esplorazione finalizzati a supportare la valutazione del rischio sismico

1. Modelli geologico/geofisici (Vs e Vp + geometrie)
2. "immagine" del sottosuolo > ubicazione faglie, faglie capaci

Approccio per la pianificazione di indagini geofisiche

- Definire il problema che si vuole risolvere
- Conoscere il contesto dove si intende operare (geologico e logistico)
- Integrare con altri dati (i.e. geologici, geotecnici, remote sensing)
- Scegliere il/i metodo/i più appropriato/i
- Definire i parametri di acquisizione ad hoc

Contesti geologici "difficili" Microzonazione 3° livello

- Bacini sedimentari con spessa coltre – Pianura Padana
- Aree con variazioni laterali – i.e. valli alpine

→ Ambienti sfidanti per i metodi geofisici

→ Sismica a riflessione può dare un importante contributo

Effetti di sito – bacini sedimentari

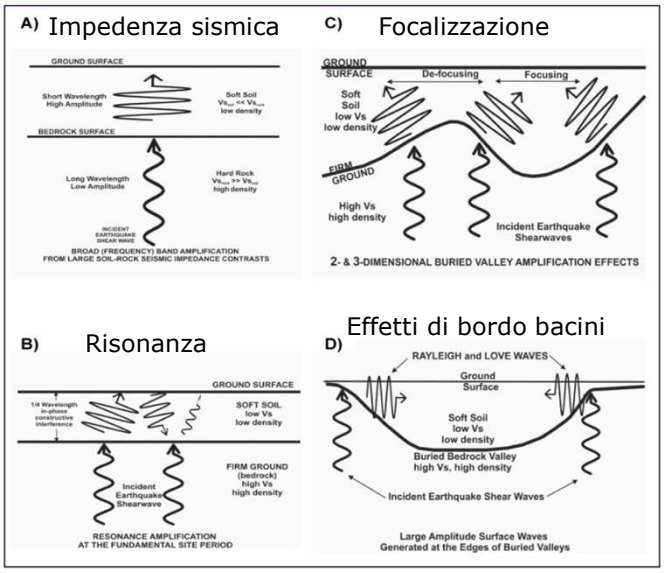


Fig. 2-1: Potential site-effects occurring over a sediment-filled basin: A) seismic impedance; B) resonance; C) focusing/defocusing; and D) basin-edge effects (after Hunter et al., 2010).

Contesti "difficili" - Integrazione metodi

HVSR e sismica a riflessione "vedono" la stessa cosa?

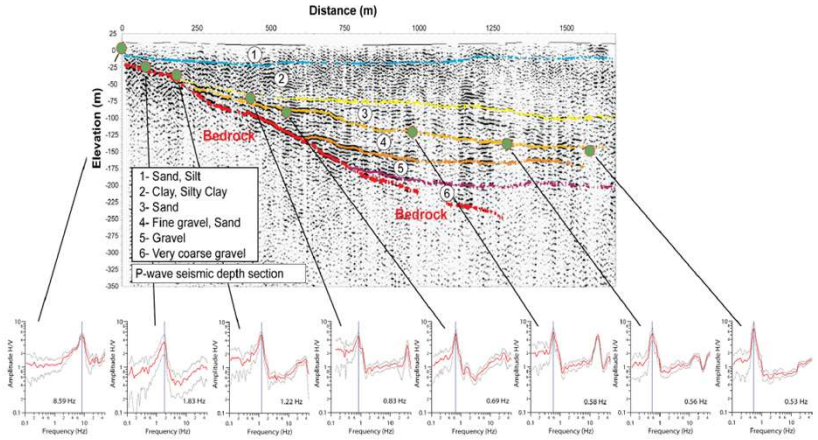
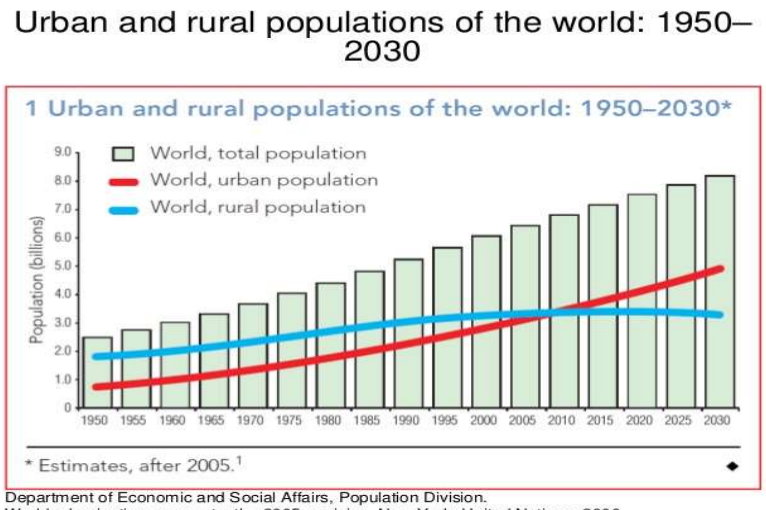


Figure 2.3.1-2. H/V spectral ratios obtained across part of a buried valley, Charlevoix region (Quebec). Depths corresponding to the peak of lowest frequency on H/V curves have been estimated from S-wave profiles (not shown here), and positioned (green circles) on a landstreamer P-wave seismic section. The interface controlling the H/V main peak is the top of bedrock for the three leftmost sites, and the top of sedimentary unit 4 for the other sites (landstreamer data processing and interpretation by A. Pugin, Geological Survey of Canada).

