

COMMITTENTE	Gruppo Pirani PGD S.r.l.
LOCALITÀ	CAMAIORE (LU) Via Sterpi - via Fonda
OGGETTO	VARIANTE DI RIMODULAZIONE DELLA SCHEDA NORMA TR.4.2 DEL PIANO OPERATIVO COMUNALE CON CAMBIO DI DESTINAZIONE D'USO E CONTESTUALE RICHIESTA DI PIANO ATTUATIVO

SALVATO IL: 17/11/2025

Cotefa.ingegneri&architetti

Sede legale, amministrativa, operativa
25124 Brescia, via Cefalonia n. 70
tel. +39.030.220692 +39.030.2424177 fax +39.030.220655

Sede operativa
27100 Pavia, via Frank n. 11
tel. +39.0382.303999 fax +39.0382.1753916
e-mail cotefa@cotefa.com



TECNICO INCARICATO

DOTT. GEOL. LUCA NICCOLI

GRUPPO PIRANI PGD SRL
Via Solferino, 7
20121 MILANO (MI)
C. F. e P. IVA 01825340191



K:\23-11 CAMAIORE\23-11A EDIFICIO\PIANO ATTUATIVO\VARIANTE SCHEDA NORMA DOC

REV.	DESCRIZIONE REVISIONE	REDAZ.	DATA	CONTR.	DATA	APPROV.	DATA
0	PRIMA STESURA	L.N.	21/11/2024	L.N.	21/11/2024	L.N.	21/11/2024
1	RECEPIMENTO OSSERVAZIONI COMUNE E ENTI	L.N.	31/10/2025	L.N.	31/10/2025	L.N.	31/10/2025
2	--	--	--	--	--	--	--
3	--	--	--	--	--	--	--

<p>ELABORATO</p> <p>AII.05</p>	FASE						
	VARIANTE ALLA SCHEDA NORMA TR.4.2						
	DESCRIZIONE DISEGNO						
AREA a							INDAGINI GEOGNOSTICHE
SCALA	-	DATA	21/11/2024	PROT.	23-11	ARCH.GEN.	50721

LEGENDA SPECIFICHE TECNICHE PROVA PENETROMETRICA DINAMICA

DIVERSE TIPOLOGIE DI PENETROMETRI DINAMICI

La prova penetrometrica dinamica consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica (per tratti consecutivi δ , misurando il numero di colpi N necessari.

Elementi caratteristici del penetrometro dinamico sono i seguenti :

- peso massa battente M
- altezza libera caduta H
- punta conica : diametro base cono D , area base A (angolo di apertura α)
- avanzamento (penetrazione δ)
- presenza o meno del rivestimento esterno (fanghi bentonitici) .

Con riferimento alla classificazione ISSMFE (1988) dei diversi tipi di penetrometri dinamici (vedi tabella più sotto riportata) si rileva una prima suddivisione in quattro classi (in base al peso M della massa battente) :

DIVERSE TIPOLOGIE DI PENETROMETRI DINAMICI Classificazione ISSMFE dei penetrometri dinamici

Tipo	Sigla di riferimento	massa battente	prof.max indagine
Leggero	DPL (Light)	$M \div 10$	8 m
Medio	DPM (Medium)	$10 < M < 40$	20-25 m
Pesante	DPH (Heavy)	$40 < M < 60$	25 m
Super pesante	DPSH (Super Heavy)	$M > 60$	> 25 m

Per la visione delle caratteristiche tecniche dei penetrometri, si rimanda alla sezione EDITOR PENETROMETRI.

I PENETROMETRI dinamici in uso in Italia risultano essere i seguenti (non rientranti però nello Standard ISSMFE) :

- DINAMICO LEGGERO ITALIANO (DL-30) (MEDIO secondo la classifica ISSMFE)

massa battente M = 30 kg, altezza di caduta H = 0.20 m, avanzamento $\delta \approx 10$ cm, punta conica ($\alpha \approx 60-90^\circ$), diametro D = 35.7 mm, area base cono A = 10 cm² rivestimento / fango bentonitico : talora previsto

- DINAMICO LEGGERO ITALIANO (DL-20) (MEDIO secondo la classifica ISSMFE)

massa battente M = 20 kg, altezza di caduta H = 0.20 m, avanzamento $\delta \approx 10$ cm, punta conica ($\alpha \approx 60-90^\circ$), diametro D = 35.7 mm, area base cono A = 10 cm² rivestimento / fango bentonitico : talora previsto

- DINAMICO PESANTE ITALIANO (SCPT) (SUPERPESANTE secondo la classifica ISSMFE)

massa battente M = 73 kg, altezza di caduta H = 0.75 m, avanzamento $\delta \approx 30$ cm, punta conica ($\alpha \approx 60^\circ$), diametro D = 50.8 mm, area base cono A = 20.27 cm² rivestimento : previsto secondo precise indicazioni

- DINAMICO SUPERPESANTE (Tipo EMILIA)

massa battente M = 63.5 kg, altezza caduta H = 0.75 m, avanzamento $\delta \approx 20-30$ cm, punta conica ($\alpha \approx 60^\circ$), diametro D = 50.5 mm , area base cono A = 20 cm², rivestimento / fango bentonitico : talora previsto .

LEGENDA PARAMETRI GEOTECNICI SPECIFICHE TECNICHE

VALUTAZIONI STATISTICHE - CORRELAZIONI N / N_{spt}

Il sottosuolo indagato viene suddiviso in strati .

Previo definizione della profondità di ciascuno strato , il programma effettua (con riferimento al numero di colpi N) una serie di elaborazioni statistiche dei dati in memoria, valutando :

valore minimo m , massimo Max , media M, scarto quadratico medio s, valore medio/minimo $(M+m)^{1/2}$

media-scarto quadratico medio (M-s)

Ciò considerato , si potrà adottare il valore caratteristico VCA per N più adatto , a seconda delle esigenze, impostando uno dei valori elaborati sopracitati o un valore a scelta.

Successivamente , con riferimento al valore caratteristico assunto per il numero di colpi N , si potrà avviare un tentativo di correlazione con il numero di colpi N_{spt} della prova SPT : $N_{spt} = \beta N$ [ove per il coefficiente β si potrà introdurre un valore sperimentale a piacere (vedi note illustrative), ovvero il coefficiente teorico di energia β_t fornito dal programma] .

VALUTAZIONE RESISTENZA DINAMICA E COEFFICIENTE DI ENERGIA

La resistenza alla punta dinamica qcd viene comunemente valutata in base alla formula Olandese :

$$qcd = (M^2 H) / [A e (M + P)] \text{ ove :}$$

N = n. colpi per avanzamento δ qcd = resist.dinam.punta [area A] M = massa battente [altezza caduta H]

e = avanzamento per colpo = δ/N P = peso tot. sistema battuta e aste ,

ovvero in base alla formula semplificata :

$$qcd' = (M H) / (A e) = (M H) N / (A \delta) = Q N ,$$

ove : $Q = (M H) / (A \delta)$ = energia specifica teorica per colpo .

Ciò considerato, volendo riferire la prova in esame (N,Q) alla prova SPT (N_{spt},Q_{spt}),

dall'uguaglianza dei valori di resistenza dinamica relativi alle due prove, si ricava teoricamente :

$$qcd' = Q N = Q_{spt} N_{spt} \Rightarrow N_{spt} = N [Q/Q_{spt}] = \beta N ,$$

ove il rapporto $\beta_t = Q/Q_{spt}$ viene definito coefficiente teorico di energia della prova in esame , relativamente alla prova SPT (Q_{spt} = 7.83 kg/cm² = 0.768 MPa) per M = 63.5 kg, H = 0.75 m, D = 50.8 mm, A = 20.27 cm², d = 0.30 m) .

Le scelte litologiche vengono effettuate in base al valore del numero dei colpi SPT equivalente prevedendo altresì la possibilità di casi dubbi :

N_{spt} -> Dr DENSITA' RELATIVA (Terreni granulari) - TERZAGHI & PECK (1948-1967)

N_{spt} -> ϕ' ANGOLO DI ATTRITO EFFICACE (Terreni granulari) - PECK-HANSON-THORBURN (1953-1974)

N_{spt} -> E' MODULO DI DEFORMAZIONE DRENATO (Terreni granulari) - D'APPOLONIA e altri (1970)

N_{spt} -> Cu COESIONE NON DRENATA (Terreni coesivi) - TERZAGHI & PECK (1948-1967)

N_{spt} -> Y PESO DI VOLUME

TERRENI GRANULARI (Terzaghi-Peck 1948/1967) [e.max = 1 e.min = 1/3 G = 2.65]

TERRENI COESIVI (Bowles 1982, Terzaghi-Peck 1948/1967) [p.specifico G = 2.70]

qcd -> Qd CAPACITA' PORTANTE DINAMICA Herminier, Tchong & Lebeque(1965)

F.L. = accelerazione al suolo che può causare liquefazione (terreni granulari)

(g = accelerazione gravità)(Seed & Idriss 1971 - Sirio 1976) [correlazioni : (Amax/g)]

Vs = velocità di propagazione delle onde sismiche (Iyisan 1996)

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI	DIN	1
	Riferimento	029-2024

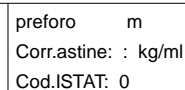
Committente	Pironi Group	U.M.:	kg/cm²	Data esec.	11/10/2024
Cantiere	Via Sterpi	Pagina	1		
Località	camaiole	Elaborato		Falda	Non rilevata

H m	asta n°	punta colpi	riv colpi	qcd kg/cm²	H m	asta n°	punta colpi	riv colpi	qcd kg/cm²
0.20	1	54		595.4					
0.40	1	38		419.0					
0.60	1	11		121.3					
0.80	1	11		121.3					
1.00	2	7		72.4					
1.20	2	4		41.3					
1.40	2	5		51.7					
1.60	2	4		41.3					
1.80	3	8		82.7					
2.00	3	15		145.9					
2.20	3	14		136.2					
2.40	3	13		126.5					
2.60	3	12		116.7					
2.80	4	11		101.1					
3.00	4	12		110.3					
3.20	4	15		137.8					
3.40	4	17		156.2					
3.60	5	16		147.0					
3.80	5	16		139.3					
4.00	5	26		226.3					
4.20	5	24		208.9					
4.40	5	23		200.2					
4.60	6	26		215.0					
4.80	6	24		198.5					
5.00	6	22		181.9					
5.20	6	26		215.0					
5.40	7	50		413.4					

H = profondità L1 = asta L2 = punta L3 = riv	qcd = Resistenza dinamica punta
---	---------------------------------

029-2024

Falda	Non rilevata
-------	--------------



PROVA PENETROMETRICA DINAMICA SUDDIVISIONE GEOTECNICA	DIN	1
	Riferimento	029-2024

Committente	Pironi Group	U.M.:	kg/cm²	Data esec.	11/10/2024
Cantiere	Via Sterpi	Pagina	1		
Località	camaiole	Elaborato		Falda	Non rilevata

PARAMETRI GENERALI												
n°	profondità m	statistica	VCA colpi	β -	Nspt colpi	qcd kg/cm²	qc kg/cm²	Vs m/sec	G kg/cm²	Q kg/cm²	natura	descrizione
1	0.00 : 0.80	Media	29	1.51	43	314	283	131	243	15.71	Coes./Gran.	
2	0.80 : 1.80	Media	6	1.51	8	58	52	112	63	2.89	Coes./Gran.	
3	1.80 : 5.40	Media	20	1.51	30	177	166	188	182	8.82	Coes./Gran.	

			NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE						
n°	profondità m	Nspt colpi	Cu kg/cm²	Ysat t/m³	W %	e -	Mo kg/cm²	Dr %	ø °	E' kg/cm²	Ysat t/m³	Yd t/m³	Mo kg/cm²	Liq. -
1	0.00 : 0.80	43	2.69	2.10	20.20	0.55	116	78	39	523	2.11	1.79	488	- - -
2	0.80 : 1.80	8	0.50	1.87	34.98	0.94	41	28	29	253	1.91	1.46	161	- - -
3	1.80 : 5.40	30	1.88	2.10	20.20	0.55	90	65	36	423	2.05	1.69	377	- - -

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI	DIN	2
	Riferimento	029-2024

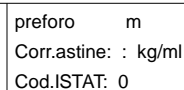
Committente	Pironi Group	U.M.:	kg/cm²	Data esec.	11/10/2024
Cantiere	Via Sterpi	Pagina	1	Falda Non rilevata	
Località	camaiole	Elaborato			

H m	asta n°	punta colpi	riv colpi	qcd kg/cm²	H m	asta n°	punta colpi	riv colpi	qcd kg/cm²
0.20	1	25		275.6					
0.40	1	17		187.4					
0.60	1	6		66.2					
0.80	1	2		22.1					
1.00	2	2		20.7					
1.20	2	1		10.3					
1.40	2	2		20.7					
1.60	2	3		31.0					
1.80	3	2		20.7					
2.00	3	2		19.5					
2.20	3	1		9.7					
2.40	3	2		19.5					
2.60	3	3		29.2					
2.80	4	3		27.6					
3.00	4	3		27.6					
3.20	4	5		45.9					
3.40	4	5		45.9					
3.60	5	4		36.8					
3.80	5	5		43.5					
4.00	5	3		26.1					
4.20	5	4		34.8					
4.40	5	5		43.5					
4.60	6	10		82.7					
4.80	6	18		148.8					
5.00	6	26		215.0					
5.20	6	20		165.4					
5.40	7	18		148.8					
5.60	7	31		244.1					
5.80	7	33		259.9					
6.00	7	28		220.5					
6.20	7	30		236.3					
6.40	8	41		308.2					
6.60	8	50		375.9					

H = profondità L1 = asta L2 = punta L3 = riv	qcd = Resistenza dinamica punta
---	---------------------------------

029-2024

Falda	Non rilevata
-------	--------------



PROVA PENETROMETRICA DINAMICA SUDDIVISIONE GEOTECNICA	DIN	2
	Riferimento	029-2024

Committente	Pironi Group	U.M.:	kg/cm²	Data esec.	11/10/2024
Cantiere	Via Sterpi	Pagina	1		
Località	camaiole	Elaborato		Falda	Non rilevata

PARAMETRI GENERALI												
n°	profondità m	statistica	VCA colpi	β -	Nspt colpi	qcd kg/cm²	qc kg/cm²	Vs m/sec	G kg/cm²	Q kg/cm²	natura	descrizione
1	0.00 : 0.60	Media	16	1.51	24	176	159	102	153	8.82	Coes./Gran.	
2	0.60 : 4.40	Media	3	1.51	5	28	26	118	43	1.41	Coes./Gran.	
3	4.40 : 6.60	Media	28	1.51	42	219	197	216	239	10.93	Coes./Gran.	

			NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE						
n°	profondità m	Nspt colpi	Cu kg/cm²	Ysat t/m³	W %	e -	Mo kg/cm²	Dr %	Ø °	E' kg/cm²	Ysat t/m³	Yd t/m³	Mo kg/cm²	Liq. -
1	0.00 : 0.60	24	1.50	2.07	21.91	0.59	77	56	34	376	2.01	1.63	326	- - -
2	0.60 : 4.40	5	0.31	1.83	39.28	1.06	33	18	28	230	1.88	1.41	127	- - -
3	4.40 : 6.60	42	2.63	2.10	20.20	0.55	114	77	39	515	2.11	1.78	480	- - -

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA LETTURE CAMPAGNA E VALORI TRASFORMATI	DIN	3
	Riferimento	029-2024

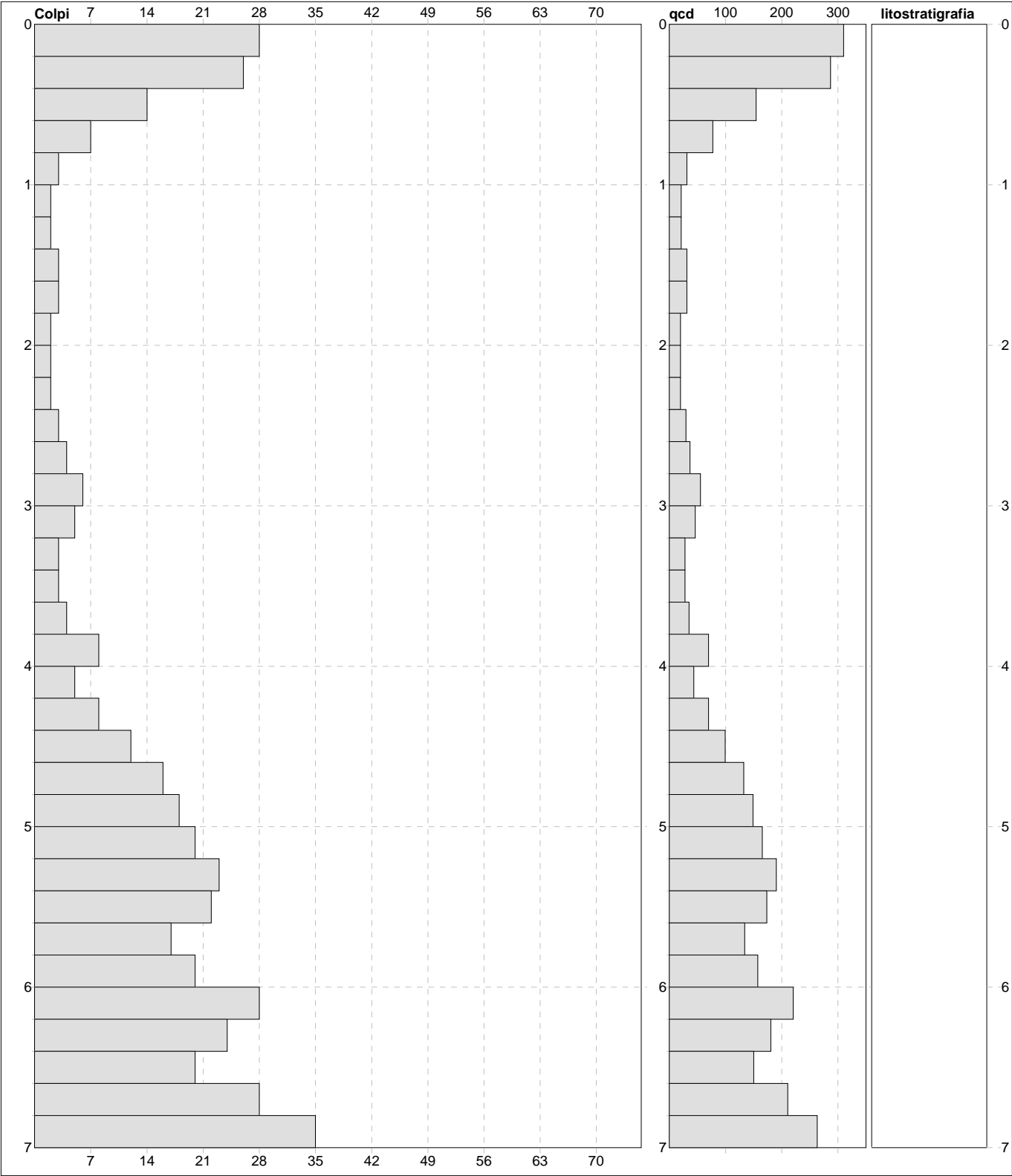
Committente	Pirani Group	U.M.:	kg/cm²	Data esec.	17/10/2024
Cantiere	Via Sterpi	Pagina	1	Falda Non rilevata	
Località	Camamiore	Elaborato			

H m	asta n°	punta colpi	riv colpi	qcd kg/cm²	H m	asta n°	punta colpi	riv colpi	qcd kg/cm²
0.20	1	28		308.7					
0.40	1	26		286.7					
0.60	1	14		154.4					
0.80	1	7		77.2					
1.00	2	3		31.0					
1.20	2	2		20.7					
1.40	2	2		20.7					
1.60	2	3		31.0					
1.80	3	3		31.0					
2.00	3	2		19.5					
2.20	3	2		19.5					
2.40	3	2		19.5					
2.60	3	3		29.2					
2.80	4	4		36.8					
3.00	4	6		55.1					
3.20	4	5		45.9					
3.40	4	3		27.6					
3.60	5	3		27.6					
3.80	5	4		34.8					
4.00	5	8		69.6					
4.20	5	5		43.5					
4.40	5	8		69.6					
4.60	6	12		99.2					
4.80	6	16		132.3					
5.00	6	18		148.8					
5.20	6	20		165.4					
5.40	7	23		190.2					
5.60	7	22		173.3					
5.80	7	17		133.9					
6.00	7	20		157.5					
6.20	7	28		220.5					
6.40	8	24		180.4					
6.60	8	20		150.3					
6.80	8	28		210.5					
7.00	8	35		263.1					

H = profondità L1 = asta L2 = punta L3 = riv	qcd = Resistenza dinamica punta
---	---------------------------------

PROVA PENETROMETRICA DINAMICA DIGRAMMI DI RESISTENZA E LITOLOGIA	DIN	3
	Riferimento	029-2024

Committente	Pirani Group	U.M.:	kg/cm²	Data esec.	17/10/2024
Cantiere	Via Sterpi	Scala:	1:35	Quota inizio : Falda Non rilevata	
Località	Camamiore	Pagina	1		
		Elaborato			



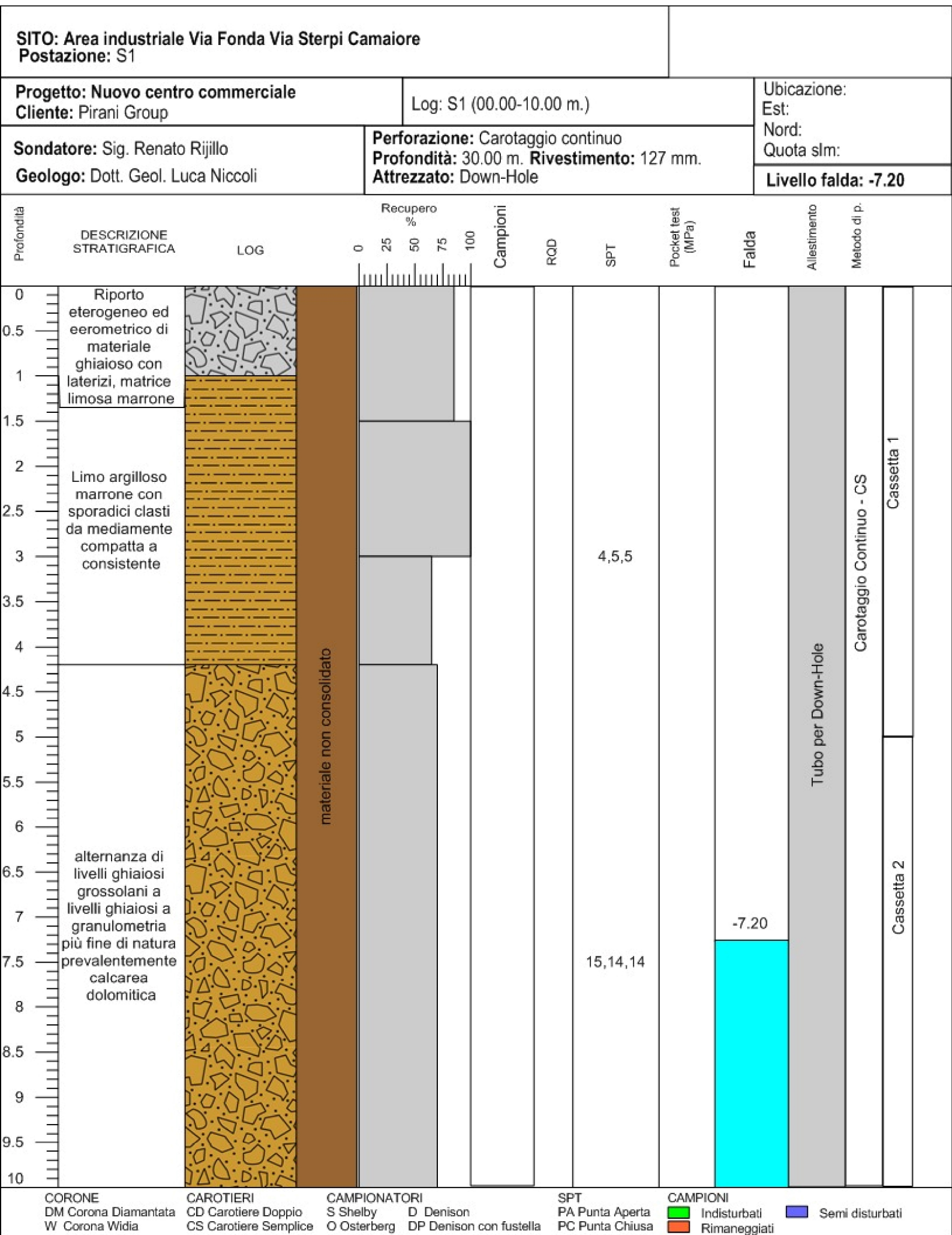
Penetrometro:	TG63-200Din	sist.litologico:	Begemann [qc + qc/fs] 4 Zone	preforo	m
	63.00 kg	Responsabile::		Corr.astine:	: kg/ml
	0.75 m	Assistente::		Cod.ISTAT:	0
	0.20 m				

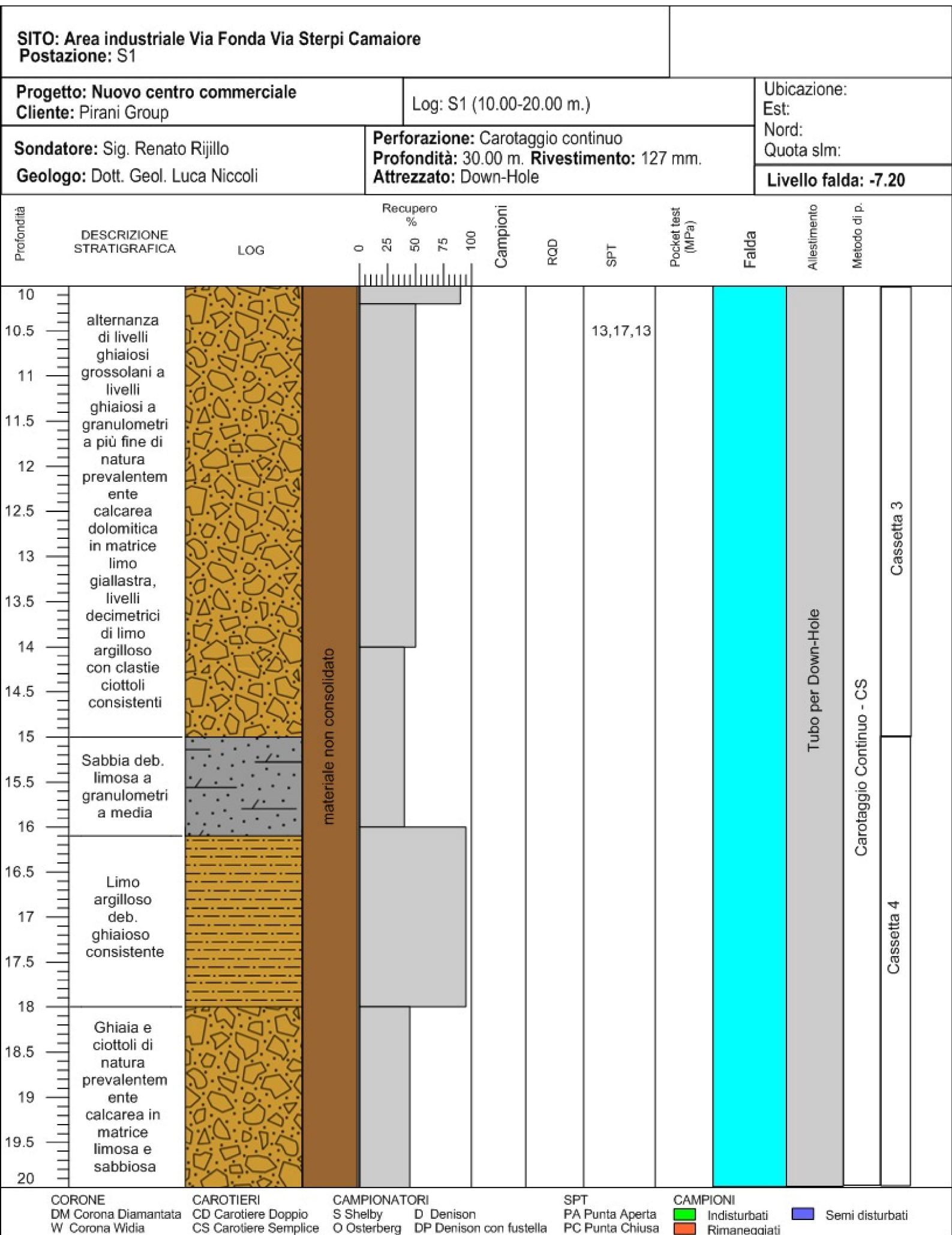
PROVA PENETROMETRICA DINAMICA SUDDIVISIONE GEOTECNICA	DIN	3
	Riferimento	029-2024

Committente	Pirani Group	U.M.:	kg/cm²	Data esec.	17/10/2024
Cantiere	Via Sterpi	Pagina	1		
Località	Camamiore	Elaborato		Falda	Non rilevata

PARAMETRI GENERALI													
n°	profondità m	statistica	VCA colpi	β -	Nspt colpi	qcd kg/cm²	qc kg/cm²	Vs m/sec	G kg/cm²	Q kg/cm²	natura	descrizione	
1	0.00 : 0.60	Media	23	1.51	34	250	225	119	202	12.50	Coes./Gran.		
2	0.60 : 4.60	Media	4	1.51	7	41	38	126	57	2.02	Coes./Gran.		
3	4.60 : 7.00	Media	23	1.51	34	177	160	210	202	8.86	Coes./Gran.		

			NATURA COESIVA					NATURA GRANULARE						
n°	profondità m	Nspt colpi	Cu kg/cm²	Ysat t/m³	W %	e -	Mo kg/cm²	Dr %	Ø °	E' kg/cm²	Ysat t/m³	Yd t/m³	Mo kg/cm²	Liq. -
1	0.00 : 0.60	34	2.13	2.10	20.20	0.55	98	69	37	453	2.07	1.72	411	- - -
2	0.60 : 4.60	7	0.44	1.86	36.00	0.97	39	25	29	245	1.90	1.45	150	- - -
3	4.60 : 7.00	34	2.13	2.10	20.20	0.55	98	69	37	453	2.07	1.72	411	- - -





CAMPIONI

	Indisturbati		Semi disturbati
	Rimaneggiati		



0.00-5.00 metri (tratteggiato campione per analisi)



5.00-10.00 metri



10.00-15.00 metri



15.00-20.00 metri



20.00-25.00 metri



25.00-30.00 metri



dott. geol. S. Margottini - dott. geol. F. Cecchini
Geologia-Prospezioni Geofisiche-Topografia
338.2458259/338.9529763

- Comune di Camaione (Lu) -

7/10/2024

Prospezione microgravimetrica finalizzata alla valutazione sulla presenza di zone
a rischio voragine presenti nell'area della fabbrica O. Pardini in
via Sterpi 20-24, Camaione (Lu)

Committente: Dott. Geol. Luca Niccoli

Dott. Geol. Flavio Cecchini
Dott. Geol. Siro Margottini

INDICE

INDICE.....	2
PREMESSA.....	3
INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA IN STUDIO	4
INQUADRAMENTO GEOLOGICO SINTETICO	5
RILIEVO TOPOGRAFICO	9
PROSPEZIONE MICROGRAVIMETRICA.....	13
ANOMALIE DI GRAVITA'	21
ANOMALIE DI BOUGUER.....	24
CAMPO REGIONALE DEL 1° ORDINE E ANOMALIE RESIDUE DI ORDINE n-1	25
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	29

PREMESSA

Su incarico del dott. Geol. L. Niccoli sono state effettuate nei giorni 4-5 ottobre 2024 indagini microgravimetriche al fine di valutare la presenza aree a rischio sinkhole all'interno della Fabbrica Pardini di via Sterpi 20-24.

Nell'area d'indagine, sono state realizzate 62 stazioni microgravimetriche.

L'indagine è stata effettuata secondo il seguente schema:

- 1) materializzazione sul campo dell'area d'indagine;
- 2) georeferenziazione assoluta mediante GPS differenziale di alcuni punti di riferimento all'interno della zona in studio;
- 3) realizzazione di stazioni di misura microgravimetriche;
- 4) rilievo topografico mediante stazione totale delle stazioni microgravimetriche e degli elementi topografici principali dell'area in studio;
- 5) acquisizione delle misure microgravimetriche realizzate in doppia lettura e lungo circuiti chiusi;
- 6) elaborazione e generazione di mappe delle anomalie gravimetriche di Bouguer e Residue.

Alla presente relazione sono allegati i seguenti elaborati grafici:

- **Tavola 1:** Ubicazione delle Stazioni Microgravimetriche
- **Tavola 2:** Mappa delle Anomalie di Bouguer.
- **Tavola 3:** Mappa del Campo Regionale Gravimetrico.
- **Tavola 4:** Mappa delle Anomalie di Residue.

Strumentazioni utilizzate per la presente prospezione geofisica:

Prospezione Microgravimetrica:

Gravimetro La Coste & Romberg model D.

Rilievo topografico:

Stazione Totale Pentax R325NX Reflectorless, sistema GPS differenziale Promark III Ashtech.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA IN STUDIO

L'area oggetto di studio, ricade nel Comune di Camaione (Lucca), tra Via Fonda e Via Sterpi n.20-24. Nella immagine seguente è mostrata una vista satellitare dell'area in studio con l'indicazione del perimetro dell'area indagata



Figura 2: area indagata (in rosso-arancio)

INQUADRAMENTO GEOLOGICO SINTETICO

Il centro abitato di Camaione, in provincia di Lucca, si trova posizionato in una conca naturale incastonata tra rilievi collinari e montuosi che costituiscono le propaggini sud-occidentali delle Alpi Apuane. La piana camaionese si sviluppa nella parte terminale delle valli del T. Lucese e del T. Lombricese che convergono, da direzioni sub-ortogonali, verso l'abitato del capoluogo. Poco dopo la loro confluenza, ove ha origine il T. Camaione, la vallata si restringe e sbocca nell'ampia pianura costiera della Versilia che si estende, sulla fascia litoranea, da Capezzano al Lido di Camaione.

L'Appennino Settentrionale e le Alpi Apuane, i cui margini lambiscono la piana di Camaione, possono essere interpretati come il risultato dell'evoluzione spazio-temporale di una tettonica a tratti compressiva, a tratti distensiva, che ha interessato i bacini sedimentari liguri s.l. e toscani s.l.. La collisione con la microplacca Sardo-Corsa durante l'Oligocene può essere vista come la causa principale della formazione, in un regime tettonico compressivo, dell'edificio a falde di ricoprimento sovrapposte che caratterizza i suddetti rilievi (Carmignani, Kligfield, 1990).

A partire dal Miocene superiore e sino a tutto il Messiniano le strutture compressive sono interessate da una tettonica distensiva a larga scala, collegata, molto probabilmente, al processo di retroarco che ha portato all'apertura del Mare Tirreno e che ha dato origine a strutture tipo horst e graben in tutta la Toscana. La piana di Camaione è situata in una depressione tettonica compresa tra l'alto morfologico delle Apuane a Nord ed rilievi collinari dell'allineamento Monte Magno-Monte Moneta a Sud, formatasi in seguito alla suddetta fase deformativa distensiva. Tale struttura negativa, tipo graben, si realizza principalmente attraverso faglie dirette sottrattive, a geometria listrica, a direzione appenninica (NO-SE), in associazione a sistemi secondari di faglie a direzione antiappenninica ed a faglie con direzione E-O e N-S (pleistoceniche).

Il sistema di faglie dirette, che ha ribassato il substrato roccioso del margine occidentale dei rilievi apuani, ha determinato sia il rapido colmamento della pianura costiera con sedimenti terrigeni e costieri recenti (ghiaie, sabbie, argille e torbe), sia il ringiovanimento dei versanti nell'entroterra collinare e montano (Pleistocene inf.), con la formazione delle grandi conoidi di materiale alluvionale. Gli studi effettuati sulla piana in og-

getto indicano la presenza di una tettonica attualmente attiva, riconoscibile proprio dalla particolare struttura profonda del "graben" della conca di Camaione.

La fascia collinare-montuosa, che lambisce o contorna le aree di pianura, assume forme diverse nei rilievi che la costituiscono, ovvero forme blande nel settore centro-meridionale, con quote massime che si aggirano intorno ai 500-600 m slm, con versanti a medio-bassa acclività, raramente incisi da valli incassate e ripide; rilievi con asperità più accentuate nel settore settentrionale, sovrastanti la conca del capoluogo, culminanti in corrispondenza dei massicci prevalentemente carbonatici del M.te Gabberi, del M.te Prana e del M.te Matanna (circa 1300 m slm). L'aspetto morfologico di questi ultimi massicci è tipico del paesaggio apuano, con pendii da mediamente acclivi a molto acclivi, con speroni rocciosi e doline, risultato di una evoluzione morfologica di tipo carsico.

Il complesso assetto geologico della zona, con strette anticlinali, laminazioni e sovrascorrimenti, condiziona ovviamente la morfologia dei versanti, che assumono forme decisamente forti in corrispondenza degli affioramenti delle formazioni prevalentemente calcaree appartenenti alla Successione Toscana (localizzabili a Nord, Nord-Est e Sud-Est della conca con i termini dal "Calcare cavernoso" alla "Maiolica"), mentre sui più dolci rilievi meridionali e sud-occidentali affiorano terreni argillitici ed arenacei (dalla "Scaglia rossa" al "Macigno" della Succ. Toscana, alle argilliti caotiche ed i flysch delle Unità liguri). Ad Ovest, in corrispondenza delle colline che separano la valle interna dalla pianura costiera, affiorano le filladi quarzitiche del "Verrucano" dell'Unità di Massa.

L'assetto geologico condiziona ovviamente anche il circuito idrogeologico delle acque sotterranee, determinando, nel caso specifico, una situazione particolarmente favorevole al trabocco. Nella zona tra le località Frati e Teneri, in corrispondenza della strettoia che delimita ad Ovest la conca camaione, il substrato roccioso è costituito da Filladi quarzitiche a permeabilità molto bassa, mentre il sovrastante Calcare cavernoso acquifero risulta laminato fino a sparire.

Questo determina un effetto soglia al deflusso delle acque sotterranee che, risalendo dalle fratture nei calcari, fluiscono verso l'uscita del bacino, causandone l'emergenza. In questa zona si trovavano alcune grosse sorgenti, attualmente ancora presenti sia pure

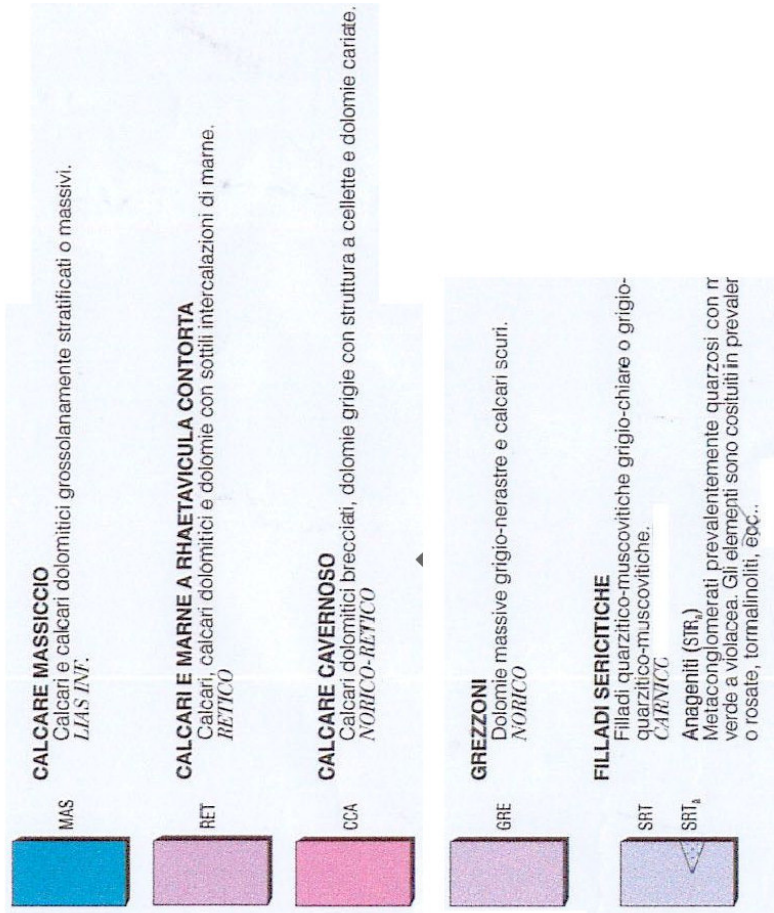
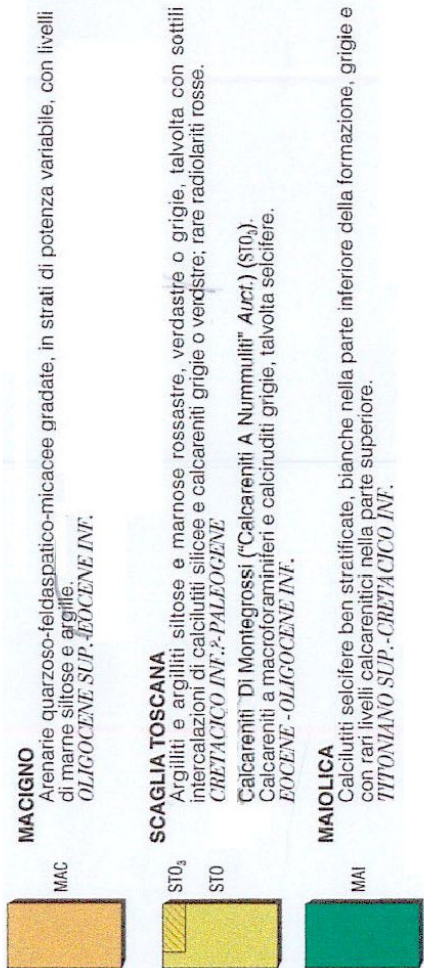
con portata ridotta; le maggiori erano alla base delle due colline di Calcare cavernoso Monte di Rose a Nord e Colle Donaia a Sud.

Sempre in questa zona si trova la batteria di pozzi per uso acquedottistico che viene pertanto alimentata sia dalla falda superficiale che dalle acque che risalgono dall'acquifero carbonatico nella zona della soglia naturale.

Stu



Stralcio del Foglio n. 260 "Viareggio" affioramenti cenozoici (bedrock)



30

RILIEVO TOPOGRAFICO

Il rilievo topografico eseguito (Figure 6 e 7) ha permesso di ubicare le stazioni gravimetriche e le linee radar rispetto agli elementi topografici esistenti.

Per poter correttamente georeferenziare le stazioni di microgravimetria è stato effettuato un rilievo GPS effettuato in modalità RTK.

Le basi S1 e S2 sono state utilizzate come basi di partenza per georeferenziare le 62 stazioni microgravimetriche ed i principali elementi topografici presenti mediante l'utilizzo di Stazione Totale.



Figure 6: basi GPS RTK.



Figura 7: fasi del rilievo topografico mediante stazione totale.

Tutti i punti rilevati sono stati georeferenziati mediante le due basi S1 e S2 le cui coordinate UTM ED1950 32N sono le seguenti:

EST (ED1950 UTM 33N)	NORD (ED1950 UTM 33N)	QUOTE (m s.l.m.)	Nome punto
604693,65	4866374,25	33,03	S1
604666,62	4866409,30	33,42	S2

A partire dalle basi GPS RTK posizionate in area è stato effettuato il rilievo topografico delle stazioni microgravimetriche e dei diversi elementi topografici presenti.

Nella tabella seguente sono elencate le coordinate dei punti rilevati.

