



REGIONE PIEMONTE
COMUNE DI AVIGLIANA
PROVINCIA DI TORINO

PROGETTAZIONE PER LA RILOCALIZZAZIONE DI
UNA PISTA DI GUIDA SICURA SITA IN AREA
AUTOPORTO DI SUSÀ (TO)

Codice generale	Codice dell' opera	Lotto	Livello di progettazione	Area di progettazione	Numero elaborato	Tipo documento	Versione
Cconspa	001	0	D	G	010	rel strutt	1-13

IL COMMITTENTE :



I PROGETTISTI (A.T.I.) :

Ing. Valter RIPAMONTI (Capogruppo)



Studio DUEPUNTDIECI Associati

dott. ing. Andrea Durando dott. ing. Enzo Lacroce

Studio ESSEBI Ingegneria



Ing. Enrico GUIOT

Ing. Stefano COALOVA

Stefano Coalova
Ingegnere Edile

TIMBRI E FIRME:



Capogruppo di progettazione : Ing. Valter RIPAMONTI 

Responsabile area di progettazione : Ing. Enzo LACROCE 

Redattore : Ing. Stefano COALOVA 

PROGETTO DEFINITIVO
ai sensi del d.lgs 163/06 allegato XXI

OGGETTO

RELAZIONI TECNICHE E SPECIALISTICHE
RELAZIONE SISMICA E SULLE STRUTTURE

VERS.	MODIFICHE	DATA	SCALA
0	Prima consegna	04 Novembre 2013	-
1	Seconda consegna	22 Novembre 2013	CUP C11J05000030001
2			
3			
4			

INDICE

INTRODUZIONE	2
1 – NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO	2
2 – ASPETTI SISMICI E GEOTECNICI	3
3 – DESCRIZIONE DELLE OPERE STRUTTURALI	4
4 – CRITERI PROGETTUALI RELATIVI ALLE STRUTTURE	5
5 – MATERIALI PREVISTI	6
6 – ANALISI DEI CARICHI	6
7 – PREDIMENSIONAMENTO DI ALCUNI ELEMENTI STRUTTURALI	7

REGIONE PIEMONTE
COMUNE DI AVIGLIANA

(Provincia di Torino)

**PROGETTAZIONE PER LA RILOCALIZZAZIONE DI UNA PISTA DI
GUIDA SICURA SITA IN AREA AUTOPORTO DI SUSÀ (TO)**

RELAZIONE SISMICA E SULLE STRUTTURE

INTRODUZIONE

La presente riporta le prime indicazioni in merito alle strutture da realizzarsi nell'ambito del progetto di rilocalizzazione del Centro Regionale di Guida Sicura oggi esistente e funzionante nell'area Autoporto di Susa, che si riferiscono in particolare all'edificio destinato a Centro Servizi e alle opere accessorie quali cabina di consegna ENEL e muri contro terra per rampe e barriere.

1 – NORMATIVA TECNICA DI RIFERIMENTO

Le strutture previste nell'intervento in oggetto sono da ascrivere alla tipologia delle opere in conglomerato cementizio armato ordinario sia per quanto riguarda le strutture verticali che quelle orizzontali.

Le norme tecniche di riferimento per la progettazione di tali strutture sono le seguenti:

LEGGI

- L. 05.11.1971, n. 1086, "Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica".

DECRETI

- D.M. 14/01/2008, “Norme tecniche per le costruzioni”.

CIRCOLARI

- Circ. C.S.LL.PP. 2 Febbraio 2009, n.617.

2 – ASPETTI SISMICI E GEOTECNICI

Il territorio comunale di Avigliana è classificato come zona 3 (pericolosità sismica media) ai sensi della Deliberazione della Giunta Regionale n. 4-3084 del 12 dicembre 2011.

Il sito di costruzione del Centro Servizi è stato oggetto di un sondaggio geognostico a rotazione con carotaggio continuo spinto alla profondità di 8 metri, finalizzato alla determinazione dell’assetto litostratigrafico locale ed al prelievo di alcuni campioni di terreno da sottoporre ad analisi di laboratorio, e di una indagine geofisica finalizzata alla valutazione dell’effetto della risposta sismica locale tramite il calcolo del parametro Vs30.