(Motaziedan, 2010)

Urbanizzazione & bacini sedimentari

55% popolazione vive in città costruite su bacini sedimentari



Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
World urbanization prospects: the 2005 revision. New York: United Nations, 2006.

Ferrara: sismica a riflessione con onde P

Progetto Smart Cities CLARA

- Sorgente vibrazionale P (MiniVib)
- Sweep 8-140 Hz 16 s
- Geofoni V 6 x 10 Hz pattern lineare
- Lunghezza linea:2630 m
- Intertraccia: 10 m
- Energizzazione: ogni 20 m

Ferrara: sismica a riflessione con onde P

Sfide della geofisica in ambiente urbano

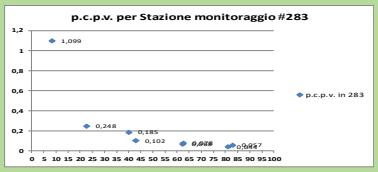
Forte presenza rumore antropico

Acquisizione notturna

Strumenti/ parametri acquisizione ad hoc

Riduzione interferenza

Monitoraggio vibrometrico



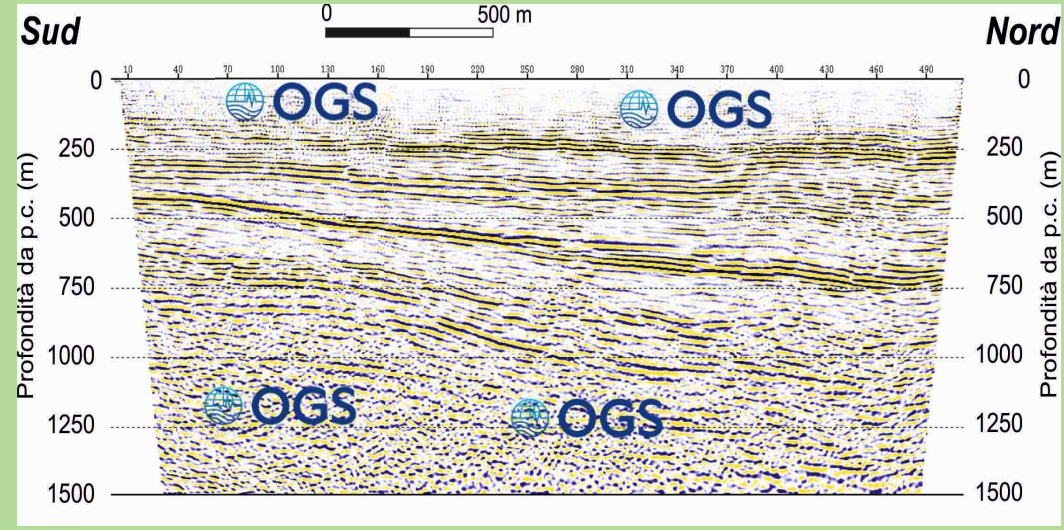
Logistica e burocrazia

Coinvolgimento autorità per supporto autorizzativo/sensibilizzazione

OGS

Ferrara: sismica a riflessione con onde P

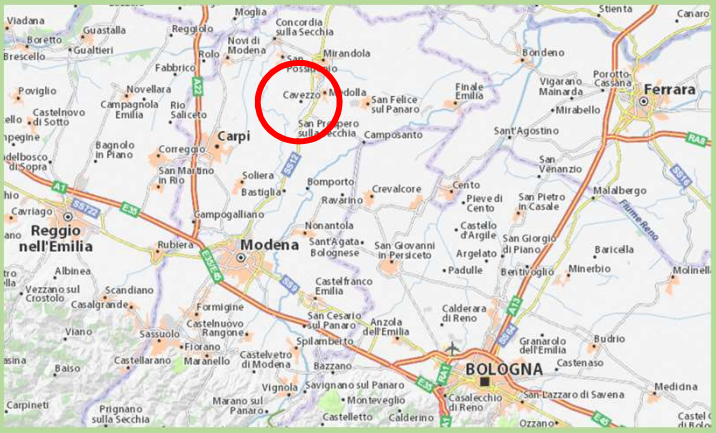
Sezione stack in profondità

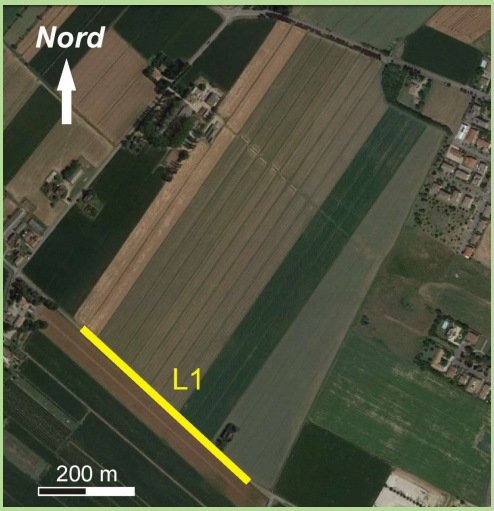


OGS

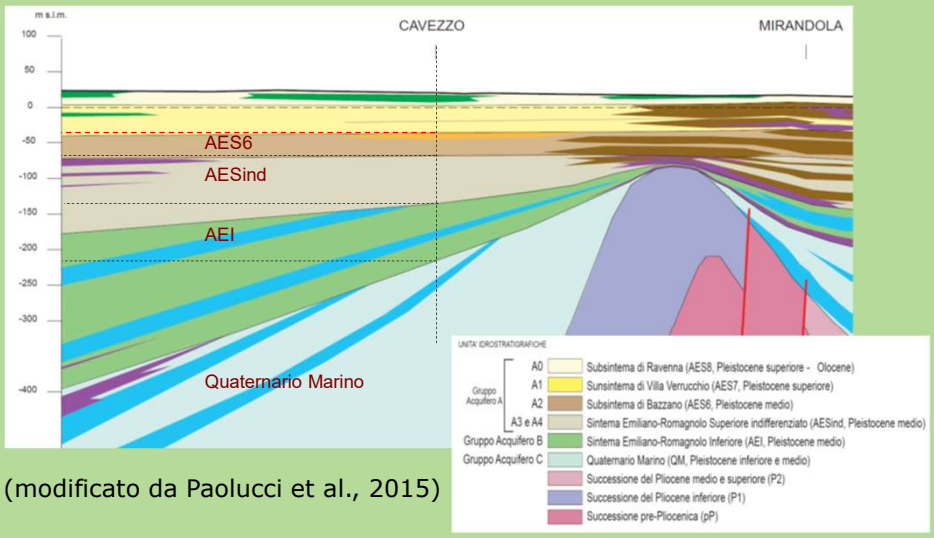
(Petronio et al., 2021, in submission)

Pianura Padana - Cavezzo





Pianura Padana - Cavezzo



(modificato da Paolucci et al., 2015)

Pianura Padana - Cavezzo

SH-wave line
- Lenght: 480 m
- Trace interval: 2 m
- Active channels: 240 – single geophone 14 Hz (Z)
- Source: MiniVib SH (10 – 120 Hz, 12 s, 1800 lb)
- Source interval: 4 m
- Source points: 120

P-wave line
- Lenght: 480 m
- Trace interval: 2 m
- Active channels: 240 – single geophone 40 Hz (Y)
- Source: MiniVib P mode (10 – 240 Hz, 12 s, 1800 lb)
- Source interval: 4 m
- Source points: 120