EST (ED1950 UTM 33N)	NORD (ED1950 UTM 33N)	QUOTE (m s.l.m.)	Nome punto
604692,65	4866374,25	33,03	S1
604665,62	4866409,30	33,42	S2
604632,67	4866433,13	33,29	8
604643,02	4866422,87	33,35	9
604654,19	4866412,62	33,38	10
604664,88	4866402,27	33,43	11
604676,02	4866391,96	33,35	12
604685,95	4866380,92	33,22	13
604696,03	4866370,04	32,97	14
604706,88	4866359,64	32,86	15
604718,48	4866350,19	32,92	16
604730,50	4866341,50	32,84	17
604742,08	4866331,86	32,83	18
604731,91	4866339,58	32,80	SPG1
604713,52	4866356,36	32,87	SPG4
604690,72	4866368,32	33,04	SPG2
604682,84	4866357,14	33,04	SPG3
604672,23	4866372,87	33,28	SPG5
604682,52	4866383,76	33,33	SPG6
604681,28	4866392,82	33,30	SPG8
604654,28	4866424,95	33,33	SPG9
604631,90	4866432,09	33,35	SPG7
604681,19	4866362,81	33,09	S3
604664,34	4866403,21	33,41	S4
604709,60	4866404,44	33,54	S5
604708,86	4866404,28	33,53	45
604708,45	4866356,83	32,83	S6
604736,15	4866336,55	32,80	S7
604692,91	4866361,36	33,00	S8
604682,80	4866366,12	33,12	VASCA1
604681,36	4866364,17	33,13	VASCA2
604683,11	4866362,87	33,11	VASCA3
604682,63	4866361,99	33,09	VASCA4
604683,75	4866361,24	33,11	VASCA5
604685,67	4866363,92	33,19	VASCA6
604621,48	4866421,19	33,33	SPG10
604613,80	4866425,59	33,19	1
604624,11	4866415,23	33,33	2
604634,83	4866404,74	33,30	3
604645,79	4866394,44	33,32	4
604656,65	4866384,03	33,29	5
604667,48	4866373,74	33,24	6
604678,42	4866363,48	33,12	7
604682,67	4866354,64	32,90	TP1
604681,16	4866355,73	32,16	TP2
604653,60	4866382,46	33,19	TP3
604653,14	4866382,05	32,23	TP4
604626,46	4866408,22	33,18	TP5
604626,16	4866407,87	32,45	TP6
604608,74	4866424,88	33,15	TP7
604608,38	4866425,16	32,39	TP8
604668,69	4866419,66	33,50	56
604658,03	4866433,38	33,51	57
604670,34	4866443,68	33,51	58
604679,82	4866453,44	33,52	59
604685,96	4866466,93	33,84	60
604678,08	4866475,15	33,96	61
604628,89	4866435,34	33,28	TP11
604628,79	4866435,58	32,58	TP12
604631,16	4866436,66	33,29	TP13

604630,97	4866437,06	32,64	TP14
604640,92	4866427,92	33,34	TP15
604641,25	4866428,16	33,11	TP16
604701,04	4866389,80	33,55	999
604706,42	4866390,68	33,55	44
604712,51	4866423,04	33,54	46
604714,93	4866437,62	33,56	47
604698,82	4866441,14	33,56	48
604695,50	4866424,61	33,54	49
604692,24	4866406,35	33,50	50
604689,89	4866392,31	33,53	51
604678,16	4866407,65	33,54	52
604681,01	4866422,39	33,52	53
604684,46	4866439,20	33,54	54
604686,81	4866454,63	33,57	55
604716,72	4866369,34	33,12	S10
604738,13	4866414,33	33,68	S11
604712,92	4866369,93	33,16	31
604707,09	4866375,07	33,59	POZZO
604728,88	4866367,07	32,94	32
604748,22	4866363,81	32,96	33
604769,21	4866360,00	32,92	34
604724,43	4866385,75	33,45	35
604727,39	4866401,11	33,55	36
604730,79	4866416,64	33,60	37
604743,15	4866409,76	33,69	38
604752,39	4866400,34	33,71	39
604760,06	4866390,95	33,75	40
604772,30	4866380,04	33,86	41
604754,66	4866379,89	33,68	42
604742,26	4866383,61	33,59	43
604749,39	4866338,83	32,98	27
604720,65	4866317,60	32,83	S20
604747,03	4866301,09	32,87	S21
604740,23	4866348,38	32,97	S22
604762,10	4866344,07	33,01	28
604747,08	4866348,38	32,98	29
604733,57	4866353,25	32,97	30
604715,91	4866331,49	32,82	21
604725,24	4866318,06	32,82	22
604739,28	4866307,95	32,82	23
604753,20	4866294,52	33,06	24
604756,36	4866308,97	33,11	25
604751,51	4866319,61	33,02	26
604690,83	4866353,63	32,99	19
604704,25	4866344,15	33,00	20

PROSPEZIONE MICROGRAVIMETRICA

La gravimetria è un metodo geofisico che permette, attraverso la misura dell'accelerazione di gravità di evidenziare variazioni di densità nei terreni che costituiscono il sottosuolo.

Attualmente, con un microgravimetro, è possibile rilevare differenze di gravità di qualche microGal ($1 \text{ microGal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$).

Unità di misura in gravimetria		
	MKS	Cgs
g	m s^{-2}	$\text{cm s}^{-2} = \text{Gal}$ $\text{mGal} = 10^{-3} \text{ Gal} = 10^{-5} \text{ m s}^{-2}$
U	Nm/kg	dyne cm/g
G	$6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$	$6.67 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Se nel sottosuolo sono presenti rocce dense, la gravità risulta maggiore rispetto a zone in cui sono presenti terreni a densità minore, quali sabbie, argille, torbe o addirittura materiali di riporto. È quindi possibile rilevare gli effetti gravimetrici di cavità vuote o piene d'acqua presenti nel sottosuolo e correlare, dal nomogramma di figura 9, le anomalie di gravità con la profondità e la dimensione di una cavità nel sottosuolo.



Figura 8: Gravimetro in misura su alcune stazioni di misura nell'area d'indagine

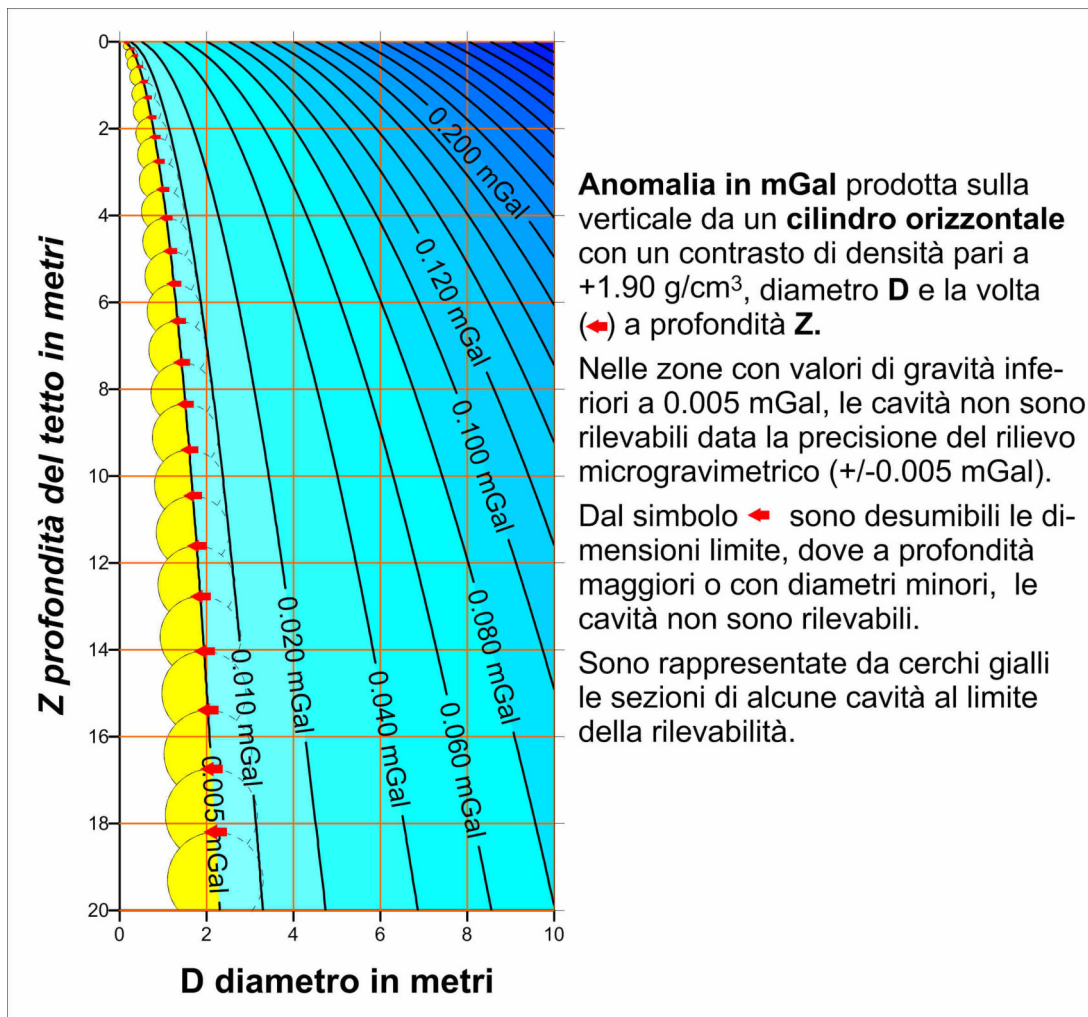


Figura 9: Anomalia data da una cavità di forma cilindrica con un contrasto di densità di $+1,9 \text{ g/cm}^3$ rispetto alle rocce incassanti. Il nomogramma fornisce, in funzione della profondità della volta della cavità e del suo diametro, il corrispondente effetto gravimetrico in superficie.

Gli apparecchi impiegati per le misure del campo gravitazionale sono i gravimetri, strumenti che determinano solo differenze di gravità da luogo a luogo ma con un'altissima sensibilità accoppiata ad una grande rapidità di uso.

Il tipo di gravimetro più usato al giorno d'oggi, consta in sostanza di una massa metallica **M** (fig. 10) sospesa ad una molla obliqua **L**; passando da un luogo all'altro la massa subisce dei piccolissimi spostamenti rispetto ad un riferimento. La misura si effettua riportando la massa **M** nella posizione orizzontale mediante rotazione della vite micrometrica **V** la quale tende un'altra molla **I**. La posizione della massa s'osserva mediante il microscopio **m**. L'apparecchio è perfezionato in modo che si riesca ad apprezzare differenze di gravità dell'ordine del μGal ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-6} \text{ Gal} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

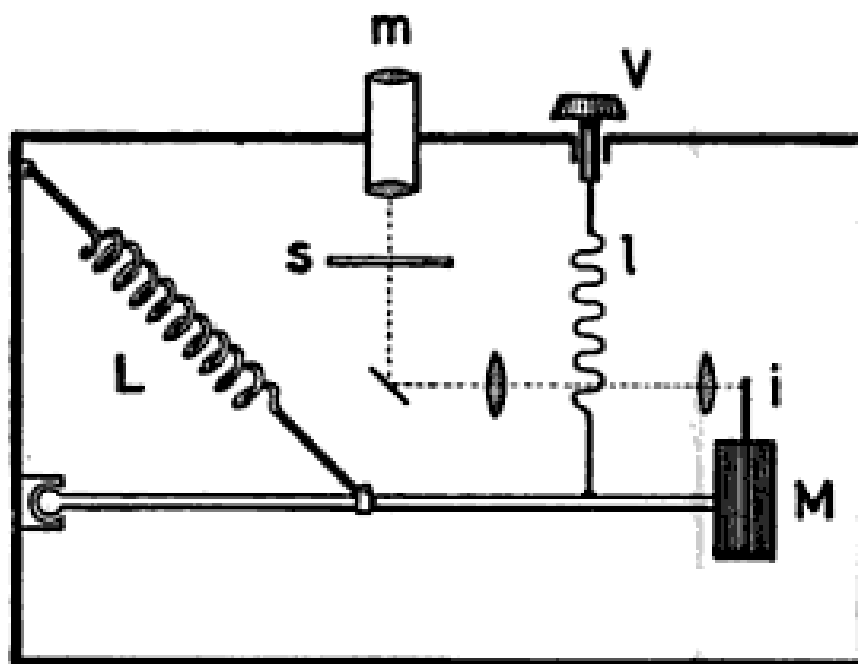


Figura 10. Schema di un gravimetro.

2 μGal corrispondono ad una variazione di altitudine di un centimetro: perciò le coordinate e la quota dei punti di stazione devono essere determinate molto accuratamente; per questa prospezione, coordinate e quota sono state determinate mediante una stazione totale Pentax R325NX reflectorless. Le quote sono state determinate con una precisione migliore di ± 1 cm e riferite al livello del mare. I punti di misura sono stati materializzati tramite vernice sull'asfalto.

Le misure di gravità sono state eseguite con un microgravimetro **LaCoste & Romberg**, strumento con una sensibilità di 0.001 mGal.

Le misure di gravità sono state eseguite mediante circuiti chiusi, con controllo periodico della deriva strumentale; ogni stazione è stata interessata da due circuiti di misura, al fine di migliorare la precisione del valore di gravità osservata e controllare le variazioni gravimetriche mareali e le eventuali ondulazioni della crosta terrestre causate da terremoti lontani ad elevata magnitudo.

È stata scelta una spaziatura tra le misure di circa 2 m; tale valore risulta ottimale per lo scopo della ricerca, ovvero l'individuazione di cavità e gallerie. La griglia di misure è realizzata tenendo conto dell'estensione dell'area d'indagine, del numero di stazioni commis-

sionate e del controllo diretto delle anomalie rilevate al fine di evitare i possibili errori di misura.

Per ottenere il valore dell'anomalia di gravità è necessario rimuovere tutti gli effetti non desiderati. Questo è possibile comparando le misure di gravità effettuate (**g**, gravità osservata) con quelle teoriche che si hanno alla stessa latitudine (**Gn**, gravità normale, figura 12) e corrette per il dislivello tra la quota del geoide (0 m s.l.m.) e la quota della stazione (correzione di Faye, **Fa**, figura 13a) e per rimuovere l'effetto attrattivo dello strato di materiale tra la superficie di riferimento e quella del piano campagna (correzione di Bouguer, **Bo**, figura 13b). Una ulteriore correzione da apportare viene utilizzata per rimuovere gli effetti attrattivi dati dalla morfologia circostante il punto di misura (correzione topografica, **Ct**, figure 13c e 14). Il risultato di queste operazioni è l'Anomalia di Bouguer.

La gravità normale (**Gn**) risulta funzione della latitudine, varia in relazione alla distanza tra il geoide e il baricentro della Terra, e alla forza centrifuga indotta dalla rotazione intorno all'asse terrestre. In figura 12 è riportato il grafico dell'andamento della gravità normale in funzione della latitudine: il valore è minimo all'equatore, 978003.27 mGal, ed aumenta verso i poli, 983218.62 mGal. Per questa prospezione la gravità normale è stata determinata con la formula (Intern.Gravity Form, Geod.Ref.Sys.1980, Torge 1980):

$$\begin{aligned} &\mathbf{Gn, gravità\ normale\ (in\ mGal)} = \\ &= 1000 \bullet \gamma \bullet (1 + \beta \bullet \sin^2 (\varphi) + \beta_1 \bullet \sin^2 (2 \bullet \varphi)) \end{aligned}$$

dove

γ	978.00327
β	0.0053024
β_1	-0.0000058
φ	Latitudine del punto di misura

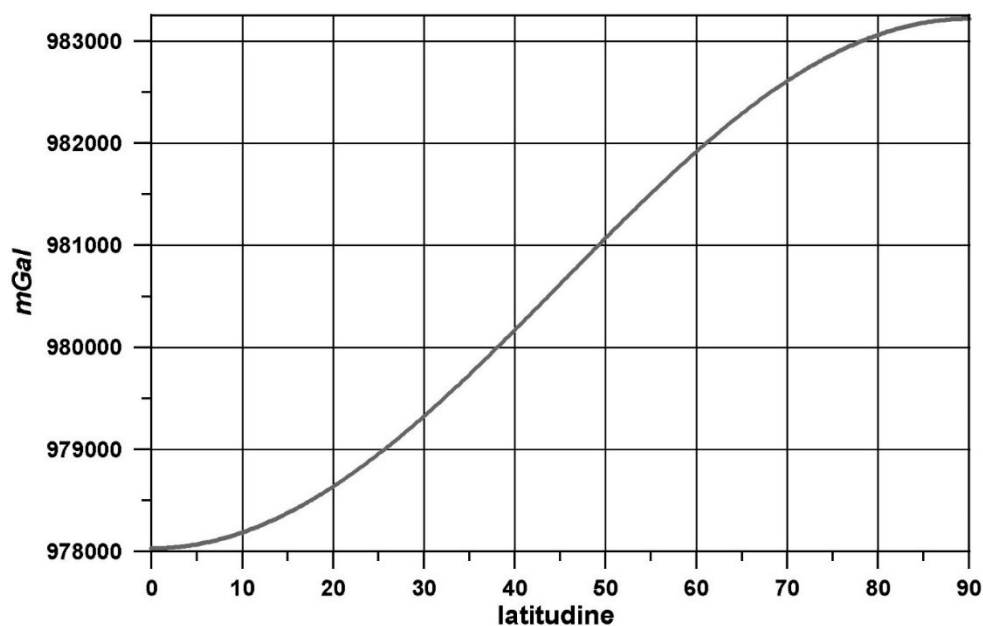


Figura 12. Variazione del campo gravitazionale teorico al livello del mare in funzione della latitudine.

Fa, correzione di Faye (in mGal) = $h \cdot (0.30855 + 0.00022 \cdot \cos(2 \cdot \varphi))$

dove **h** è la quota del punto in metri s.l.m. e **φ** la latitudine.

Bo, correzione di Bouguer o per la piastra (in mGal) = $h \cdot 0.04191 \cdot \sigma$

dove **h** è la quota del punto in metri s.l.m. e **σ** è la densità in g/cm³ delle rocce fino al livello del mare.

Ct, corr. topografica (in mGal) = $K \cdot \sigma \cdot \Delta\theta \cdot (R_2 - R_1 + \sqrt{(R_1^2 + \Delta h^2)} - \sqrt{(R_2^2 + \Delta h^2)})$

dove, nella formula di Messerschmidt,

K	$6.67 \cdot 10^{-3}$ (costante di gravità)
σ	densità della roccia in g/cm ³
Δθ	angolo in radianti tra 2 compartimenti
R₂, R₁	raggi esterno e interno del compartimento in metri
Δh	dislivello in metri tra la quota della stazione e la quota media del compartimento

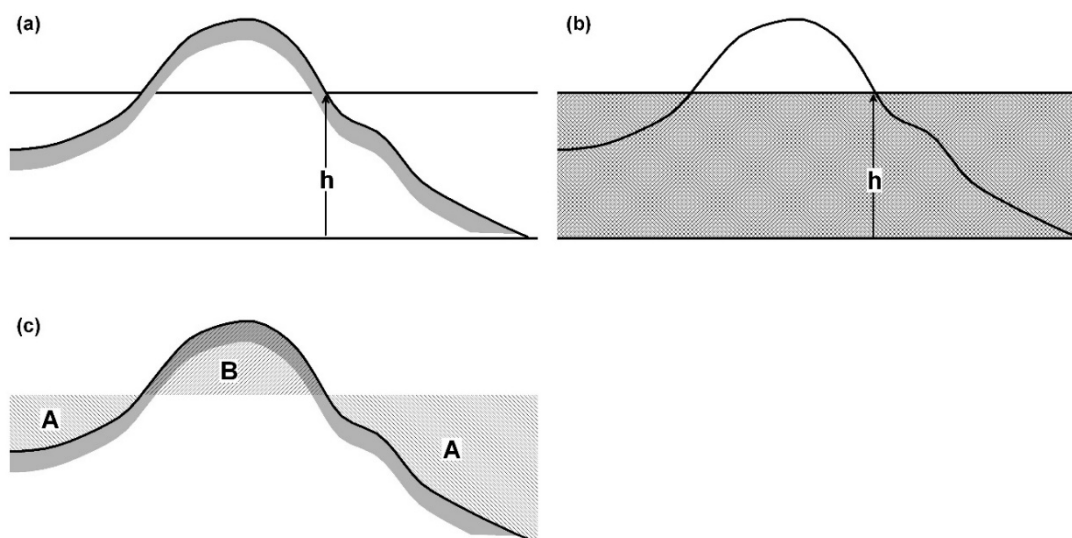


Figura 13: (a) correzione di Faye, per un'osservazione alla quota h sul livello del mare. (b) correzione di Bouguer, la parte tratteggiata corrisponde ad una piastra di roccia di spessore h estesa all'infinito nelle 2 direzioni orizzontali. (c) correzione topografica, riguarda le variazioni altimetriche tra la morfologia e il piano orizzontale tangente al punto di stazione e risulta sempre positiva.

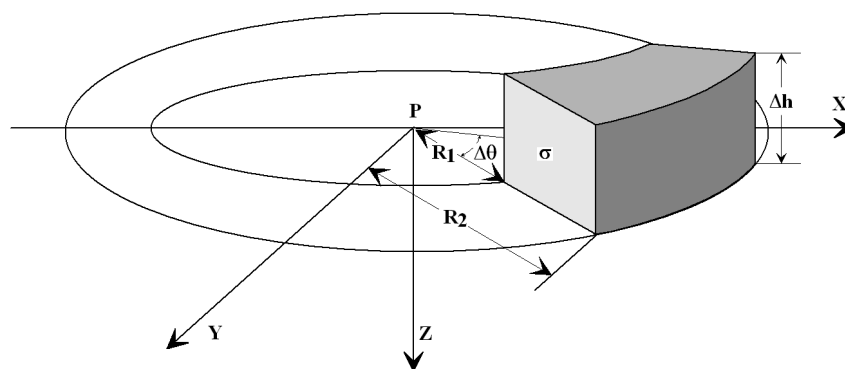


Figura 14: Schema della correzione topografica

La correzione topografica è stata estesa fino a 29 km di distanza dalle stazioni; un'estensione maggiore si ripercuoterebbe in ugual misura su tutte le stazioni e quindi risulta influente. L'anomalia di Bouguer viene quindi calcolata con la formula:

$$\text{Anomalia di Bouguer} = g - (G_n - F_a + B_o) + C_t$$

g	Gravità osservata
G_n	Gravità normale
F_a	Correzione di Faye
B_o	Correzione di Bouguer
C_t	Correzione topografica

Le anomalie di Bouguer sono state calcolate utilizzando per la correzione per la piastra un valore di densità pari a 1900 kg/m^3 , tenendo conto delle formazioni geologiche presenti nel sottosuolo.

Non è stato possibile ottenere una valutazione analitica del valore di densità, poiché il dislivello totale tra le stazioni di 1.14 metri non consente un'analisi statistica. Comunque proprio per il basso valore del dislivello, la scelta del valore di densità implica unicamente una variazione del valore medio dell'anomalia di Bouguer.

Nella fase di progettazione di un rilievo è necessario valutare le precisioni che si intendono ottenere e conseguentemente è indispensabile effettuare un esame delle possibili cause di errore.

Nel rilievo microgravimetrico si rileva che l'errore su di una singola misura può essere ridotto a valori di 3-4 microGal usando le massime cautele nel trasporto e nella manipolazione del microgravimetro; che l'errore dovuto alla quota, nelle correzioni di Faye e Bouguer, può essere notevolmente ridotto in quanto l'errore di 1 microGal è dovuto ad un errore in quota di 4-5 mm facilmente contenibile; che la correzione topografica in aree urbane è piuttosto complessa da valutare e che, con particolari accorgimenti sul rilievo topografico delle zone circostanti alle misure, gli errori dovuti alla correzione topografica possono essere ridotti ad 1-2 microGal.

Errori che non possono essere ridotti sono quelli dovuti alle disomogeneità in senso laterale delle formazioni. Tali disomogeneità determinano un rumore di fondo che al più potrebbe essere ridotto solo eseguendo un numero molto più elevato di stazioni gravimetriche di quelle strettamente necessarie.

Nel rilievo gravimetrico eseguito è stato pertanto considerato cautelativamente un errore massimo complessivo di ± 5 microGal nelle anomalie di Bouguer relativo sia alle correzioni che alle disomogeneità superficiali. Ciò porta a considerare che eventuali aree aventi deficit di massa degni di nota cavità possono essere individuate solo se generano anomalie i cui valori sono almeno 2 volte maggiori rispetto al valore del "rumore di fondo".

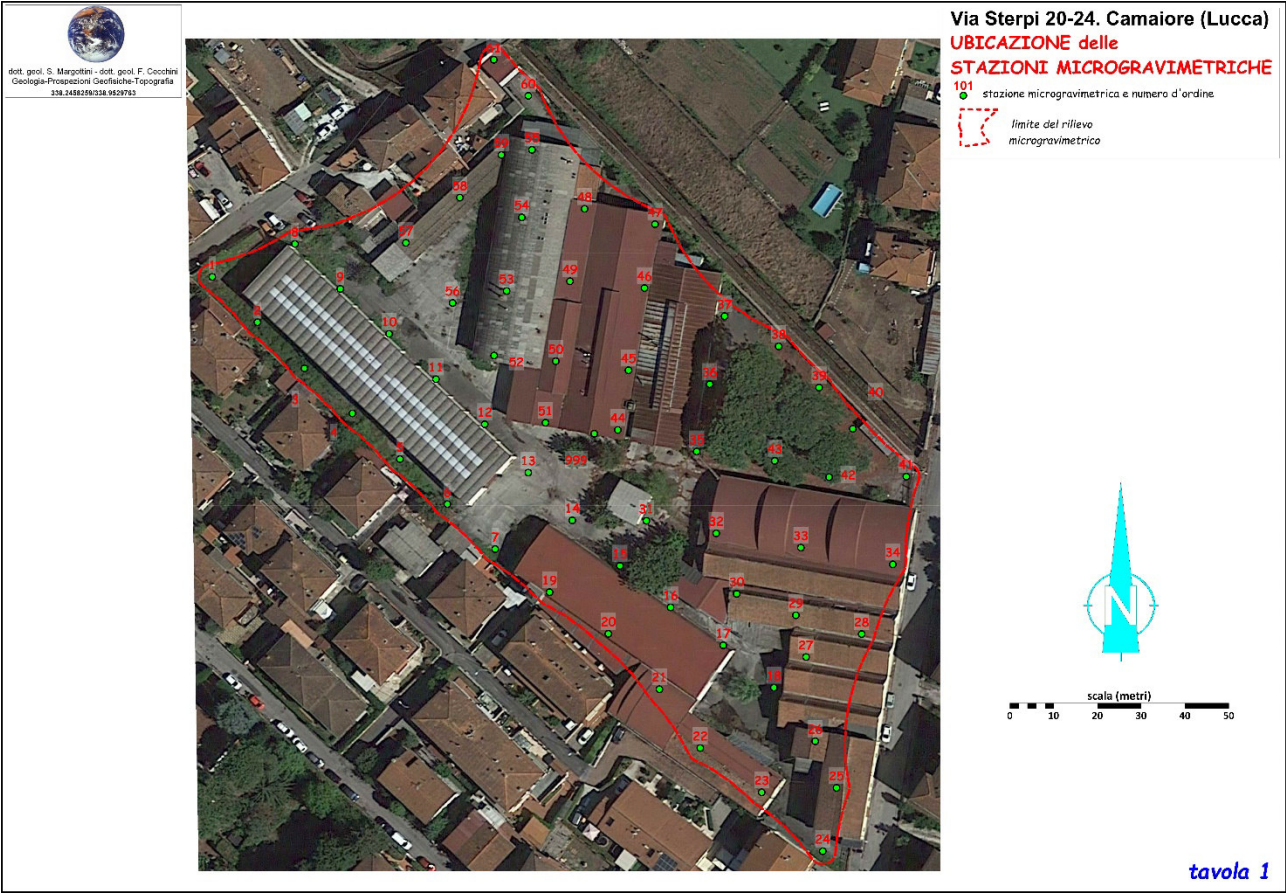
ANOMALIE DI GRAVITA'

Sono state effettuate 62 stazioni microgravimetriche nei giorni 4 e 5 ottobre 2024. Di seguito viene riportata la tabella con i dati relativi alle stazioni microgravimetriche; l'ubicazione delle stazioni è riportata nella Tavola 1.

- **Longitudine** in gradi, primi e secondi e frazione di secondi (Roma 1940 datum)
- **Latitudine** in gradi, primi e secondi e frazione di secondi (Roma 1940 datum)
- **Quota** in metri sul livello del mare
- **G.oss.** gravità osservata in mGal (**+980 000 mGal**)
- **C.Top.**, correzione topografica totale in mGal, estesa fino a 29 km.
- **Xutm e Yutm** coordinate chilometriche (European Datum 1950 UTM zone 32N)
- **Anomalia di Bouguer** calcolata utilizzando un valore di densità pari a 1900 kg/m^3 , è riportata fino alla 4° cifra decimale per avere una migliore rappresentazione del *contouring*.
- **N**, numero d'ordine.

Longitudine	Latitudine	Quota	G.oss.	C.Top.	Xutm	Yutm	Bouguer	N
12°31'51.47"	41°53'16.36"	44.74	346.056	0.091	295.2120	4640.5372	+18.2144	1
10°18'10.06"	43°56'27.96"	33.19	541.790	4.878	604.6138	4866.4256	+20.4285	1
10°18'10.51"	43°56'27.62"	33.33	541.782	4.848	604.6241	4866.4152	+20.4330	2
10°18'10.99"	43°56'27.27"	33.30	541.812	4.833	604.6348	4866.4047	+20.4476	3
10°18'11.47"	43°56'26.93"	33.31	541.820	4.808	604.6458	4866.3944	+20.4439	4
10°18'11.95"	43°56'26.59"	33.29	541.787	4.793	604.6567	4866.3840	+20.3984	5
10°18'12.43"	43°56'26.25"	33.24	541.809	4.769	604.6675	4866.3737	+20.3942	6
10°18'12.91"	43°56'25.91"	33.12	541.825	4.757	604.6784	4866.3635	+20.3795	7
10°18'10.91"	43°56'28.19"	33.29	541.697	4.907	604.6327	4866.4331	+20.3837	8
10°18'11.37"	43°56'27.86"	33.35	541.675	4.880	604.6430	4866.4229	+20.3561	9
10°18'11.86"	43°56'27.52"	33.38	541.715	4.861	604.6542	4866.4126	+20.3926	10
10°18'12.33"	43°56'27.18"	33.43	541.659	4.837	604.6649	4866.4023	+20.3324	11
10°18'12.83"	43°56'26.84"	33.35	541.658	4.821	604.6760	4866.3920	+20.3047	12
10°18'13.26"	43°56'26.48"	33.22	541.702	4.800	604.6860	4866.3809	+20.3070	13
10°18'13.71"	43°56'26.12"	32.97	541.751	4.787	604.6960	4866.3700	+20.2963	14
10°18'14.19"	43°56'25.78"	32.86	541.781	4.764	604.7069	4866.3596	+20.2860	15
10°18'14.70"	43°56'25.46"	32.92	541.776	4.754	604.7185	4866.3502	+20.2931	16
10°18'15.23"	43°56'25.18"	32.84	541.788	4.743	604.7305	4866.3415	+20.2814	17
10°18'15.75"	43°56'24.86"	32.83	541.767	4.723	604.7421	4866.3319	+20.2463	18
10°18'13.46"	43°56'25.59"	32.99	541.787	4.740	604.6908	4866.3536	+20.3018	19
10°18'14.06"	43°56'25.28"	32.99	541.806	4.723	604.7043	4866.3441	+20.3132	20
10°18'14.57"	43°56'24.86"	32.82	541.855	4.707	604.7159	4866.3315	+20.3180	21
10°18'14.98"	43°56'24.42"	32.81	541.852	4.677	604.7252	4866.3181	+20.2934	22
10°18'15.60"	43°56'24.08"	32.82	541.836	4.670	604.7393	4866.3080	+20.2808	23
10°18'16.22"	43°56'23.64"	33.06	541.784	4.643	604.7532	4866.2945	+20.2661	24
10°18'16.37"	43°56'24.11"	33.11	541.743	4.679	604.7564	4866.3090	+20.2619	25
10°18'16.16"	43°56'24.46"	33.02	541.722	4.698	604.7515	4866.3196	+20.2303	26
10°18'16.08"	43°56'25.08"	32.98	541.704	4.744	604.7494	4866.3388	+20.2333	27
10°18'16.65"	43°56'25.24"	33.01	541.651	4.768	604.7621	4866.3441	+20.2074	28
10°18'15.98"	43°56'25.39"	32.98	541.679	4.767	604.7471	4866.3484	+20.2236	29
10°18'15.38"	43°56'25.55"	32.97	541.689	4.770	604.7336	4866.3533	+20.2317	30

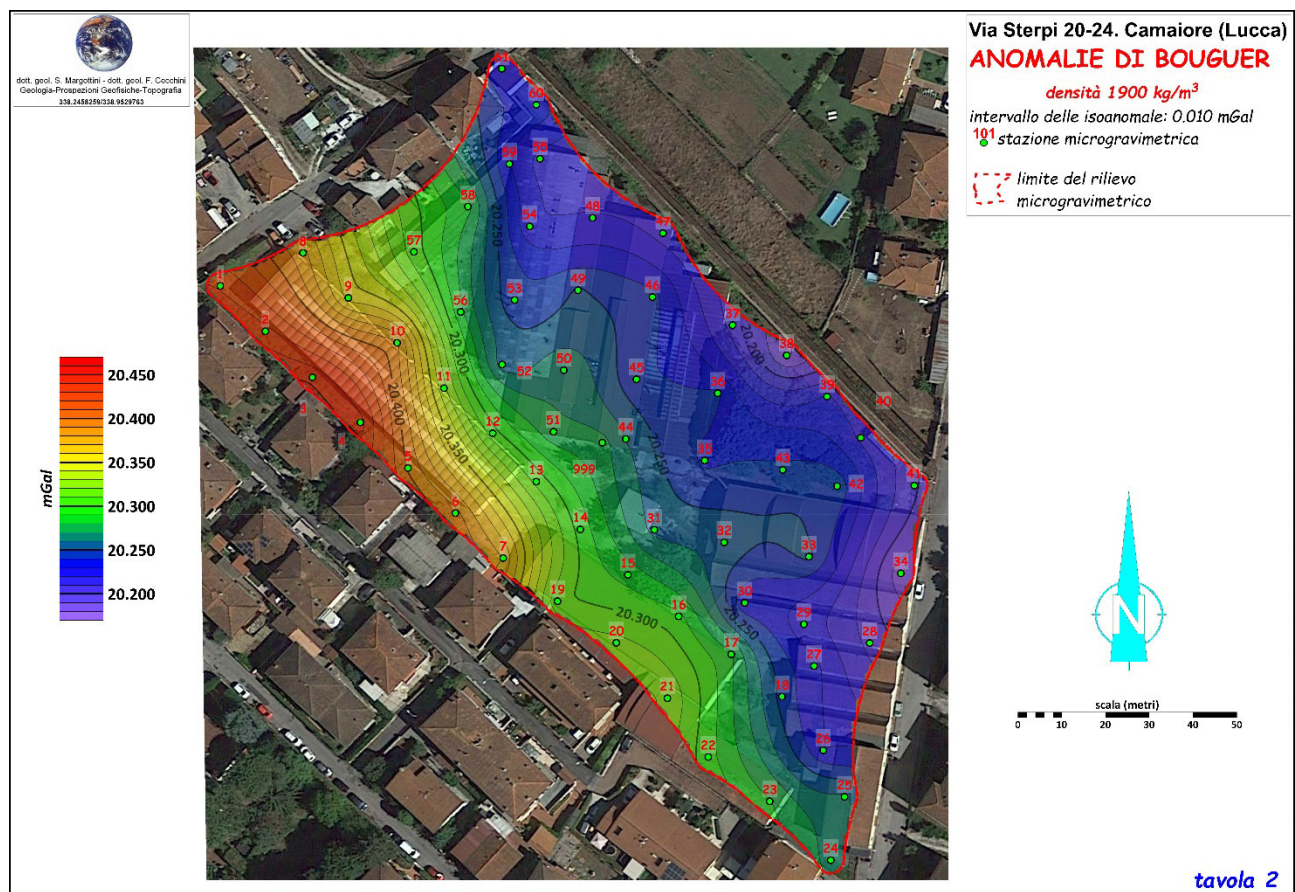
10°18'14.46" 43°56'26.11" 33.16 541.663 4.793 604.7129 4866.3699 +20.2567 31
 10°18'15.18" 43°56'26.00" 32.94 541.702 4.802 604.7289 4866.3671 +20.2571 32
 10°18'16.04" 43°56'25.89" 32.96 541.681 4.810 604.7482 4866.3638 +20.2519 33
 10°18'16.98" 43°56'25.76" 32.92 541.608 4.820 604.7692 4866.3600 +20.1839 34
 10°18'14.99" 43°56'26.61" 33.45 541.549 4.834 604.7244 4866.3858 +20.2381 35
 10°18'15.14" 43°56'27.11" 33.55 541.498 4.877 604.7274 4866.4011 +20.2413 36
 10°18'15.30" 43°56'27.61" 33.60 541.422 4.920 604.7308 4866.4166 +20.2066 37
 10°18'15.85" 43°56'27.38" 33.69 541.382 4.907 604.7432 4866.4098 +20.1786 38
 10°18'16.26" 43°56'27.07" 33.71 541.425 4.893 604.7524 4866.4003 +20.2216 39
 10°18'16.59" 43°56'26.76" 33.75 541.431 4.868 604.7601 4866.3909 +20.2180 40
 10°18'17.13" 43°56'26.40" 33.86 541.395 4.853 604.7723 4866.3800 +20.2015 41
 10°18'16.34" 43°56'26.41" 33.68 541.496 4.838 604.7547 4866.3799 +20.2462 42
 10°18'15.79" 43°56'26.53" 33.59 541.514 4.840 604.7423 4866.3836 +20.2421 43
 10°18'14.19" 43°56'26.78" 33.55 541.556 4.831 604.7064 4866.3907 +20.2594 44
 10°18'14.31" 43°56'27.22" 33.53 541.512 4.871 604.7089 4866.4043 +20.2419 45
 10°18'14.48" 43°56'27.83" 33.54 541.472 4.927 604.7125 4866.4230 +20.2434 46
 10°18'14.60" 43°56'28.30" 33.56 541.410 4.969 604.7149 4866.4376 +20.2163 47
 10°18'13.88" 43°56'28.42" 33.56 541.416 4.970 604.6988 4866.4411 +20.2215 48
 10°18'13.72" 43°56'27.89" 33.54 541.487 4.921 604.6955 4866.4246 +20.2514 49
 10°18'13.56" 43°56'27.30" 33.50 541.555 4.866 604.6922 4866.4064 +20.2695 50
 10°18'13.45" 43°56'26.84" 33.52 541.581 4.826 604.6899 4866.3923 +20.2736 51
 10°18'12.93" 43°56'27.35" 33.54 541.537 4.861 604.6782 4866.4077 +20.2555 52
 10°18'13.07" 43°56'27.82" 33.52 541.503 4.899 604.6810 4866.4224 +20.2430 53
 10°18'13.24" 43°56'28.36" 33.54 541.444 4.946 604.6845 4866.4392 +20.2223 54
 10°18'13.35" 43°56'28.86" 33.57 541.395 4.997 604.6868 4866.4546 +20.2173 55
 10°18'12.52" 43°56'27.74" 33.50 541.562 4.882 604.6687 4866.4197 +20.2822 56
 10°18'12.05" 43°56'28.19" 33.51 541.556 4.918 604.6580 4866.4334 +20.3045 57
 10°18'12.61" 43°56'28.52" 33.51 541.509 4.955 604.6703 4866.4437 +20.2839 58
 10°18'13.04" 43°56'28.83" 33.52 541.423 4.992 604.6798 4866.4534 +20.2298 59
 10°18'13.32" 43°56'29.26" 33.84 541.336 5.024 604.6860 4866.4669 +20.2380 60
 10°18'12.98" 43°56'29.53" 33.96 541.292 5.043 604.6781 4866.4752 +20.2329 61
 10°18'13.95" 43°56'26.76" 33.55 541.577 4.823 604.7010 4866.3898 +20.2741 999



ANOMALIE DI BOUGUER

Tutte le mappe delle anomalie gravimetriche sono state realizzate utilizzando il programma di *contouring* **Surfer 29.0**. L'andamento delle isoanomale è stato calcolato a partire dai valori delle singole stazioni con il metodo *kriging*.

Le isoanomale, elaborate tramite il software Surfer, nelle zone di interpolazione rispettano i valori di anomalia riscontrati nelle stazioni gravimetriche. L'estensione delle anomalie è limitata all'area effettivamente indagata in quanto i valori delle anomalie esterne sarebbero solo valori estrapolati matematicamente e non troverebbero correlazione con la realtà geologica.



La carta gravimetrica delle Anomalie di Bouguer, elaborata con un valore di densità di 1900 kg/m³ per la correzione di Bouguer e di 2600 kg/m³ per la correzione topografica, **tavola 2**, è stata realizzata utilizzando i dati delle 62 stazioni microgravimetriche. I valori dell'anomalia di Bouguer risultano tutti positivi, da +20.179 a +20.448.

Il *trend* delle anomalie gravimetriche, cioè il decremento dei valori di anomalia da Sud-Ovest verso Nord-Est, maschera l'andamento delle anomalie prodotte dall'immediato sottosuolo. L'effetto generato dalle strutture geologiche profonde è quindi sovrapposto

all'effetto generato dai terreni dell'immediato sottosuolo, è stato pertanto necessario effettuare dei filtraggi per ottenere un quadro dell'effetto gravimetrico del sottosuolo dell'intera area indagata.

CAMPO REGIONALE DEL 1° ORDINE E ANOMALIE RESIDUE DI ORDINE n-1

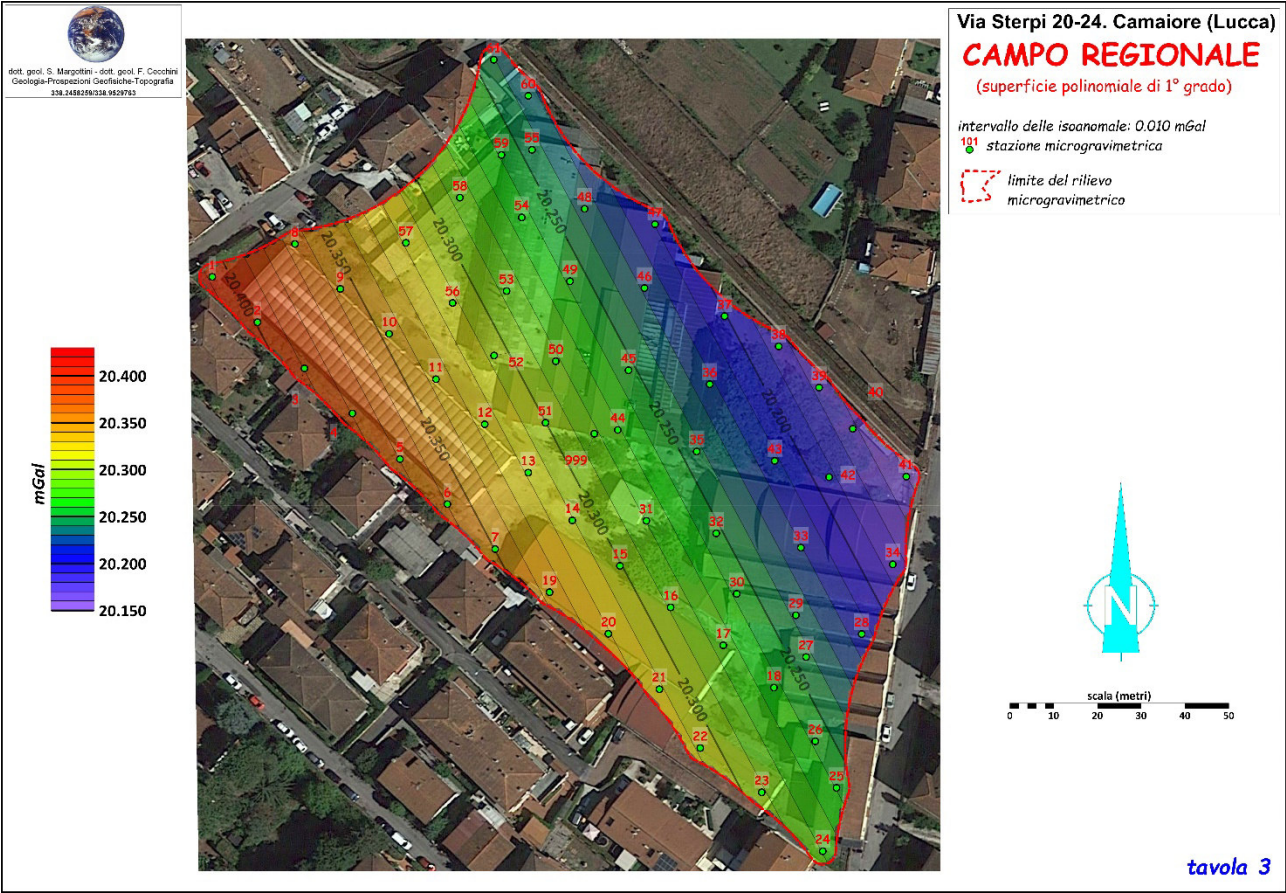
Le Anomalie di Bouguer, rappresentano la base di partenza dalla quale, attraverso elaborazioni e filtraggi successivi, è possibile separare gli effetti gravimetrici dovuti alle strutture presenti a diverse profondità dal piano campagna.