I risultati dettagliati dei sondaggi, ed in particolare la descrizione dell’assetto litostratigrafico del terreno di fondazione, sono riportati nello specifico rapporto redatto dall’Ing. Geol. M. Casale, ultimo aggiornamento 28/10/2013, allegato al presente progetto definitivo.

I risultati delle indagini sismiche del terreno di fondazione sono riportati nella relazione tecnica redatta dall’Ing. Stefano Stocco, ultimo aggiornamento 23/10/2013, e allegata al progetto definitivo.

Da tali elaborati tecnici si evince sostanzialmente come il terreno sia composto fino a 2,9 metri di profondità da materiale eterogeneo di riporto, oltre quella quota da depositi alluvionali originali composti da limi e sabbie inconsistenti aventi scarse caratteristiche meccaniche.

L’indagine sismica sul terreno ha permesso di individuare un valore di velocità media di propagazione delle onde entro 30 m “Vs30”, al piano di posa della fondazione, pari a 331 m/s.

Questo parametro permette di classificare il terreno ai sensi delle Norme Tecniche vigenti in classe C.

3 – DESCRIZIONE DELLE OPERE STRUTTURALI

Il nuovo edificio ad uso pubblico si articola su due livelli (piano terra e piano primo), con copertura piana accessibile.

La destinazione d'uso prevalente è uffici, ed è suscettibile di affollamento. Per l'ubicazione non è ipotizzabile un utilizzo ai fini strategici o di protezione civile in caso di calamità. Ai sensi del punto 2.4.2, la classe d'uso dell'edificio risulta la II.

La vita nominale prevista, ai sensi del punto 2.4.1, corrisponde al tipo 2 ($V_n > 50$).

Le opere strutturali consistono in:

- strutture di fondazione in conglomerato cementizio armato: costituite da una platea di spessore pari a 50 cm; tale tipologia è quella ritenuta più confacente alle caratteristiche del terreno come individuate con le indagini geognostiche;
- strutture verticali: costituite da un'intelaiatura di pilastri in c.c.a. di sezione quadrata;
- orizzontamenti: realizzati con solai in laterocemento, $h=20+5$ cm.

Esternamente all'edificio e all'interno dell'area sono previste alcune opere accessorie:

- marciapiede perimetrale in c.c.a.;
- cabina di consegna ENEL ad un piano fuori terra avente fondazione a platea in c.c.a., strutture verticali costituite da pilastri in c.c.a. e copertura con solaio in laterocemento $h=16+4$ cm;
- muri contro terra in conglomerato cementizio armato per la realizzazione della rampa di accesso all'area e la protezione della cabina elettrica;
- plinti per i pali di illuminazione all'interno dell'area;
- vasche interrate in conglomerato cementizio armato, con solai di copertura previsti per carichi carrabili.

4 – CRITERI PROGETTUALI RELATIVI ALLE STRUTTURE

Sulla scorta delle considerazioni di carattere geotecnico sviluppate nelle relazioni specialistiche e date le caratteristiche dimensionali della struttura, la scelta della tipologia fondazionale si è orientata verso una platea in conglomerato cementizio armato che garantisce l'efficace trasmissione delle sollecitazioni al terreno anche in presenza di un suolo con caratteristiche modeste.

Da un punto di vista strutturale si sono adottate le seguenti soluzioni:

- le strutture sono realizzate con i criteri tipici dell'edilizia tradizionale, in conglomerato cementizio armato per le strutture di fondazione e verticali, in laterocemento per gli orizzontamenti. Viene previsto l'utilizzo di travi ribassate per permettere di sostenere un maggior carico e migliorare l'equilibrio globale della struttura;
- per la scala di emergenza si è scelto di realizzare una struttura in acciaio indipendente da quella in c.c.a. dell'edificio principale, da cui è separata tramite giunto strutturale. La scelta dell'acciaio è dovuta alla semplicità e alla rapidità di esecuzione, unita ad una preferenza da un punto di vista estetico relativamente al prospetto nel quale è inserita;
- i muri contro terra sono realizzati in conglomerato cementizio armato con spessore del paramento variabile tra 25 e 30 cm in funzione dell'altezza;
- le vasche interrato a servizio della pista e dei relativi impianti sono realizzate con struttura in conglomerato cementizio armato. Esse sono a tenuta stagna e garantiscono la resistenza nei confronti delle sollecitazioni interne, dovute alla presenza degli impianti, ed esterne, dovute al passaggio dei veicoli.