MiniVib SH-wave mode

Multichannel seismograph

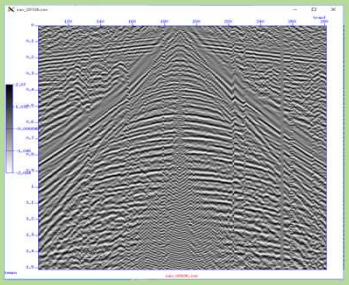
MiniVib P-wave mode

Horizontal geophone

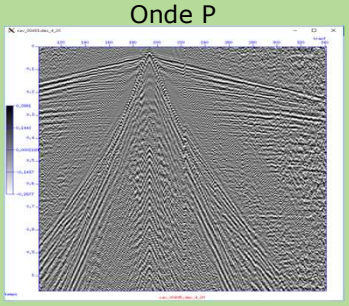
Data recording and field QC

Vertical geophones

Onde S

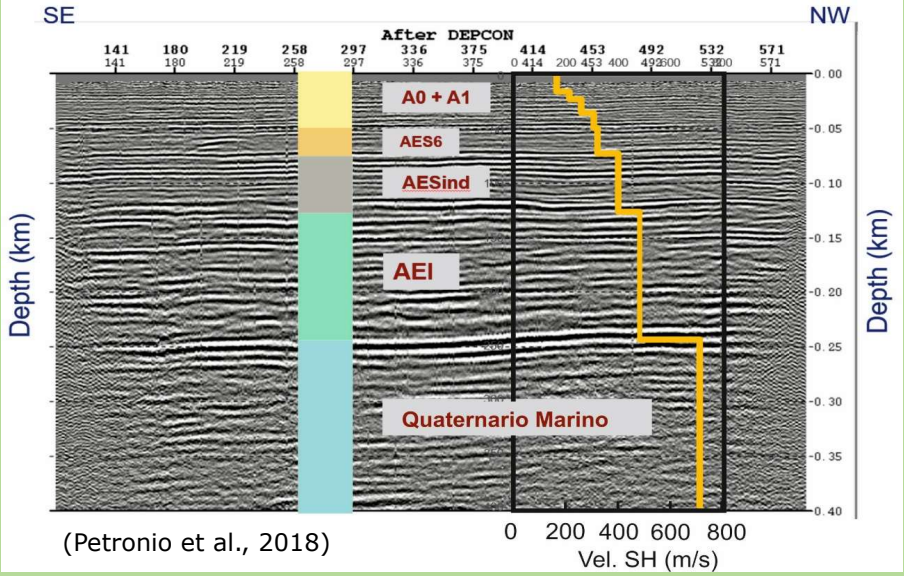


Onde P



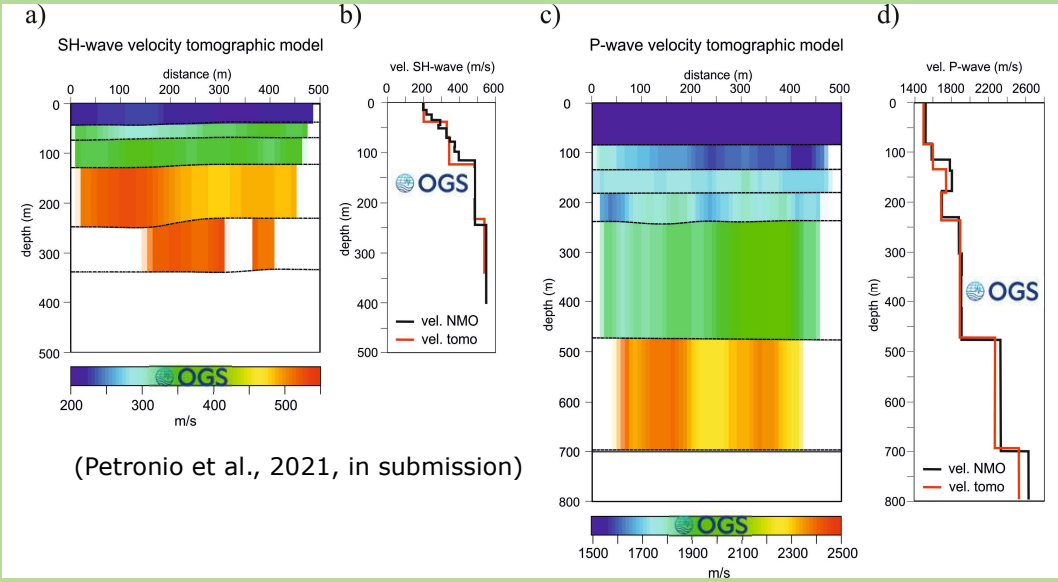
Attività svolta nell'ambito del progetto LIQUEFACT (Lai et al., 2020)

Cavezzo – sezione stack S



(Petronio et al., 2018)

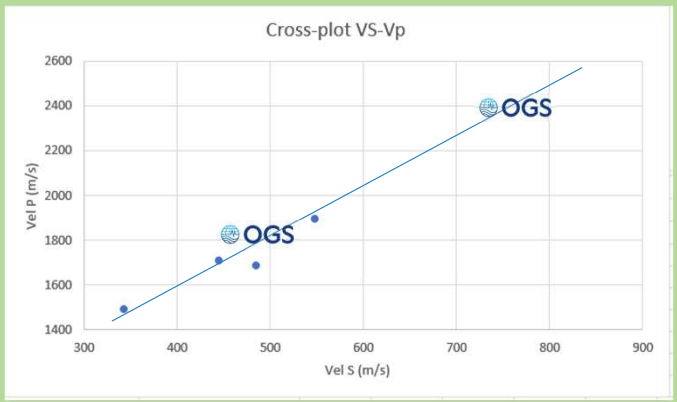
Pianura Padana – velocità sismiche