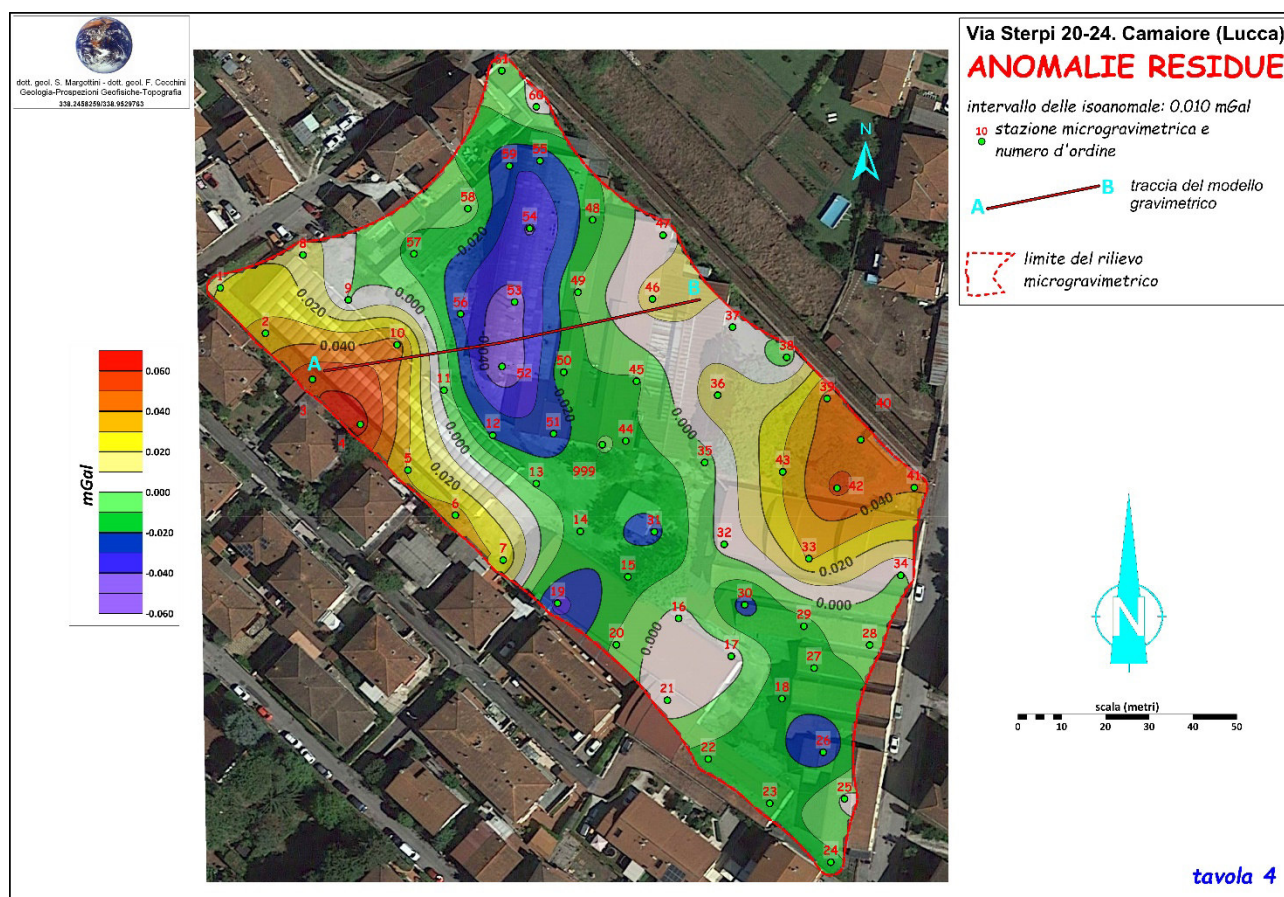
Le Anomalie di gravità risentono di variazioni di densità a varie profondità, dal piano campagna fino ad elevata profondità. Tenendo conto dell'obiettivo dello studio, l'individuazione di aree con deficit di massa, presenti nel sottosuolo, è necessario sottrarre l'effetto di strutture geologiche più profonde operando un filtraggio sulle Anomalie di Bouguer, mediante la sottrazione del Campo Regionale del 1° ordine.

Per ottenere il **Campo Regionale di 1° grado**, tavola 3, è stato utilizzato il metodo dei minimi quadrati al fine di determinare una superficie polinomiale di primo grado. Tale superficie garantisce un ottimo fitting e separa meglio le anomalie residue più superficiali da quelle generate da corpi geologici più profondi. L'espressione matematica di tale superficie è:

$$G(\text{reg}) = +5949.945 - 1.8791 * X_{utm} - 0.985 * Y_{utm}$$

Questa superficie presenta una direzione N27.7° W e un'immersione Est-Nord-Est.

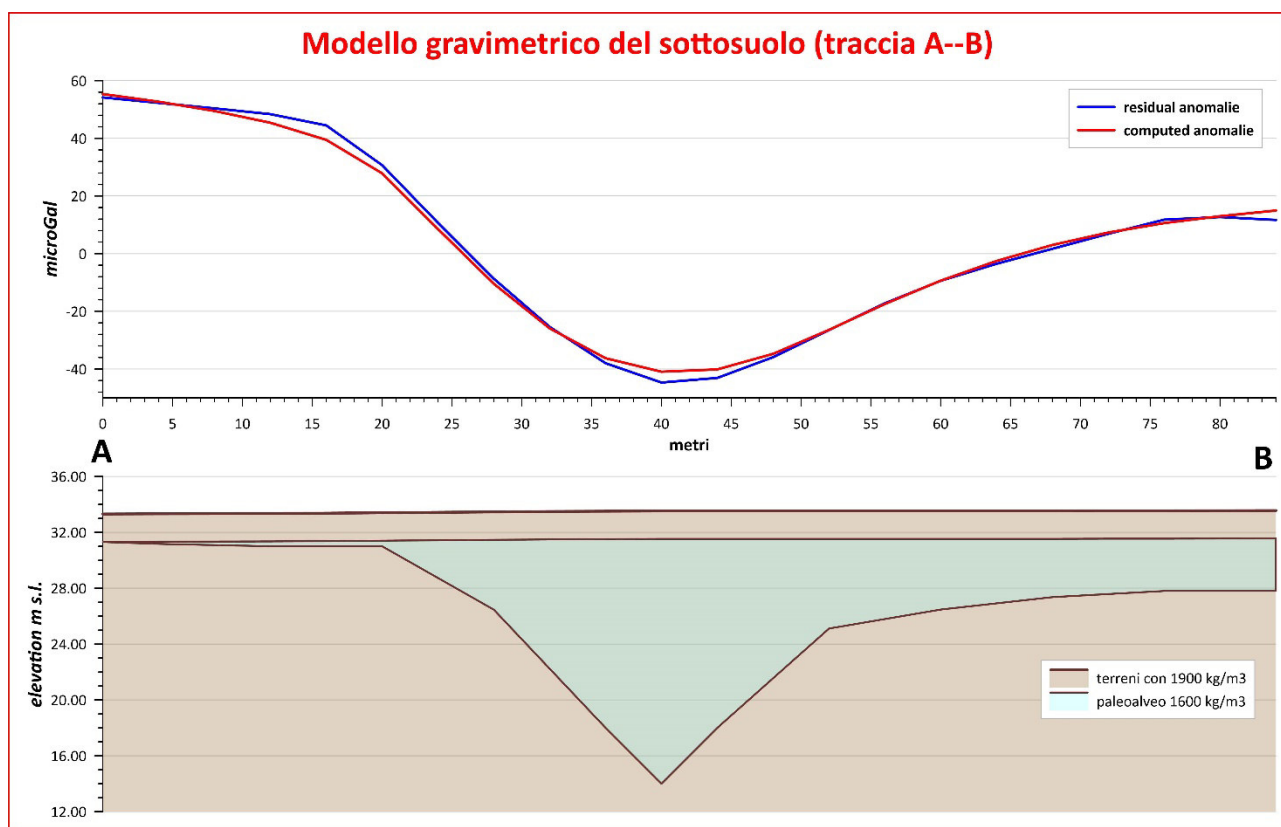




Una volta sottratto il Campo Regionale alle Anomalie di Bouguer, è stato possibile calcolare la mappa delle **Anomalie Residue** di **Tavola 4**. Data l'estensione del rilievo e la densità spaziale delle misure gravimetriche, le Anomalie Residue rappresentano gli effetti di variazioni di densità entro le prime decine di metri dal piano campagna: tali valori ed il dettaglio ottenibile, sono funzione dell'estensione areale delle anomalie sia delle dimensioni della griglia di stazioni di misura utilizzata.

I valori di anomalia presentano un *range* diverso per entità, valori sia positivi che negativi, da -0.040 mGal a +0.050 mGal. Sono presenti diverse zone con anomalie sia positive che negative molto articolate. Gli aspetti più evidenti sono:

- a) una fascia di anomalie negative, fino a oltre -0.040 mGal, che attraversa da Nord a Sud l'area indagata,
- b) un'altra area con valori negativi, -0.020 mGal, nella zona Sud-Est.
- e) aree con valori positivi, presenti presso bordi Ovest, Via Fonda, con +0.060 mGal ed Est, Via Sterpi, con +0.050 mGal,



A titolo qualitativo, è stato realizzato un modello gravimetrico del sottosuolo sulla base delle Anomalie Residue per evidenziare il possibile spessore dei terreni con una densità, 1600 kg/m^3 , minore del contesto calcolato a 1900 kg/m^3 . Dall'andamento in pianta delle Anomalie Residue di tavola 4, il modello gravimetrico evidenzia l'andamento di un possibile paleoalveo che attraversa da Nord a Sud l'area investigata.

Si ricorda infine che, essendo quelli studiati nella presente indagine fenomeni dinamici, l'indagine effettuata rappresenta una fotografia del sito alla data di realizzazione del rilievo microgravimetrico (Ottobre 2024).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Problematica ed oggetto della presente indagine

All'interno dell'area relativa all'ex stabilimento O. Pardini Alluminio ubicata in via Sterpi 20-24, nel mese di ottobre 2024 è stata eseguita una prospezione microgravimetrica. L'indagine è stata finalizzata alla individuazione potenziali aree a rischio sinkhole.

La prospezione microgravimetrica ha evidenziato anomalie generate dal contrasto di densità tra volumi a diverso stato di addensamento.

Il sito in studio è ubicato in un settore del centro urbano di Camaione, in cui il sottosuolo è caratterizzato per molte decine di metri dalla presenza di litotipi relativi a depositi alluvionali Pleistocenici-Olocenici.

Descrizione del sito

Il sito d'indagine è ubicato nell'abitato di Camaione (Lu) tra Via Fonda, Via Caduti sul Lavoro, Via Sterpi ed un canale di raccolta delle acque meteoriche.

La zona d'indagine era fino a pochi anni fa sede di una società di produzione di materiali metallici, sono pertanto presenti nell'area numerosi capannoni alternati a zone libere.

Descrizione delle mappe di Anomalia gravimetrica

Sono state distribuite nell'area da investigare n. 62 stazioni di misura microgravimetrica su una maglia avente una spaziatura di circa 8 m.

La mappa delle Anomalie Residue (**Tavola 4**) è stata realizzata annullando l'influenza del Campo Regionale (**Tavola 3**) dalle Anomalie di Bouguer (**Tavola 2**) al fine di evidenziare solo l'effetto gravimetrico generato da volumi superficiali, entro i primi 50 m a partire dal piano campagna, aventi diversa densità rispetto al contesto.

La mappa delle Anomalie Residue (**Tavola 4**) mostra zone di anomalia caratterizzate da valori negativi e valori positivi variamente disposti ed aventi dimensioni variabili.

Nella **Tavola 4** l'andamento delle anomalie residue ha un andamento articolato e riflette la presenza di volumi di terreno a stato di addensamento più basso rispetto al contesto.

I valori di anomalia, positiva e negativa, sono compresi tra -0.040 mGal e +0.050 mGal.

Le aree di anomalia gravimetrica rilevate, possono essere descritte come segue:

- a) una zona stretta ed allungata di anomalie negative, fino ad un massimo di -0.040 mGal, che attraversa da Nord a Sud l'area indagata;
- b) una zona con valori negativi, -0.020 mGal, in apparente connessione e continuità con la precedente, ubicata nella porzione sud-est dell'area indagata;
- c) aree con valori di anomalia positiva, presenti presso il bordo Ovest, Via Fonda, con $+0.060$ mGal ed ad Est, Via Sterpi, con $+0.050$ mGal,

Dall'analisi delle Anomalie Residue è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

I settori di anomalia negativa rappresentati nella Tavola 4, considerando i valori di anomalia, i gradienti gravimetrici la forma e la distribuzione areale, sono riconducibili a strutture geologiche caratterizzate da densità minore rispetto al contesto, correlate a dinamiche di tipo fluviale

L'anomalia residua stretta ed allungata, circa diagonale, che, dallo spigolo nord dell'area d'indagine, attraversa sinuosamente il sito fino al suo limite sud e sud-est, è probabilmente ascrivibile alla presenza di un paleoalveo fluviale, colmato, che in passato attraversava la zona.

Le indagini geognostiche in corso nell'area di prospezione confermano il modello stratigrafico ipotizzato attraverso il risultato dell'indagine microgravimetrica.

Attualmente, in base a tali evidenze e considerazioni, si può escludere la presenza di aree a rischio sinkhole all'interno dell'area investigata.

Si consiglia inoltre, considerando anche la presenza di possibili variazioni litologiche verticali ed orizzontali di valutare attentamente la scelta delle strutture di fondazione da utilizzare per le nuove costruzioni al fine di scongiurare potenziali futuri cedimenti differenziali.



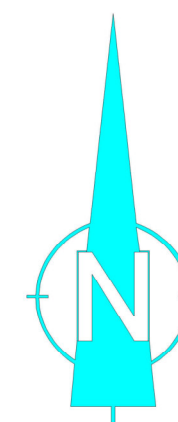
dott. geol. S. Margottini - dott. geol. F. Cecchini
Geologia-Prospezioni Geofisiche-Topografia
338.2458259/338.9529763



Via Sterpi 20-24. Camaiore (Lucca) UBICAZIONE delle STAZIONI MICROGRAVIMETRICHE

101 stazione microgravimetrica e numero d'ordine

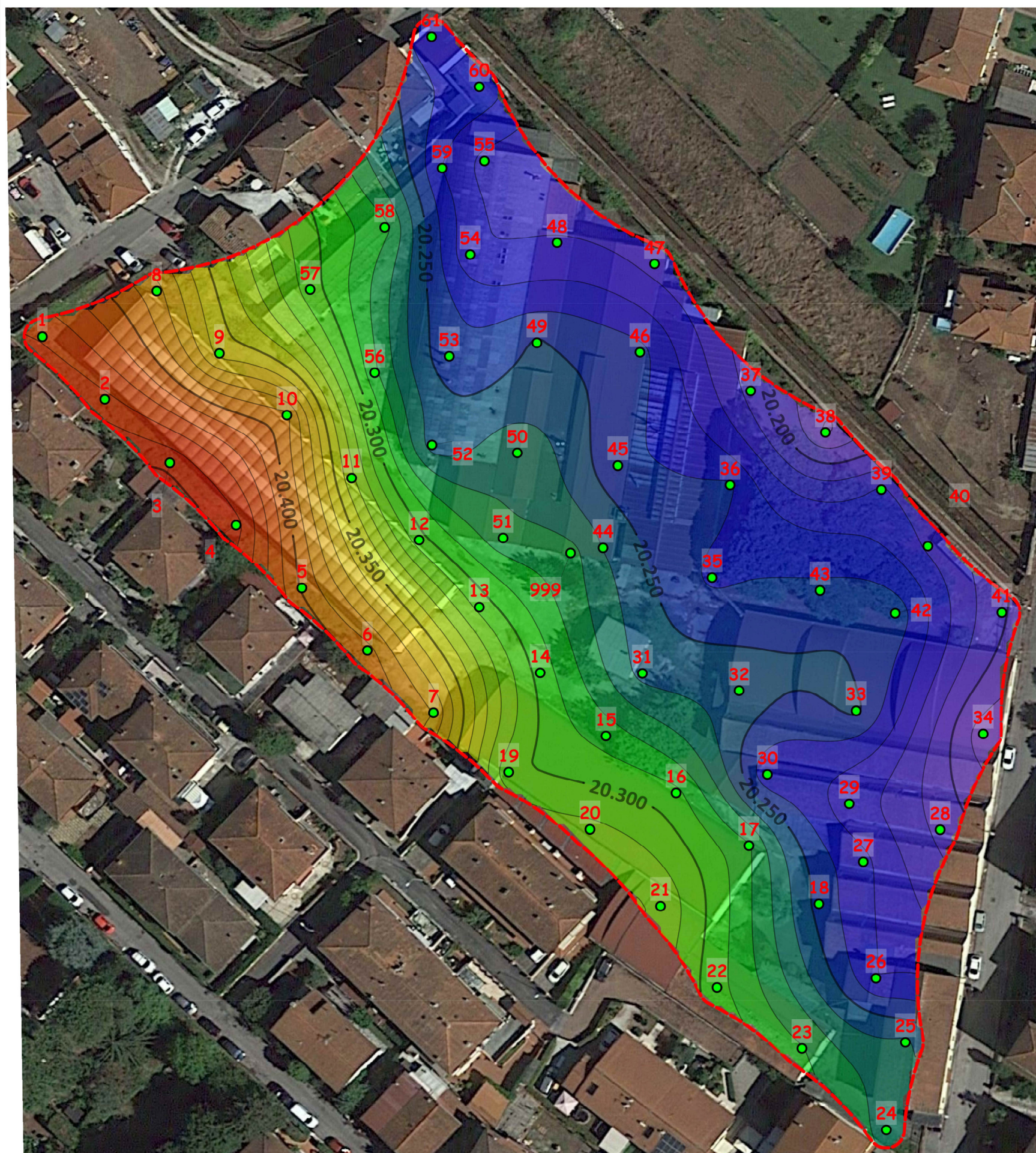
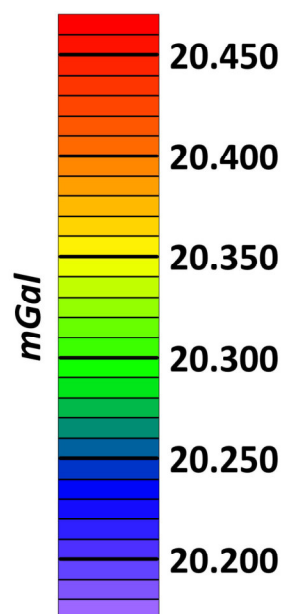
limite del rilievo
microgravimetrico



scala (metri)
0 10 20 30 40 50



dott. geol. S. Margottini - dott. geol. F. Cecchini
Geologia-Prospezioni Geofisiche-Topografia
338.2458259/338.9529763



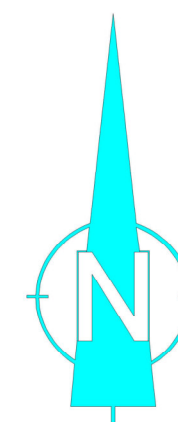
Via Sterpi 20-24. Camaione (Lucca) **ANOMALIE DI BOUGUER**

densità 1900 kg/m^3

intervallo delle isoanomale: 0.010 mGal

101 stazione microgravimetrica

limite del rilievo
microgravimetrico

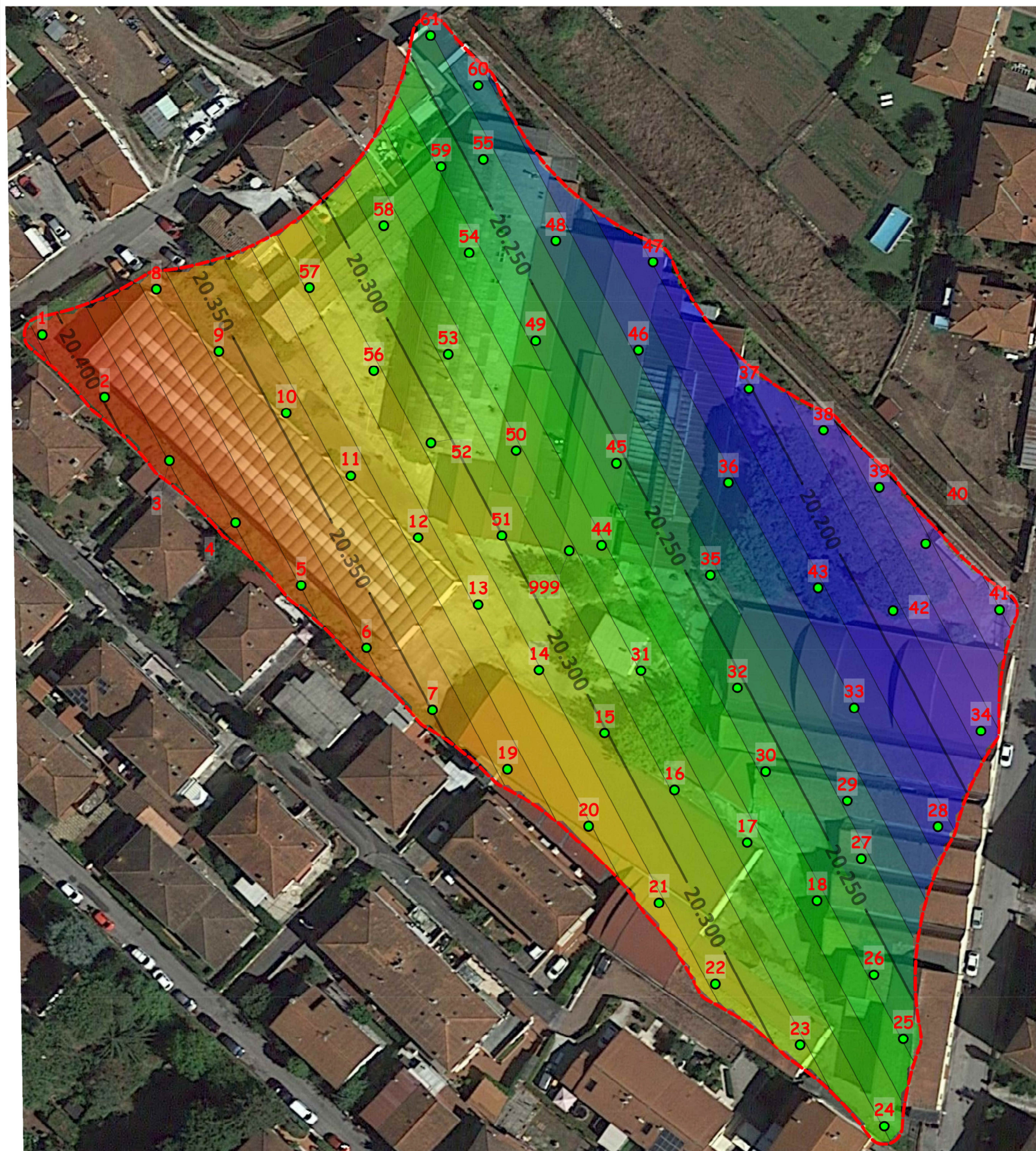
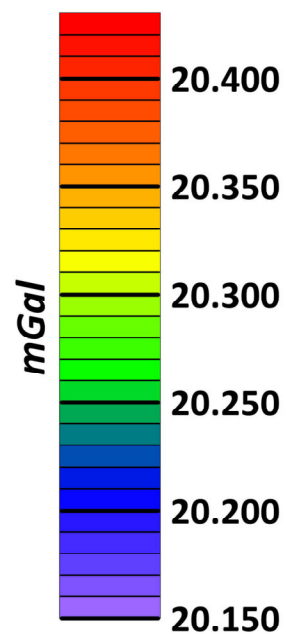


scala (metri)
0 10 20 30 40 50

tavola 2



dott. geol. S. Margottini - dott. geol. F. Cecchini
Geologia-Prospezioni Geofisiche-Topografia
338.2458259/338.9529763



Via Sterpi 20-24. Camaione (Lucca)

CAMPO REGIONALE

(superficie polinomiale di 1° grado)

intervallo delle isoanomalie: 0.010 mGal

101 stazione microgravimetrica

limite del rilievo
microgravimetrico

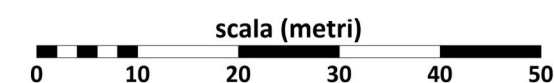
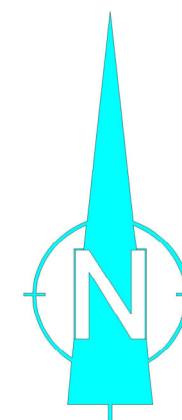
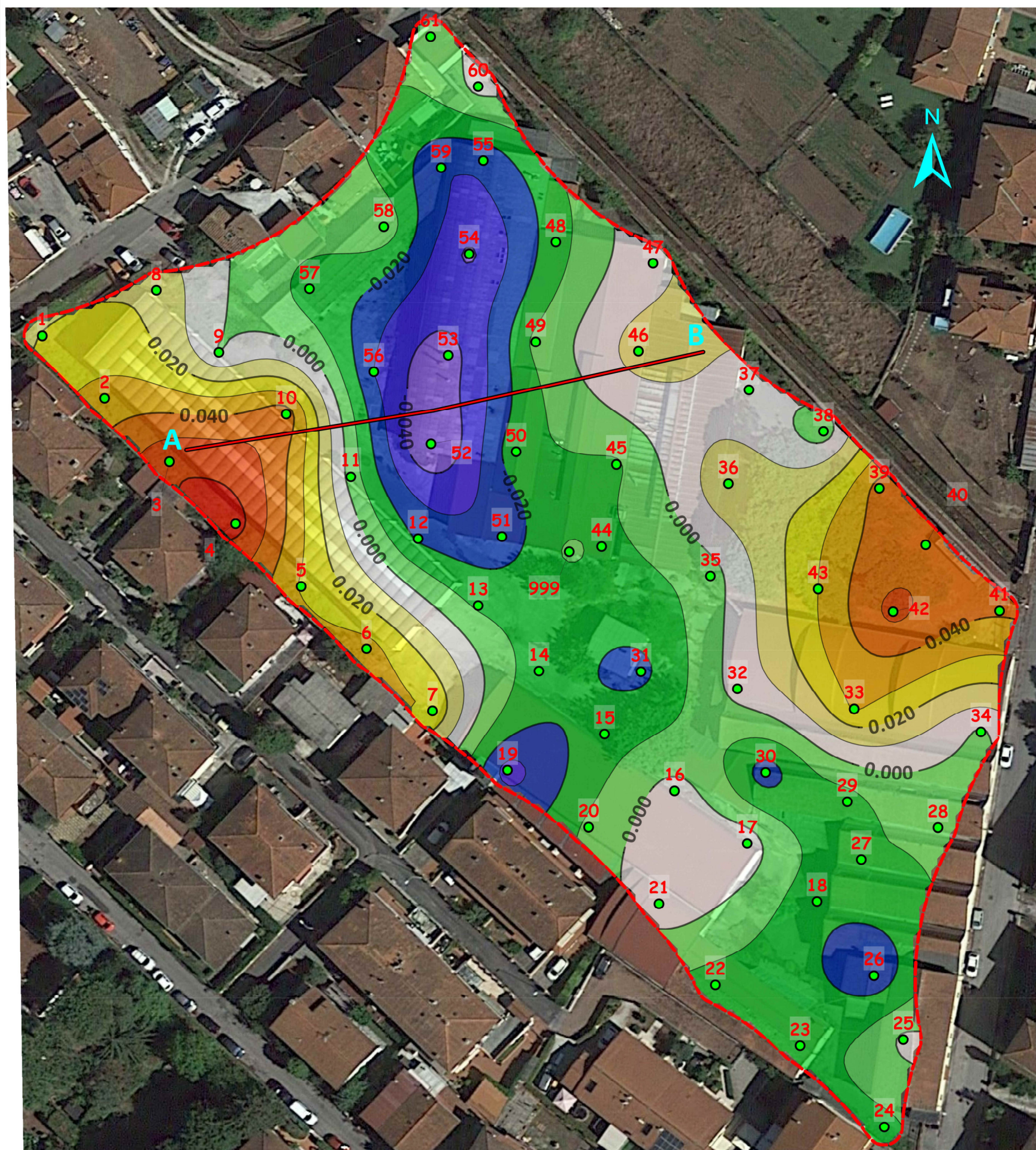
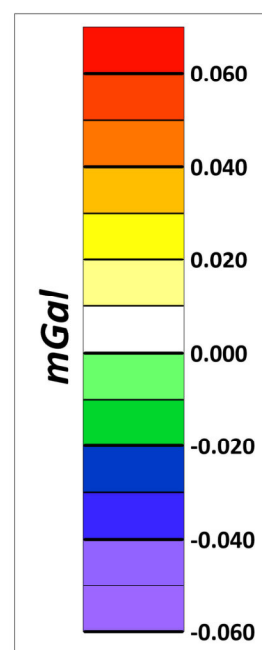


tavola 3



dott. geol. S. Margottini - dott. geol. F. Cecchini
Geologia-Prospezioni Geofisiche-Topografia
338.2458259/338.9529763



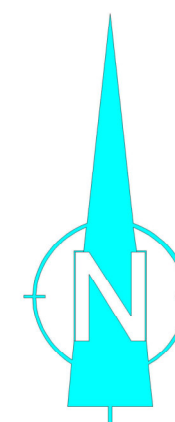
Via Sterpi 20-24. Camaiore (Lucca) **ANOMALIE RESIDUE**

intervallo delle isoanomale: 0.010 mGal

10 stazione microgravimetrica e
numero d'ordine

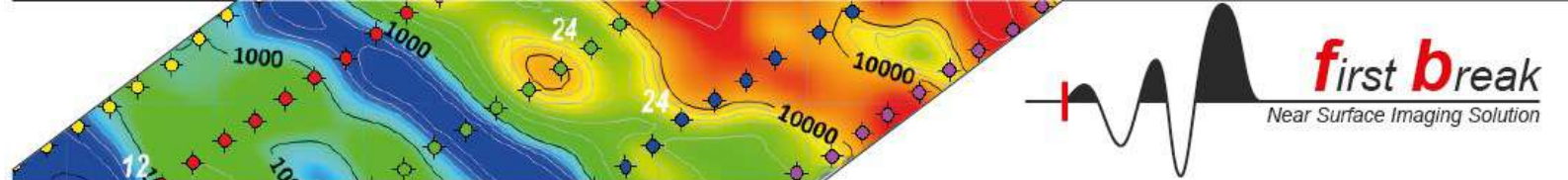
A B traccia del modello
gravimetrico

limite del rilievo
microgravimetrico



scala (metri)
0 10 20 30 40 50

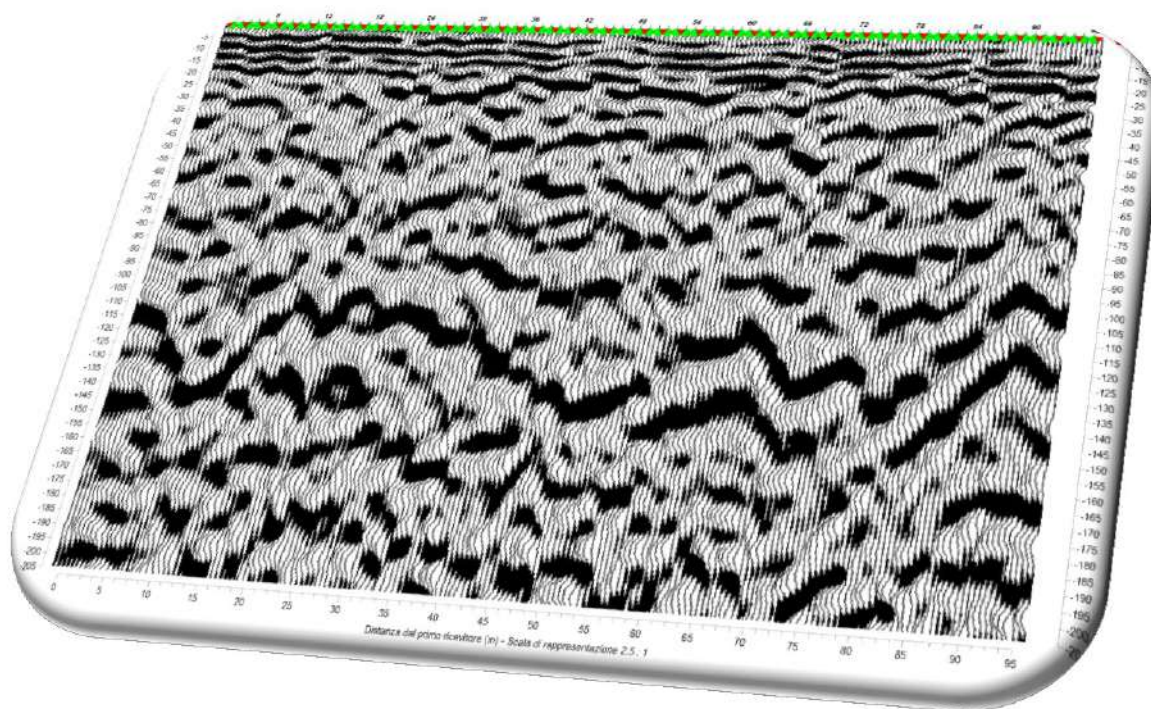
tavola 4



Richiedente: **Dott. Geol. Luca Niccoli**
Committente: Pirani group
Sito: Ex Stabilimento Pardini Alluminio
Via Sterpi, Camaione (LU)

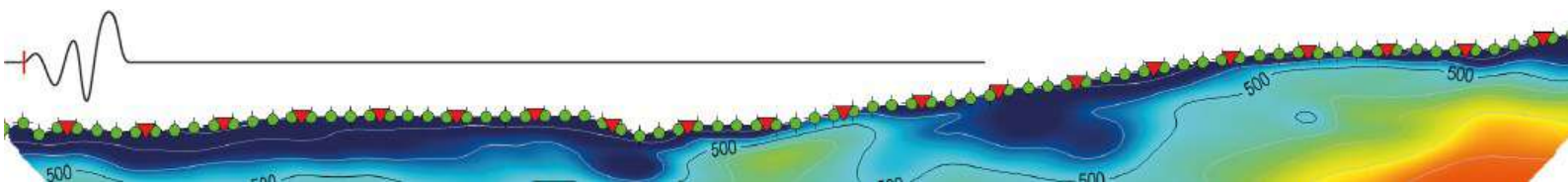
**RICOSTRUZIONE DELLE GEOMETRIE
SEPOLTE MEDIANTE SISMICA A
RIFRAZIONE E RIFLESSIONE IN ONDE
DI COMPRESSIONE (P), MASW E
SISMICA IN FORO DOWN-HOLE**

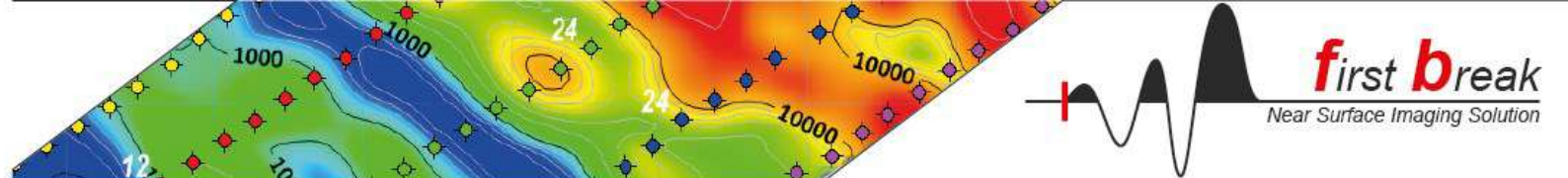
*Ex Stabilimento
Pardini Alluminio*



Dott. Geol. Dorian Caputo
First Break partner

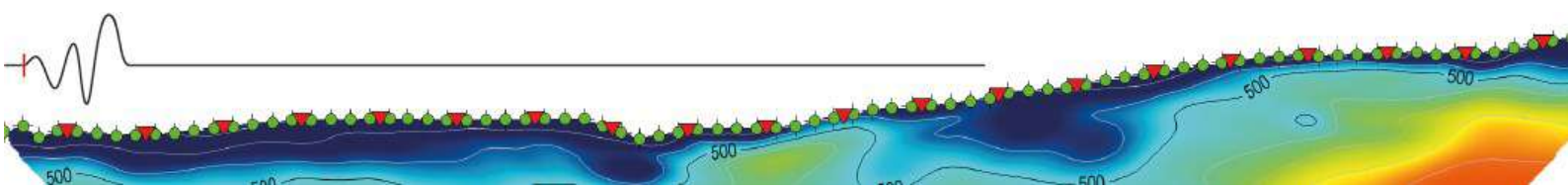
Via Ratti 64/A
19030 Ameglia (SP) - ITALY
mob. 3489226718
doriano@near-surface.com
dorianocaputo@pec.epap.it

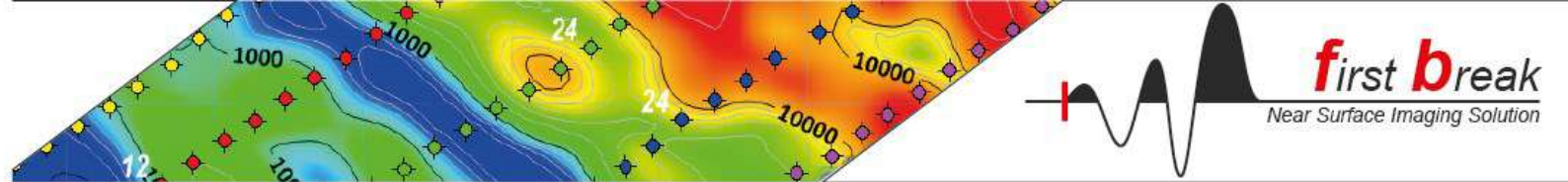




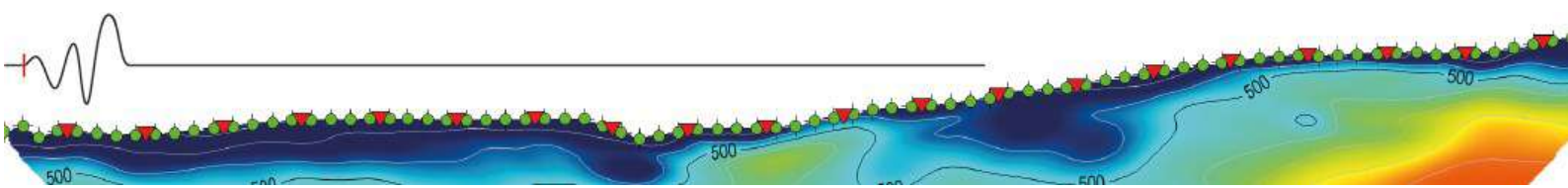
SOMMARIO

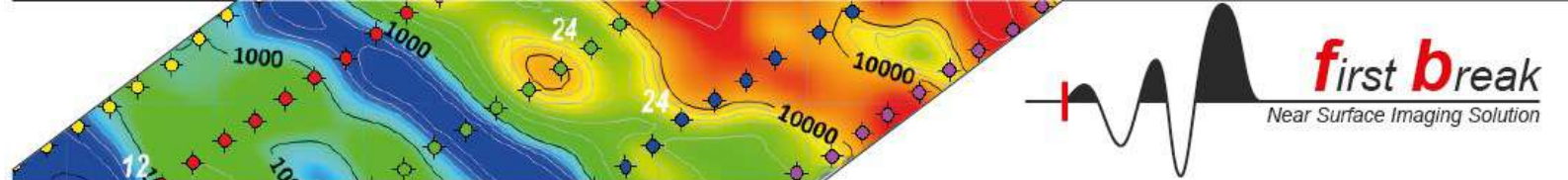
PREMESSA.....	4
Programma indagini e ubicazione	4
GENERALITÀ SULLE INDAGINI SVOLTE.....	5
Indagini eseguite.....	5
Sismica a riflessione ibrida	5
Multichannel analysis of Surface Waves (MASW)	5
Sismica in foro Down Hole.....	5
Ubicazione indagini.....	6
Strumentazione.....	8
Sismografo	8
Formato dati e denominazione dei record	9
Sorgente onde sismiche	9
Geofono per indagini in foro	10
METODI GEOFISICI APPLICATI	11
Sismica a rifrazione	11
Data Processing.....	12
Metodi tradizionali	12
Elaborazione tomografica	12
Softwares di elaborazione.....	13
Raytracing e raypath coverage	13
Tomografia vincolata.....	13
Proprietà elastiche delle rocce: cenni	14
Velocità sismiche	14
Poisson modulus.....	14
Anisotropia	15
Sismica a riflessione	16
Introduzione	16
Basi teoriche	16
Seismic data processing.....	17
Prestack-processing.....	18
Dead traces and muting	18
Correzioni statiche.....	19
Analisi di velocità Normal Move Out.....	19
Stacking.....	20
Poststack-processing	20
Trace normalization.....	20
fx-deconvolution	20
Trace balancing.....	20
2D velocity model.....	20
Depth migration	20
Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW).....	22
Metodi di analisi	22
Acquisizione dati	22
Software di elaborazione	23
Sismica in foro con metodologia Down Hole.....	24





Processing dati	24
Software	25
ANALISI DEI RISULTATI	26
Sismica a riflessione ibrida	26
Acquisizione dati	26
Shotmap 26	
Tomografia a rifrazione	28
Common shot ghaters	28
Sismica a riflessione	30
Common shot ghaters	30
MASW32	
Acquisizioni MASW	32
Modello sismo-stratigrafico	33
Sismica in foro	34
V_{s30} - V_s equivalente	35
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	36
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA	37





Premessa

Il sottoscritto Dott. Geol. Dorian Caputo, è stato incaricato dal Dott. Geol. Luca Niccoli, per conto della Proprietà, di eseguire una campagna di indagini geofisiche per la comprensione dell'assetto geologico e stratigrafico dei terreni sui quali sorgono capannoni industriali dismessi e potenzialmente interessati dal fenomeno di sinkhole, nel comune di Camaione (LU) (fig.1). Secondo quanto previsto dal programma, sono state realizzate le seguenti indagini:

- n.2 Indagini sismica attiva a rifrazione in onde P;
- n.2 elaborazione tipo MASW
- n.1 Indagine sismica in foro tipo Down-hole

Questo documento costituisce la relazione tecnica redatta a chiusura della commessa e riporta la descrizione delle attività svolte in cantiere, le specifiche tecniche delle attrezzature impiegate, i dati di campagna ed i risultati delle prove eseguite in sito. Le attività di cantiere si sono svolte in conformità alle specifiche tecniche pervenuteci dalla direzione dei lavori.

Programma indagini e ubicazione

Il sito di indagine è nel centro dell'abitato di Camaione (LU), (Fig. 1). Il contesto geomorfologico è un contesto pianeggiante di pianura alluvionale intramontana. Il sito si colloca nel centro abitato di Camaione in un contesto completamente antropizzato..