5 – MATERIALI PREVISTI

I materiali previsti per la realizzazione delle opere strutturali in oggetto hanno le seguenti caratteristiche:

- acciaio per opere in c.a.: B450C
- conglomerato cementizio per sottofondazioni: C12/15
- conglomerato cementizio per opere strutturali in genere: C25/30
classe di esposizione ambientale: XC2 (per fondazioni e muri contro terra)
XC1 (tutte le altre strutture)
consistenza del getto: S4;
- acciaio per carpenteria S275.

I materiali rispondono a quanto previsto dalla N.T. vigente.

6 – ANALISI DEI CARICHI

Vengono utilizzati per i calcoli i seguenti carichi:

- Carichi sul solaio di piano primo – CENTRO SERVIZI

peso proprio struttura	300 daN/m^2
permanenti non str.	150 daN/m^2
tramezzature	150 daN/m^2
carichi variabili	400 daN/m^2
(categoria C2: ambienti suscettibili di affollamento)	

- Carichi sulla copertura – CENTRO SERVIZI

peso proprio struttura	300 daN/m^2
permanenti non strutturali	300 daN/m^2
carichi variabili	200 daN/m^2
(categoria H2: coperture praticabili)	
Neve (a quota < 1000 m s.l.m.)	142 daN/m^2

- Carichi sulla copertura – CABINA ELETTRICA

peso proprio struttura	250 daN/m^2
permanenti non strutturali	150 daN/m^2

carichi variabili (categoria H2: coperture praticabili)	50 daN/m^2
Neve (a quota < 1000 m s.l.m.)	142 daN/m^2

➤ Carichi sulla copertura – VASCHE INTERRATE

peso proprio struttura	500 daN/m^2
permanenti non strutturali	250 daN/m^2
carichi variabili (categoria H3: coperture speciali)	700 daN/m^2
Neve (a quota < 1000 m s.l.m.)	142 daN/m^2

7 – PREDIMENSIONAMENTO DI ALCUNI ELEMENTI STRUTTURALI

Si procede al dimensionamento di massima di alcuni elementi strutturali.

Strutture orizzontali:

Trave principale in conglomerato cementizio armato T144 RIBASSATA 55x25 / 30x25 cm del solaio su piano terra:

- carico lineare complessivo: $1440 daN/m^2 \times 4,58 m = 6595,2 daN/m$
si utilizza la *combinazione fondamentale* per la determinazione dei carichi da applicare al solaio in SLU.

Per il caso oggetto di studio porta, nella situazione più sfavorevole, ad avere la seguente combinazione:

$$\gamma_{G1}G_1 + \gamma_{G2}G_2 + \gamma_{Q1}Q_{K1}$$

$$1.3 \times 300 daN/m^2 + 1.5 \times 300 daN/m^2 + 1.5 \times 400 daN/m^2 = 1440 daN/m^2.$$

- sollecitazione flessionale massima:
 $M_{Sd} = 6595,2 daN/m \times (5,0 m)^2 / 10 = 16.488,0 daNm$
- armatura ipotizzata: 5Ø18 inferiori, 6Ø14 superiori
- calcolo del momento resistente della sezione: $M_{Rd} = 22.610,0 daNm$

Verifica C.A. S.L.U. - File:

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° strati barre 2 Zoom

N°	b [cm]	h [cm]
1	55	25
2	30	25

N°	As [cm²]	d [cm]
1	9.24	2.5
2	12.72	47.5

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 kN
 M_{xEd} 36.73 kNm
 M_{yEd} 0 kNm

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

Materiali
 B450C C25/30
 ε_{su} 67.5 ‰ ε_{c2} 2 ‰
 f_{yd} 391.3 N/mm² ε_{cu} 3.5 ‰
 E_s 200,000 N/mm² f_{cd} 14.17 N/mm²
 E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0.8
 ε_{syd} 1.957 ‰ σ_{c,adm} 9.75 N/mm²
 σ_{s,adm} 255 N/mm² τ_{co} 0.6
 τ_{c1} 1.829 N/mm²

M_{xRd} 226.1 kN m
 σ_c -14.17 N/mm²
 σ_s 391.3 N/mm²
 ε_c 3.5 ‰
 ε_s 37.93 ‰
 d 47.5 cm
 x 4.013 x/d 0.08448
 δ 0.7