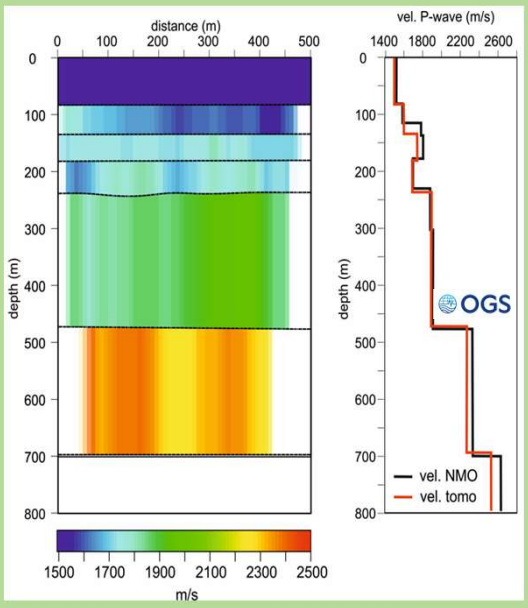


(Petronio et al., 2021, in submission)

Pianura Padana – velocità sismiche

Unit	Depth interval (m)	Vel S (m/s)	Vel P (m/s)	Poisson ratio	Mirabello Vel S (m/s)	Mirandola Vel S (m/s)
	0 - 15	199	na	na	116 - 200	158 - 213
	15 - 51	255	na	na	207 - 326	218 - 308
	51 - 88	343	1489	0,472	310 - 356	284 - 339
	88 - 170	445	1707	0,464	355 - 464	284 - 460
	170 - 244	485	1685	0,455	310 - 525	430 - 449
	244 - 475	548	1895	0,454		
	475 - 705	na	2261	na		
	705 - na	na	2520	na		