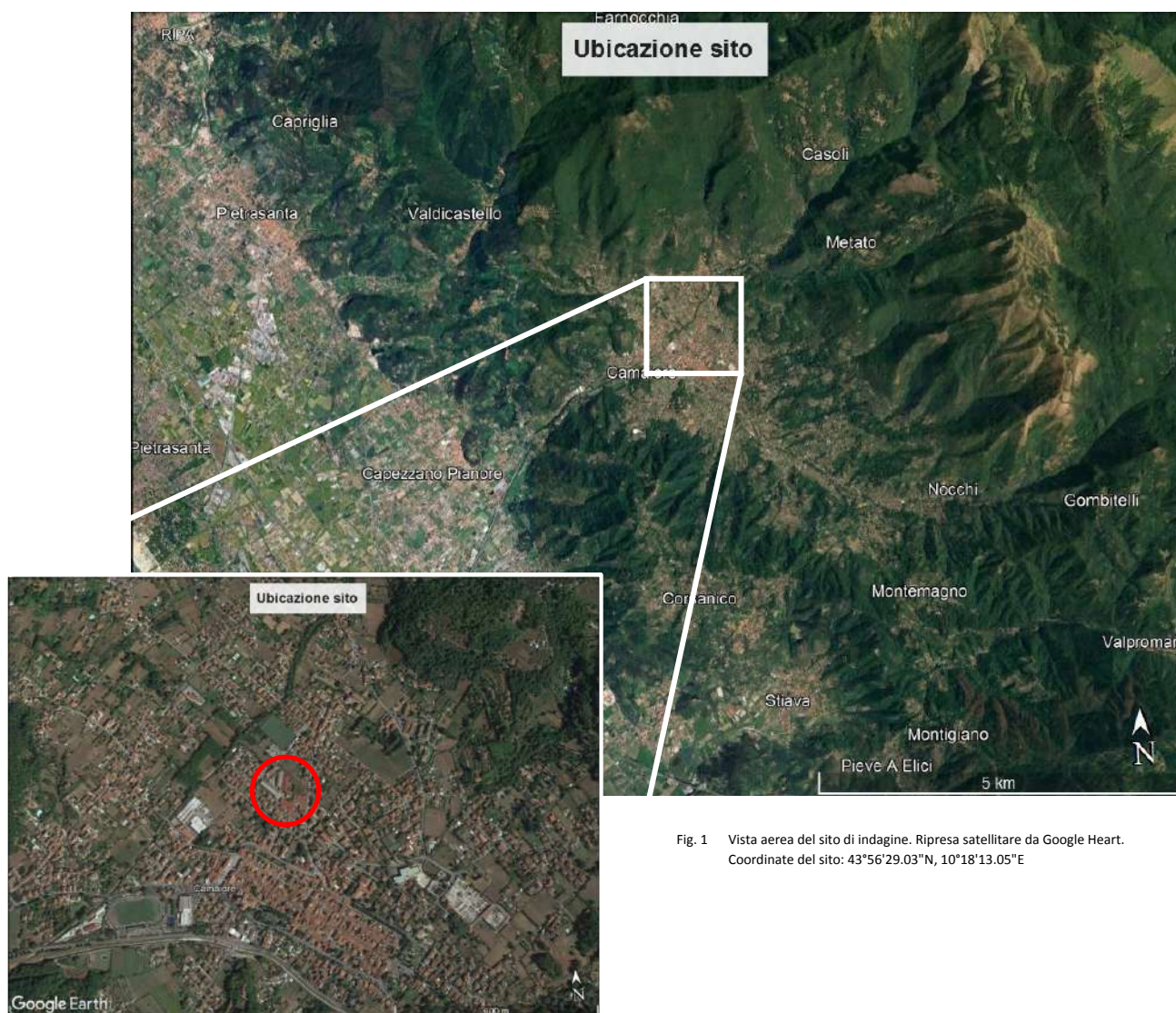
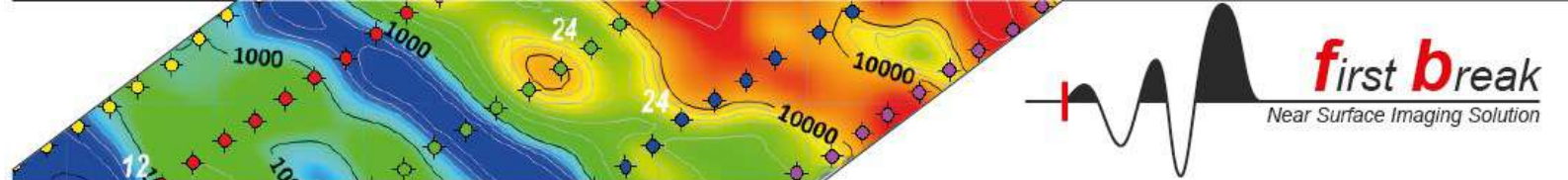


Fig. 1 Vista aerea del sito di indagine. Ripresa satellitare da Google Heart. Coordinate del sito: 43°56'29.03"N, 10°18'13.05"E



Generalità sulle indagini svolte

La finalità del piano indagini sommariamente descritto al paragrafo precedente, sono state definite dalla Committenza al momento dell’affidamento, e nello specifico tendeva ad acquisire nuove informazioni utili alla progettazione dell’opera in oggetto, relativamente a: geometrie sepolte; presenza di coltri di copertura e loro addensamento; stato degli ammassi rocciosi; presenza di lineamenti strutturali significativi. Più in particolare le finalità dei differenti metodi di prospezione sismica possono essere sinteticamente riassunte come segue:

- Il **metodo della sismica a rifrazione** è finalizzato alla determinazione continua lungo la verticale d’esplorazione della velocità di propagazione delle onde sismiche di volume (compressive), all’interno del mezzo preso in esame, con grande dettaglio ma limitatamente alle porzioni meno profonde. Le velocità sismiche così determinate sono inoltre propedeutiche nella sismica a riflessione per la correzione statica e per una più accurata conversione da tempi in profondità;
- la **sismica a riflessione** è una metodologia d’indagine geofisica attiva utilizzata nell’esplorazione del sottosuolo, che consente di ricostruire l’assetto sismo-stratigrafico e strutturale dei corpi geologici (stratificazione, superfici di discordanza, faglie, sovrascorrimenti), attraverso le proprietà elastiche del terreno, in quanto ogni superficie che marca un passaggio litologico o tettonico, rappresenta una discontinuità elastica in grado di riflettere parte dell’energia sismica che si propaga nel sottosuolo.
- **MASW**
- **Down Hole**

Indagini eseguite

L’elenco completo e dettagliato delle indagini eseguite, corredato delle caratteristiche specifiche (compresi i parametri di acquisizione), è riportato nelle tabelle successive (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), mentre i risultati vengono presentati nelle pagine successive ed in apposite tavole grafiche incluse in allegato, cui si rimanda per l’analisi di dettaglio delle singole stese.

Sismica a riflessione ibrida

Sito	Rifr.	Lunghezza	Geofoni	Array	Passo	Shots	Energizzazione	Copertura	Durata record / Campionamento
	Line1	96 m	Vert. 96	Onde P	1.0 m	49	Mazza 8 Kg su Piastra	2400%	1000 ms 500.0 μ s - 2500 Hz

Tab. 1 Caratteristiche geometriche e parametri di acquisizione utilizzati per l’acquisizione delle linee a riflessione realizzate sul Lotto.

Multichannel analysis of Surface Waves (MASW)

Le analisi MASW sono state eseguite “sezionando la linea sismica a riflessione in 2 segmenti e utilizzando direttamente gli shot. Eseguiti per la stessa. In particolare la MASW 1 è stata analizzata dal G1 al G60 in modo da coprire almeno 60 metri di line, analogamente la MASW 2 è stata analizzata dal G35 al G96.

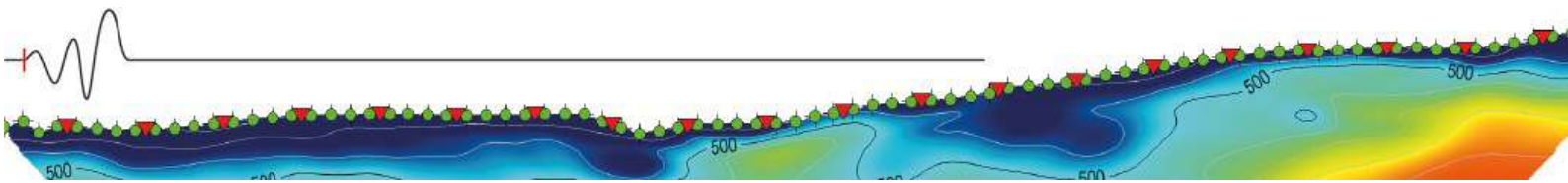
LINEA	LUNGHEZZA	GEOFONI	ARRAY	PASSO	SHOTS	ENERGIZZAZIONE	ACQUISIZIONE	CAMPIONAMENTO
MASW 1	60 m	vert. 60 Da g1 a g60	Onde Rayleigh	1.00 m.	1	Mazza 8 kg su Piastra	1000 ms	250.0 μ s - 4000Hz
MASW 2	60 m	vert. 60 da g36 a g96	Onde Rayleigh	1.00 m.	1	Mazza 8 kg su Piastra	1000 ms	250.0 μ s - 4000Hz

Tab. 2 Caratteristiche geometriche e parametri di acquisizione utilizzati per l’elaborazione MASW.

Sismica in foro Down Hole

FORO	PROFONDITÀ	GEOFONI	ARRAY	PASSO	ENERGIZZAZIONE	ACQUISIZIONE	CAMPIONAMENTO
S1	30 m	4 orizz+1 vert.	Onde S e P	1.00 m.	Mazza 8 kg su trave e Piastra	500 ms	125.0 μ s - 8000Hz

Tab. 3 Caratteristiche geometriche e parametri di acquisizione della Down-Hole.



Ubicazione indagini

La posizione di tutte le linee sismiche è stata definita dalla Committenza e comunicata a GeoTec già in fase di offerta economica, in forma di mappe di ubicazione in scala 1:5000 su base cartografica CTR (documento di riferimento "Allegato I.2.2 Plan ubicazione indagini TOTALE.pdf"), di cui si riporta a titolo di esempio lo stralcio dalla Tav. 1 (Fig. 2), con la posizione degli allineamenti previsti per le indagini sismiche a rifrazione in onde P e onde S di supporto alla progettazione delle rampe A+D del nuovo viadotto.

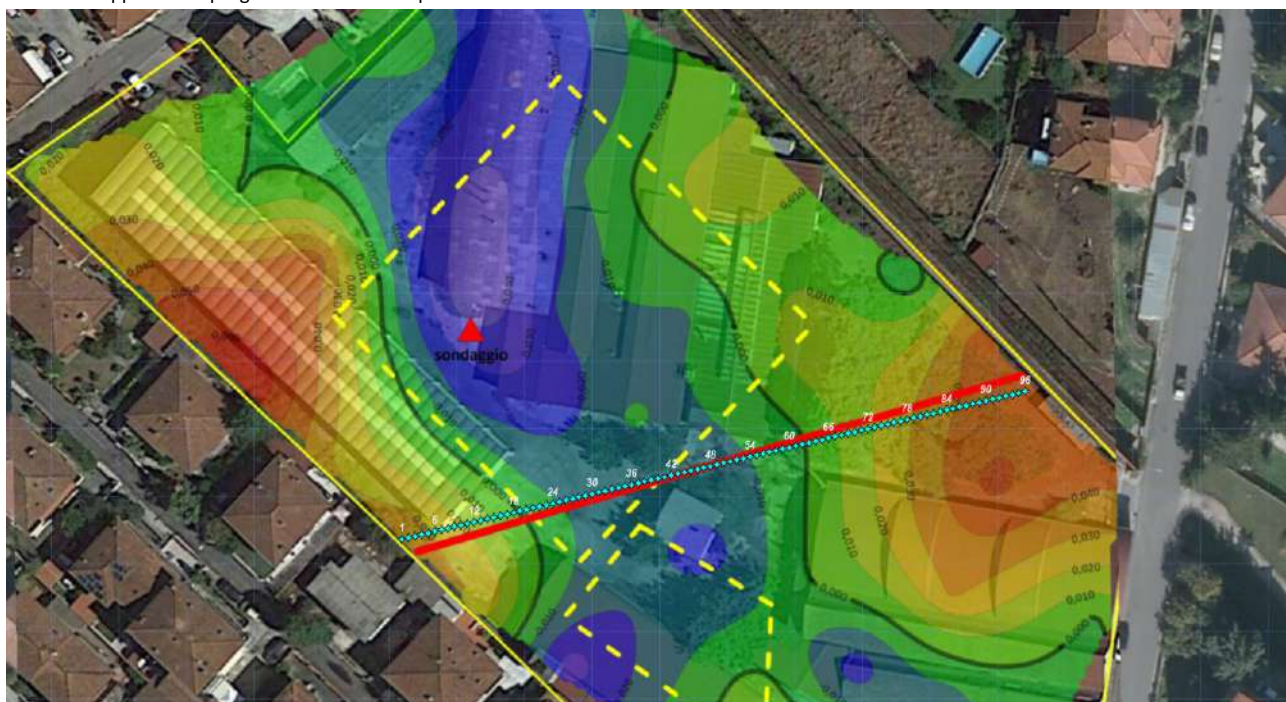
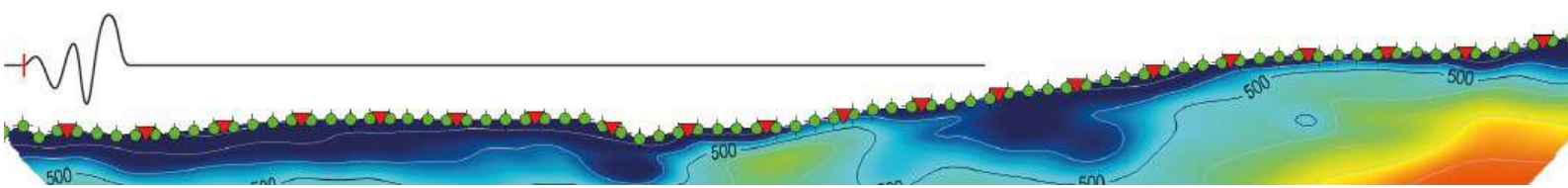


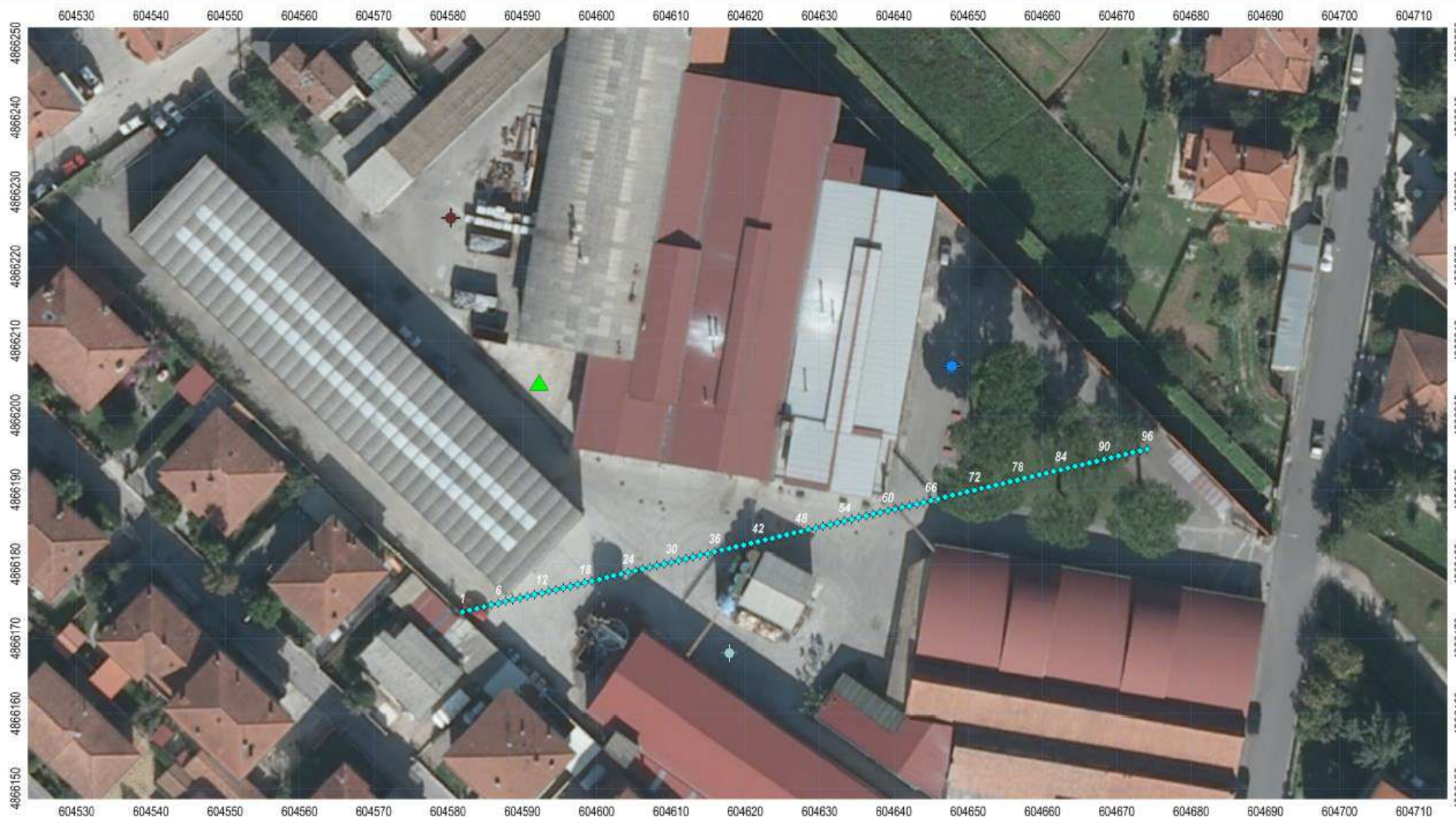
Fig. 2 Confronto tra la posizione delle linee come indicata dalla Committenza (linea rossa) e posizione finale con n. dei geofoni indicati

L'ubicazione della linea ci è pervenuta direttamente dalla ditta esecutrice dell'indagine gravimetrica, in accordo con il geologo incaricato, in funzione delle anomalie gravimetriche che ha riscontrato in sito. L'ubicazione finale poi, ha tenuto conto della tratta che necessitava la minor pulizia, precedentemente è stata fatta una totale pulizia delle aree di piazzale e della viabilità interna



Ubicazione indagini
sismica a riflessione

SEISMIC REFLECTION and REFRACTION TOMOGRAPHY
Indagini Geofisiche - Ex Sito Industriale in Via Sterpi, Comune di CAMAIORE (LU)



Project info

Client: Dott. geol. Luca Niccoli
Richiedente: Dott. Geol. Luca Niccoli
Numero d'ordine: Reflex_Via Sterpi
Refinimento lavoro: Reflex_Via Sterpi
Acquisizione dati: ottobre 2023 - Alacorta / Caputo
Data processing: ottobre 2023 - Dott. Luigi Alacorta
Report: ottobre 2023 - Dott. Luigi Alacorta

Technical features

P waves
strumento: DAQlink 4 (MegaDAQ config.)
canali attivi: 96
canali totali: 96
ricevitori: verticali, 4.5Hz
intensità ricev. (Rx): x = 1.0m
punti di trasmissione (Tx): 50, 2.0 m (dT = 2.0m)
software di acquisizione: VScope 3.6
software di elaborazione: Rayfract 4.05 / ZandST2d 7.0

Log_Vs_(MASW)
60
96
verticali, 4.5Hz
x = 1.0m
1.5m
VScope 3.6
WinMass Acq 2023

Legenda

◆ Ricevitori linea reflex
MASW1
MASW2
▲ Sondaggio c.c. + CH (sismica)

◆ DPSH1
◆ DPSH2
◆ DPSH3

Scala 1:500



Sistema di coordinate:
projection: UTM
datum: WGS84_zone 32N
coordinates: m

Strumentazione

Sismografo

L'apparecchiatura per l'esecuzione di indagini sismiche è costituita da sismografi 24 canali modello **DAQLink4**, prodotti da **Seismic Source Co.**, aventi risoluzione di acquisizione 24 bit e *range* dinamico superiore a 125dB (a 500 sps). Di seguito la scheda dello strumento con tutte le caratteristiche tecniche:



A/D Conversion:	24-bit, high-speed, delta-sigma converters
Dynamic Range:	Greater than 125 dB (measured @ 500 sps)
Crossfeed:	Better than 125 dB (measured @ 500 sps)
Common Mode Rejection:	Better than 100 dB (measured @ 500 sps)
Total Harmonic Distortion:	Better than 0.00005% (measured @ 500 sps)
Noise Floor:	0.15 mV RMS (measured @ 500 sps)
Bandwidth:	0 to 32 KHz (unfiltered)
Preamplifier Gain (User Selectable):	x1 (0 dB), x4 (12 dB) & x16 (24 dB)
Maximum Input Signal:	x1 gain - 0.5 Volts peak to peak
Input Impedance:	100k Ohms
Digital Filter (User Selectable):	Low-Cut Filter - Disabled, 0.001-120 Hz
	Filter Type - Linear or Minimum Phase
Anti-Alias Filter:	85% of the Nyquist frequency
Sampling Interval:	0.0156, 0.0313, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, & 8.00 milliseconds
Sampling Rate:	64,000, 32,000, 16,000, 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, & 125 sps
Record Length:	Unlimited (with Continuous Recording)
Record Modes:	DAQLink (Triggered by External Event)
	Sigma (Continuous Recording)
Trigger Accuracy:	±1 microsecond at any sampling frequency
Pre-Trigger Delay:	Up to 32 seconds
Post-Trigger Delay:	Up to 100 seconds

Fig. 3 Sismografo DAQLink 4 (sx), e relativa scheda tecnica (dx).

First Break dispone di n.6 sismografi DAQLink 4 che possono essere combinati in modalità MegaDAQ mediante connessione fisica o *wireless*, per realizzare stendimenti fino a 144 canali attivi simultaneamente (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

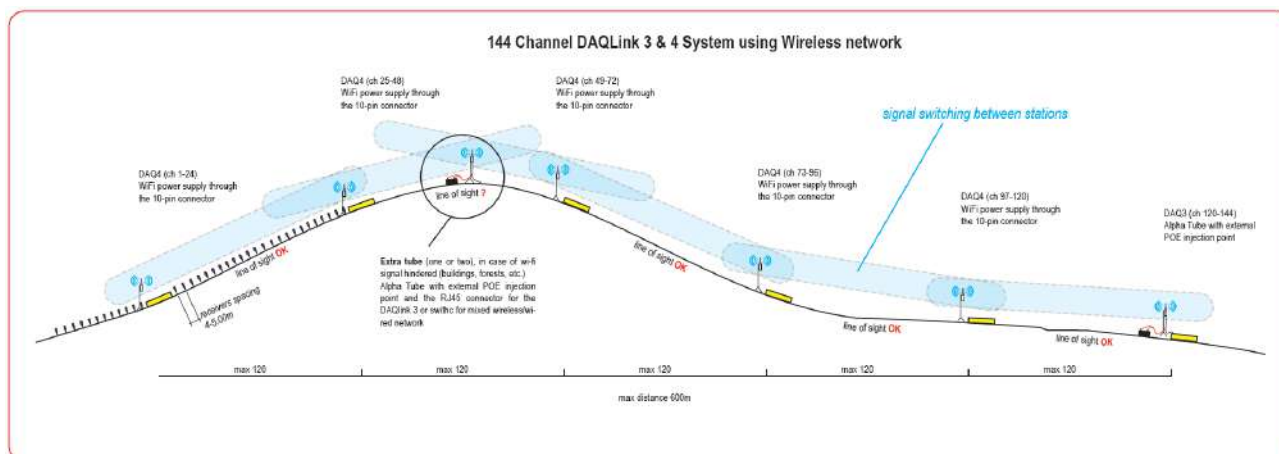
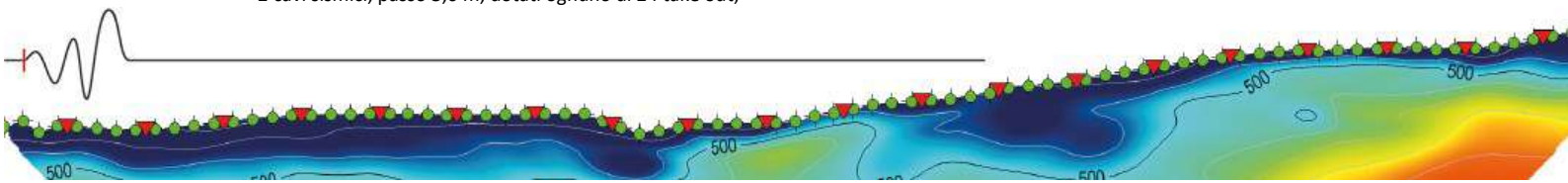


Fig. 4 Allestimento di una rete di sismografi in configurazione MegaDAQ attraverso connessione interamente wireless. In condizioni di scarsa "visibilità" è possibile adottare soluzioni miste wireless-cablato o, nei casi più difficili, interamente cablato

Il parco attrezzature disponibile per svolgere compiutamente tali indagini è completato da:

- avvolgitori con 90m di cavo ethernet CAT5 e *switch* di rete 5 porte 100bit integrato per la connessione cablata dei DAQLink;
- antenne omnidirezionali Alpha Tube per la connessione *wireless* dei DAQLink;
- 180 geofoni verticali con frequenza propria di 4,5 Hz;
- 180 geofoni orizzontali con frequenza propria di 4,5 Hz;
- 10 coppie di cavi sismici, passo 5,0 m, dotati ognuno di 12 take out;
- 2 cavi sismici, passo 3,0 m, dotati ognuno di 24 take out;



- sistema *radio-trigger* compatibile con le principali sorgenti di energia per indagini a rifrazione e riflessione, per l'innesco del sistema di acquisizione;
- radio trasmettenti Motorola per le comunicazioni in campo su medio-grandi distanze;
- sistema GPS Leica composto di stazione totale, base e rover. sistema *radio-trigger* compatibile con le principali sorgenti di energia per indagini a rifrazione e riflessione, per l'innesco del sistema di acquisizione;
- radio trasmettenti Motorola per le comunicazioni in campo su medio-grandi distanze;
- sistema GPS Leica composto di rover con connessione dati e servizio Italpos.

Formato dati e denominazione dei record

Tutti i parametri di acquisizione vengono gestiti mediante apposito *software* specifico per i DAQLink (VibraScope ver. 2 o 3), che consente la registrazione automatica dei dati in formato proprietario (.vs3), direttamente nel *database* associato al progetto.

Le registrazioni per ogni singolo punto di energizzazione vengono valutate in sito e la selezione di quelli ritenuti idonei viene sommata verticalmente (*stack*) ed esportata in uno dei formati compatibili con i *software* di *processing* (formati sismici *standard* sg2 o sgY), prima di procedere con la successiva registrazione.

Qualunque sia il metodo di inversione scelto, la corretta assegnazione della geometria dello stendimento è fondamentale per ottenere interpretazioni affidabili. Per limitare al minimo la possibilità di errori legati alla geometria, soprattutto in situazioni in cui la spaziatura dei ricevitori varia lungo lo *spread* o dove si abbia una situazione topografica complessa, si adotta il concetto di *station number* per l'identificazione di tutti gli elementi dello stendimento (ricevitori e punti di sparo). Assegnato il riferimento "*station number 1*" al primo ricevitore (s.n.1), a ciascun elemento successivo si assegna un ID identificativo in progressione numerica, indipendentemente dalla spaziatura di intertraccia. Quindi ad esempio il ricevitore 48 viene identificato come s.n.48, mentre al punto di sparo tra i ricevitori 48 e 49 (s.n.48 e s.n.49) viene assegnato ID s.n.49.5

Sarà sempre possibile ottenere la progressiva metrica (corretta solo per stendimenti planari) dalla semplice relazione:

$$X = (sn - 1) \cdot dx$$

dove X è la progressiva metrica dal primo ricevitore (o *station number 1*), posto al metro 0.00 e dx è la spaziatura dei ricevitori.

L'assegnazione del nome *file* segue lo stesso concetto, per cui adottando un codice numerico a 4 cifre in cui la prima identifica lo *spread* e le successive tre la *station number*, il file è univocamente associato al punto di sparo (Tab. 4).

File Name	Shot No.	S.N.	Spread	Position (M)
1005	1	0.5	1	-2.5
1085	2	8.5	1	37.5
1165	3	16.5	1	77.5
1245	4	24.5	1	117.5
2165	5	16.5	2	77.5
2245	6	24.5	2	117.5
2325	7	32.5	2	157.5
2405	8	40.5	2	197.5

Tab. 4 Esempio di *shotmap* per una linea sismica realizzata in *roll-along* con *spread* da 24 canali, sovrapposizione di 8 ricevitori e spari ogni 8 ricevitori. Per gli *spread* successivi al primo la s.n. di riferimento rimane sempre il primo ricevitore del primo *spread*.

Le registrazioni vengono salvate prive del dato topografico, che verrà inserito successivamente in fase di *pre-processing*. Un *backup* di sicurezza viene eseguito in continuo o ad intervalli prefissati. Una copia delle registrazioni e del database Vscope viene duplicata su *server cloud* mediante connessione dati.

Sorgente onde sismiche

Nelle indagini sismiche, siano esse a rifrazione o riflessione, la generazione dei fronti d'onda avviene mediante idonei strumenti concepiti per enfatizzare prevalentemente la propagazione delle diverse tipologie di perturbazione elastica che si desidera registrare.

Per le onde di Taglio "S", la sorgente è solitamente costituita da una trave in legno con placche in ferro sulle superfici di battuta, che viene colpita orizzontalmente con una massa pesante, mentre per le onde di Compressione "P", la sorgente più comunemente impiegata è una piastra in ferro appoggiata sul terreno e percossa verticalmente con una massa pesante. In entrambi i casi le masse in gioco sono funzione della lunghezza degli *offset*, della profondità di esplorazione fissata e dalla rigidità dei terreni presenti, tuttavia non possono prescindere dalle condizioni logistiche esistenti.

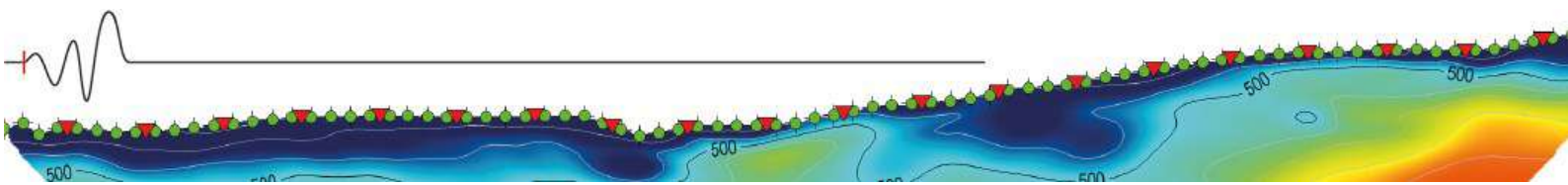
Nella maggior parte dei casi, come massa battente è utilizzata una mazza da 8÷10 kg, ma con buone condizioni di accesso è possibile utilizzare gravi in caduta o masse accelerate con sistemi oleodinamici (es. Hydropluse). Per *target* molto profondi e quindi grandi *offset*, possono essere utilizzati esplosivi ad alta velocità d'innesco specifici per questo tipo di indagini.

Geofono per indagini in foro

Il geofono da foro impiegato è il modello **BGK5** prodotto da Geotomographie (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) con cavo da 50 m, sistema di ancoraggio pneumatico e dotato di 5 ricevitori con frequenza propria di risposta 10 Hz. 4 ricevitori nel piano orizzontale disposti a 45° uno dall'altro ed uno verticale.



Fig. 5 Geofono da foro Geotomographie BGK5 per prove fino a 50 m. A dx lo schema di orientazione dei 5 velocimetri alloggiati nel corpo dello strumento.



Metodi geofisici applicati

Sismica a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione è finalizzato alla determinazione diretta e continua lungo la verticale d'esplorazione della velocità di propagazione delle onde sismiche all'interno del mezzo preso in esame. Dall'analisi dei valori di velocità è possibile ricostruire le geometrie del sottosuolo e ricavare informazioni circa le condizioni meccaniche dei materiali attraversati (addensamento, rigidità, stato di fratturazione, alterazione, etc.).

Il metodo considera il fenomeno della rifrazione di onde elastiche generate artificialmente in superficie in corrispondenza di interfacce che separano mezzi a differenti condizioni di densità, assumendo che il terreno esplorato abbia un comportamento tensione-deformazione di tipo elastico lineare¹.

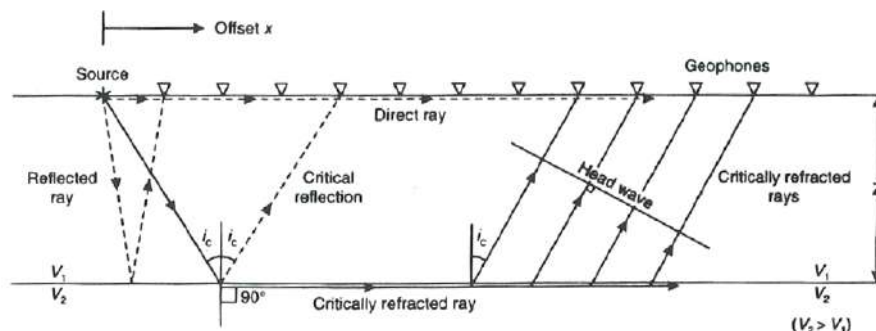


Fig. 6 Percorso dei raggi sismici diretti, riflessi e criticamente rifratti. Lungo l'interfaccia posta a profondità Z la perturbazione elastica si propaga alla velocità maggiore, e durante questo percorso ciascun punto investito dal fronte d'onda emette energia verso la superficie con angolo di incidenza critico.

L'energia acustica viene immessa nel sottosuolo dalla fonte di energia, sia essa una mazza, un grave in caduta libera o una carica esplosiva. Le onde acustiche si propagano nel sottosuolo ad una velocità che è funzione delle proprietà elastiche del materiale attraverso cui viaggiano. Quando le onde raggiungono un'interfaccia che separa mezzi a densità o velocità significativamente differenti, una parte dell'energia viene riflessa verso la superficie e il resto viene trasmessa nello strato inferiore. Se, e solo se, la velocità dello strato inferiore è maggiore di quella dello strato superiore, una parte dell'energia viene anche criticamente rifratta lungo l'interfaccia stessa (Fig. 6). Le onde criticamente rifratte viaggiano lungo l'interfaccia alla velocità dello strato inferiore e continuamente rifrangono energia verso la superficie, dove si dispongono appositi sensori (velocimetri o accelerometri) in grado di avvertire la perturbazione propagatasi nel terreno a seguito della generazione dell'onda elastica. Tali sensori traducono la sollecitazione in un segnale elettrico che attraverso un cavo multipolare viene trasferito ad uno strumento di registrazione (sismografo multicanale). Il sismografo digitalizza i segnali ricevuti dai geofoni sotto forma di "sismogrammi", dove, per ogni canale vengono rappresentati il dominio dei tempi sull'asse verticale e l'ampiezza del segnale elettrico (\pm mV) sull'asse orizzontale.

La prima perturbazione elastica (primo arrivo) ricevuta da ogni geofono a seguito della generazione dell'impulso (*shot*) può avere seguito un percorso "diretto" (ossia il tragitto più breve tra sorgente e ricevitore), oppure avere subito una o più "rifrazioni totali" presso superfici di discontinuità. Oltre una certa distanza definita "critica" (*cross-over distance*), i raggi rifratti raggiungono i geofoni in superficie prima dei raggi diretti, malgrado il tragitto più lungo, in virtù del tratto percorso a velocità più elevata presso l'interfaccia.

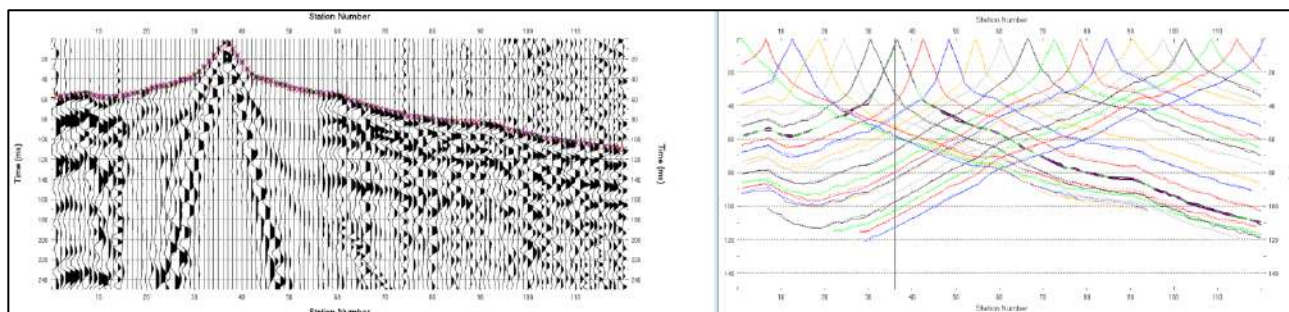


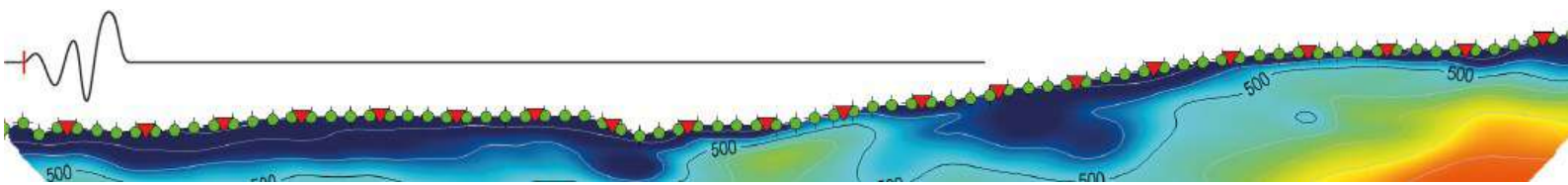
Fig. 7 Esempi di Common shot gathers (sx) in onde di compressione (P) e relative traveltimes (dx). TT colorate=picking; TT tratteggio nero=sintetiche.

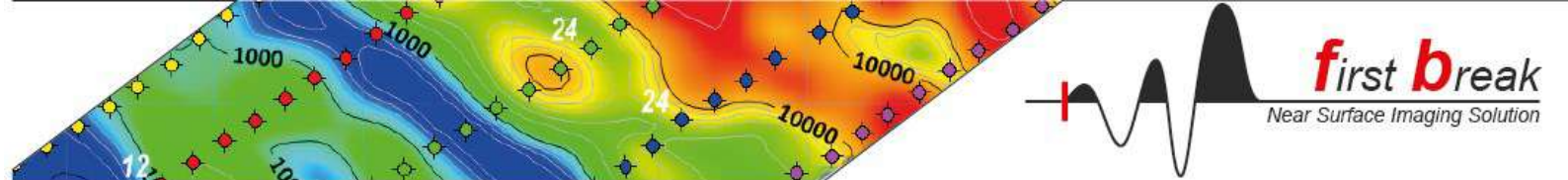
Il metodo presuppone un incremento della velocità di propagazione delle onde elastiche con la profondità. Ne segue una implicita difficoltà nel risolvere adeguatamente eventuali inversioni di velocità (*velocity inversion channel*).

I tempi di primo arrivo (*first break*) identificati sui sismogrammi e riportati in diagrammi tempo-distanza, vanno a costituire le dromocrone (*traveltimes*), e sono la base dei più comuni processi di inversione.

1

Le deformazioni tangenziali prodotte dalle onde sismiche sono spesso inferiori a 3-10 %, quindi al di sotto della soglia di linearità.





Data Processing

Metodi tradizionali

L'impiego della sismica a rifrazione come prima tecnica di esplorazione petrolifera ha portato allo sviluppo di numerosi metodi di inversione, non tutti impiegati regolarmente o egualmente efficaci, oggi noti come tecniche "convenzionali" o basate su modelli a strati, per differenziarle dai più recenti metodi tomografici. Tutti questi metodi prevedono l'attribuzione dei diversi rami delle *traveltimes* (definiti dai punti di ginocchio o cambi di pendenza), ai diversi strati del sottosuolo.

Tra questi, i vari *Wavefront reconstruction method*, (Rockwell, 1967), *Intercept Time Method* (Edwing et al., 1939), o il gruppo di Metodi del Reciproco Convenzionale che assumono diverse denominazioni ma che sostanzialmente risultano equivalenti (*ABC method* in Nord America, *Hagiwara's method* in Giappone, *Plus-Minus* in Europa). Oppure i più raffinati *Delay-Time* (Barry, 1967), *Hale's method* o *Graphical rayfract* (Hales, 1958; Sjogren, 1984), e il Metodo del Reciproco Generalizzato (Palmer, 1980) che introducono la tecnica della migrazione per ottimizzare la *offset distance* (distanza orizzontale tra il punto di emergenza del raggio rifratto ed il punto di ricezione alla superficie).

A seconda della complessità del sito l'analisi dei dati potrebbe essere fatta con un metodo piuttosto che un altro, tuttavia molti di questi sono di fatto inglobati nel metodo GRM di Palmer, di cui costituiscono casi limite. Questi metodi richiedono generalmente un minimo di 5 punti per ogni linea (2 colpi esterni, 2 colpi agli estremi e un colpo al centro). Solo il caso semplice di strati a velocità costanti, orizzontali o debolmente inclinati, può essere risolto adeguatamente con due soli colpi alle estremità della linea applicando il metodo del tempo-intercetto.

Come tutti i metodi di inversione, anche le tecniche di modellazione di dati sismici a rifrazione sono affette da non univocità della soluzione. Oltre alle problematiche connesse alla qualità dei dati acquisiti, ulteriori incertezze di interpretazione possono essere causate dalla presenza di strutture non diagnosticabili per limiti intrinseci al metodo come: inversioni di velocità; livelli nascosti; marcate variazioni laterali sia di velocità, sia di giacitura dei sismo-strati; rifrazioni fuori piano (generate da strutture a lato della linea piuttosto che sotto).

Un'inversione di velocità è uno strato geologico con una velocità sismica inferiore a quella dello strato sovrastante. Lungo tale strato la rifrazione critica non avviene perché la velocità non aumenta. Se il livello non viene individuato la profondità degli strati sottostanti risulta sovrastimata.

Uno strato nascosto è invece un livello caratterizzato da incremento di velocità ma di spessore troppo modesto rispetto alle velocità degli strati soprastanti e sottostanti, tale che gli arrivi rifratti non raggiungono i geofoni prima di quelli dalla strato più profondo. Un tipico esempio si verifica laddove sedimenti saturi sovrastano un substrato veloce.

Quando invece la struttura di velocità del sottosuolo aumenta gradualmente in funzione della profondità piuttosto che per strati discreti, i metodi "classici" non sono lo strumento di analisi e la profondità dei rifrattori risulta sovra o sottostimata.

Analisi dettagliate del metodo sismico a rifrazione si possono trovare in Musgrave (1967), Redpath (1973), Palmer (1991).

Elaborazione tomografica

Metodi classici come Delay-Time o GRM assumono a priori l'esistenza di rifrattori geometrici semplificando in modo eccessivo la reale struttura di velocità del sottosuolo. Eterogeneità laterali, discontinuità, gradiente di velocità, si uniscono ai già citati strato cieco ed inversioni di velocità nel definire una realtà geologica più complessa rispetto agli strati a velocità interna costante. In particolare per gli studi a ridotta profondità, dove lo strato superficiale alterato costituisce una porzione importante dello spazio esplorato. Le più recenti tecniche di inversione tomografica hanno invece le potenzialità per superare i limiti dei metodi classici e risolvere queste sismo-strutture complesse che possono essere ad esempio osservate nelle transizioni tra roccia alterata verso roccia massiva del substrato. Ad esempio, sebbene il metodo sismico a rifrazione non possa modellare inversioni di velocità che siano continue sotto tutto lo stendimento, utilizzando tecniche di inversione tomografica è invece possibile identificare inversioni di velocità "localizzate".

La tomografia è uno strumento matematico applicato in vari campi, inclusa l'inversione di dati geofisici, in cui lo spazio indagato viene suddiviso in celle, ciascuna associata ad un valore di velocità. Il procedimento avviene attraverso una funzione obiettivo che ricerca il minor scarto tra il modello teorico di riferimento e i dati osservati.

A partire da un modello iniziale viene calcolato il percorso dei raggi sismici (*ray-tracing*) per tutte le coppie sorgente-ricevitore disponibili, da cui vengono derivate le dromocrone teoriche. L'errore residuo tra tempi sperimentali e tempi teorici viene quindi minimizzato attraverso un procedimento iterativo fino a valori ritenuti congrui. A differenza dei metodi tradizionali, non è necessario assegnare (soggettivamente) i rami delle *traveltimes* ai rifrattori. I metodi a strati in questo contesto vengono comunque impiegati per definire i *ranges* di variazione delle velocità nei modelli tomografici, che malgrado una maggiore capacità risolutiva degli aspetti geometrici, tendono invece a sottostimare e sovrastimare le velocità. Se non opportunamente vincolate le tecniche di inversione tomografica producono un modello con gradiente anche laddove esista un netto contrasto di impedenza.

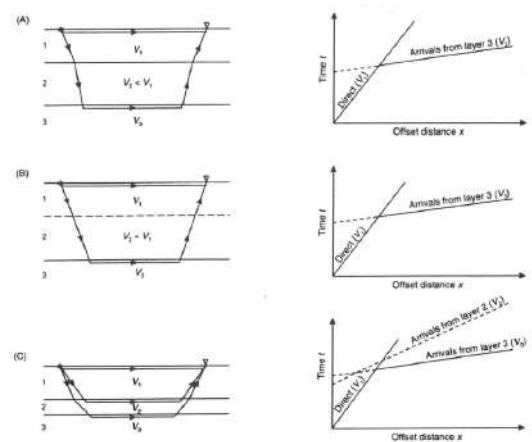
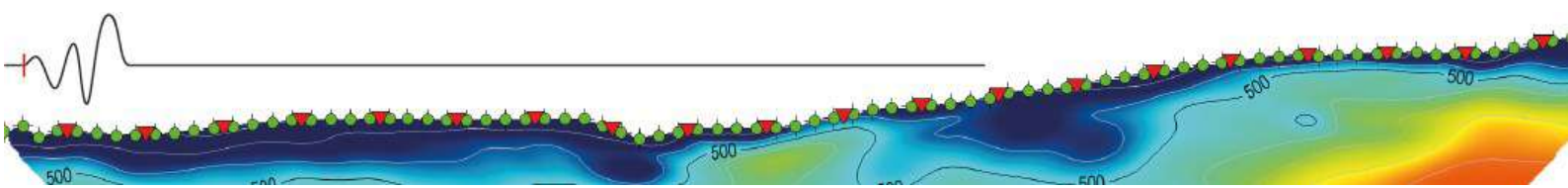
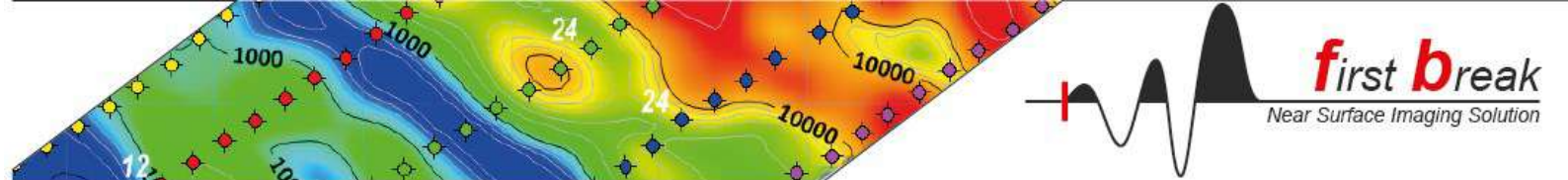


Fig. 8 Casi principali per cui i metodi tradizionali risultano poco o del tutto inefficaci: alto) inversione di velocità; medio) assenza di contrasto; basso) strato cieco. sx) modello sismo-stratigrafico di riferimento; dx) aspetto della dromocrona.