N° rett. 100
 Calcola MRd Dominio M-N
 L_o 0 cm Col. modello
 Precompresso

- verifica $M_{Sd} < M_{Rd} = 16.488,0 \text{ daNm} < 22.610,0 \text{ daNm}$ VERIFICATO

Strutture verticali – CABINA ELETTRICA:

pilastro P02, che presenta la maggior area di carico (2,2 m²):

➤ sollecitazioni verticali:

dal solaio di copertura $813,0 \text{ daN/m}^2 \times 2,2 \text{ m}^2 = 1788,6 \text{ daN}$

p.p. pilastro piano primo $2500 \text{ daN/m}^3 \times 0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 2,5 \text{ m} = 390,6 \text{ daN}$

➤ carico verticale complessivo: 2179,2 daN

- sezione: (25x25) cm

- compressione nel calcestruzzo: $\sigma_c = 217920 \text{ N} / (250 \times 250) \text{ mm}^2 = 3,5 \text{ N/mm}^2$

$3,5 \text{ N/mm}^2 < R_{ck} = 24,9 \text{ N/mm}^2$ VERIFICATA

ALLEGATO 1:

CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL SITO

INDAGINI GEOFISICHE



CARATTERIZZAZIONE SISMICA DI SITO

COMUNE DI AVIGLIANA (TO)

RELAZIONE TECNICA

Committente: Studio Tecnico Dott. Ing. Valter Ripamonti

Relazione n.:	RS13045
Data stesura:	23/10/2013
Revisione n.:	0
Elaborazioni:	ing. Stefano Stocco
Stesura:	ing. Stefano Stocco

GAMUT S.r.l. CF e IVA: 10087030010
REA: TO1104410 - Capitale Sociale: € 10000 i.v.
Sede legale: corso Re Umberto 56, 10128 Torino
Sede operativa: via Maiole 15, 10040 Leinì TO
www.gamutgeophysics.com - info@gamutgeophysics.com
tel: +39 011 9987452 - fax: +39 011 7432123

INDICE

INDICE.....	2
1 RIASSUNTO.....	3
2 PREMESSA	3
3 OBIETTIVI E INDAGINI ESEGUITE	4
4 STRUMENTAZIONE	7
5 INFORMAZIONI A PRIORI	8
6 ELABORAZIONE DATI	8
6.1 Tomografia sismica in onde P	9
6.2 Prova per onde superficiali.....	11
7 INTERPRETAZIONE GEOFISICA	20
8 PARAMETRO VS30.....	21
8.1 Stima del Parametro VS30	22
9 TOMOGRAFIA SISMICA – Nota tecnica	22
9.1 Introduzione teorica.....	22
9.2 Modalità di acquisizione.....	23
9.3 Elaborazione dei dati tomografici	23
10 PROVE PER ONDE SUPERFICIALI – Nota tecnica	24
10.1 Introduzione teorica	24
10.2 Modalità di acquisizione	26
10.3 Elaborazione dati di onde superficiali	27
11 BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE.....	29

1 RIASSUNTO

In data 22 ottobre 2013 si è eseguita un'indagine geofisica in comune di Avigliana (TO), finalizzata alla valutazione dell'effetto della risposta sismica locale tramite il calcolo del parametro V_{S30} , ai sensi del D.M. 14/01/2008. A tale scopo sono stati acquisiti due profili sismici coincidenti, uno per onde superficiali (SWM) e uno di tomografia sismica in onde di compressione (P).

L'elaborazione con metodo probabilistico della curva di dispersione ottenuta con la prova per onde superficiali ha fornito un fuso di possibili soluzioni da cui è stata calcolata la distribuzione del parametro V_{S30} .

L'interpretazione del set di possibili soluzioni, congiuntamente all'analisi di informazioni a priori disponibili, ha permesso l'estrazione di un singolo profilo di velocità delle onde di taglio (S), ritenuto il più rappresentativo, da cui è stato calcolato il parametro V_{S30} .

La tomografia sismica integrativa ha consentito di migliorare la qualità dell'elaborazione del profilo di V_S , fornendo maggiore solidità interpretativa e ottenendo informazioni di carattere stratigrafico lungo lo stendimento.