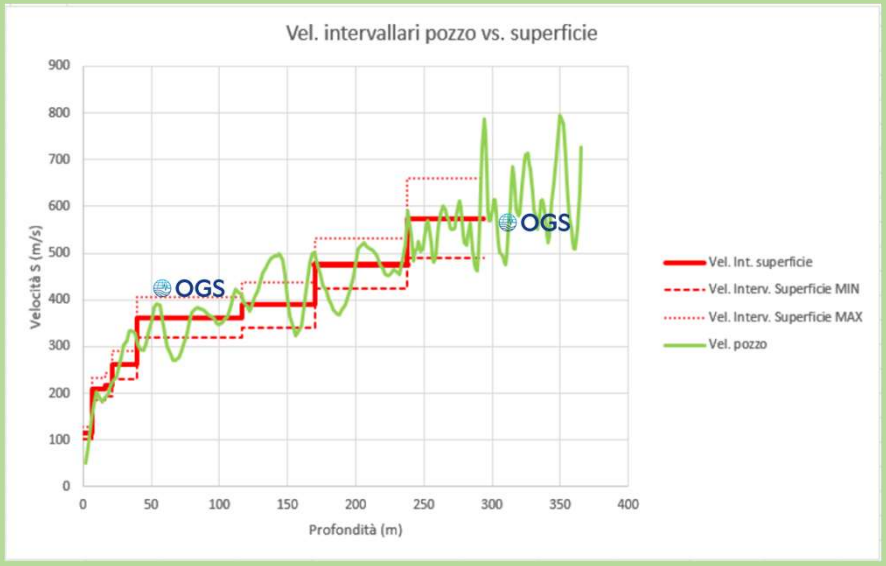




Sismica di pozzo

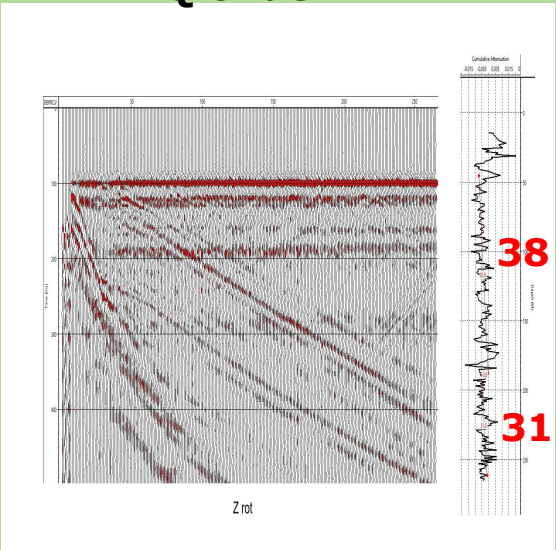
In collaborazione con dott. Minarelli (ora INGV)

Sismica di pozzo

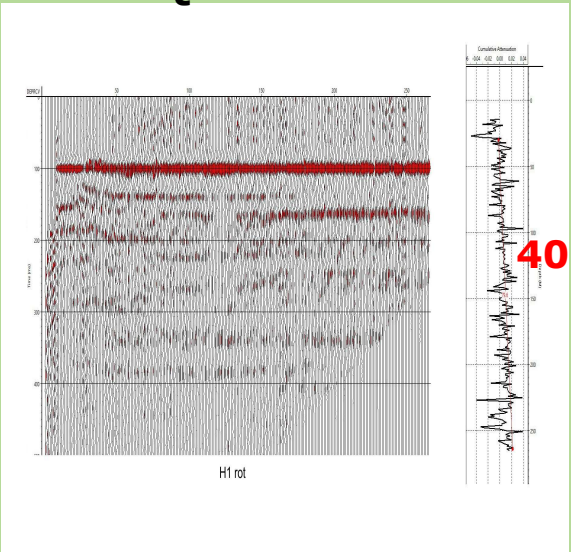


Q da dati di pozzo

Q onde P



Q onde S



Paludi - Alpago

Microzonazione sismica Comune di Alpago. Terzo livello di approfondimento D.G.R.V. n 1572 del 3 settembre 2013 e successive.
In collaborazione con dott. Marinoni e dott. Olivotto

Paludi - geologia

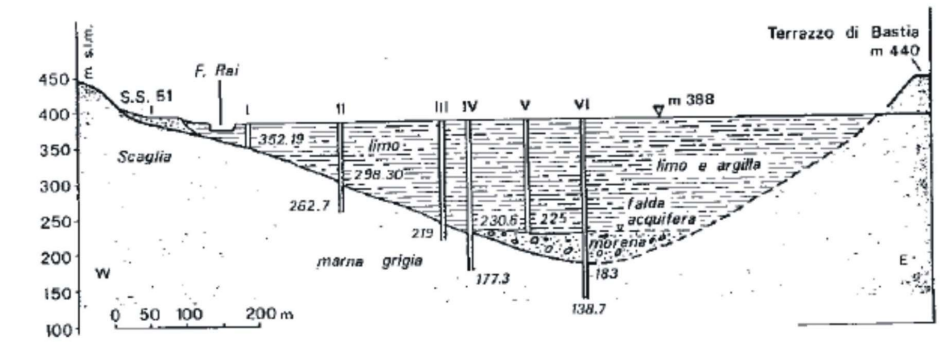
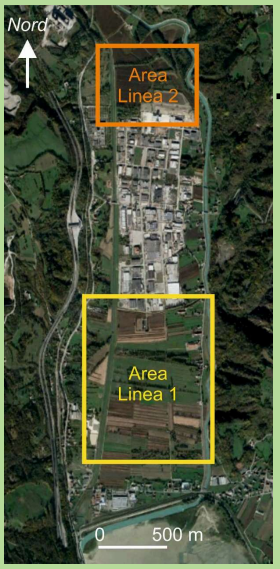
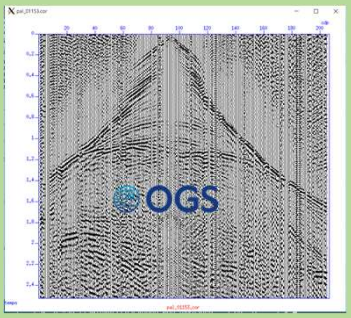
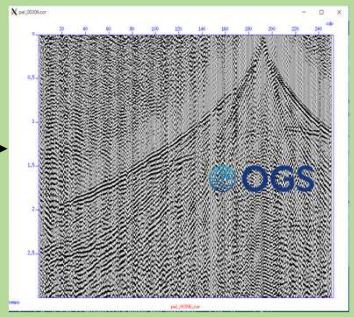