Software di elaborazione

Esistono in letteratura molti diversi approcci alla rifrazione tomografica, e altrettanti programmi commerciali ciascuno con le proprie peculiarità. Nel lavoro in esame l'elaborazione tomografica è realizzata prevalentemente con il software RAYFRACT®, versione 4.05, sviluppato da Intelligent Resource Inc, anche se alcune operazioni possono essere state eseguite con altri programmi complementari di cui segue elenco:

Software	Versione	Sviluppatore	Sviluppatore
Rayfract	4.05	Intelligent Resources Inc.	picking, inversione
ZondST2d	7.0	Zond Geophysical Software	picking, inversione, attenuazione
FrontEnd	10.1 (full)	Geogiga Technology Corp.	data QC, filtri
VScope	3.6	Seismic Source Inc.	gestione acquisizione
Surfer	29	Golden Software	geostatistica e restituzione grafica

Tab. 5 Elenco dei software utilizzati nelle varie fasi di lavorazione (acquisizione, pre-processing, processing e restituzione), delle tomografie sismiche.

In Rayfract il modello iniziale determinato dai tempi di primo arrivo utilizzando il metodo Delta-t-V (che assume un gradiente verticale costante e adotta il metodo Common Mid Point (CMP) in luogo del common shot-point per il calcolo delle velocità apparenti (Gebrande, 1986)), viene mediato in senso orizzontale (metodo di Herglotz-Wiechert) per ridurre l'incidenza di artefatti che si generano in caso di forti contrasti orizzontali, quindi iterativamente affinato mediante l'algoritmo di inversione tomografica Wavepath Eikonal Traveltime (Schuster, 1993), basato sulla modellazione dei percorsi di propagazione multipla di raggi sismici "fat" o Fresnell Volume (Watanabe, 1999), invece dei tradizionali raggi sismici. Tale algoritmo valuta inoltre le differenze tra onde rifratte, diffratte e trasmesse, di conseguenza le immagini delle anomalie vengono esaltate.

Raytracing e raypath coverage

Durante il processo di inversione, Rayfract genera e traccia i raggi sismici, ovvero la rappresentazione dei percorsi delle perturbazioni elastiche nel sottosuolo per ciascuna coppia sorgente-ricevitore. In questo contesto, il termine "ray coverage" si riferisce alla quantità e alla distribuzione di tali tragitti ed indica l'estensione e la qualità della copertura ottenuta nell'area di interesse del sottosuolo.

Una buona copertura sismica è essenziale per ottenere risultati affidabili nell'inversione dei tempi di arrivo. Una copertura adeguata implica una distribuzione uniforme dei raggi sismici, con una buona densità e penetrazione nel sottosuolo, e si ottiene quando i raggi attraversano uniformemente e in modo rappresentativo l'area di interesse, coprendo le diverse strutture geologiche e

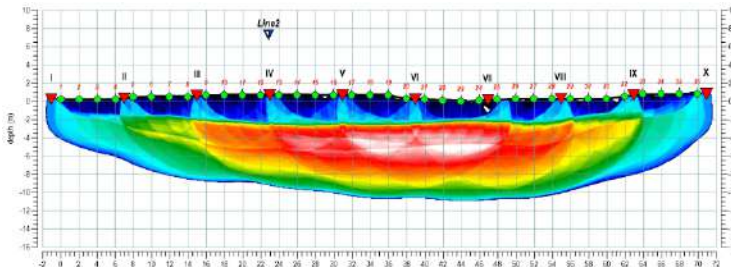


Fig. 9 Ray path coverage section: copertura dei raggi sismici espressa come densità per unità di superficie (pixel).

fornendo informazioni significative per la ricostruzione del modello di velocità. Tuttavia, in alcune situazioni può essere difficile ottenere una copertura sismica completa e uniforme. Ad esempio in presenza di zone di attenuazione sismica oppure "ostacoli" geologici. Una valutazione accurata del ray coverage consente quindi di identificare aree con una copertura sismica insufficiente e può essere utilizzata per supportare l'interpretazione delle sezioni di velocità. Oppure può guidare la pianificazione di ulteriori misure o modifiche nella configurazione di ricevitori e punti sorgente per migliorare la copertura sismica complessiva e ottenere risultati più accurati. A tale scopo, la copertura dei raggi sismici viene restituita come funzione della profondità lungo tutto il profilo (Fig. 9). In queste sezioni le zone dalle scadenti proprietà geo-meccaniche solitamente sono evidenziate da aree a ridotta copertura, in quanto per natura sono zone a bassa velocità tendendo l'energia a concentrarsi più facilmente in settori a maggiore rigidità.

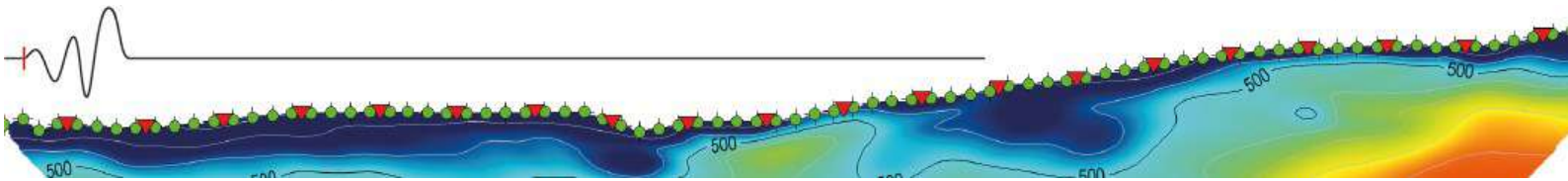
Tomografia vincolata

In fase di elaborazione viene comunque sempre valutata una soluzione a strati discreti attraverso il metodo più idoneo, scelto in base alle caratteristiche delle dromocrone. Rayfract dispone di tre diversi approcci:

- il metodo wavefront che costituisce una variante del GRM classico in cui il parametro XY non è costante ma può variare lungo la linea (Ali Ak, 1990);
- metodo classico Plus-Minus;
- metodo CMP intercept time refraction che consente la modellazione di velocità e spessori sotto ciascun ricevitore e punto sorgente, ma in caso di forti curvature del rifrattore può restituire valori di velocità non affidabili.

Un modello preliminare a strati consente una valutazione delle velocità e degli spessori prima di addentrarsi nel processo di inversione. In caso di rifrattori ben definiti e strati internamente omogenei, è possibile ottenere un risultato più fedele alle reali condizioni geologiche, utilizzando tale risultato preliminare per eseguire un'inversione vincolata. Solitamente il risultato è una sezione tomografica con gradienti molto accentuati in corrispondenza dei rifrattori precedentemente individuati, restando però possibile apprezzare variazioni di velocità interne agli strati e non solo lungo il rifrattore.

Per questi motivi, senza trascurare la morfologia talvolta molto pronunciata, le routine di inversione tomografica sono ritenute la tecnica di modellazione dati più appropriata tuttavia, in fase di elaborazione è possibile produrre due modelli: uno tomografico libero, con gradienti di



velocità e l'altro impiegando come vincolo il rifrattore geometrico calcolato preliminarmente. Il confronto dei risultati e l'analisi incrociata con i dati geologici disponibili guidano la scelta su quale sia il risultato più robusto.

Proprietà elastiche delle rocce: cenni

Velocità sismiche

La Fig. 10 mostra l'intervallo medio delle velocità delle onde di compressione e di taglio per i tipi di roccia più comuni e indica alcune tendenze e caratteristiche tipiche:

la velocità delle rocce ignee aumenta dai membri acidi/felsici (granito) a quelli basici/macrofisici (peridotite);

- l'intervallo per un singolo tipo di roccia, talvolta anche molto ampio, è il risultato della variazione della composizione della roccia (contenuto minerale) e, se presente, della fratturazione;
- tra le rocce metamorfiche, gli gneiss e gli scisti in particolare mostrano una anisotropia con velocità parallela alla scistosità > velocità perpendicolare alla scistosità;
- le rocce sedimentarie porose mostrano un'ampia gamma di velocità, dove le alte velocità sono tipiche di quelle relativamente dense (bassa porosità) e le basse velocità sono tipiche dei membri porosi (areati);
- le velocità più basse si riferiscono a rocce non consolidate (asciutte), come risultato dello specifico contatto tra grani e dell'alta porosità;
- La maggiore dispersione si riscontra nelle rocce porose (influenza della porosità, del fluido interstiziale e della composizione minerale).

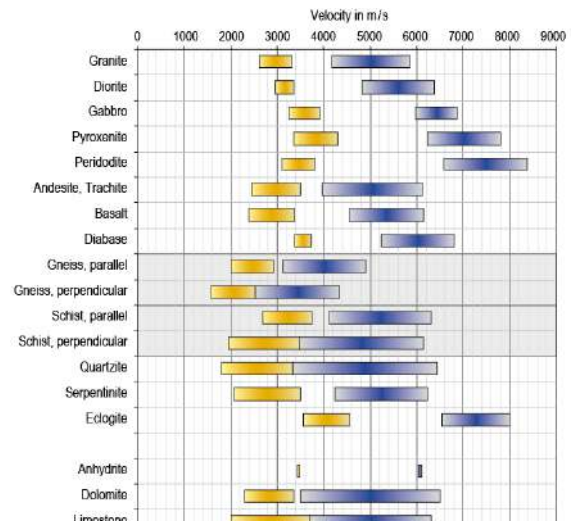


Fig. 10 intervalli di velocità delle onde di compressione (giallo) e di taglio (blu) per le rocce più comuni: modificato da Physical Properties of Rocks, A Workbook - J.H. Schon (2011).

Poisson modulus

Il modulo di Poisson, indicato con il simbolo ν , rappresenta il rapporto tra la deformazione laterale (contrazione o espansione) e la deformazione longitudinale (allungamento o compressione) che si verifica in un materiale quando viene sottoposto a sforzo uniassiale.

Il rapporto delle due velocità d'onda V_p/V_s o il rapporto di Poisson " ν ", sono entrambi controllati prevalentemente dalla tipologia di roccia e dal fluido contenuto nei pori qualora presente. La Fig. 11 fornisce una panoramica con alcune tendenze riscontrabili nei materiali naturali.

Il valore del modulo di Poisson può variare da 0, per i materiali completamente incompressibili, a 0.5 per quelli che subiscono una deformazione laterale massima in risposta alla deformazione longitudinale. Al valore minimo del rapporto di Poisson $\nu=0$ in un materiale omogeneo e isotropo, corrisponde il rapporto minimo $V_p/V_s = \sqrt{2} \approx 1.4$, quindi, per le rocce isotrope reali $V_p/V_s > \sqrt{2}$ (Fig. 11-sx).

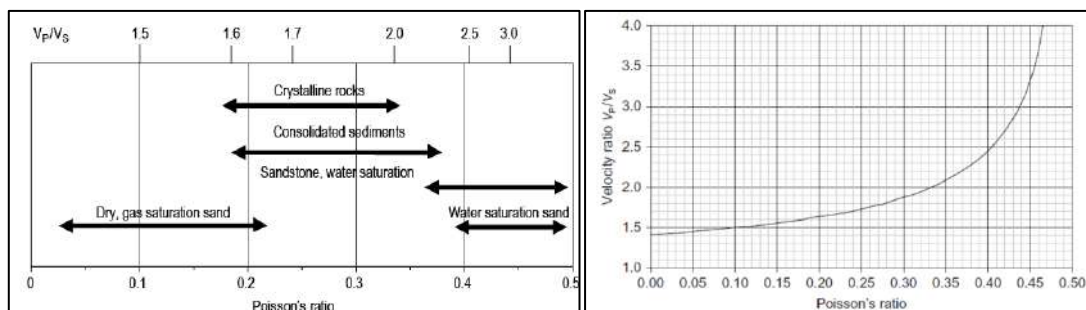


Fig. 11 sx) rapporto medio di Poisson per diverse litologie, da Bourbie et al. (1987); dx) conversione tra Rapporto V_p/V_s e Modulo di Poisson.

Anisotropia

Fattori come l'allineamento preferenziale di minerali ad esempio lungo piani di foliazione, la presenza di sistemi di fratturazione, oppure l'orientamento dei pori nel mezzo geologico (Fig. 12), possono dar luogo a fenomeni di anisotropia nel campo di velocità. Questo significa che la velocità delle onde sismiche può differire, entro certi limiti, a seconda dell'orientamento all'interno del mezzo geologico analizzato.

E tali risulteranno qualora determinate da stendimenti sismici con diversa orientazione reciproca. L'effetto dell'anisotropia sismica può quindi essere osservato durante l'elaborazione dei dati sismici a rifrazione, pertanto eventuali differenze di velocità, con conseguenti scostamenti tra sezioni tomografiche limitrofe o anche intersecanti, non possono essere liquidati a priori come errori di modellazione, ma devono essere attentamente valutati e considerati nel contesto geologico generale.

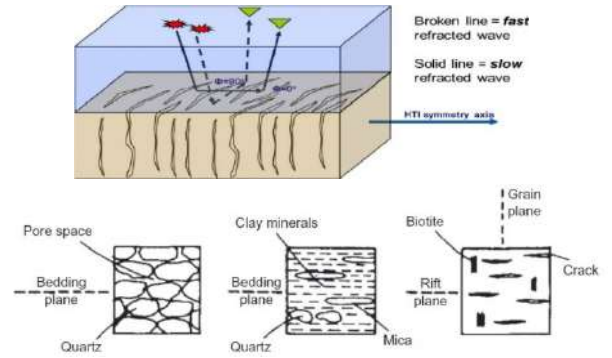
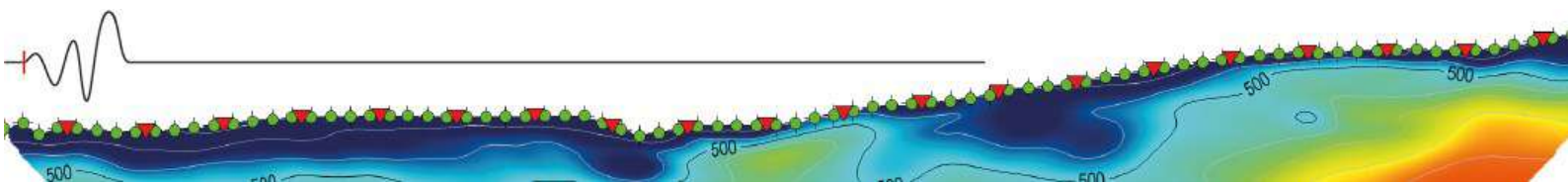


Fig. 12 Anisotropia: alto) anisotropia dovuta al fabric petrografico delle rocce; basso) anisotropia conseguente allo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso



Sismica a riflessione

Introduzione

Il metodo della riflessione sismica si basa appunto sulla registrazione di vibrazioni del terreno indotte da onde elastiche (usando opportune fonti di energia come masse battenti, dinamite o sorgenti vibratorie), le quali, dopo aver viaggiato per un certo percorso nel sottosuolo, incontrano una superficie riflettente, in corrispondenza della quale una parte dell'energia immessa viene indirizzata verso la superficie stessa secondo un angolo (di riflessione) che è uguale a quello di incidenza (Fig. 13).

La porzione di energia riflessa in forma di onde elastiche viene registrata per un periodo di tempo predeterminato (lunghezza della registrazione), mediante ricevitori che rilevano il movimento del terreno in cui sono posizionati. Il tipico ricevitore utilizzato per indagini a terra è un piccolo strumento noto come geofono, che converte il movimento in un segnale elettrico analogico, che è una misura della velocità dello spostamento subito. In acqua vengono invece utilizzati sensori che convertono le variazioni di pressione in segnali elettrici, noti come idrofoni.

La risposta di ciascun ricevitore a una singola sollecitazione è nota come "traccia sismica". L'insieme delle tracce sismiche aventi in comune il punto di energizzazione è definito nella terminologia anglosassone come "Common shot gather", meglio noto come "sismogramma".

Normalmente, le tracce registrate (raw data) sono sottoposte a quantità significative di elaborazione del segnale prima che siano pronti per essere interpretati. In generale, più complessa è la geologia dell'area in esame, più sofisticate sono le tecniche necessarie per rimuovere il rumore ed estrarre il segnale sismico aumentando la capacità di risoluzione.

Senza addentrarsi nelle più complesse tecniche di sismica a riflessione 3D, la riflessione sismica bidimensionale (2D) utilizza una sorgente sismica controllata per avviare la propagazione dell'energia elastica nel terreno e registrare le onde riflesse verso la superficie utilizzando una serie di ricevitori collocati lungo profili rettilinei a distanze note dalla fonte sismica.

Lo sviluppo delle tecniche di riflessione sismica superficiale e ultra superficiale derivate dal continuo adattamento e miglioramento delle procedure per l'acquisizione e l'elaborazione introdotte e sviluppate dall'industria petrolifera per l'esplorazione profonda necessaria ad individuare i giacimenti di idrocarburi, ha consentito l'applicazione della riflessione a problematiche tipicamente più superficiali come quelle legate all'ingegneria ed alla geotecnica. Il moderno metodo di riflessione sismica superficiale inizia con il lavoro di Schepers (1975), il quale ottenne eccellenti riflessioni in onde di compressione da profondità inferiori a 20 metri. Da allora l'applicazione di tale tecnica a problematiche near surface è in continua crescita, sia in ambito accademico sia professionale.

La tecnica sismica a riflessione si basa sulla registrazione dei tempi che intercorrono tra l'istante in cui viene generato un impulso elastico in superficie (shot) e l'istante di ricezione del segnale da parte dei sensori (receivers), dopo che questo ha incontrato una o più superfici riflettenti poste al di sotto del piano di campagna. Quindi, diversamente dalla sismica rifrazione, nella sismica a riflessione non ci si limita alla misura del tempo di primo arrivo del segnale ma si effettua un'analisi completa dei treni d'onda ricevuti.

Rispetto alla sismica a rifrazione inoltre, la riflessione non necessita dell'assunto che la velocità di propagazione delle onde aumenti con la profondità. La riflessione infatti è legata al coefficiente di riflessione (positivo o negativo) a sua volta funzione del contrasto di impedenza acustica tra materiali di diversa natura (definita come il prodotto della densità del mezzo per la velocità delle onde sismiche che lo attraversano); così una variazione delle caratteristiche tra litotipi oppure all'interno di uno stesso litotipo è in grado di generare una riflessione.

Il vantaggio significativo di questa raffinata tecnica d'esplorazione sta nell'elevata capacità di penetrazione nel sottosuolo e nell'accuratezza con cui è possibile localizzare le superfici riflettenti, definirne la geometria, l'estensione e le reciproche relazioni.

Basi teoriche

L'equazione matematica che descrive la curva di un segnale riflesso è, approssimata alla potenza di secondo grado, di tipo iperbolico:

$$V_{1t}^2 = 4H^2 + x^2 + 4Hx \sin \varphi$$

dove " V_1 " rappresenta la velocità dell'onda che si propaga nel mezzo considerato omogeneo; " t " il tempo d'arrivo nel punto di ascissa generica " x " espressa come distanza del ricevitore dal punto sorgente; " H " lo spessore dello strato interessato; " φ " l'inclinazione della superficie riflettente (Fig. 14 sx).

In fase di acquisizione dei dati i parametri fondamentali riguardanti la geometria dello stendimento sono:

- l'offset (distanza tra la sorgente energizzante ed il primo sensore);

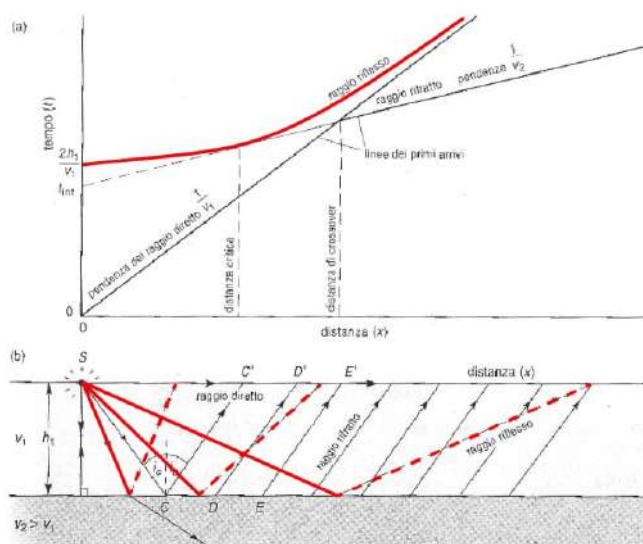
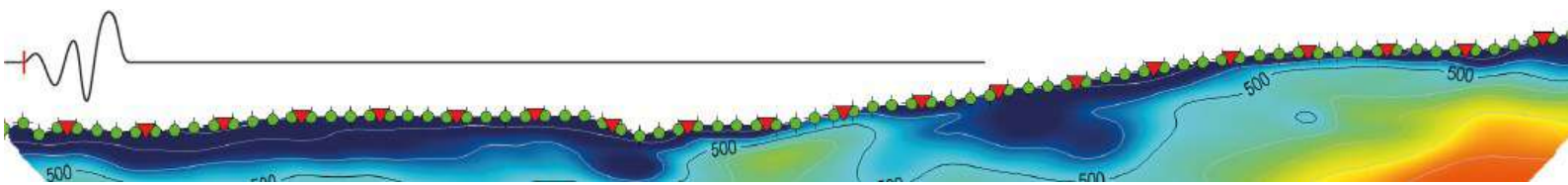


Fig. 13 Propagazione di raggi sismici riflessi e rifratti e rappresentazione dei tempi di percorso (traveltimes).



- il numero delle tracce da registrare;
- la distanza tra le tracce.

La sorgente energizzante nella sismica a riflessione può essere posta all'esterno dello stendimento geofonico (geometria off-end spread), oppure all'interno di esso (geometria split-spread) (Fig. 14 dx).

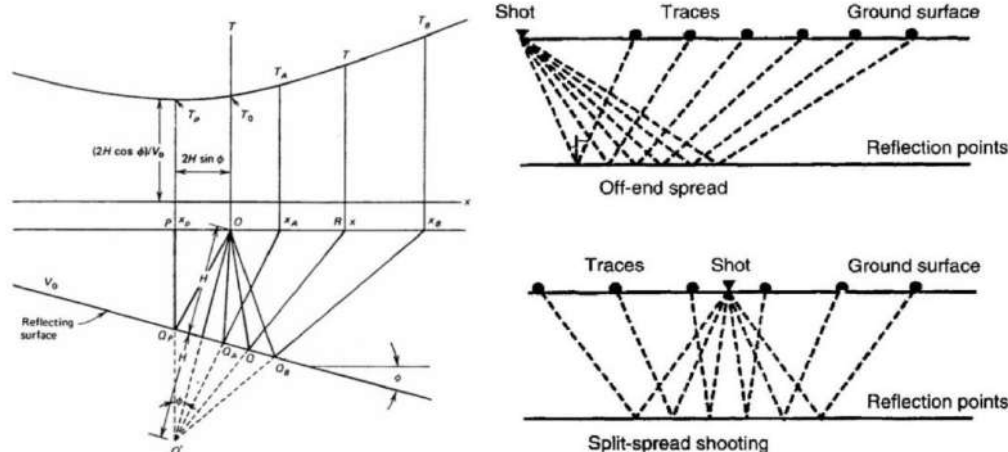


Fig. 14 sx) traiettoria dei raggi sismici su un riflettore inclinato e relativo diagramma tempo-distanza; dx) principali geometrie d'acquisizione.

Solitamente vengono eseguite più misurazioni spostando la sorgente di energizzazione e la catena geofonica in direzioni uguali oppure opposte, così da investigare una porzione più ampia di terreno.

Su queste geometrie si basa la modalità di acquisizione common-depth-point (CDP) che, energizzando in differenti posizioni sulla superficie, permette di "illuminare" più volte un dato punto in profondità, ottenendo così più segnali associati. Tale processo consente di incrementare il rapporto segnale/rumore rendendo il risultato finale più nitido in quanto filtrato degli effetti casuali generati dal rumore.

Tale modalità d'acquisizione prevede dunque almeno due coperture per ogni punto comune da cui risulta utile operare con tecniche multicanale (multifold coverage).

La capacità di risoluzione massima verticale (potere di risoluzione) dell'indagine è proporzionale alla lunghezza d'onda del segnale generato, potendo apprezzare uno spessore minimo degli strati pari a $\lambda/4$ (Fig. 15).

Un aspetto importante del tipo di tecnica di prospezione è il campionamento del segnale. Quest'ultimo infatti è di tipo analogico (continuo nel tempo) mentre lo strumento di acquisizione (calcolatore) è di tipo digitale (ossia in grado di campionare il segnale solo ad intervalli di tempo imposti dall'operatore e condizionati dallo strumento).

La funzione continua che rappresenta il segnale viene quindi campionata con un intervallo di tempo Δt ed un intervallo di distanza Δx . Risulta pertanto molto importante in fase di acquisizione la scelta dei valori di campionamento, così da evitare che un errore in fase di registrazione digitale possa determinare un'acquisizione imprecisa finanche falsata dei dati (aliasing temporale/spaziale).

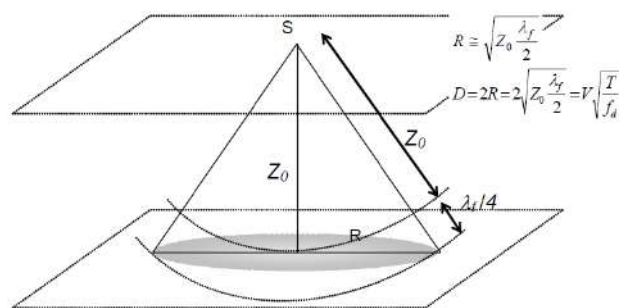
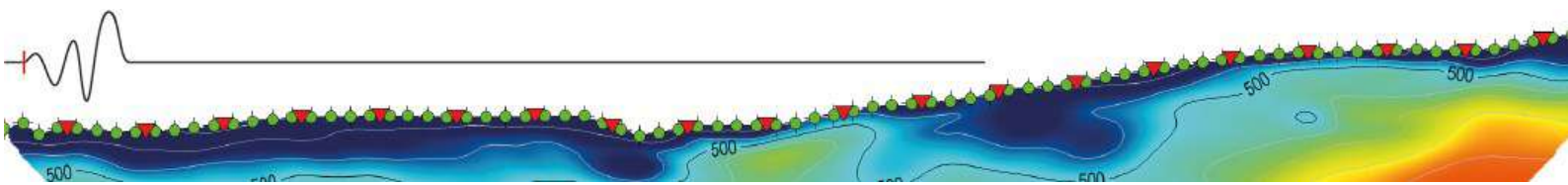


Fig. 15 Zona di Fresnel. Tutti gli arrivi provenienti dal suo interno contribuiscono costruttivamente al segnale. Due oggetti distanziati di una misura inferiore a $2R$ risulteranno indistinguibili. (T = Tempo di riflessione; V = Velocità media; f_d = Frequenza dominante).

Seismic data processing

L'elaborazione dei dati sismici è quell'insieme di passaggi, anche molto complessi, che consente di passare dalle tracce sismiche registrate in campo al prodotto finale nella forma di sezione trasversale o volume, in tempi o profondità, in cui siano riconoscibili i più significativi orizzonti geologici presenti nel sottosuolo.



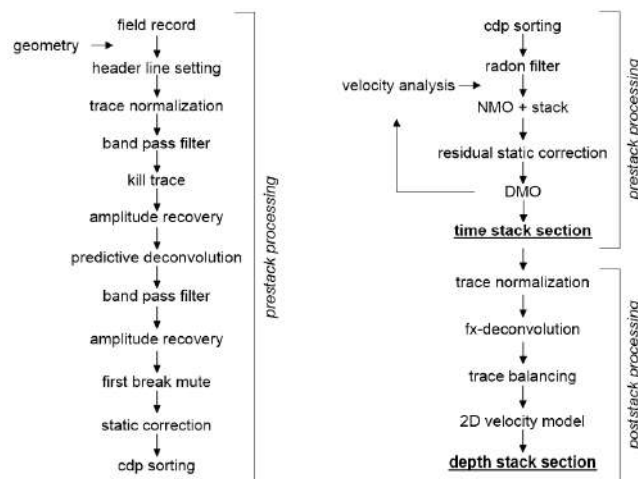
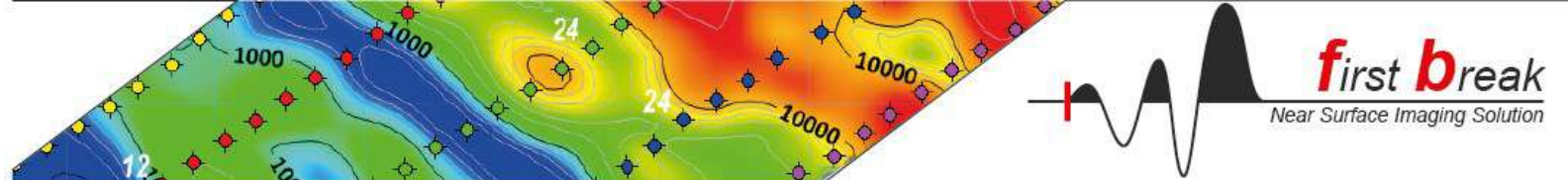


Fig. 16 Flow-Chart delle operazioni di Processing descritti nei paragrafi seguenti.

Attraverso l'oculata gestione di tutti questi passaggi è possibile ridurre l'effetto negativo di quei parametri limitanti, quali onde di superficie, onde d'aria prodotta dal sistema energizzante, onde dirette e rifrazioni, ed enfatizzare il segnale riflesso allo scopo di rendere chiaramente identificabili le superfici riflettenti ed aumentare la capacità risolutiva.

Oltre alla riorganizzazione dei dati da come registrati in campagna (common shot gathers), a common depth point (CDP), il processing si compone di una serie di passaggi dedicati a specifici scopi. Ad esempio la rimozione completa di segnali non riflessi, che richiede interventi di muting superiore o chirurgico (Doomenbal & Helbig, 1983), oppure l'introduzione di correzioni statiche in quanto i materiali in prossimità della superficie presentano variazioni di velocità significative così come sono possibili cambiamenti di elevazione topografica non trascurabili. Entrambi questi fattori sono cruciali nella riflessione sismica superficiale e richiedono correzioni statiche estremamente importanti e analisi della velocità. O ancora, l'applicazione di filtri f-k per l'attenuazione del ground-roll e dell'onda d'aria.

Il diagramma in Fig. 16 illustra quindi in modo dettagliato la sequenza di processing cui sono stati sottoposti i dati acquisiti. Questa è costituita da: 1) Prestack Processing, che coinvolge i raggruppamenti shot-gathers sino allo step dell'analisi di velocità, mediante cui si ottiene la sezione in tempi; 2) Poststack Processing, attraverso il quale si perviene alla sezione stack migrata in profondità.

La flow-chart riportata è valida per tutte le linee analizzate con minime variazioni dei parametri utilizzati nei filtri.

Prestack-processing

Include la registrazione dei dati sul campo, il trasferimento di dati dal sismografo al software di elaborazione, l'immissione della geometria del sistema e l'editing delle tracce. Tutti i files di campo sono stati registrati mediante sismografi DAQLink4, esportati in formato seg2 e successivamente importati nel software "Sismic Unix" in esecuzione su un sistema operativo Linux. L'introduzione della geometria, in termini di posizioni reciproche dei ricevitori e punti di scoppio è il secondo passaggio di questa fase del processing. Ulteriori passaggi di questo step includono:

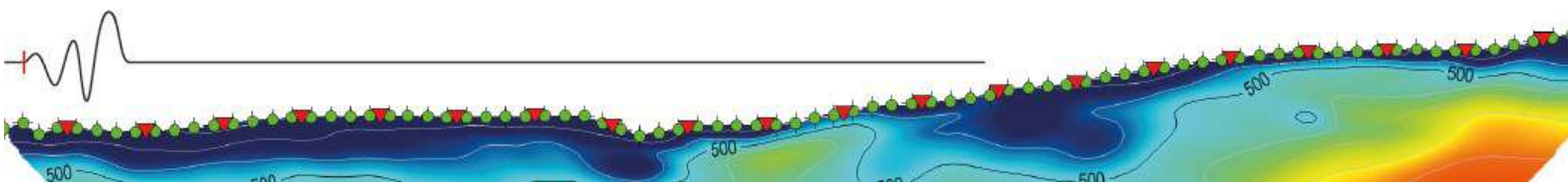
Dead traces and muting

Include il rilevamento di tracce morte o eccezionalmente rumorose. I dati errati vengono azzerati o sostituiti con valori interpolati. Le ampiezze anomale, che sono probabilmente rumore, sono ridotte a zero o al livello dei dati circostanti. Questo passaggio può anche essere usato per trovare tracce in cui tutti i campioni sono zero (morti) o hanno inversione di polarità.

Il muting delle tracce è il processo di azzeramento della parte (o parti) indesiderata di una traccia. In termini matematici, ogni traccia viene moltiplicata per 0 per ogni parte disattivata e per 1 per ogni parte non disattivata. Per evitare la sovrapposizione di eventi non riflessi come il primo arrivo delle rifratte, la prima parte delle tracce viene normalmente silenziata prima del passaggio successivo al processo di stack. Il silenziamento chirurgico viene applicato per rimuovere l'onda d'aria², mentre il silenziamento inferiore viene utilizzato per escludere il ground-roll, tuttavia per questi due casi l'applicazione di filtri f-k³ conduce spesso a risultati migliori.

² La generazione di un'onda acustica che si propaga nell'aria accompagna quasi tutti i sistemi di energizzazione ed è fonte di disturbo quando investe i sensori e viene registrata come rumore a banda larga. Può infatti contaminare i dati sismici con ampiezze elevate, specialmente quando si usano fonti di superficie come la mazza. La rimozione di questo rumore in maniera chirurgica non è esente dal produrre risultati indesiderati e imprevisibili. Migliori risultati si possono ottenere mediante una procedura automatizzata (filtro), in grado di ricercare, traccia per traccia, l'energia prodotta da un'onda acustica data una velocità di propagazione, una soglia di ampiezza del rumore relativa e una larghezza approssimativa dell'involuppo di energia.

³ Il filtro f-k è un filtro numerico applicato ai dati nel dominio delle frequenze. L'obiettivo è rimuovere l'effetto di *back-scattering* e il *ground-roll* delle onde di superficie. I dati vengono convertiti da tracce campionate nel tempo e nello spazio nel dominio f-k mediante una trasformata di Fourier bidimensionale. Dopo aver applicato il filtro f-k, i dati vengono riconvertiti mediante trasformata inversa di Fourier nella forma classica di tracce sismiche. Un parametro significativo di questo passaggio è la finestra o l'intervallo del filtro (Harris and White, 1997; Jeng, 1995).



Correzioni statiche

Le correzioni statiche vengono utilizzate per correggere l'elevazione della superficie e per compensare l'effetto di variazioni di velocità prossime alla superficie non determinabili mediante analisi di velocità, allo scopo di correggere le variazioni di velocità e spessore dello strato più superficiale.

Operativamente comprende tre passaggi; first break picking per la stima delle velocità sismiche mediante i metodi della sismica a rifrazione; elevazione statica e rifrazione statica. Partendo dalla geometria di acquisizione vengono applicate le correzioni statiche di elevazione utilizzando un modello superficiale di velocità a due strati ricavato con il metodo Plus-Minus (Fig. 17).

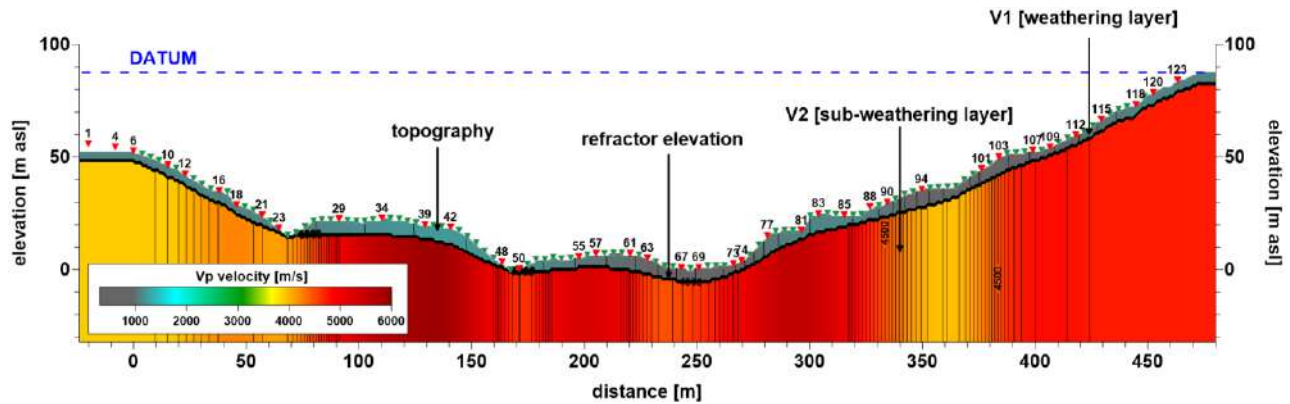


Fig. 17 Esempio di modello di velocità applicato per la correzione statica di rifrazione .

Tale modello restituisce in maniera puntuale ed efficace, in corrispondenza di ogni punto di registrazione, la velocità e lo spessore del weathering layer (V1) e la velocità del sub-weathering layer (V2), per le correzioni statiche di rifrazione e di elevazioni per le quali è stato scelto un datum posizionato alla massima quota di ogni profilo e una replacement velocity pari a quella del sub-weathering layer.

Analisi di velocità Normal Move Out

L'analisi della velocità è il processo più vitale nella sequenza di elaborazione dei dati sismici (Tsvankin, 1997). Viene utilizzato per determinare le velocità sismiche che verranno applicate alla correzione Normal Move Out (NMO) e successivamente per la conversione Time-to-Depth. La qualità del risultato è decisa in modo critico dall'accuratezza della determinazione delle velocità sismiche, di conseguenza questa determinazione diventa il parametro più critico.

L'NMO dipendente dall'offset è una funzione iperbolica. Maggiore è l'offset maggiore sarà la correzione NMO. La velocità tende normalmente ad aumentare con la profondità, quindi maggiore è il tempo di percorrenza o la velocità, minore è la correzione per qualsiasi offset.

Attraverso uno specifico algoritmo è stato dunque utilizzato uno script proprietario di elaborazione del dato sismico per la ricerca del miglior modello di velocità finalizzato alla correzione del Normal Move Out dei segnali. Mediante tale funzione è stato possibile eseguire l'analisi di velocità su super-raggruppamenti CDP (supergathers) realizzati sommando in stack, secondo i rispettivi offset, 5 raggruppamenti CDP continui, così da incrementare il rapporto S/N. In Fig. 18 si mostra a titolo di esempio uno tra i numerosi supergather CDP utilizzati per la ricerca del modello di velocità 2D.

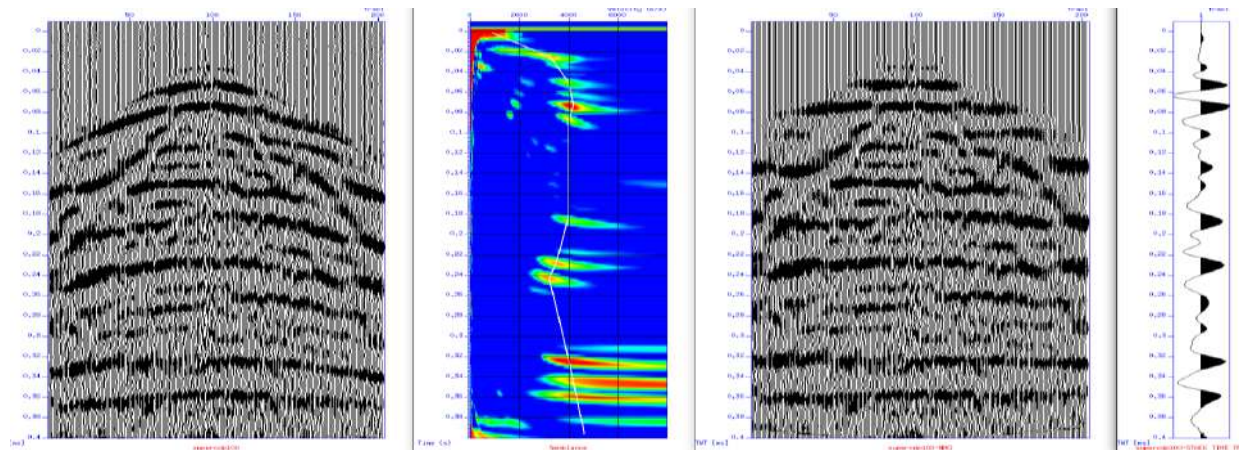
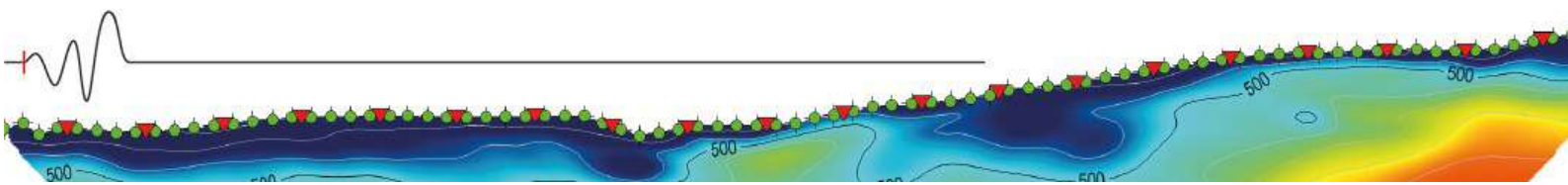
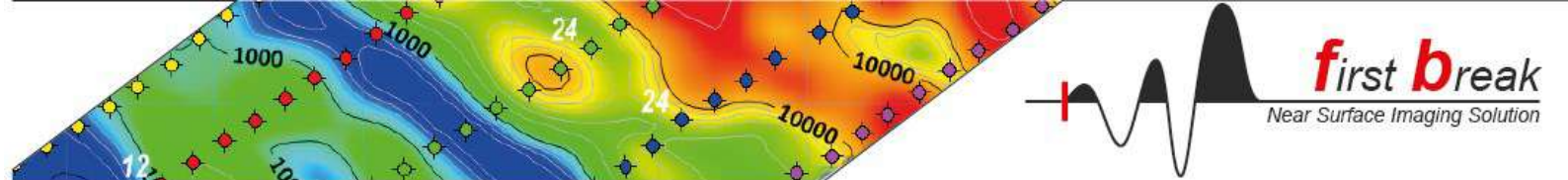


Fig. 18 Esempio di supergather sul quale è stata operata l'analisi di velocità - CMP 90, Reflex1. a) tracce del supergather; b) semblance del supergather sul quale si è operato il picking dei massimi valori (coppie t0-Vnmo); c) supergather a cui è stata applicata la correzione del Normal Move Out; d) traccia stack (ottenuta dalla somma orizzontale dei valori di ogni traccia del super-raggruppamento NMO-corretto)





Il pannello di velocità (semblance) derivante da un supergather mostra valori di coerenza relativi a eventi di riflessione chiari e consente di tracciare in maniera ottimale l'andamento della velocità con la profondità lungo i vari punti della linea sismica.

Per l'analisi delle velocità su tutte le acquisizioni è stato preso in considerazione un supergather ogni 10, implementando i punti di verifica all'occorrenza, per conseguire il massimo dettaglio 2D. Il modello di velocità 2D lungo la sezione sismica è stato quindi ricavato graficamente affiancando i risultati ottenuti per ciascun supergather.