Fig. 5 - *Interpretazione geomorfologica dei sondaggi geognostici ICOS effettuati presso il lago di S. Croce (loc. La Secca)* (G.B. Pellegrini).

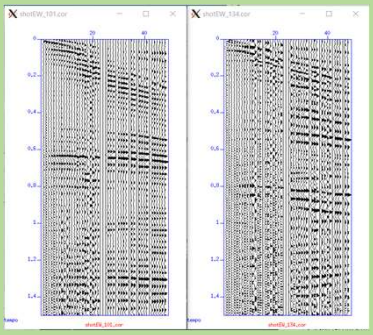
Paludi: qualità dato

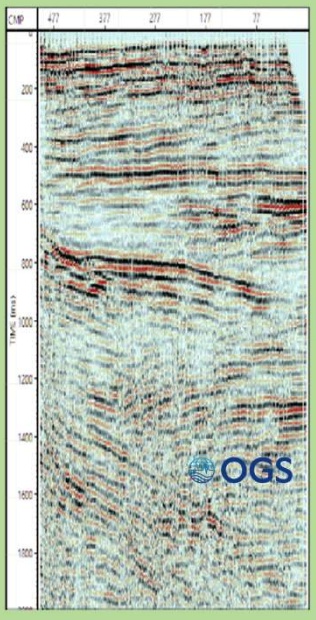


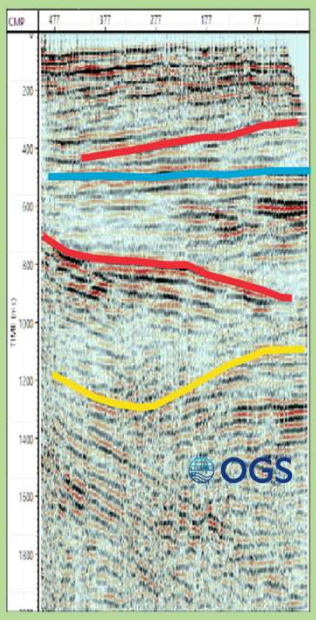




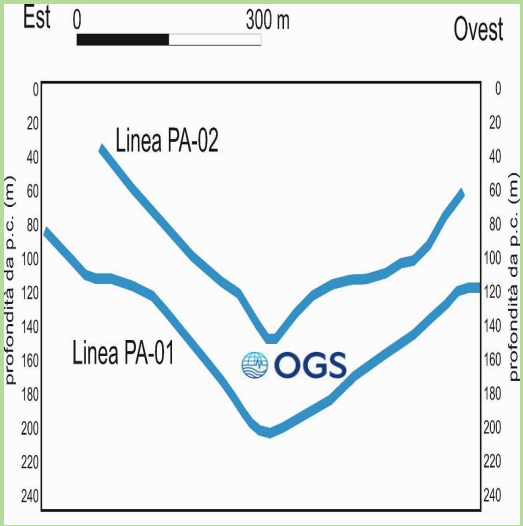
Paludi – dati landstreamer



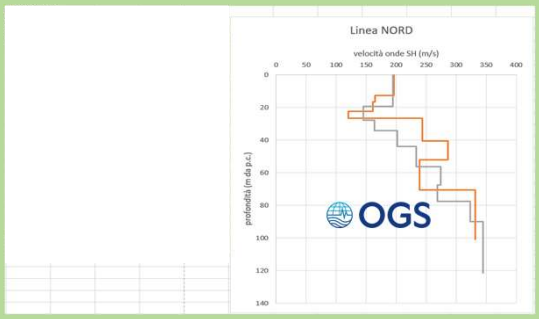


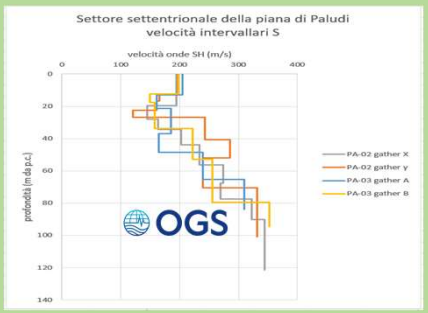


Paludi: geometrie e velocità



Profondità del substrato lapideo desunto dall'interpretazione del dato sismico a riflessione rispetto al piano campagna. La massima profondità in corrispondenza della linea PA-02 (settore settentrionale della piana di Paludi) si trova a 146 m al di sotto del piano campagna mentre a 188 m nel punto più profondo in corrispondenza della linea PA-01 (settore meridionale).