È stato così costruito un modello di velocità iniziale selezionando le coppie t_0 - V_{nmo} sulle semblance realizzate; successivamente questo modello è stato perfezionato nei suoi punti più rilevanti, utilizzando le semblance a risoluzione più elevata. Il modello 2D di velocità ottenuto è stato infine liscio attraverso uno specifico algoritmo di smoothing per evitare/limitare la formazione di artefatti all'interno della sezione stack finale.

L'analisi di velocità eseguita sui raggruppamenti CDP è stata successivamente comparata a pannelli CVS (Constant Velocity Stack) per migliorare l'efficacia del picking sui riflettori principali.

Stacking

La legge di riflessione afferma che il punto di riflessione si trova sotto il punto centrale del rilevatore di sorgente. È possibile avere diverse tracce che hanno lo stesso punto medio comune (CMP), da record di ripresa diversi. La concezione di base dello stacking è quella di sommare tutte le tracce CMP per generare una nuova traccia semplice. Lo scopo principale dello stacking è migliorare il rapporto segnale-rumore e aumentare la risoluzione (verticale) degli eventi di riflessione come riduzione del rumore incoerente. Il miglioramento del segnale di riflessione dovuto allo stacking dipende in gran parte dall'accuratezza della correzione NMO.

Poststack-processing

Trace normalization

Questa fase serve a rimuovere eventuali effetti di distorsione e di attenuazione dei segnali sismici che potrebbero essere presenti nei dati acquisiti.

fx-deconvolution

La deconvoluzione nel campo F-X è un valido strumento per l'attenuazione del rumore random e di conseguenza per evidenziare la continuità dei riflettori. In questa fase del processing ogni traccia è trasformata dal dominio temporale al suo corrispettivo dominio in frequenza mediante trasformata discreta di Fourier. Relativamente agli spettri delle tracce allineati tra loro, per ogni frequenza viene utilizzato un filtro Wiener, con lag spaziale unitario, per prevedere il campione spazialmente successivo. Al termine del processo i dati sono rimappati nuovamente nel campo t-x (tempo-spazio).

Trace balancing

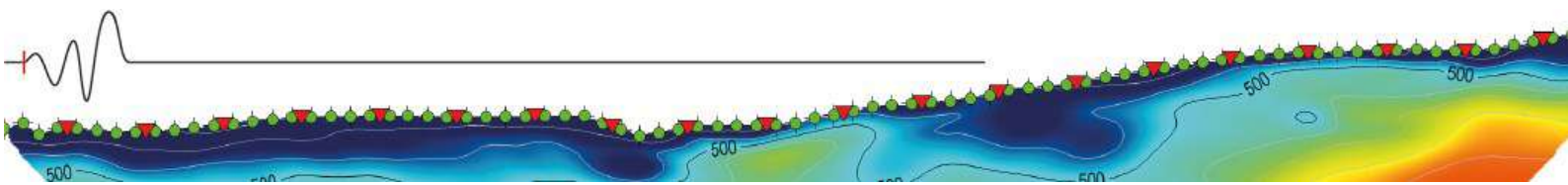
Il bilanciamento delle tracce è un tipo di normalizzazione che coinvolge l'intero sismogramma rappresentativo della sezione stack. Questo tipo di processamento, andando a compensare decadimenti localizzati dovuti a differenziazioni di copertura del segnale, aiuta l'interprete nel riconoscimento dei riflettori e delle strutture sismiche tettoniche principali.

2D velocity model

Il modello di velocità bidimensionale V_{rms} è ricostruito a partire dalle verticali 1D estratte dall'analisi delle singole semblance. Una volta ubicate le verticali di velocità nella loro esatta posizione spaziale, attraverso un processo d'interpolazione e liscio dei valori che evita la formazione di zone d'impedenza troppo marcate, viene costruita una griglia di velocità i cui valori presentano un passo di campionamento spaziale e temporale pari a quello della sezione stack. Il modello finale viene, quindi, utilizzato per la correzione del NMO (Normal Move Out) di tutti i raggruppamenti CDP costituenti la sezione sismica.

Depth migration

Il modello 2D- V_{rms} è, infine, convertito mediante la Formula di Dix nel modello 2D-Vint (velocità intervallare). Tale modello è utilizzato per la conversione, da tempi in profondità, della sezione stack finale. Quest'ultimo importantissimo passaggio posiziona correttamente nello spazio bidimensionale investigato tutti i riflettori individuati dalla prospezione sismica in riflessione.



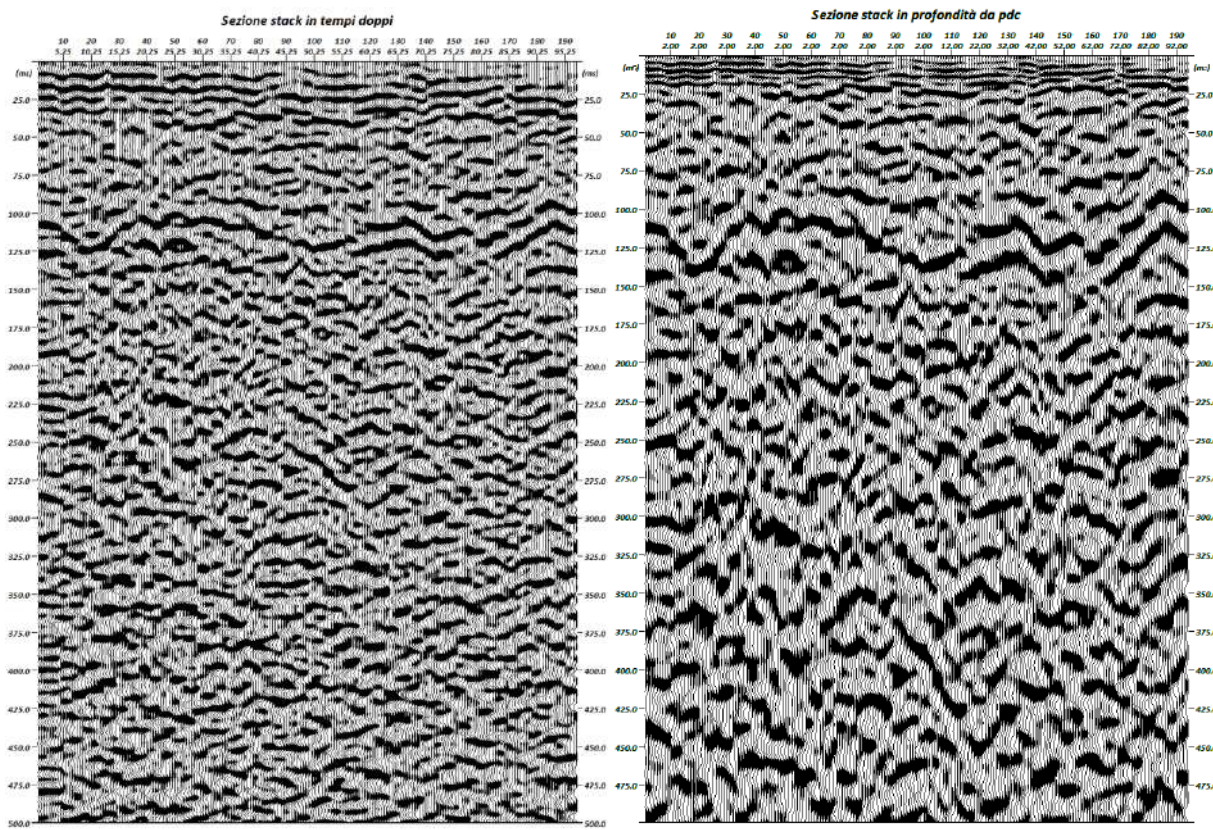
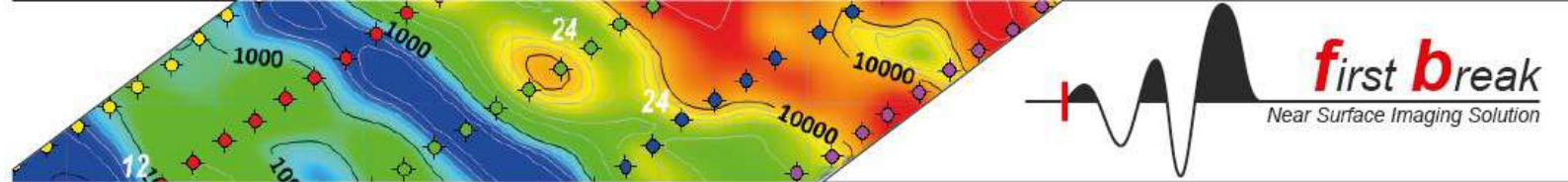
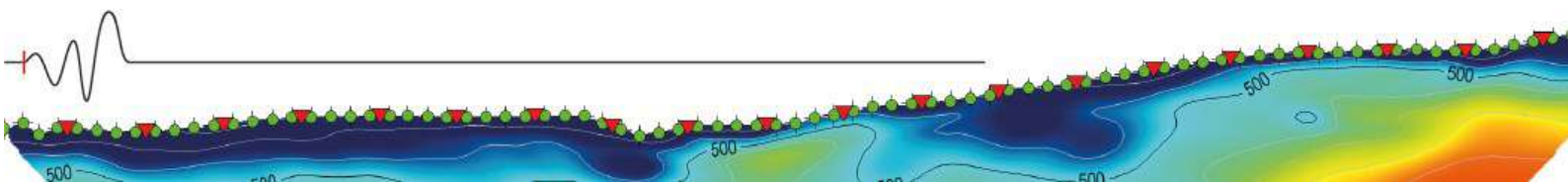
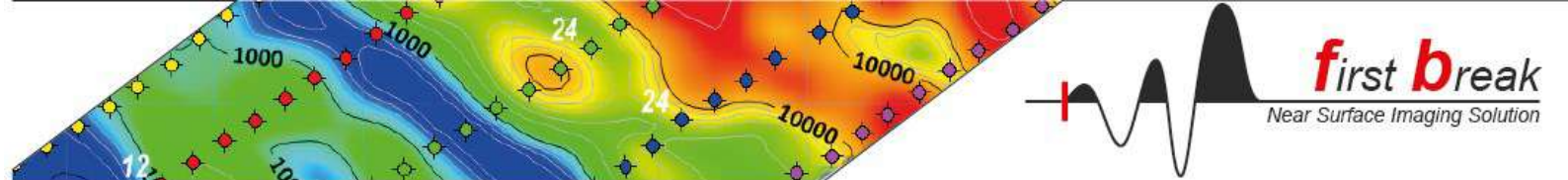


Fig. 19 sx) sezione stack non migrata (scala verticale è in tempi doppi); dx) sezione stack migrata in profondità (scala verticale in metri, rapporto H/V 1.75:1).





Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)

I metodi di *Multichannel Analysis of Surface Waves*, meglio noti con l'acronimo MASW, particolarmente apprezzati per la loro non invasività e praticità di esecuzione rispetto ad altri metodi sismici, negli ultimi 20 anni hanno riscosso una sempre maggiore attenzione in ambito geotecnico e ingegneristico, fino a diventare ormai di largo uso per la determinazione di modelli monodimensionali della velocità delle onde di taglio.

Diversamente dalle onde di volume, la cui velocità non dipende dalla frequenza, per le onde di superficie non esiste "una" velocità di propagazione ma ogni frequenza è caratterizzata da una propria velocità. Questo comportamento definito *dispersione in frequenza* è fortemente controllato dalle caratteristiche del mezzo in cui la propagazione avviene. Maggiore l'eterogeneità tra gli strati presenti, maggiore la dispersività del mezzo. All'estremo opposto, un mezzo omogeneo è invece poco dispersivo, o addirittura non dispersivo nel caso limite di un mezzo omogeneo e isotropo.

L'energia legata alle onde di superficie decade esponenzialmente allontanandosi dalla superficie stessa, e la trattazione matematica dimostra che il moto indotto alle particelle dal passaggio dell'onda è confinato in profondità non oltre una lunghezza d'onda. È chiaro quindi come al variare delle caratteristiche elastiche con la profondità, si abbiano ripercussioni sullo spettro di velocità ed è questo il principio alla base dei metodi MASW. Lunghezze d'onda minori sono condizionate solo dalle porzioni di terreno più prossime alla superficie, mentre lunghezze d'onda maggiori (o basse frequenze), penetrando il terreno più in profondità risentono anche di quanto si trova in basso nella colonna sismo-stratigrafica. Ne segue che la forma dello spettro di dispersione è una rappresentazione indiretta del sottosuolo, in cui il dominio delle alte frequenze è rappresentativo di quanto si trova nell'immediato sottosuolo, mentre procedendo verso le basse frequenze si collezionano informazioni a maggiore profondità.

Metodi di analisi

I metodi di prospezione sismica basati sulle onde di superficie adottano modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati piano paralleli sovrapposti, con caratteristiche elastiche lineari nei casi più semplici, oppure considerando il comportamento visco-elastico più realistico per i materiali naturali.

Per ogni strato si possono definire i parametri principali che controllano la propagazione dell'energia elastica: spessore; densità; velocità di propagazione delle onde di taglio V_s ; coefficiente di Poisson; fattore di qualità (Q). A partire da questi è possibile ricavare le proprietà dispersive delle onde superficiali, definendo in questo modo il *problema diretto* che, note le caratteristiche del terreno, permette di descrivere la dispersione. Nei metodi geofisici occorre invece affrontare il *problema inverso*, ossia, partendo dal dato sperimentale, si deve risalire al modello del terreno descrivendolo attraverso i parametri meccanici e sismici.

La procedura utilizzata può essere sintetizzata nelle tre seguenti fasi principali:

1. **Acquisizione dati e controllo qualità (QC):** registrazione (dominio del tempo) e osservazione dei dati sismici (dominio delle frequenze) per un intervallo sufficientemente ampio in termini sia di tempo (il ventaglio dispersivo deve essere interamente contenuto nel sismogramma), sia di frequenze (tipicamente 4.5÷60 Hz);
2. **Signal processing:** trattamento dei dati attraverso trasformata di Fourier, filtraggio e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione espresse come velocità di fase o gruppo in funzione della frequenza (spettro velocità di fase/frequenza);
3. **Processing/Inversione:** elaborazione del profilo monodimensionale di V_s mediante definizione di uno spazio di ricerca ottenuto iterativamente per modellazione diretta e affinamento mediante inversione numerica.

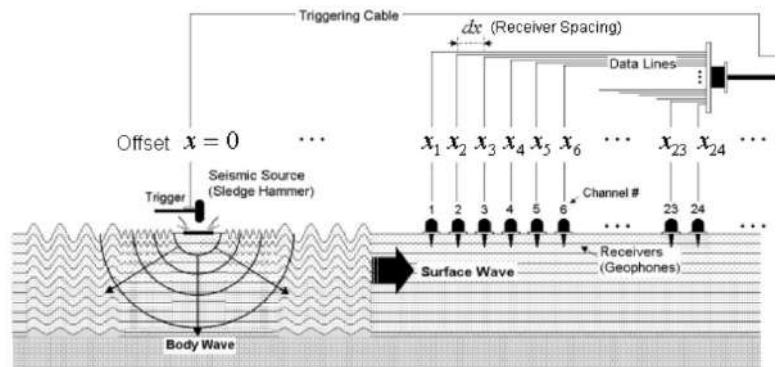


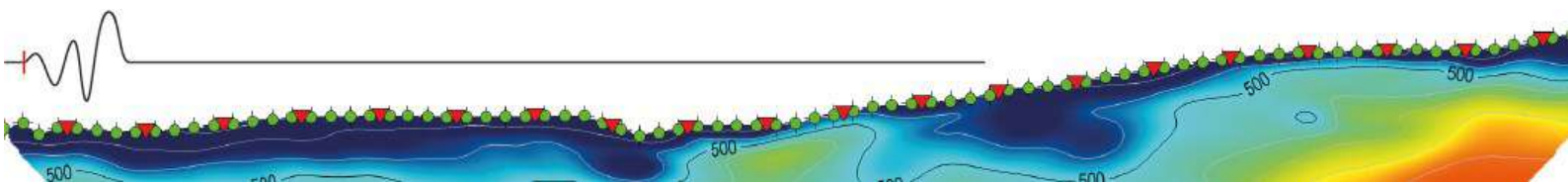
Fig. 20 Schema della disposizione dei geofoni e del punto di energizzazione

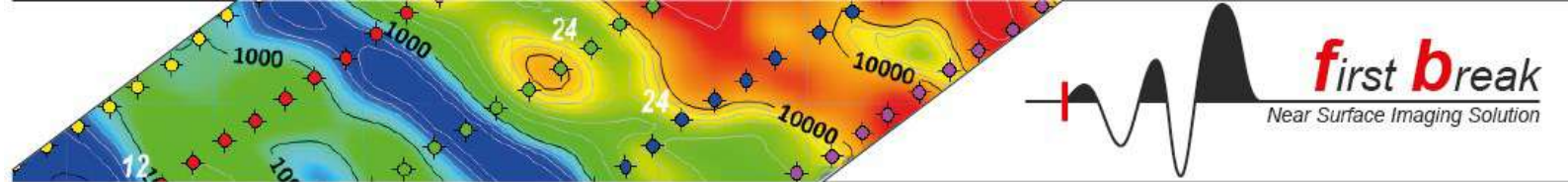
Come tutti i metodi geofisici, anche in questo caso la ricerca della soluzione del problema inverso è sottodimensionata. Una data curva/spettro di dispersione può essere quindi soddisfatta da "n" soluzioni dove per soluzione si intende in questo caso il log sismo-stratigrafico composto di coppie spessore-velocità per ciascuno strato.

Esistono in letteratura numerosi metodi di inversione (Monte Carlo, minimi quadrati, algoritmi genetici, etc.), nessuno dei quali è però in grado di garantire la congruità della soluzione. Ragione per cui le tecniche più evolute, ormai adottate anche da alcuni *softwares* commerciali, hanno abbandonato l'approccio acritico puramente matematico in favore di un *processing* ragionato che attraverso la definizione di vincoli geologici prevede la preliminare definizione di uno spazio di ricerca quanto più ristretto possibile, che può essere spinto fino alla definizione del modello finale o affinato mediante inversione numerica.

Acquisizione dati

L'acquisizione di un set di dati per l'indagine MASW si esegue mediante uno stendimento di sensori, solitamente da 12 a 24 velocimetri con frequenza caratteristica di 4.5 Hz, rigorosamente allineati con la sorgente. Distanza intergeofonica ed *offset* minimo vengono in genere definiti in



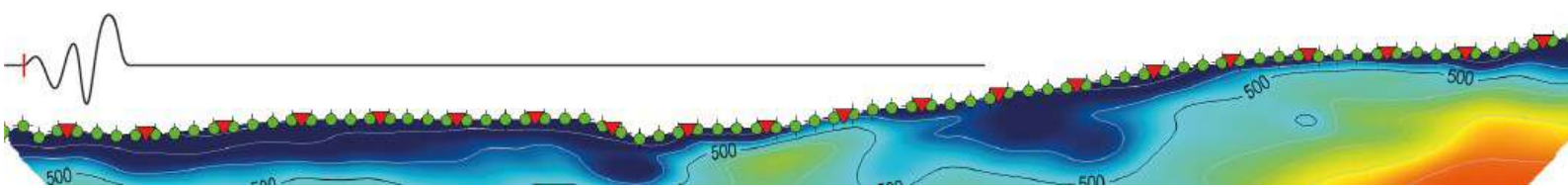


base al contesto geologico ed alle condizioni logistiche. In generale, dispositivi geofonici con lunghezze di 50÷70 m e due o tre punti di energizzazione posti a distanze comprese tra 5.0 e 15.0 metri dal primo ricevitore, consentono una buona definizione degli spettri di frequenza in quasi tutte le condizioni. Terreni particolarmente lenti possono necessitare di stendimenti di maggiore lunghezza affinché la profondità di esplorazione raggiunga il *target* richiesto, o l'abbinamento di qualche tecnica passiva (es, ESAC o MAAM, tralasciando l'ormai obsoleta REMI), per definire adeguatamente la porzione bassa dello spettro. Stendimenti di lunghezze inferiori a 45-50m portano solitamente ad un deterioramento della qualità dello spettro alle basse frequenze per campionamento spaziale insufficiente, e sono generalmente da evitare.

Software di elaborazione

Acquisizione dati, pre-processing e processing dati sono eseguiti con i seguenti *softwares* commerciali. Tutti i software sotto elencati sono licenziati e regolarmente aggiornati alla versione più recente disponibile:

1. **Vscope 2.4.81**, Seismic Source Company - acquisizione dati;
2. **Fron End Express**, Geogiga Technology Corp - data QC e pre-processing;
3. **WinMASW 2023 Acd**, EliaSoft srl - data processing.



Sismica in foro con metodologia Down Hole

Le prove *down-hole* vengono eseguite allo scopo di ricostruire la colonna sismo-stratigrafica nelle immediate vicinanze del foro d'indagine misurando la velocità delle onde sismiche dirette che si propagano dalla superficie nel terreno in profondità, assumendo che i percorsi siano circa rettilinei. Il metodo prevede l'inserimento di un ricevitore (geofono triassiale) in un foro di sondaggio appositamente attrezzato, e la generazione di fronti d'onda dalla superficie, in prossimità del boccaforo (Fig. 21).

Le onde sismiche possono essere generate energizzando il terreno in direzione verticale oppure in direzione trasversale (parallelamente alla orientazione di uno dei trasduttori orizzontali). Nel primo caso verranno generate prevalentemente onde compressive (P) che si propagano in profondità per compressione-dilatazione e vengono registrate al meglio dal geofono verticale. Nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde S o di taglio (moto delle particelle sollecitate ortogonale alla direzione di propagazione), visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente. Queste ultime, avendo velocità inferiori a quelle compressive raggiungeranno la terna geofonica quando già il fronte d'onda P è transitato. Questo passaggio costituisce un disturbo per la misura delle onde trasversali qualora i geofoni orizzontali, eccitati dal transito del treno compressivo, si trovino ancora in movimento all'arrivo dell'onda trasversale. Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda compressiva e l'energia dell'onda trasversale a favore di quest'ultima, si esegue una doppia registrazione orizzontale con polarità opposta, che, all'occorrenza, in fase di elaborazione dati permette di:

1. eseguire il confronto delle forme d'onda tra battute a polarità opposta (Fig. 22, onde S identificabili dal cambio di fase);
2. ridurre in ampiezza la componente compressiva sulle battute orizzontali mediante *stacking* dei record dopo inversione di polarità di una delle battute (P in contro-fase vengono ridotte per interferenza distruttiva, al contrario le onde S in fase risulteranno ulteriormente rafforzate per interferenza costruttiva).

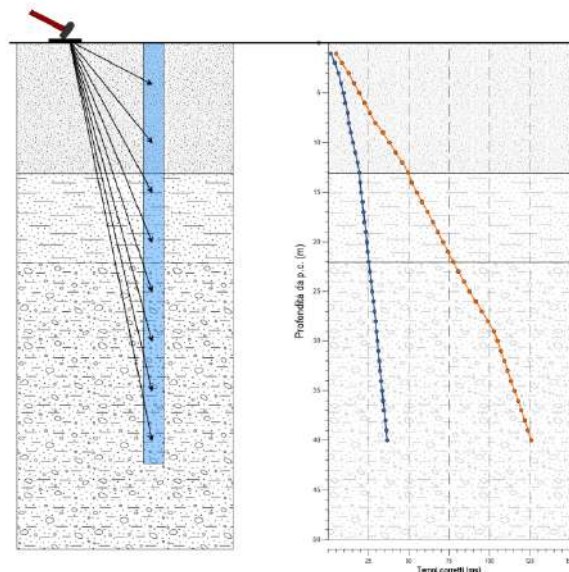


Fig. 21 Schema di acquisizione indagine in foro tipo Down-Hole e rappresentazione grafica dei tempi di primo arrivo

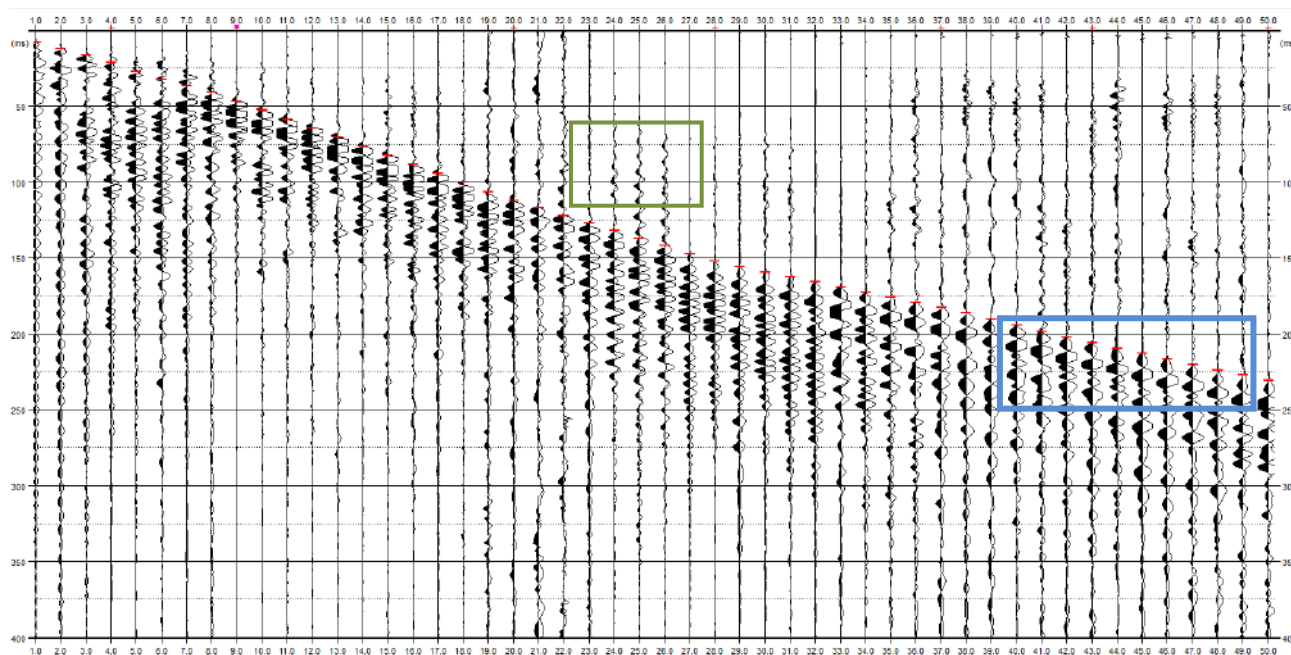
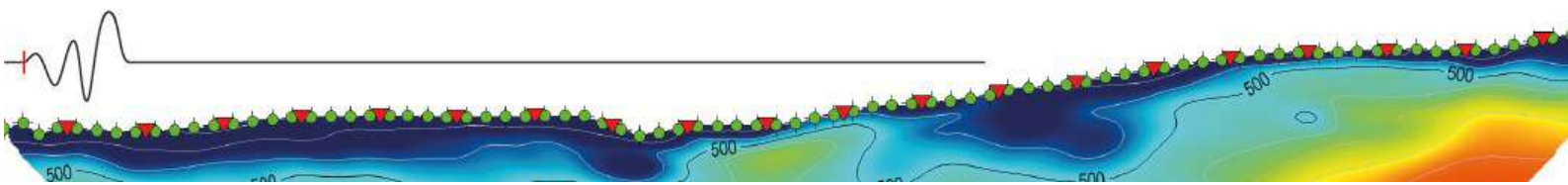
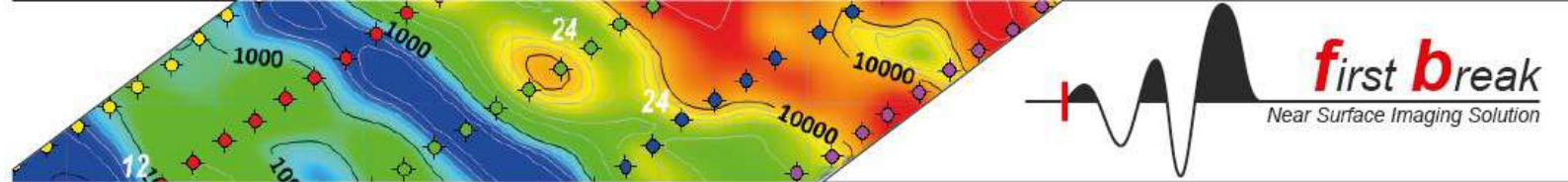


Fig. 22 Esempio di registrazione onde di taglio, confronto battuta destra (wiggles nero) e battuta sinistra (wiggles bianco). Mentre il treno di onde compressive eccita allo stesso modo tutti i canali attivi (box verde), il primo arrivo delle onde di taglio è chiaramente marcato da un'inversione di fase (box azzurro).

Processing dati

L'analisi dei dati prevede che le battute eseguite a diverse quote vengano raccolte a ricostruire un unico sismogramma, identico a quello che sarebbe stato ricevuto da una catena di geofoni quante sono le quote di misura nel foro. In particolare vengono raggruppate in un unico sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni verticali ed in altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali.





Su questi si esegue il *picking*, ovvero l'identificazione del momento di primo arrivo della deformazione elastica al ricevitore (*first break*) e quindi la definizione del tempo di tragitto sorgente-ricevitore (tempo "osservato") necessario per il calcolo del tempo "corretto" (t^*) da cui si ottengono infine le velocità, essendo t^* il tempo che impiegherebbe l'onda se si propagasse in direzione verticale. Per una registrazione eseguita a profondità Z, con sistema di energizzazione posto a distanza H dal boccaforno, il tempo corretto si ottiene dalla seguente:

$$t^x = \frac{z}{d} \times t = \frac{z}{\sqrt{z^2 - H^2}} \times t \quad [1]$$

Il calcolo delle velocità si esegue con il **metodo delle dromocrone**, secondo cui, ad ogni cambio di pendenza dell'involuppo dei tempi di primo arrivo corrisponde una variazione di velocità dei terreni attraversati.

Per minimizzare l'errore insito nel metodo le velocità non vengono calcolate per ogni quota di misura (metodo dello pseudo-intervallo), bensì attraverso l'analisi delle dromocrone (senza trascurare le informazioni geologico-stratigrafiche disponibili). Sul grafico dei tempi corretti, vengono infatti individuati strati omogenei (involuppo lineare dei tempi di primo arrivo), per i quali la velocità è materializzata dalla pendenza del ramo di dromocrona e si ottiene per regressione lineare dei tempi attribuiti allo strato in esame. Le velocità di pseudo-intervallo vengono comunque riportate in apposita tabella (Tab.1).

Dai valori delle velocità sismiche calcolate e riportate nella tabella dei risultati, è possibile ottenere i moduli elastici dinamici del terreno secondo le relazioni sotto riportate:

$$\text{Poisson Modulus} \quad \nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad [2] \quad \text{Shear modulus} \quad G = \rho V_s^2 \quad [3]^4$$

$$\text{Young Modulus} \quad E = 2G(1 + \nu) \quad [4] \quad \text{Bulk Modulus} \quad \kappa = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad [5]$$

Dai valori di Vs si ottiene invece il parametro V_{S30} e/o $V_{S_{Eq}}$ calcolati secondo quanto stabilito dalla vigente normativa con la seguente relazione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S_i}}} ; V_{Seq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

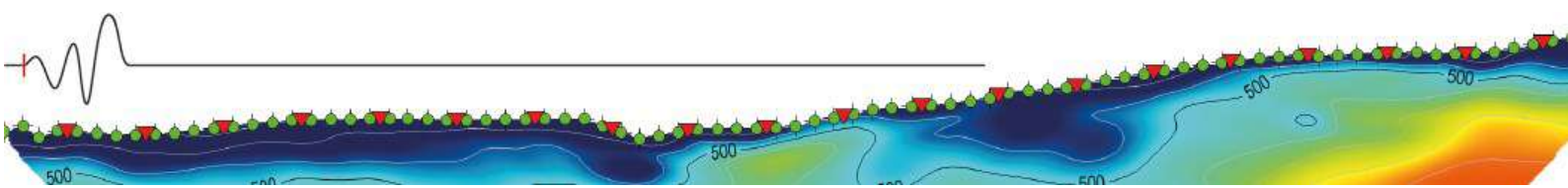
dato "n" il numero di strati in cui è articolata la sismostratigrafia del sito, " h_i " e " V_{S_i} " rispettivamente spessore e velocità dell'i-esimo strato, ed "H" la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s, per i casi in cui questo sia presente entro i 30m di profondità da piano di fondazione.

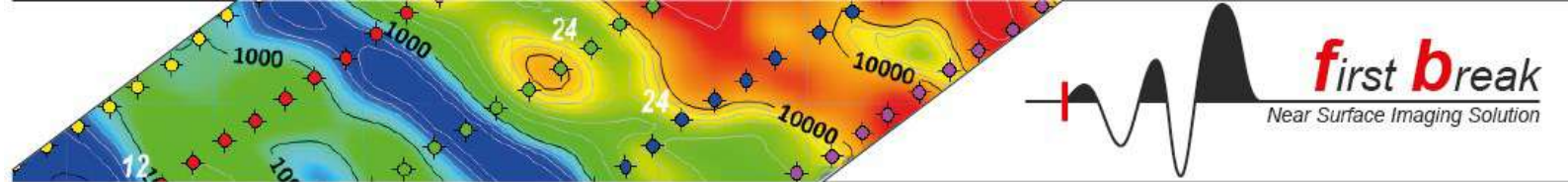
Software

Si riporta di seguito lo stato di validazione dei *software* utilizzati. Tutti i software sotto elencati sono licenziati e regolarmente aggiornati alla versione più recente disponibile:

1. **WinDownHole 4.0**: preprocessing;
2. **Seissee**; data QC e pre-processing;
3. **Fron End Express**, Geogiga Technology Corp - data QC e pre-processing;
4. **PSLog**, Geogiga Technology Corp - data processing;
5. **Microsoft Excel 2023**: correzione tempi, calcolo velocità e moduli dinamici, grafici.

⁴ Quando non disponibile da prove di laboratorio su campioni prelevati in fori di sondaggio, la densità dei materiali è calcolata secondo "Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., Gregory, A.R., 1974. Formation velocity and density-the diagnostic basis for stratigraphic trap. Geophysics 39, 770-780"





Analisi dei risultati

Sismica a riflessione ibrida

L'indagine sismica a riflessione ibrida comprende anche l'analisi tomografica degli eventi rifratti, per questo i risultati del metodo a rifrazione relativi alle tre linee Reflex1, 2+3 e 4, vengono esposti nel presente capitolo unitamente alle sezioni a riflessione. Per quanto attiene invece agli aspetti introduttivi e più generali o le modalità di presentazione degli elaborati, si rimanda ai paragrafi precedenti in cui tali temi sono già stati trattati (§Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.÷Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.). Nei prossimi paragrafi monografici, dedicati alle singole linee, vengono presentati:

- geometria della linea e parametri di acquisizione;
- il piano di tiro completo, sia in forma grafica (senza topografia), sia in forma tabellare;
- un esempio di sismogramma, già trattato in *pre-processing*, corredato dello spettro d'ampiezza del segnale;
- sezione tomografica di velocità in onde P;
- *traveltimes* ottenute dal *picking* da cui deriva il risultato tomografico;
- sezione (a riflessione) *stack* migrata in profondità in rapporto di scala 2.5:1;
- sezione (a riflessione) *stack* migrata in profondità con *layering* indicativo delle principali evidenze geometriche, in rapporto di scala 2.5:1.

Acquisizione dati

Per la generazione dei segnali sismici è stata adottata la massa battente, una mazza da 10kg strumentata per l'innesco della registrazione (*trigger*). Questo sistema di energizzazione è stato scelto in funzione della praticità di esecuzione ed in virtù del limitato sviluppo orizzontale della linea.

Sito	Rifr.	Lunghezza	Geofoni	Array	Passo	Shots	Energizzazione	Copertura	Durata record / Campionamento
SITO 6	Reflex 1	96 m	Vert. 96	Onde P	1.0 m	49	Mazza 8 Kg su Piastra	2400%	1000 ms 500.0 µs - 2000 Hz

Shotmap

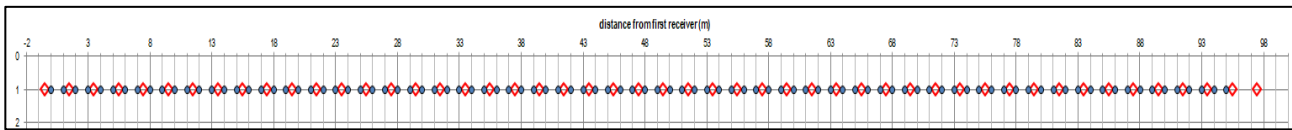
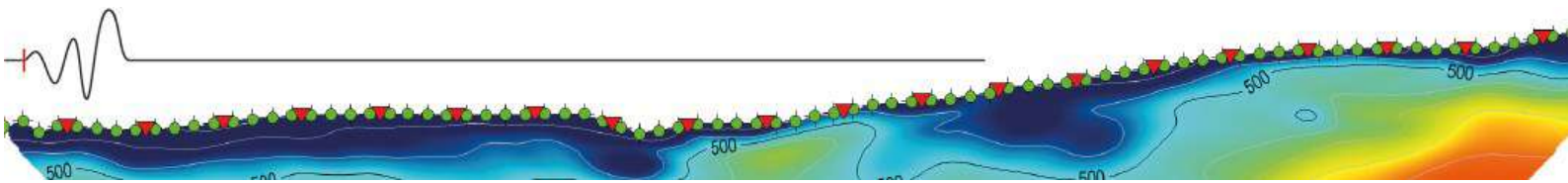
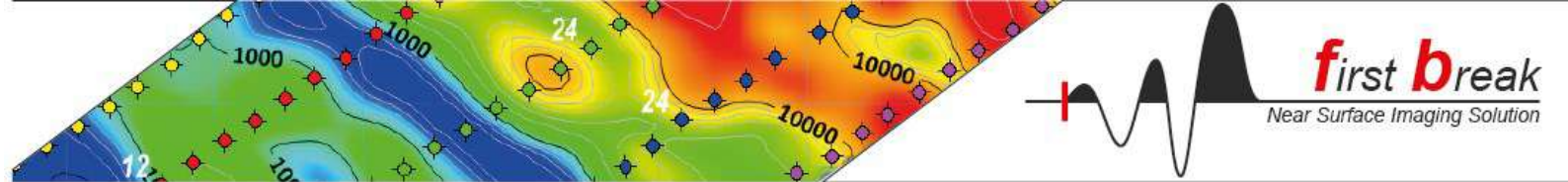


Fig. 23 Schema della posizione dei punti di sparo (*shotmap*) adottato per la linea eseguita. Frequenza di sparo ogni 2 ricevitori, per una copertura pari al 2100%. Losanghe di colore rosso) punti di sparo; punti azzurri) ricevitori.

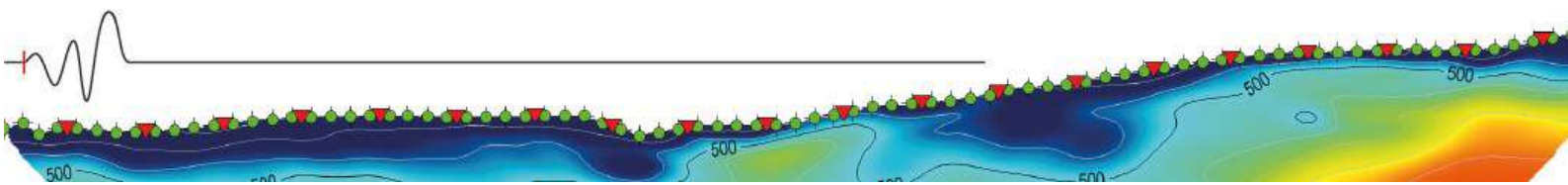
file name	Shot No.	S.N.	spread	Position (m)	file name	Shot No.	S.N.	spread	Position (m)
10005	1	0.5	1	-0.5	10505	26	50.5	1	49.5
10025	2	2.5	1	1.5	10525	27	52.5	1	51.5
10045	3	4.5	1	3.5	10545	28	54.5	1	53.5
10065	4	6.5	1	5.5	10565	29	56.5	1	55.5
10085	5	8.5	1	7.5	10585	30	58.5	1	57.5
10105	6	10.5	1	9.5	10605	31	60.5	1	59.5
10125	7	12.5	1	11.5	10625	32	62.5	1	61.5
10145	8	14.5	1	13.5	10645	33	64.5	1	63.5
10165	9	16.5	1	15.5	10665	34	66.5	1	65.5
10185	10	18.5	1	17.5	10685	35	68.5	1	67.5
10205	11	20.5	1	19.5	10705	36	70.5	1	69.5
10225	12	22.5	1	21.5	10725	37	72.5	1	71.5
10245	13	24.5	1	23.5	10745	38	74.5	1	73.5
10265	14	26.5	1	25.5	10765	39	76.5	1	75.5
10285	15	28.5	1	27.5	10785	40	78.5	1	77.5
10305	16	30.5	1	29.5	10805	41	80.5	1	79.5
10325	17	32.5	1	31.5	10825	42	82.5	1	81.5
10345	18	34.5	1	33.5	10845	43	84.5	1	83.5
10365	19	36.5	1	35.5	10865	44	86.5	1	85.5





10385	20	38.5	1	37.5	10885	45	88.5	1	87.5
10405	21	40.5	1	39.5	10905	46	90.5	1	89.5
10425	22	42.5	1	41.5	10925	47	92.5	1	91.5
10445	23	44.5	1	43.5	10945	48	94.5	1	93.5
10465	24	46.5	1	45.5	10965	49	96.5	1	95.5
10485	25	48.5	1	47.5	10985	50	98.5	1	98.5

Tab. 6 Tabella dei punti di sparo (*shotmap*) per la linea eseguita: progressiva metrica riferita al primo ricevitore o station number 1 posto alla posizione -0,50m



Tomografia a rifrazione

Common shot gathers

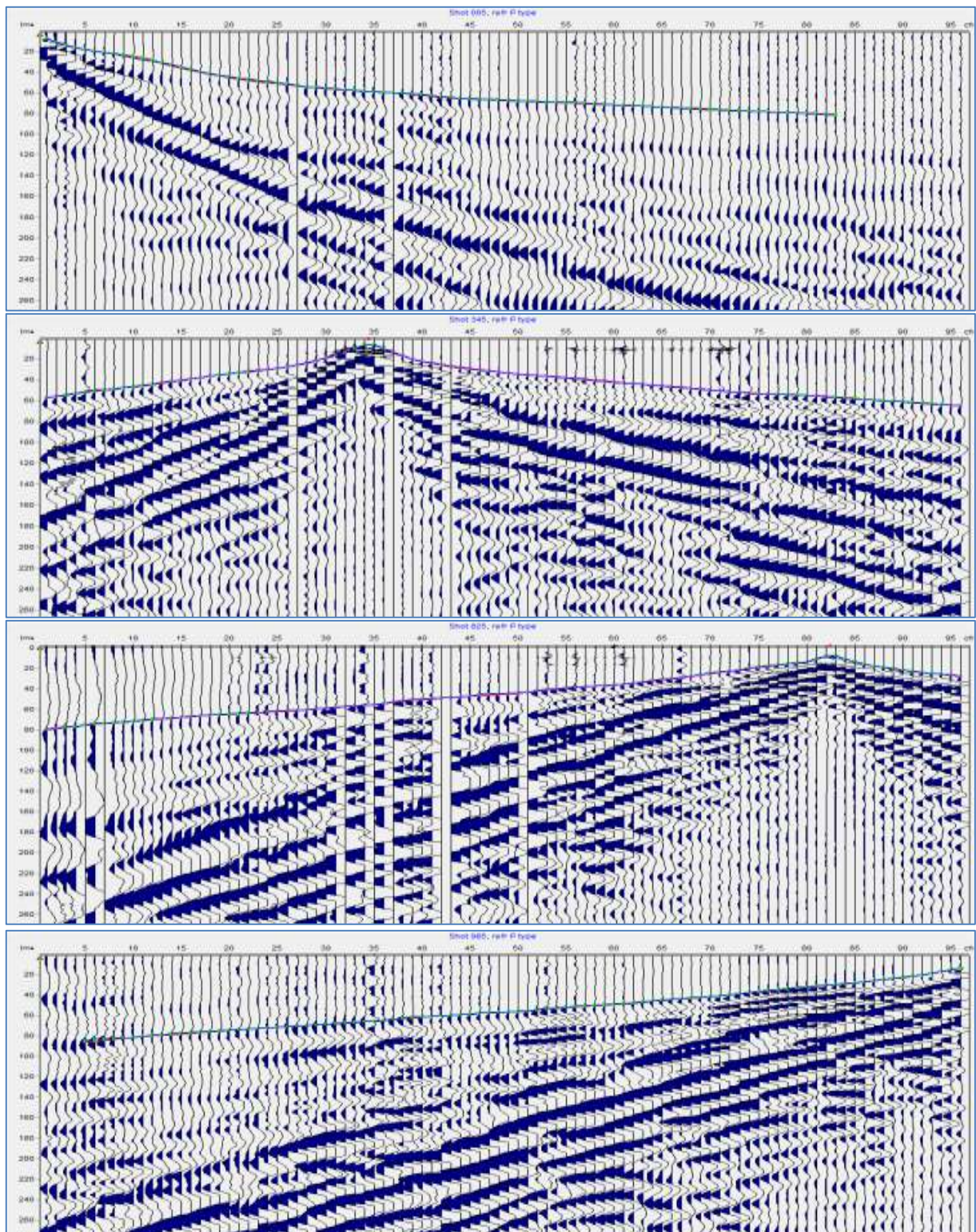
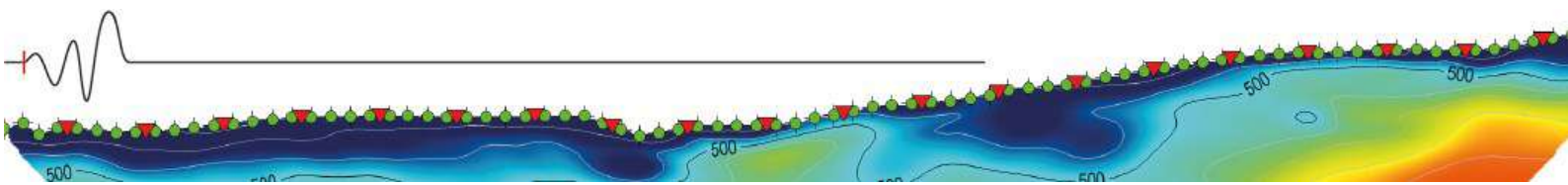


Fig. 24 96 channels common shot gathers in onde P : dall'alto, shot position 005,345, 525 e 965.



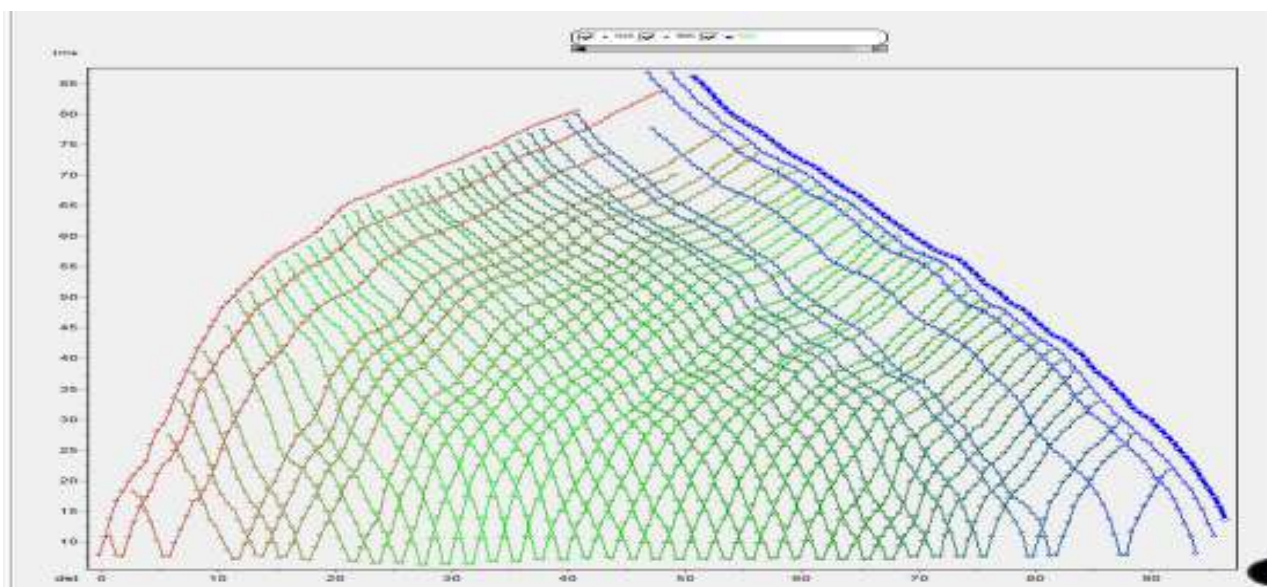


Fig. 25 esempio delle dromocrome per lo sparo 245

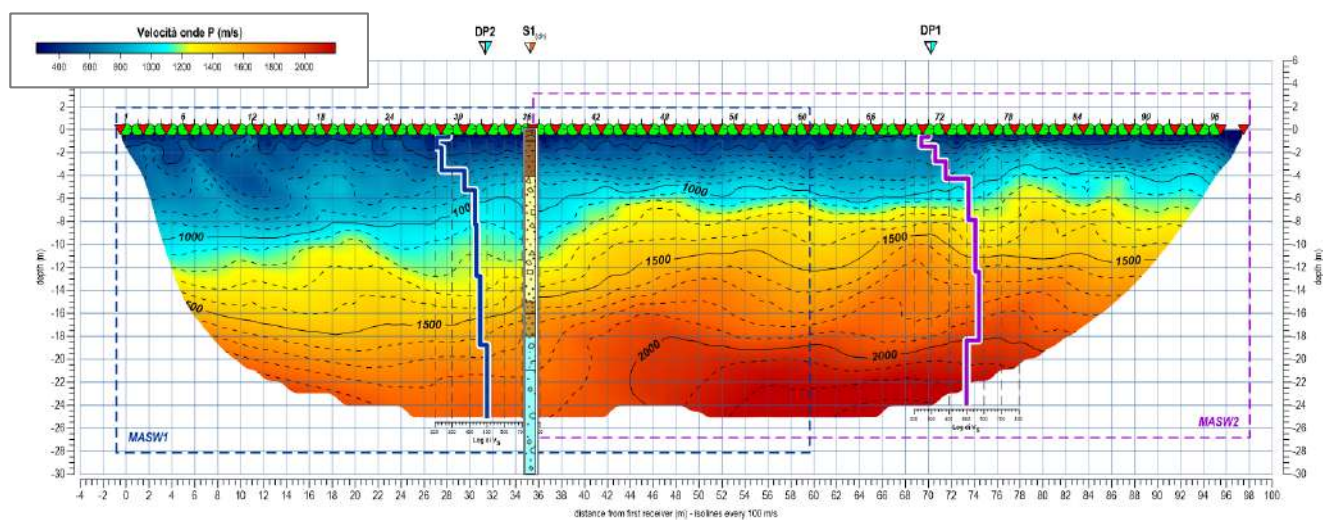
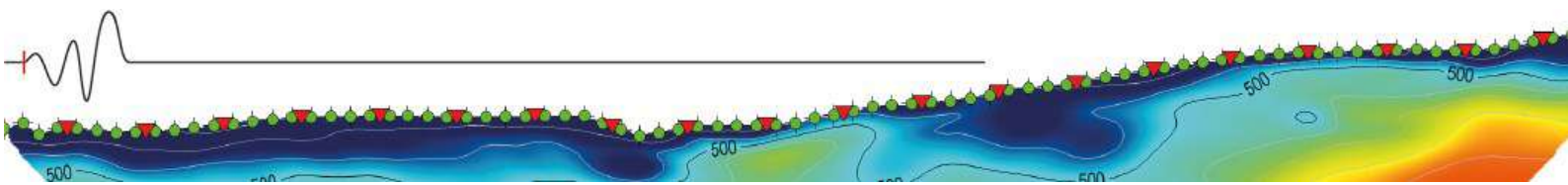


Fig. 26 Sezione in onde di compressione non interpretata, e relativa scala cromatica utilizzata nei tomogrammi per la rappresentazione della velocità. In sovrapposizione: log stratigrafico schematico; profili di velocità in onde di taglio ricavati dall'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh. Vp tomografiche isotache P ogni 100 m/s).



Sismica a riflessione

Common shot gathers

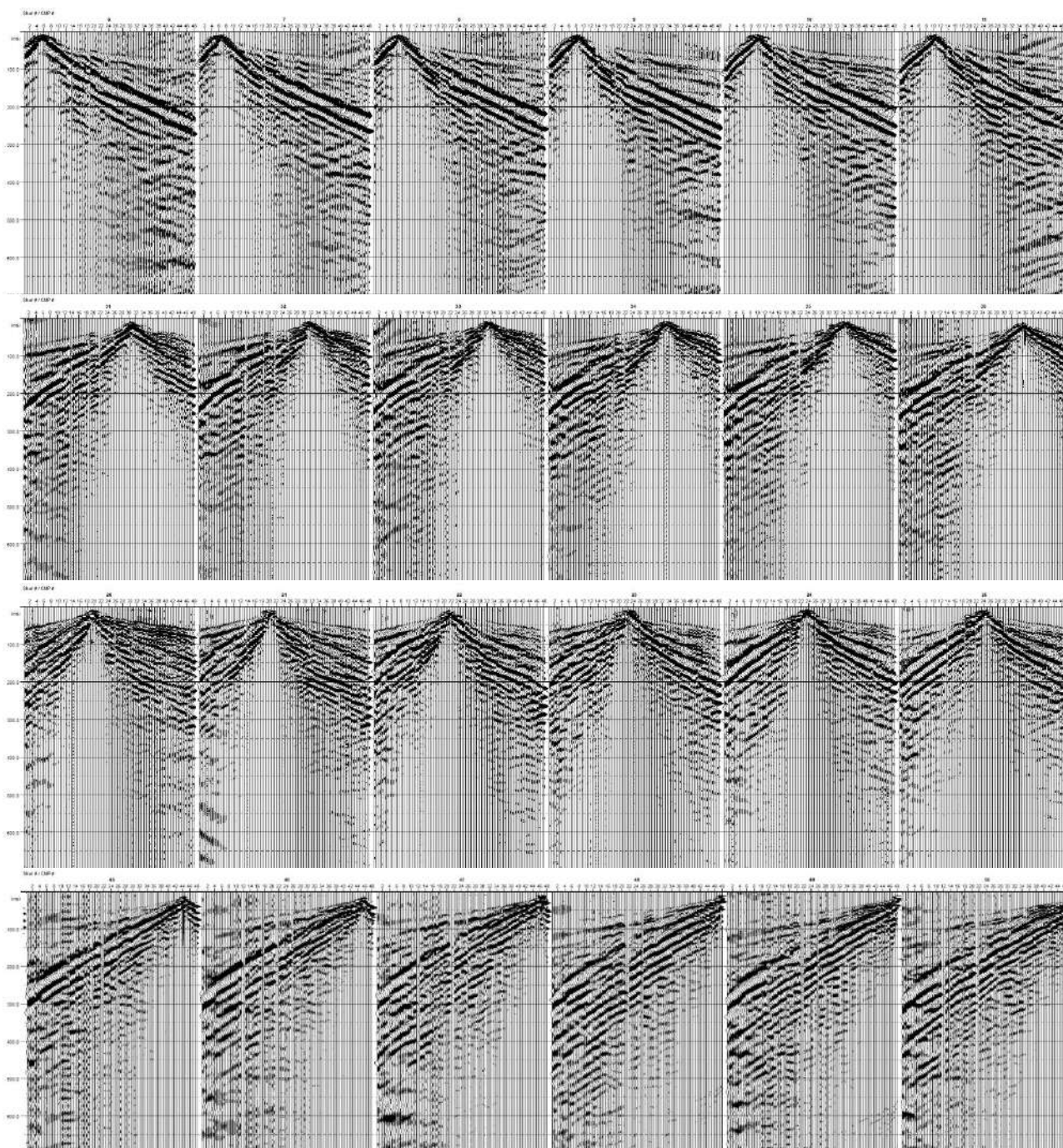
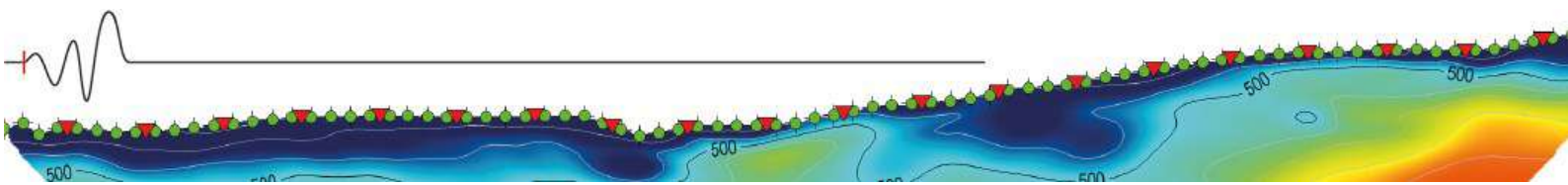


Fig. 27 96 channels common shot gathers in onde P : sismogrammi estratti a campione a titolo di esempio della qualità dei segnali acquisiti. Filtro BP applicato in pre-processing.



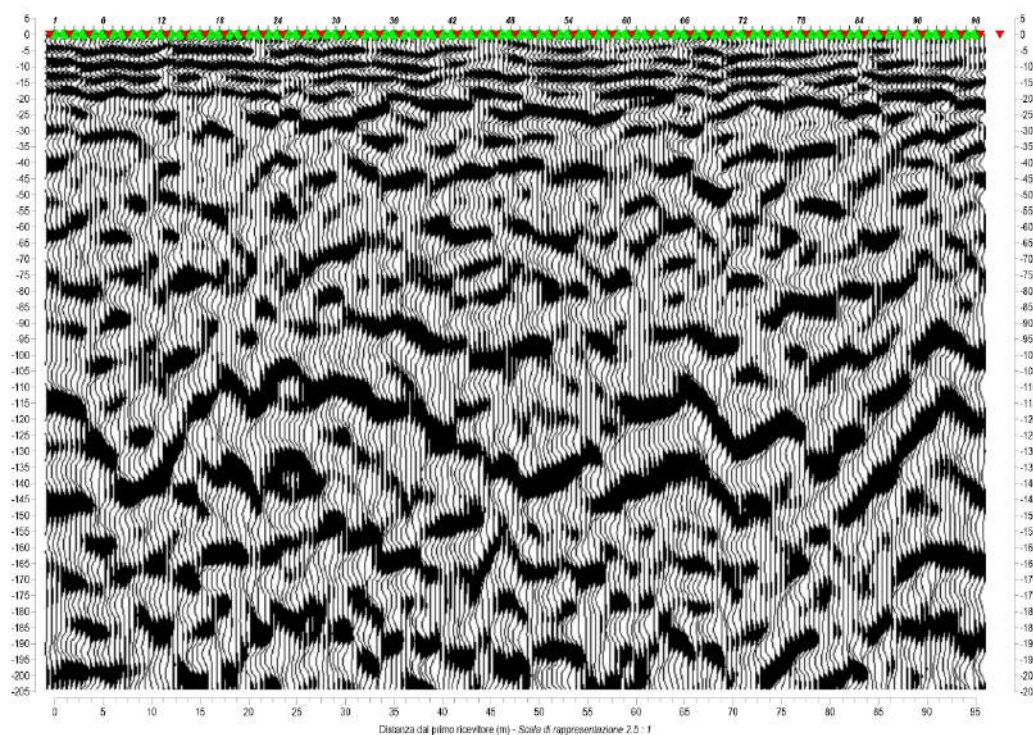


Fig. 28 Linea sismica a riflessione ibrida Reflex1: sezione *stack* migrata in profondità. Rapporto di scala V/H 1:1

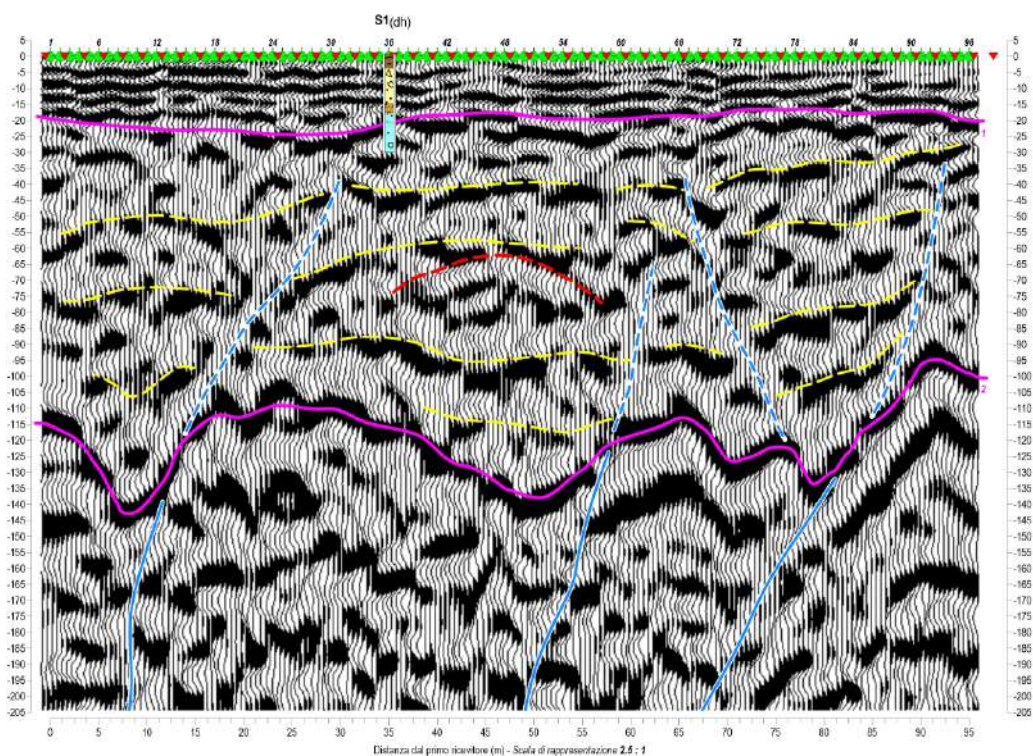
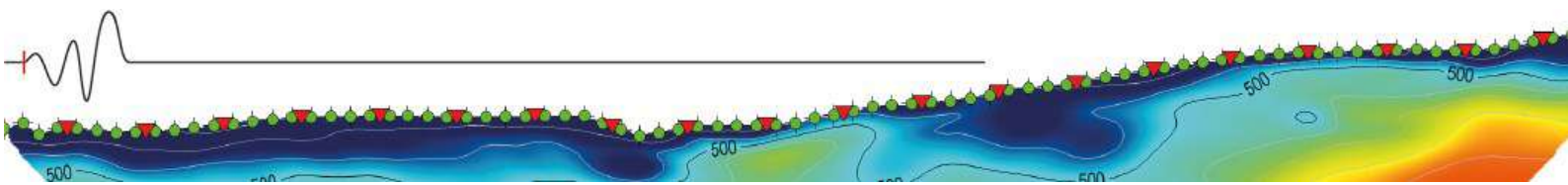


Fig. 29 Linea sismica a riflessione ibrida Reflex1: sezione *stack* migrata in profondità con *layering* indicativo delle principali evidenze geometriche. Rapporto di scala V/H 1:1



MASW

Nel caso specifico sono state realizzate 2 analisi MASW, utilizzando lo stendimento di sismica, una per la prima metà della linea denominata MASW 1 e una per la parte terminale denominata MASW 2.

Acquisizioni MASW

I profili della variazione della velocità delle Onde Sh con la profondità prodotti per inversione degli spettri di dispersione sono profili a strati con velocità costante (Log monodimensionali o 1D), ottenuti attraverso modellazione prevalentemente diretta, utilizzando la modellazione numerica solo per la rifinitura del modello una volta definito uno spazio di ricerca quanto più ristretto e vincolato possibile. Infatti, a prescindere dall'approccio adottato (*single* o *multi-component*), il processo di inversione necessita sempre di un modello geologico "sensato" di riferimento (spessore degli strati e *ranges* di velocità) che definisca lo spazio di ricerca all'interno del quale andare ad individuare la soluzione "migliore".

Per i motivi esposti nelle pagine introduttive, nel caso di risultati ottenuti dalla dispersione delle sole onde di Rayleigh, in assenza di indagini dirette o altri dati di riferimento adeguati, le colonne sismo-stratigrafiche proposte hanno valore indicativo. Il valore di V_{S30} si può tuttavia considerare affidabile in quanto, per le n soluzioni "matematicamente equivalenti" che soddisfano la dispersione, può variare rispetto al valore medio proposto di un margine non superiore a $\pm 10\%$. Al contrario, modelli sismo-stratigrafici ottenuti per modellazione congiunta a due (*Rayleigh+Love*; *Rayleigh+HVS*; *Love+HVS*) o tre componenti (*Rayleigh+Love+HVS*), godono di una maggiore affidabilità, non richiedono necessariamente dati diretti per vincolare il modello di partenza e consentono ricostruzioni anche dettagliate delle geometrie sepolte.

Nel caso in esame, il modello sismo-stratigrafico deriva dalla modellazione della componente verticale (ZVF) acquisite nella linea a riflessione eseguite delle (Fig. 30 e Fig. 31). Raffrontate poi con altre prove in situ eseguite dal tecnico incaricato

I dati sperimentali risultano di buona qualità. I risultati sono ottenuti esclusivamente per modellazione diretta dello spettro sintetico (FVS *inversion*). Tutti gli spettri ottenuti dalle registrazioni di campagna sono stati valutati e confrontati selezionando poi il migliore per la fase di modellazione.

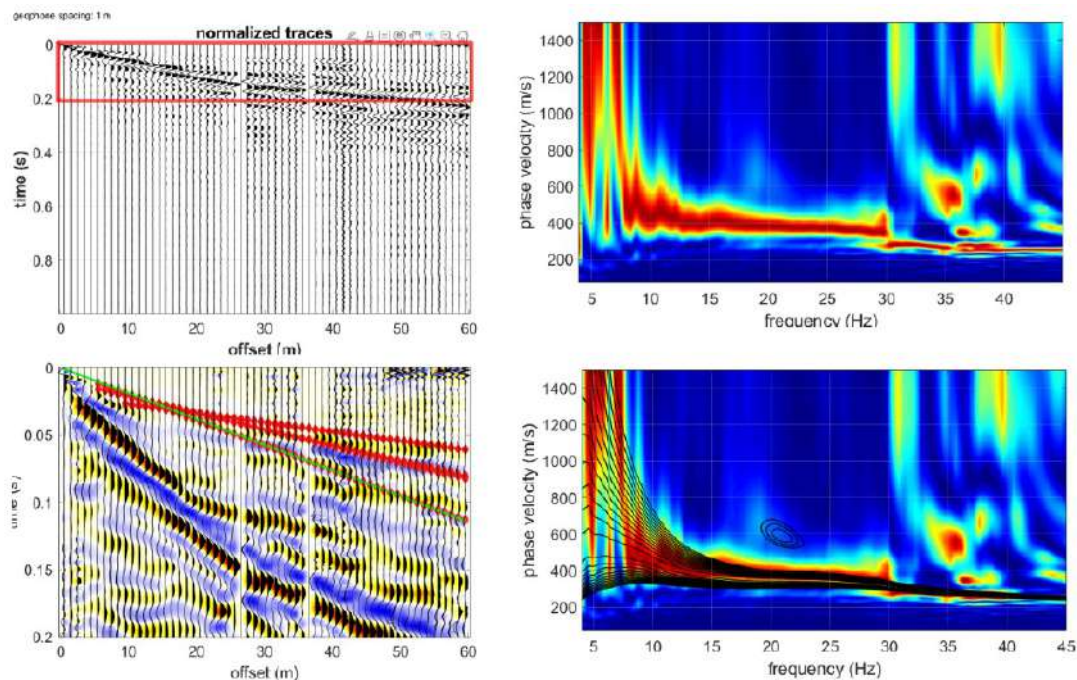
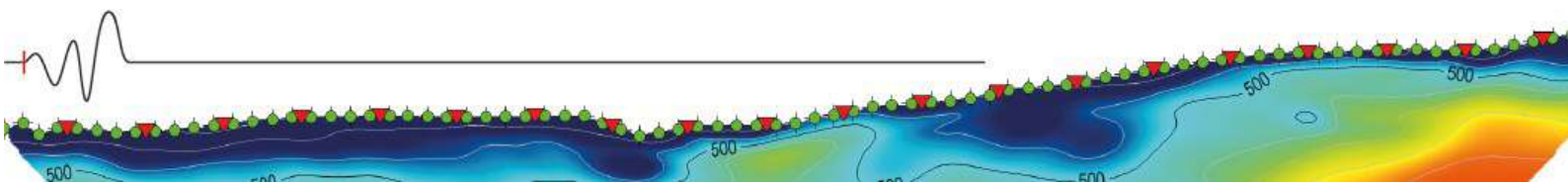


Fig. 30 Spettri sintetici delle velocità di fase ottenuti per modellazione diretta mediante analisi FVS (full velocity spectrum), sovrapposti agli spettri sperimentali (in scala colori). La buona sovrapposizione del sintetico sullo spettro sperimentale è il presupposto fondamentale per l'affidabilità del modello sismo-stratigrafico. MASW 1;



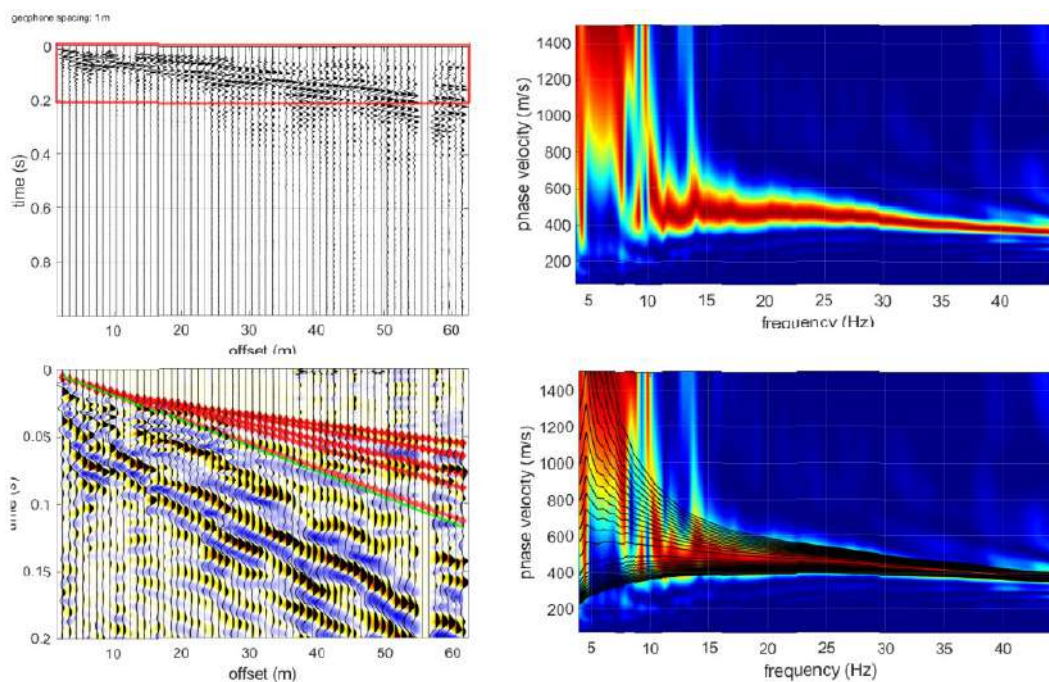


Fig. 31 Spettri sintetici delle velocità di fase ottenuti per modellazione diretta mediante analisi FVS (full velocity spectrum), sovrapposti agli spettri sperimentali (in scala colori). La buona sovrapposizione del sintetico sullo spettro sperimentale è il presupposto fondamentale per l'affidabilità del modello sismo-stratigrafico. MASW 1.

Di seguito negli allegati viene esposto sia in forma tabulare, sia in forma grafica, il modello sismo-stratigrafico utile per il calcolo del parametro V_{S30} o V_{seq} e per la definizione della categoria di suolo. L'acquisizione è stata eseguita con geofoni verticali per la componente verticale delle onde di Rayleigh (ZVF). Il modello ottenuto soddisfa pertanto sia la dispersione delle onde di Rayleigh sia gli eventi rifratti () osservabili sul sismogramma. In allegato si riportano i parametri (velocità; spessori; densità; modulo di taglio dinamico e parametro V_{S30}), relativi al "modello finale" anche per profondità superiori ai 30 m da p.c. (in rosso gli strati profondi necessari per aspetti inerenti il calcolo degli spettri sintetici, ma poco vincolabili per la scarsa definizione degli spettri di dispersione alle basse frequenze), ottenuto dall'interpretazione della dispersione.

Modello sismo-stratigrafico

layer	h (m)	Vs (m/s)	top (m)	bottom (m)	Density (g/cm3)	Poisson (adim.)	Vp (m/s)	Shear M. G*	Young M. E*	Bulk M. k*
1	0.2	280	0.0	0.2	1.9	0.30	524	151	393	328
2	0.9	210	0.2	1.1	1.9	0.38	477	82	225	312
3	2.0	240	1.1	3.1	1.9	0.38	537	109	299	400
4	1.7	370	3.1	4.8	2.0	0.37	815	274	750	963
5	3.0	430	4.8	7.8	2.1	0.33	854	379	1008	990
6	4.5	440	7.8	12.3	2.1	0.45	1473	397	1152	3919
7	6.0	460	12.3	18.3	2.1	0.44	1405	436	1255	3485
8	9.0	500	18.3	27.3	2.1	0.42	1369	523	1487	3220
9		530	27.3		2.1	0.40	1298	590	1652	2752
10										
11										
12										

layer	h (m)	Vs (m/s)	top (m)	bottom (m)	Density (g/cm3)	Poisson (adim.)	Vp (m/s)	Shear M. G*	Young M. E*	Bulk M. k*
1	0.2	280	0.0	0.2	1.9	0.30	524	151	393	328
2	0.8	240	0.2	1.0	1.9	0.38	545	109	300	416
3	1.3	320	1.0	2.3	2.0	0.38	716	202	555	741
4	1.5	380	2.3	3.8	2.0	0.37	837	290	795	1021
5	3.6	510	3.8	7.4	2.1	0.36	1090	544	1478	1758
6	4.5	550	7.4	11.9	2.1	0.42	1489	638	1814	3827
7	6.0	570	11.9	17.9	2.1	0.42	1503	689	1951	3871
8	9.0	500	17.9	26.9	2.1	0.43	1474	523	1500	3844
9		530	26.9		2.1	0.43	1476	590	1682	3788
10										
11										
12										

Tab. 7 Modelli sismostratigrafici: descrizione in termini di velocità e spessori della colonna sismo-stratigrafica. Gli strati profondi (prof.>35-40m) hanno valore puramente indicativo non essendo sufficientemente vincolabili, tuttavia risultano utili a guidare l'inversione verso un insieme di soluzioni geologicamente plausibili escludendo quelle geologicamente improbabili. Moduli dinamici e Rapporto di Poisson: poiché il modulo di Poisson incide in piccola parte sulla forma dello spettro sintetico, è possibile includere questo parametro nella modellazione. Terreni sciolti in falda ad esempio sono un caso favorevole che consente di fissare Poisson con valori prossimi a 0.5, o la presenza di strati di sabbie che hanno solitamente valori intorno a 0.45. La densità, se non disponibile da prove di laboratorio su campioni indisturbati, può essere ottenuta mediante la relazione di Gardner et al. (1974). Per le modalità con cui si perviene alla stima di questi parametri, è implicito che il valore dei moduli dinamici da essi derivati è del tutto qualitativo. Sopra modello derivante dall'elaborazione della MASW 1, sotto quello della MASW 2

Sismica in foro

Nell'analisi delle dromocrone si è adottato un modello a più strati, evidenziati in colonna 1 e 2 in Fig. 33, caratterizzati da velocità delle onde sismiche rappresentative di ciascuno.

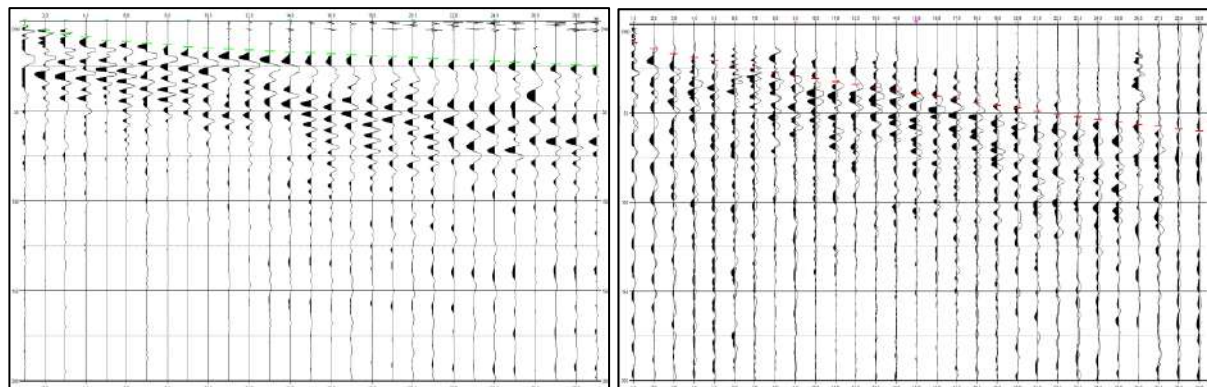


Fig. 32 : Common shot gathers: onde P (sx), onde S battuta destra vs sinistra (dx).

Tempi di primo arrivo, velocità di strato e moduli dinamici calcolati sono riportati sia in forma tabulare riportata nell'allegato specifico, sia grafica (Fig. 33), nelle seguenti pagine. I tempi corretti (t^*) sono calcolati dai tempi di primo arrivo considerando una distanza sorgente-boccafori pari a 2.40 m.

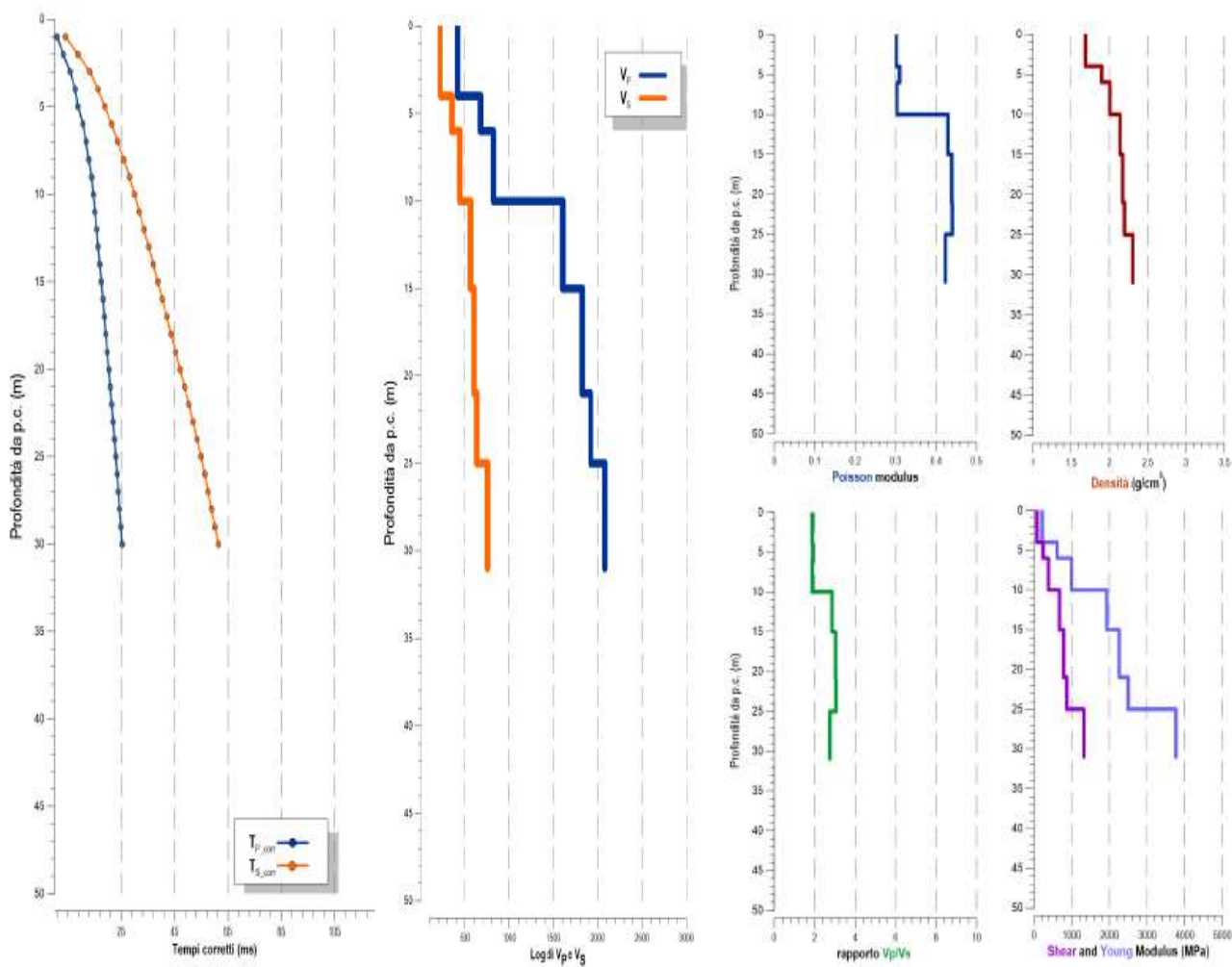
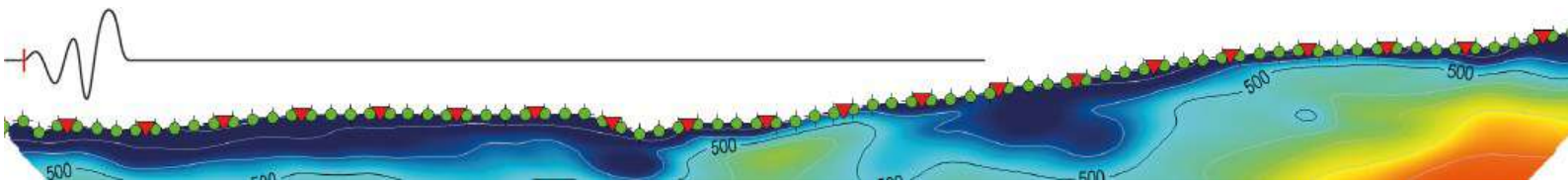
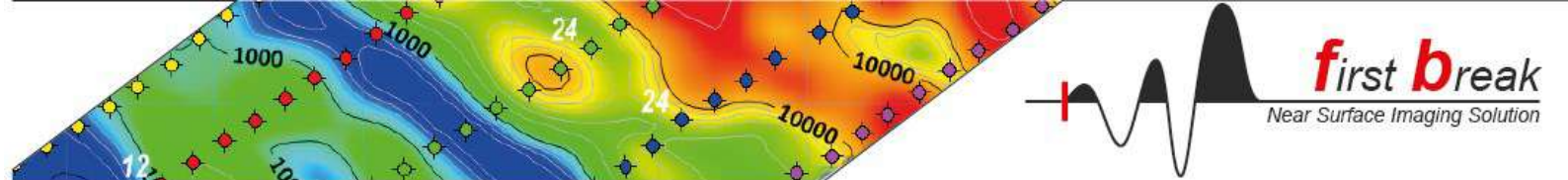


Fig. 33 Traveltimes (grafico tempi-profondità), Velocità onde P e onde S (m/s); modulo di Poisson; densità (g/cm^3); rapporto V_p/V_s ; Moduli dinamici Shear e Young (MPa).





V_{S30} - V_s equivalente

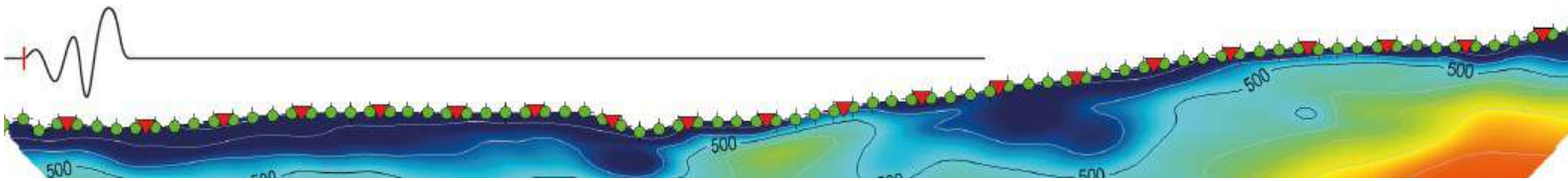
Dai valori delle velocità delle onde di taglio calcolate e riportate nella tabella dei risultati, è possibile ottenere il valore di V_{S30} o V_{s_eq} , calcolati secondo modalità precedentemente descritte. Come da indicazioni del Committente, tali parametri sono calcolati prendendo a riferimento il piano campagna.

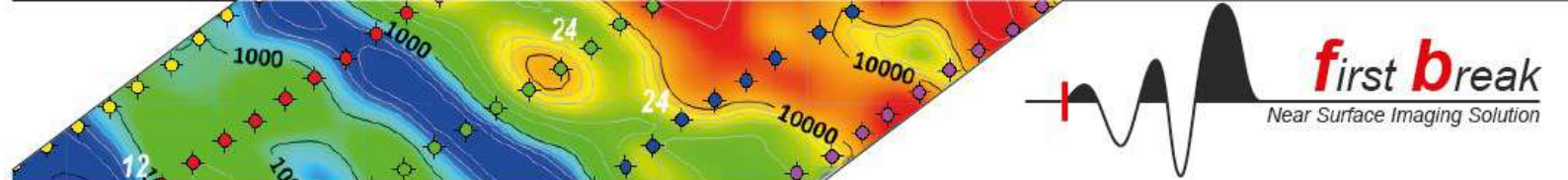
Strato	Prof. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$V_{S30} = 486 \text{ m/s}$
1	0 - 3	411	219	
2	3 - 5	669	351	
3	5 - 9	820	436	
4	9 - 14	1600	562	
5	14 - 20	1821	601	
6	20 - 24	1919	628	
7	24 - 30	2076	758	

Tab. 8 Tabella sinottica della sismostratigrafia del sito e V_{S30} o V_{s_eq}

Rec.	Depth (m)	Tempi (ms)				Vel (m/s)				Vp/Vs	Poisson <i>n</i>	Density (g/cm³)	Shear M. <i>G</i> (Mpa)	Young M. <i>E</i> (Mpa)	Bulk M. <i>k</i> (Mpa)
		<i>Tp</i>	<i>Ts</i>	<i>Tp_corr</i>	<i>Ts_corr</i>	<i>Vp_p.int</i>	<i>Vs_p.int</i>	<i>Vp_layer</i>	<i>Vs_layer</i>						
1	0														
2	1	2.51	10.58	1.0	4.1	288	103	411	219	1.9	0.302	1.69	81	211	177
3	2	5.09	13.63	3.3	8.7	436	215	411	219	1.9	0.302	1.69	81	211	177
4	3	7.48	16.93	5.8	13.2	388	222	411	219	1.9	0.302	1.69	81	211	177
5	4	9.00	18.96	7.7	16.3	533	329	669	351	1.9	0.310	1.90	234	613	538
6	5	9.79	20.99	8.8	18.9	899	375	669	351	1.9	0.310	1.90	234	613	538
7	6	11.51	23.02	10.7	21.4	537	408	820	436	1.9	0.303	2.00	381	993	840
8	7	12.44	25.05	11.8	23.7	929	431	820	436	1.9	0.303	2.00	381	993	840
9	8	13.36	27.08	12.8	25.9	967	446	820	436	1.9	0.303	2.00	381	993	840
10	9	14.36	29.11	13.9	28.1	933	457	820	436	1.9	0.303	2.00	381	993	840
11	10	14.92	30.80	14.5	29.9	1560	548	1600	562	2.8	0.430	2.14	675	1929	4569
12	11	15.49	32.49	15.1	31.7	1600	556	1600	562	2.8	0.430	2.14	675	1929	4569
13	12	16.06	34.19	15.7	33.5	1631	563	1600	562	2.8	0.430	2.14	675	1929	4569
14	13	16.63	35.88	16.4	35.3	1653	568	1600	562	2.8	0.430	2.14	675	1929	4569
15	14	17.27	37.57	17.0	37.0	1508	572	1600	562	2.8	0.430	2.14	675	1929	4569
16	15	17.78	39.21	17.6	38.7	1842	595	1821	601	3.0	0.439	2.17	785	2258	6158
17	16	18.30	40.84	18.1	40.4	1855	598	1821	601	3.0	0.439	2.17	785	2258	6158
18	17	18.82	42.47	18.6	42.1	1866	600	1821	601	3.0	0.439	2.17	785	2258	6158
19	18	19.34	44.10	19.2	43.7	1876	602	1821	601	3.0	0.439	2.17	785	2258	6158
20	19	19.86	45.73	19.7	45.4	1883	603	1821	601	3.0	0.439	2.17	785	2258	6158
21	20	20.51	47.36	20.4	47.0	1513	604	1821	601	3.0	0.439	2.17	785	2258	6158
22	21	21.02	49.15	20.9	48.8	1912	554	1919	628	3.1	0.440	2.20	866	2495	6934
23	22	21.53	50.67	21.4	50.4	1916	649	1919	628	3.1	0.440	2.20	866	2495	6934
24	23	22.04	52.19	21.9	51.9	1923	650	1919	628	3.1	0.440	2.20	866	2495	6934
25	24	22.56	53.71	22.4	53.4	1923	651	1919	628	3.1	0.440	2.20	866	2495	6934
26	25	23.03	55.25	22.9	55.0	2070	646	2076	758	2.7	0.423	2.30	1323	3765	8159
27	26	23.51	56.52	23.4	56.3	2075	778	2076	758	2.7	0.423	2.30	1323	3765	8159
28	27	23.99	57.79	23.9	57.6	2075	780	2076	758	2.7	0.423	2.30	1323	3765	8159
29	28	24.46	59.06	24.4	58.8	2079	781	2076	758	2.7	0.423	2.30	1323	3765	8159
30	29	24.94	60.33	24.9	60.1	2079	781	2076	758	2.7	0.423	2.30	1323	3765	8159
31	30	25.42	61.60	25.3	61.4	2075	779	2076	758	2.7	0.423	2.30	1323	3765	8159

Tab. 9 Tabella completa della sismostratigrafia del sito con paramentri indicati per ogni metro di indagine



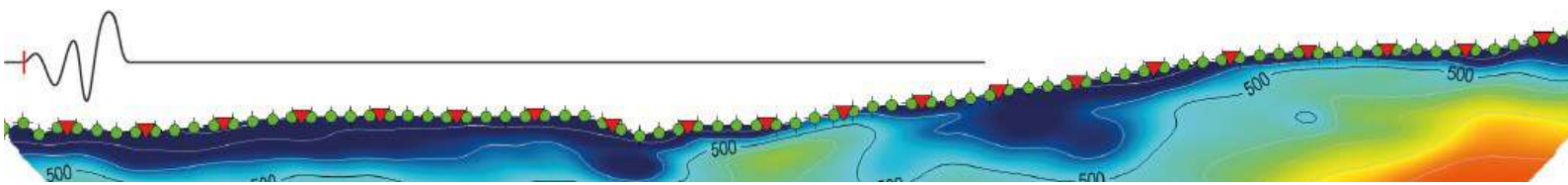


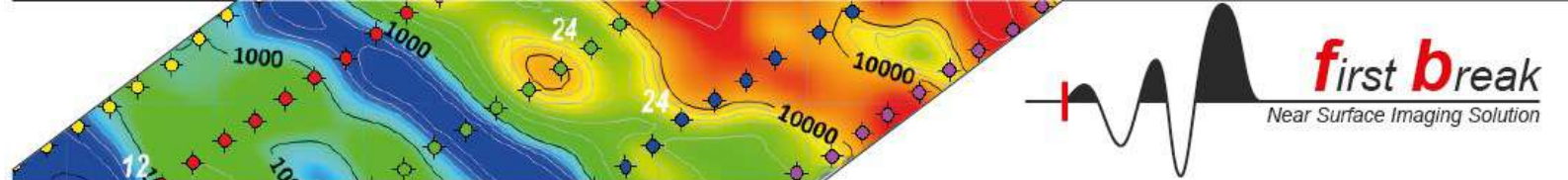
Considerazioni conclusive

Dall'analisi unitaria delle indagini sismiche effettuate in sito si rileva la presenza di terreni alluvionali piuttosto sciolti molto superficiali, il cui spessore tende ad aumentare leggermente procedendo verso Ovest, tali depositi sormontano livelli più consistenti, associabili a ghiaie, dallo spessore molto potente. In particolare dalla sismica a rifrazione si evince un primo livello di circa 5.00/6.00 metri con velocità inferiore a 1000 m/s che si mantiene costante da Ovest, ovvero da fine linea (g96) sino a circa metà stesa per poi approfondirsi sino a 10.00 ad Est nella parte iniziale della linea.