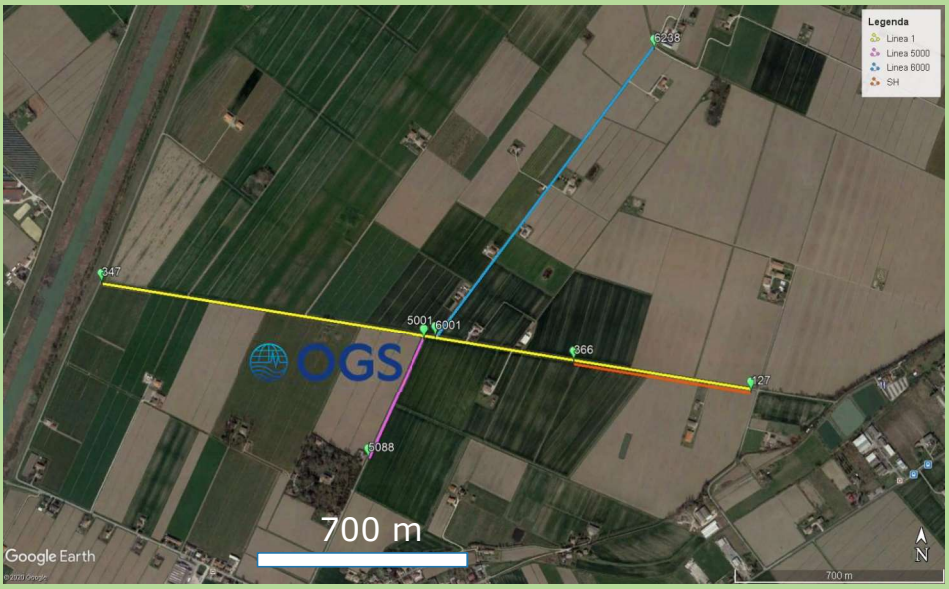


Test area epicentrale terremoto Emilia 2012

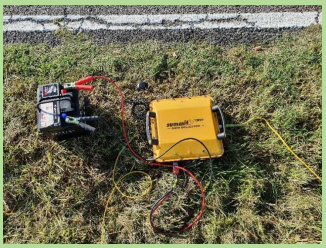
Acquisizione test

1) definire un modello di velocità onde S e P
2) testare 2 tipi di acquisitori sismici
3) valutare capacità penetrative/risoluzione sorgenti OGS

Mappa test



Test area epicentrale terremoto Emilia 2012



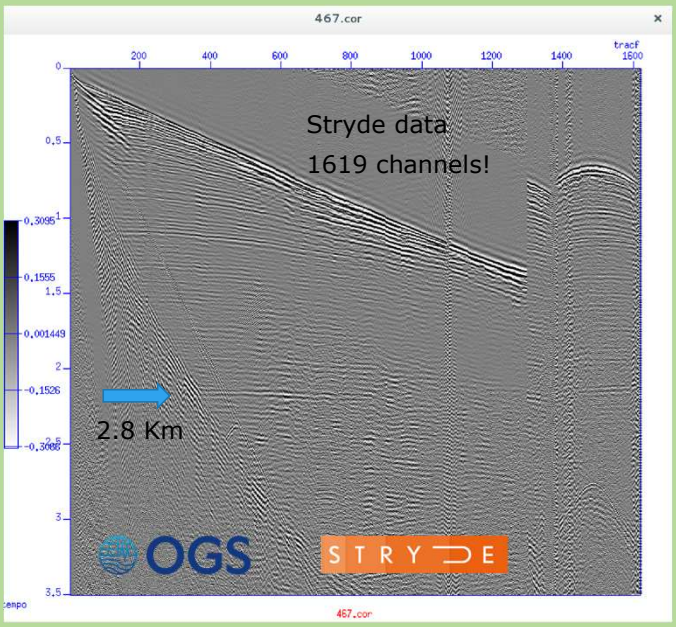
240 canali DMT X-one (wired+ wifi)

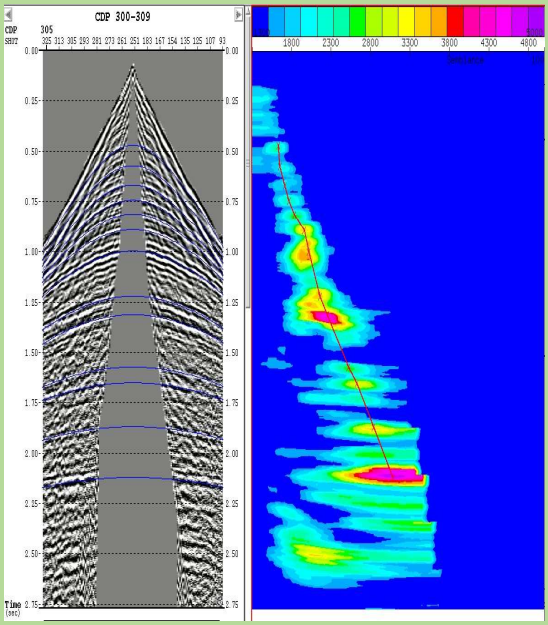
1620 nodi Stryde (autonomous)