La sismica a riflessione, mette in luce le geometrie più profonde, ed infatti individua il bedrock ad una profondità variabile da circa 90/95 di profondità ad un minimo di 145 m. da piano campagna. L'andamento del tetto del bedrock appare piuttosto articolato, analogamente alla geometria dei depositi sovrastanti. Alcune diffrazioni che si notano nella sezione sismica a riflessione fanno supporre ad una variazione laterale di consistenza, probabilmente legata ad una variabilità laterale granulometrica, tipica di un ambiente deposizionale come questo. La porzione più superficiale, entro i 20 m. dall'analisi delle riflessioni appare più omogenea ed organizzata sebbene anch'essa mette in luce un certo aumento di spessore dei depositi superficiali.

L'analisi dei dati profondi ha rivelato la probabile presenza di discontinuità ad alto angolo nel bedrock, che sembrano proseguire nel deposito sovrastante, senza tuttavia dare evidenza nei metri più superficiali.





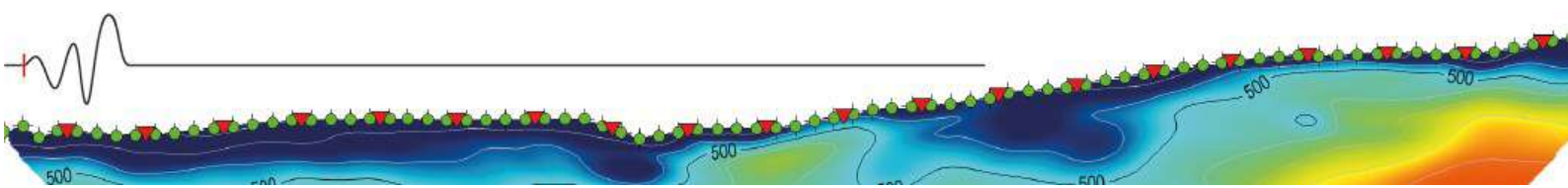
Documentazione fotografica

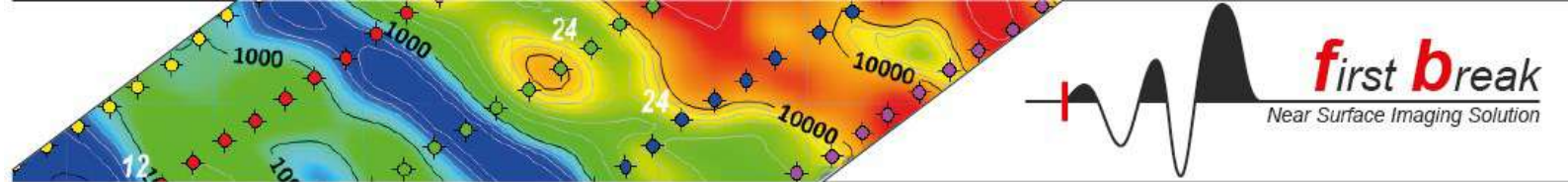


Fig. 34 Esecuzione dell'indagine di sismica a riflessione. A dx vista della linea ripresa da G3 verso centro linea. A sx viste del tratto finale foto da G60 verso G96



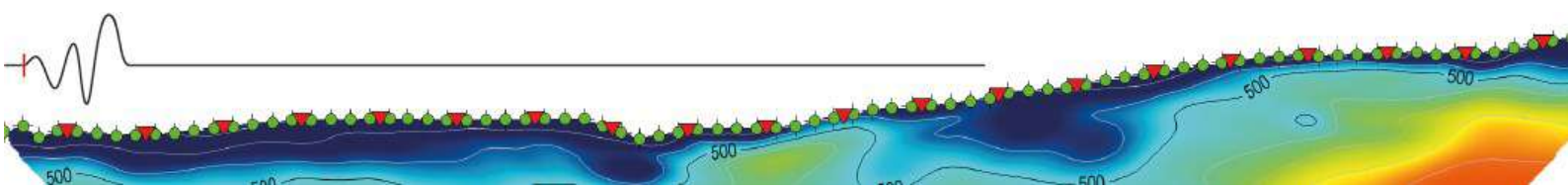
Fig. 35 Esecuzione dell'indagine di sismica a in foro tipo Down-hole

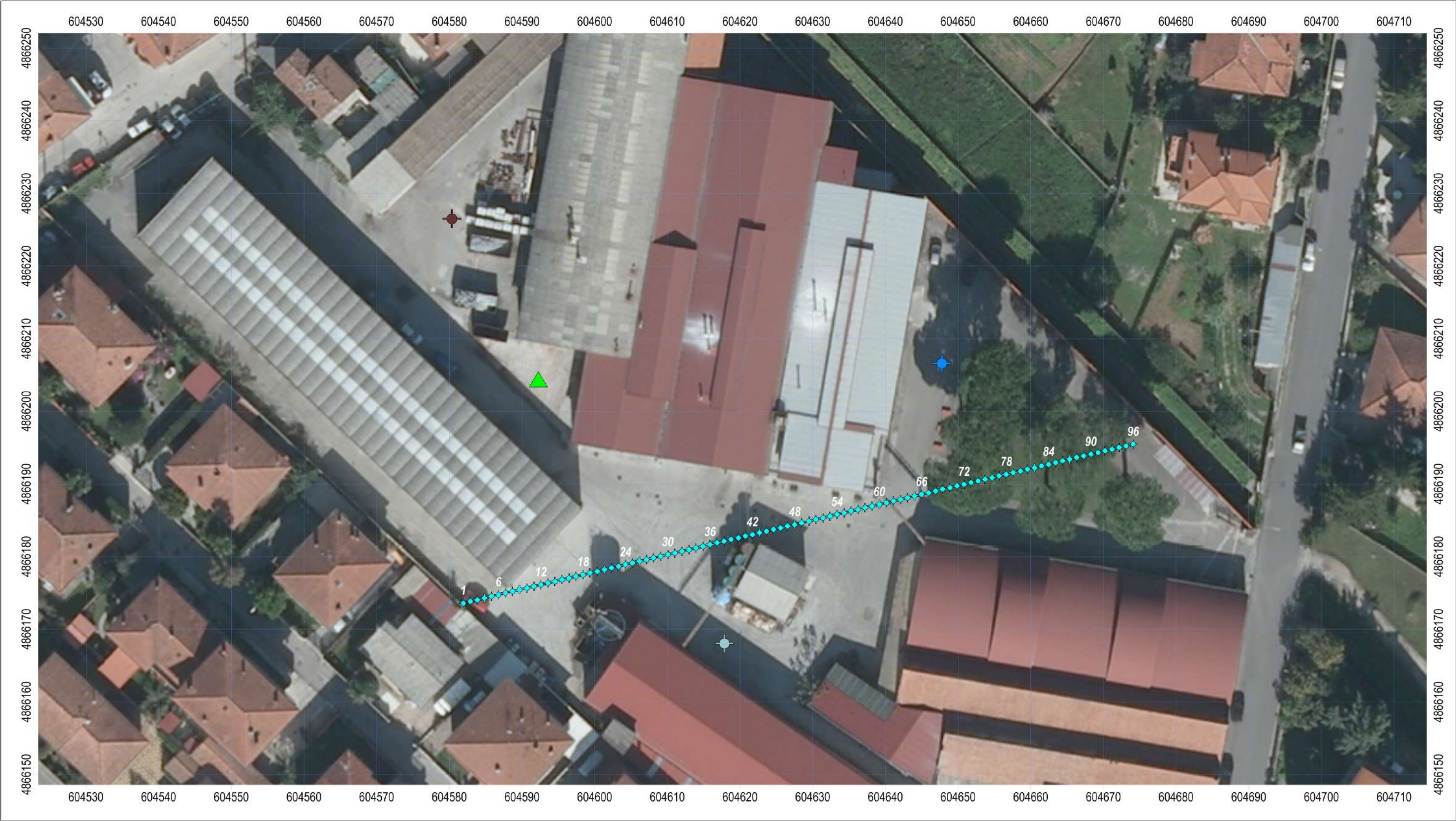




ALLEGATI

1. Ubicazione Indagini
2. Tavola di tomografia sismica a rifrazione con elaborazione MASW sovrapposta
3. Tavola riflessione nuda
4. Tavola riflessione con velocità tomografiche
5. Tavola interpretativa riflessione
6. Tavola riflessione con velocità tomografiche





Project info

Client: **Dott. geol. Luca Niccoli**
Richiedente: **Dott. Geol. Luca Niccoli**
Numero d'ordine: **Reflex_Via Sterpi**
Riferimento lavoro: **Reflex_Via Sterpi**

Acquisizione dati: **ottobre 2023 _ Allacorta / Caputo**
Data processing: **ottobre 2023 _ Dott. Luigi Allacorta**
Report: **ottobre 2023 _ Dott. Luigi Allacorta**

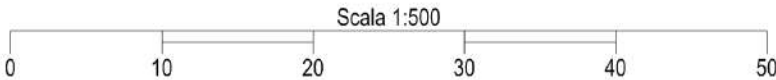
Technical features

P_waves
strumento: **DAQLink 4 (MegaDAQ config.)**
canali attivi: **96**
canali totali: **96**
ricevitori: **verticali, 4.5Hz**
interdistanza ricev (Rx): **x = 1.0m**
punti di trasmissione (Tx): **50, 2.0 m (dT = 2 dR)**
software di acquisizione: **VScope 3.6**
software di elaborazione: **Rayfract 4.05 / ZondST2d 7.0**

Log_Vs_(MASW)
- **60**
96
verticali, **4.5Hz**
x = 1.0m
1.5m
VScope 3.6
WinMasw Acd 2023

Legenda

- Ricevitori linea reflex
- DPSH1
- DPSH2
- DPSH3
- Sondaggio c.c. + DH (sismico)



Sistema di coordinate:
projection: **UTM;**
datum: **WGS84_zone 32N**
coordinates: **m**

SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY (SRT) & MULTICHANNEL ANALYSIS of SURFACE WAVES (MASW)

seismic refraction tomography survey with compressional waves (P) and analysis of surface wave dispersion using synthetic spectra (Full Velocity Spectrum approach)



Indagini geofisiche presso
Ex Sito Industriale in Via Sterpi, CAMAIORE (LU)

Info Commessa

Commessa: Reflex_Via Sterpi
Committente: Dott. Geol. Luca Niccoli
Sito: Via Sterpi, Camaiore (LU)
Tavola: SRT_P + MASW_rayleigh waves

Strumentazione

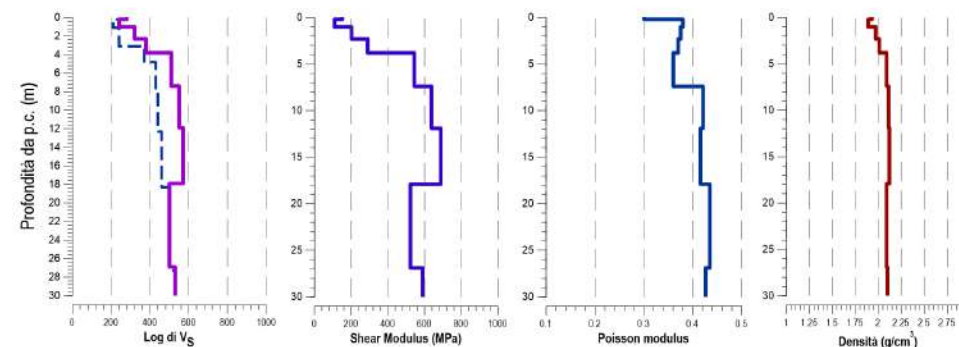
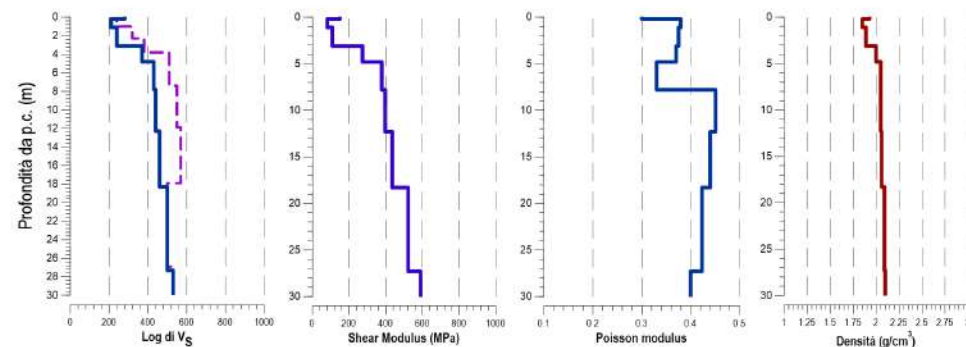
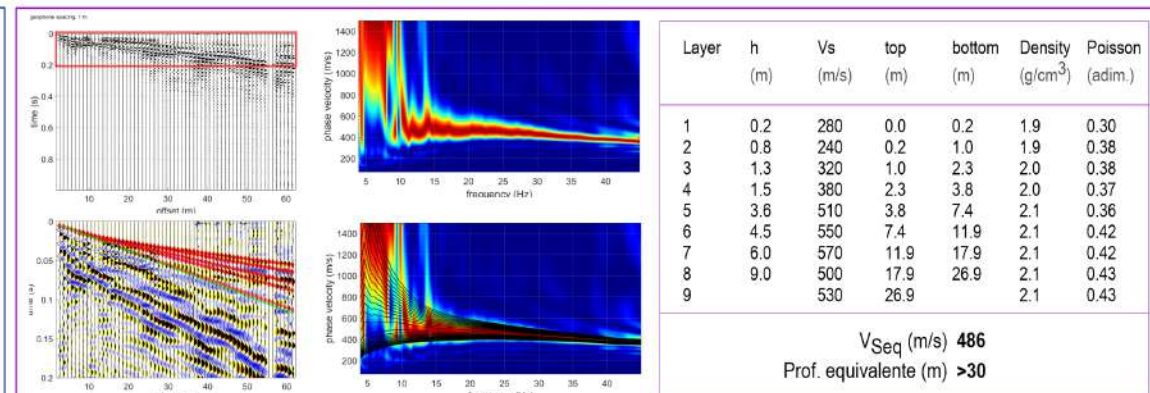
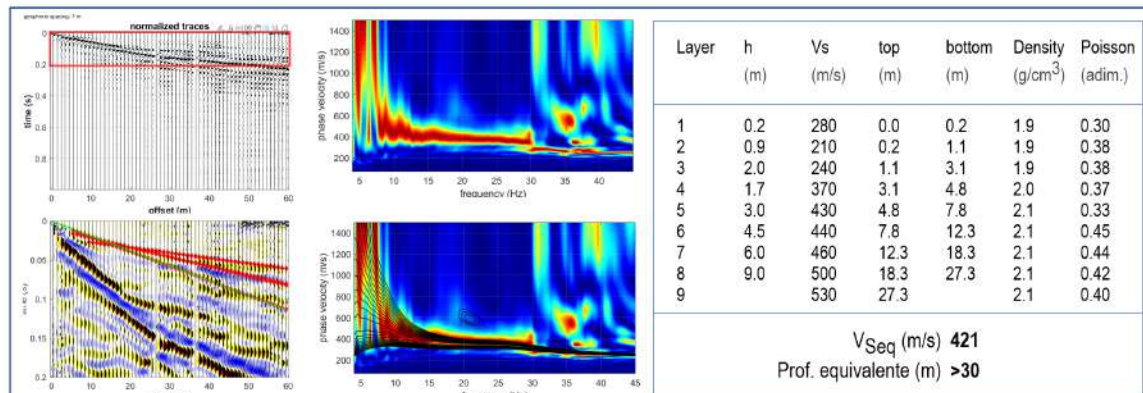
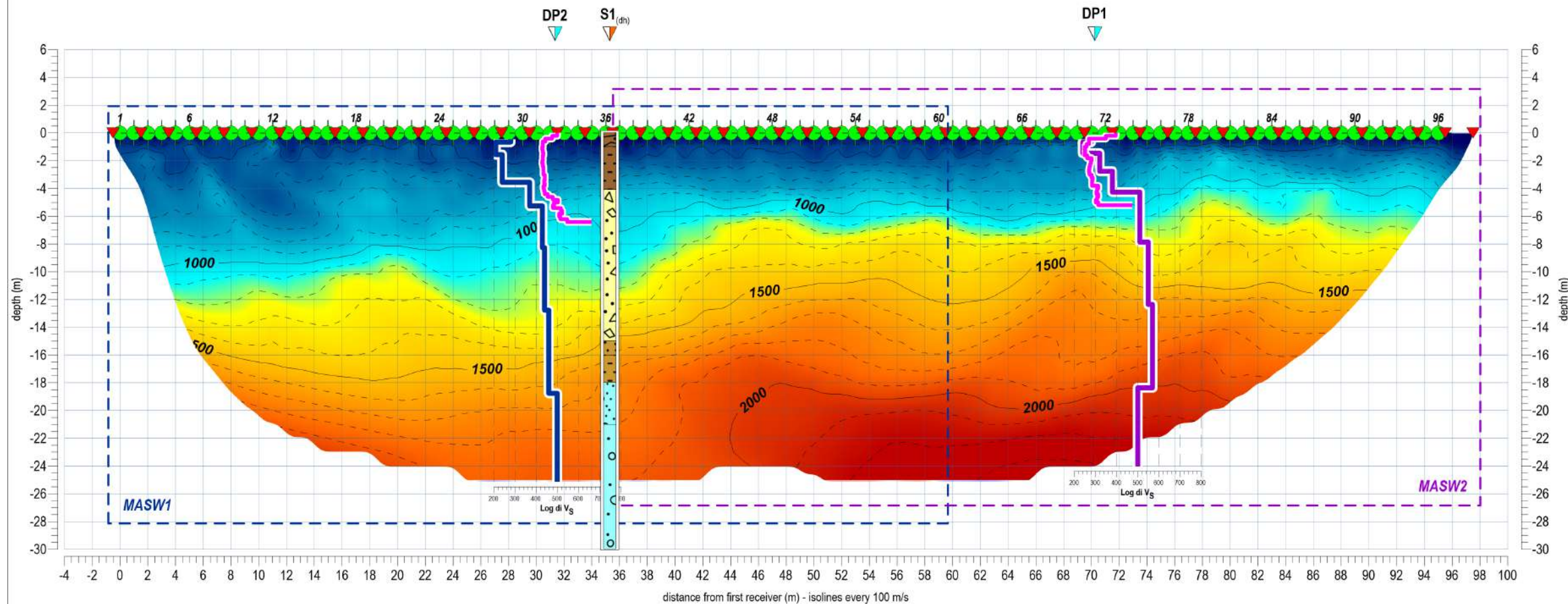
sismografo: DaqLink IV
sensori: velocimetri verticali freq. 4.5Hz
sorgente: mazza 8kg

Acquisizione

data esecuzione: Ottobre 2024
operatore: Caputo / Allacorta
durata registrazione: 1.0s
campionamento: 500ms (2500Hz)
numero sensori: 96
intertraccia: 1.0 m
punti di sparo: 50

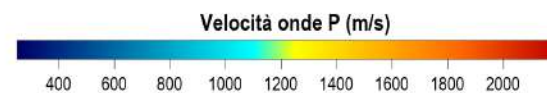
Data processing

elaborazione: Dott. Luigi Allacorta software: ZondST2d
data elaborazione: Ottobre 2024 versione: 7
metodo di analisi: tomografia



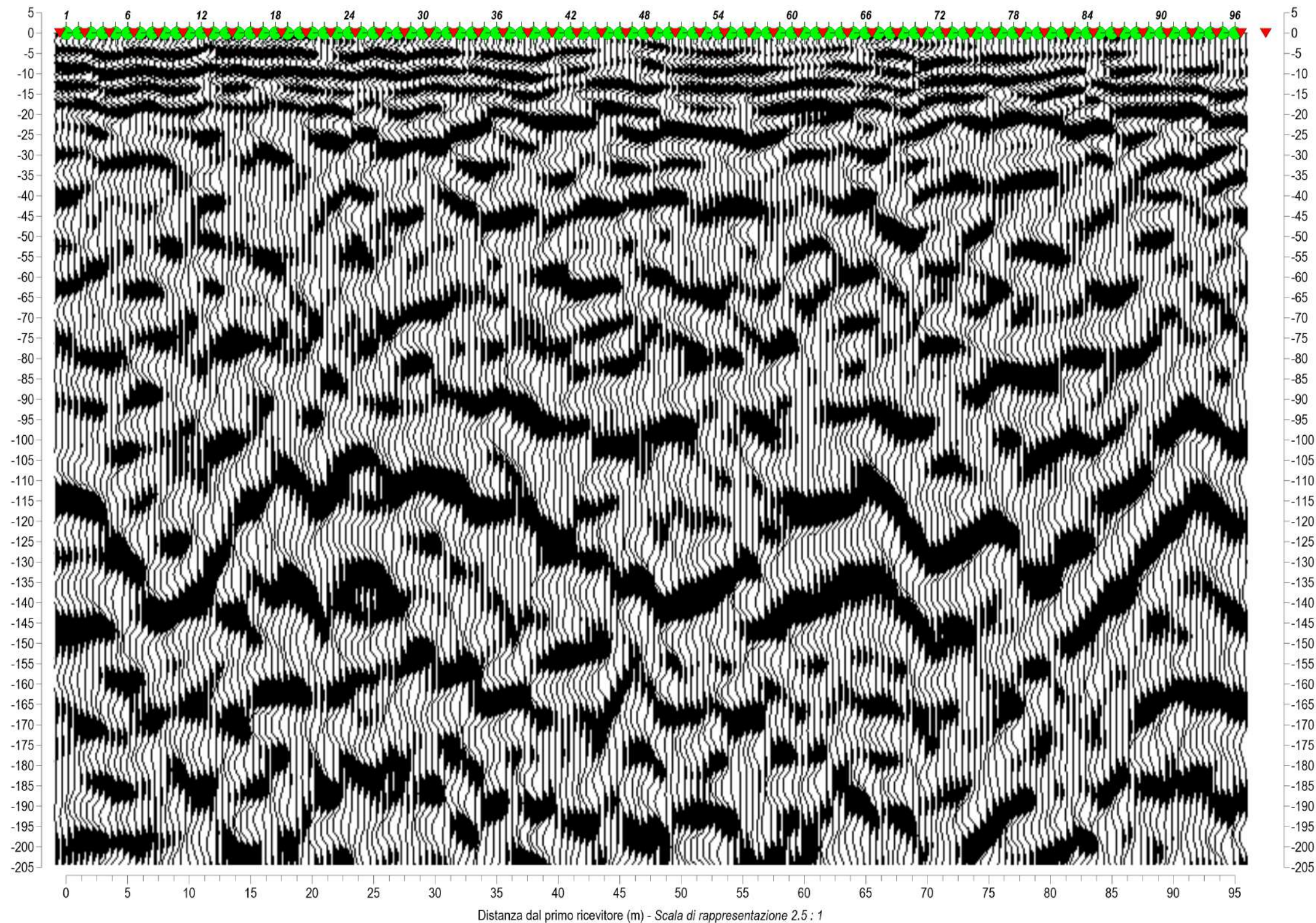
Legenda

- Geofoni
- Posizioni di scoppio
- Altre linee sismiche
- Sondaggi a carotaggio
- Prove penetrometriche
- orizzonti ricostruiti mediante rilievo microgravimetrico
- Log Vs da metodi MASW
- Log N₂₀ prova DP



COMPRESSIONAL WAVES HIGH-DEFINITION SEISMIC REFLECTION AND SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY SURVEY

sezione stack migrata in profondità



Indagini geofisiche presso
Ex Sito Industriale in Via Sterpi, CAMAIORE (LU)

Info Commessa

Commessa: Reflex_Via Sterpi
Committente: Dott. Geol. Luca Niccoli
Sito: Via Sterpi, Camaiole (LU)
Tavola: SRT_P + MASW_rayleigh waves

Strumentazione

sismografo: DaqLink IV
sensori: velocimetri verticali freq. 4.5Hz
sorgente: mazza 8kg

Acquisizione

data esecuzione: Ottobre 2024
operatore: Caputo / Allacorta
durata registrazione: 1.0s
campionamento: 500ms (2500Hz)
numero sensori: 96
intertraccia: 1.0 m
punti di sparo: 50

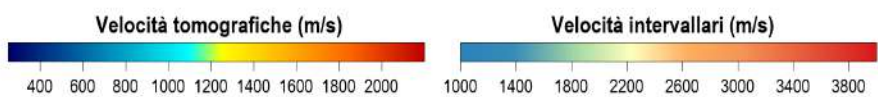
Data processing

elaborazione: Dott. Luigi Allacorta software: ZondST2d
data elaborazione: Ottobre 2024 versione: 7
metodo di analisi: tomografia



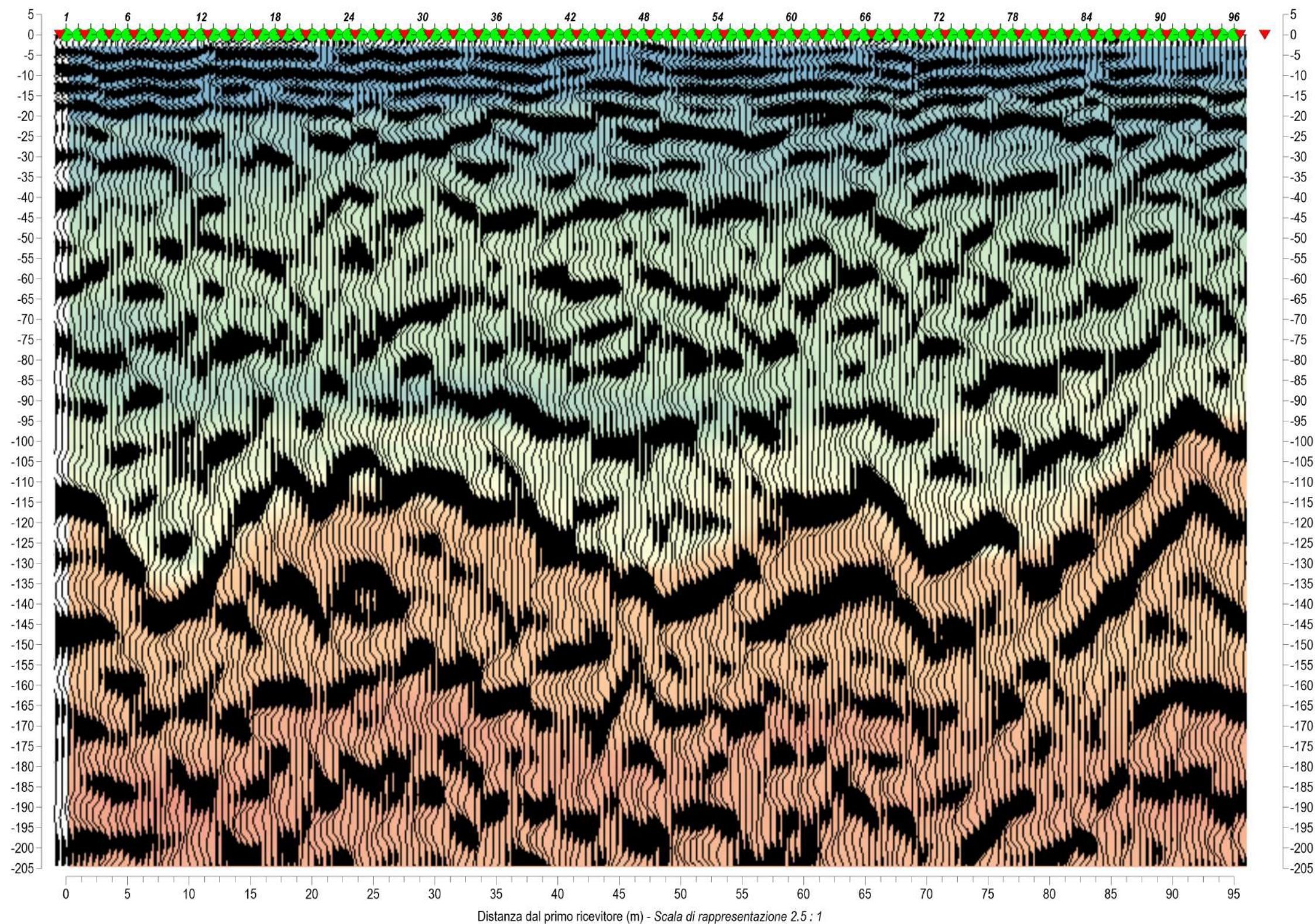
Legenda

- Geofoni
- Altre linee sismiche
- orizzonti ricostruiti mediante rilievo microgravimetrico
- orizzonti riflettenti principali
- Posizioni di scoppio
- Sondaggi a carotaggio
- Log Vs da metodi MASW
- orizzonti riflettenti secondari
- Prove penetrometriche
- Log Vs da metodi MASW
- diffrazioni



COMPRESSIONAL WAVES HIGH-DEFINITION SEISMIC REFLECTION AND SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY SURVEY

sezione stack migrata in profondità



Legenda

Geofoni

Posizioni di scoppio

Altre linee sismiche

Sondaggi a carotaggio

Prove penetrometriche

orizzonti ricostruiti mediante rilievo microgravimetrico

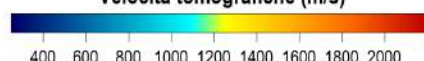
Log Vs da metodi MASW

orizzonti riflettenti principali

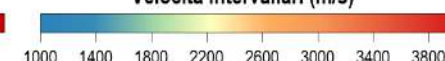
orizzonti riflettenti secondari

diffrazioni

Velocità tomografiche (m/s)



Velocità intervallari (m/s)



Indagini geofisiche presso
Ex Sito Industriale in Via Sterpi, CAMAIORE (LU)

Info Commessa

Commessa: Reflex_Via Sterpi
Committente: Dott. Geol. Luca Niccoli
Sito: Via Sterpi, Camaiole (LU)
Tavola: SRT_P + MASW_rayleigh waves

Strumentazione

sismografo: DaqLink IV
sensori: velocimetri verticali freq. 4.5Hz
sorgente: mazza 8kg

Acquisizione

data esecuzione: Ottobre 2024
operatore: Caputo / Allacorta
durata registrazione: 1.0s
campionamento: 500ms (2500Hz)
numero sensori: 96
intertraccia: 1.0 m
punti di sparo: 50

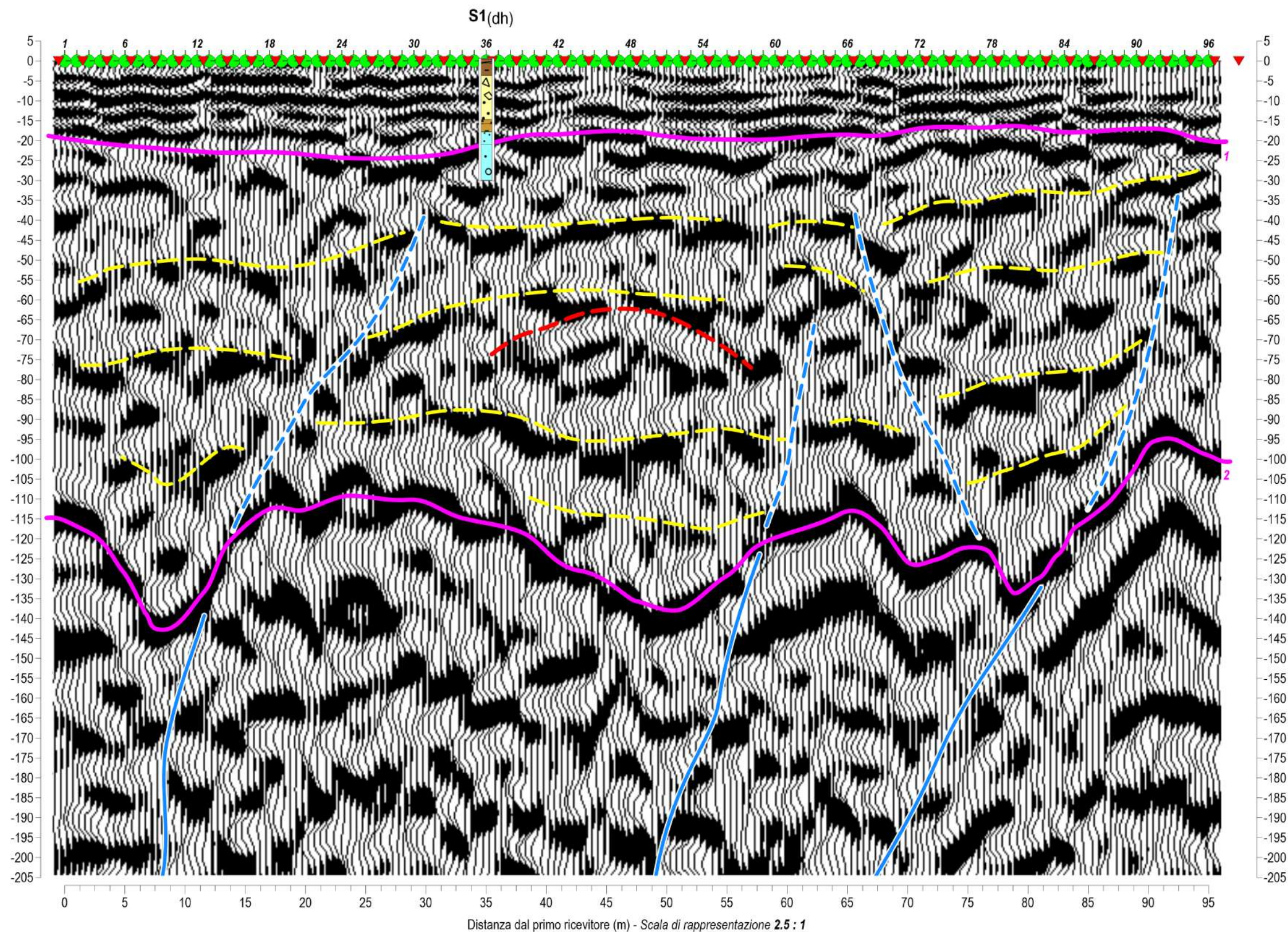
Data processing

elaborazione: Dott. Luigi Allacorta software: ZondST2d
data elaborazione: Ottobre 2024 versione: 7
metodo di analisi: tomografia



COMPRESSIONAL WAVES HIGH-DEFINITION SEISMIC REFLECTION AND SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY SURVEY

sezione stack migrata in profondità



Legenda

Geofoni

Posizioni di scoppio

Altre linee sismiche

Sondaggi a carotaggio

Prove penetrometriche

orizzonti ricostruiti mediante rilievo microgravimetrico

Log Vs da metodi MASW

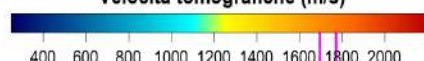
orizzonti riflettenti principali

orizzonti riflettenti secondari

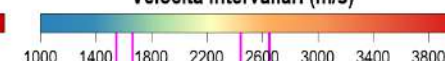
discontinuità ad alto angolo

diffrazioni

Velocità tomografiche (m/s)



Velocità intervallari (m/s)



Indagini geofisiche presso
Ex Sito Industriale in Via Sterpi, CAMAIORE (LU)

Info Commessa

Commessa: Reflex_Via Sterpi
Committente: Dott. Geol. Luca Niccoli
Sito: Via Sterpi, Camaiore (LU)
Tavola: SRT_P + MASW_rayleigh waves

Strumentazione

sismografo: DaqLink IV
sensori: velocimetri verticali freq. 4.5Hz
sorgente: mazza 8kg

Acquisizione

data esecuzione: Ottobre 2024
operatore: Caputo / Allacorta
durata registrazione: 1.0s
campionamento: 500ms (2500Hz)
numero sensori: 96
intertraccia: 1.0 m
punti di sparo: 50

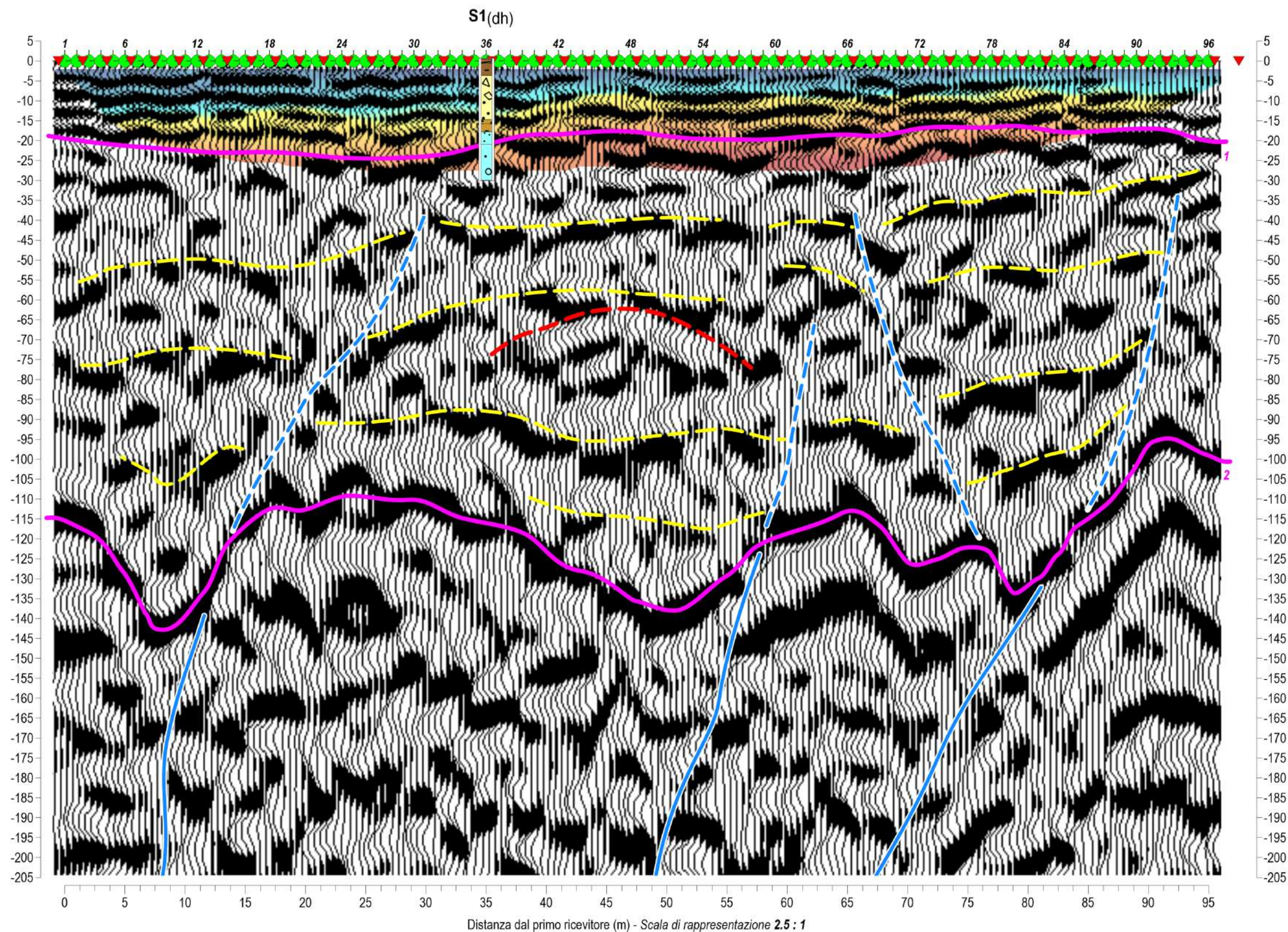
Data processing

elaborazione: Dott. Luigi Allacorta software: ZondST2d
data elaborazione: Ottobre 2024 versione: 7
metodo di analisi: tomografia



COMPRESSIONAL WAVES HIGH-DEFINITION SEISMIC REFLECTION AND SEISMIC REFRACTION TOMOGRAPHY SURVEY

sezione stack migrata in profondità



Legenda

Geofoni

Posizioni di scoppio

Altre linee sismiche

Sondaggi a carotaggio

Prove penetrometriche

orizzonti ricostruiti mediante rilievo microgravimetrico

Log Vs da metodi MASW

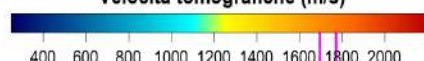
orizzonti riflettenti principali

orizzonti riflettenti secondari

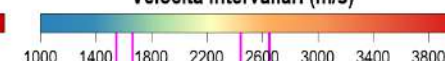
discontinuità ad alto angolo

diffrazioni

Velocità tomografiche (m/s)



Velocità intervallari (m/s)



Indagini geofisiche presso
Ex Sito Industriale in Via Sterpi, CAMAIORE (LU)

Info Commessa

Commessa: Reflex_Via Sterpi
Committente: Dott. Geol. Luca Niccoli
Sito: Via Sterpi, Camaiore (LU)
Tavola: SRT_P + MASW_rayleigh waves

Strumentazione

sismografo: DaqLink IV
sensori: velocimetri verticali freq. 4.5Hz
sorgente: mazza 8kg

Acquisizione

data esecuzione: Ottobre 2024
operatore: Caputo / Allacorta
durata registrazione: 1.0s
campionamento: 500ms (2500Hz)
numero sensori: 96
intertraccia: 1.0 m
punti di sparo: 50

Data processing

elaborazione: Dott. Luigi Allacorta software: ZondST2d
data elaborazione: Ottobre 2024 versione: 7
metodo di analisi: tomografia