OGS

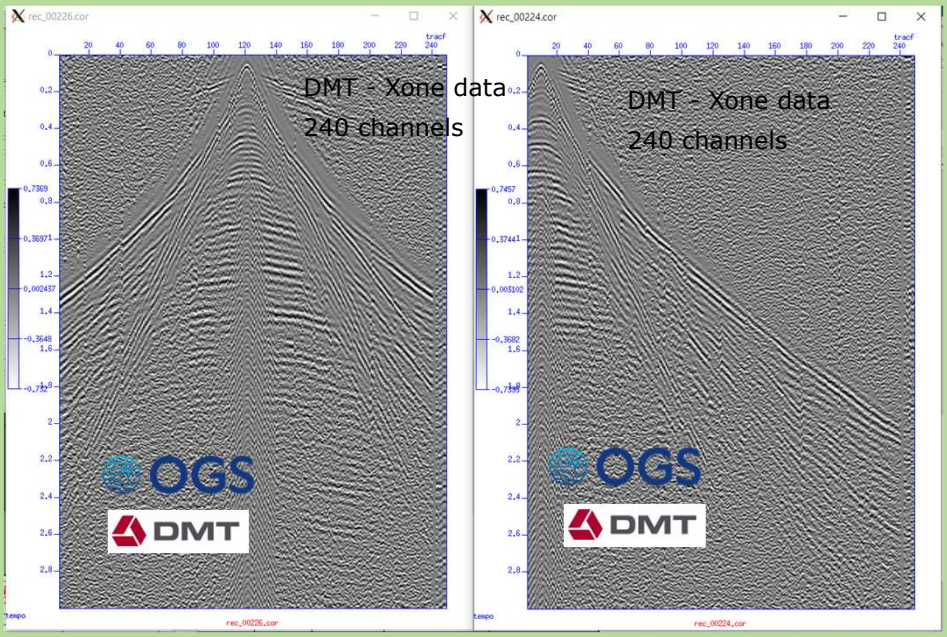
Mirabello: dati P (nodi sismici)

OGS





Mirabello: dati S



Conclusioni

- Necessità di modelli geofisici/immagini attendibili
- Problema non semplice (in certi contesti)
- Geofisica di esplorazione è un mezzo utile
- Necessario studio di fattibilità per un approccio corretto
- Miglioramento tecnologico (hardware/software) riduce i costi
- Sensibilizzazione della «committenza» sull'importanza di avere un'ottima conoscenza del sottosuolo e sulla possibilità di trovare forme contrattuali ad hoc per garantire prodotti geofisici migliori

Ringraziamenti

Ringrazio tutto l'uditorio per l'ascolto e per la pazienza

Colleghi OGS

Alessandro Affatato, Luca Baradello, Alfio Barbagallo, Rinaldo Belletti, Diego Cotterle, Michele Deponte, Giuseppe Falleti, Emiliano Gordini, Daniele Sorgo, Gino Cristofano, Massimo Lovo, Stefano Maffione, Valerio Pasciullo, sezione IRI, sezione CRS, sezione GEO

Ordine Geologi del Veneto

Università di Ferrara, Università di Padova, Università Pavia, Università di Udine, Eucentre Pavia, INGV

Comuni: Ferrara, Matera, Alpago, Terre del Reno, Cavezzo
Regione Emilia-Romagna

Lorenzo Petronio – OGS
lpetronio@inogs.it

Alcuni riferimenti bibliografici

https://www.researchgate.net/publication/342024486_An_inter-disciplinary_and_multi-scale_approach_to_assess_the_spatial_variability_of_ground_motion_for_seismic_microzonation_The_case_study_of_Cavezzo_municipality_in_Northern_Italy

https://www.researchgate.net/publication/338423549_Prospezioni_sismiche_a_riflessione_onde_SH_ad_alta_risoluzione_in_ambiente_urbano_a_supporto_della_pianificazione_territoriale_-_obiettivi_superficiali_100_m

https://www.researchgate.net/publication/338423054_Prospezioni_sismiche_in_ambiente_urbano_a_supporto_della_pianificazione_territoriale_-_parte_profonda

https://www.researchgate.net/publication/346977058_Deep_geophysical_investigation_in_urban_area_Ferrara_city_example

https://www.researchgate.net/publication/331807326_Detection_of_lateral_discontinuities_via_surface_waves_analysis_A_case_study_at_a_derelict_industrial_site

https://www.researchgate.net/publication/332572123_The_Undersea_Malta_-_Gozo_tunnel_project_Geophysical_investigations

https://www.researchgate.net/publication/338255383_Near-shore_geophysical_and_geotechnical_investigations_in_support_of_the_Trieste_Marine_Terminal_TMT_extension

https://www.researchgate.net/publication/338748363_The_Malta_-_Gozo_Tunnel_Project_onshore_borehole_and_surface_seismic_survey_in_support_to_the_geological_model_building