Il valore del parametro **V_{S30}** calcolato riferito al piano di imposta delle fondazioni (-1 m da piano campagna) è **331 m/s**.

2 PREMESSA

La presente relazione tecnica descrive le modalità operative adottate in fase di acquisizione, le procedure di elaborazione dei dati e l'interpretazione geofisica della caratterizzazione sismica di sito eseguita in comune di Avigliana (TO) per la rilocalizzazione del centro regionale di guida sicura.

L'indagine è stata eseguita in data 22 ottobre 2013.

3 OBIETTIVI E INDAGINI ESEGUITE

Gli scopi dell'indagine sono i seguenti:

- Fornire informazioni indirette sulla velocità di propagazione delle onde sismiche di taglio, secondo un profilo verticale relativo ai primi 30 m di profondità, misurati dal piano di imposta delle fondazioni (-1 m da piano campagna). L'indagine è finalizzata alla valutazione dell'effetto della risposta sismica locale, tramite il calcolo del parametro V_{S30} , ai sensi del D.M. 14/01/2008 (capitolo 8).
- Ricostruire la topografia del substrato roccioso, individuare possibili variazioni laterali.

Per soddisfare queste esigenze sono state condotte le seguenti indagini:

- Una prova per onde superficiali (SWM).
- Una tomografia sismica per onde di compressione P, coincidente con il profilo SWM.

Le tabelle seguenti riportano sinteticamente i parametri di acquisizione delle indagini eseguite.

Si rimanda ai capitoli 9 e 10 per gli approfondimenti sulle metodologie utilizzate.

Tabella 1. Schema riassuntivo dell'indagine tomografica.

Identificativo linea	P
Lunghezza stendimento (m)	73.5
Direzione stendimento	O - E
Canali (numero)	48
Spaziatura geofoni (m)	1.5
Tempo di campionamento (μ s)	125
Finestra di acquisizione (s)	0.5
Sorgenti (numero)	9

Tabella 2. Schema riassuntivo dell'indagine SWM.

Identificativo linea	SW
Lunghezza stendimento (m)	70.5
Direzione stendimento	O - E
Canali (numero)	48
Spaziatura geofoni (m)	1.5
Tempo di campionamento (μ s)	500
Finestra di acquisizione (s)	2

In Figura 1 si mostra l'ubicazione planimetrica dell'indagine eseguita. Le figure seguenti mostrano immagini fotografiche dello stendimento.



Figura 1 – Ubicazione planimetrica da immagine aerea. In giallo lo stendimento sismico (fuori scala).



Figura 2 – Foto dello stendimento - Ubicazione.



Figura 3 – Foto dello stendimento - Particolare.

4 STRUMENTAZIONE

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati è la seguente (Figura 4 e Figura 5):

- sismografo Geometrics GEODE costituito da due moduli a 24 canali controllati tramite laptop, per un totale di 48 canali disponibili; l'intervallo di campionamento è selezionabile tra 20 μ s e 16 ms; la durata dell'acquisizione è funzione della frequenza di campionamento con il limite di 64000 campioni per canale; la dinamica del convertitore analogico/digitale è di 24 bit;
- geofoni verticali SENSOR SM-6/U-B con frequenza propria di 4.5 Hz;
- sorgente impulsiva: mazza da 5 kg su piastra metallica di ripartizione, dotata di trigger elettrico per contatto;

I dati sono stati elaborati e interpretati con:

- software non commerciale GIADA sviluppato in esclusiva da Gamut srl;
- RAYFRACT 3.06 – Intelligent Resources Inc.



Figura 4 – Sismografo Geometrics Geode.



Figura 5 – Geofono verticale SENSOR SM-6/U-B.

5 INFORMAZIONI A PRIORI

Sono disponibili le seguenti informazioni a priori derivanti da un sondaggio centrato sullo stendimento sismico:

- materiale eterogeneo di riporto fino a 2.9 m di profondità
- oltre i 2.9 m depositi alluvionali originali composto da limi e sabbie, inconsistenti.

6 ELABORAZIONE DATI

Nel seguito vengono descritte le modalità di elaborazione e di interpretazione dei dati acquisiti, corredate da alcune valutazioni critiche sulla qualità dei dati e sull'affidabilità dei risultati ottenibili.

6.1 Tomografia sismica in onde P

La prima fase prevede il picking dei tempi di primo arrivo su ogni sismogramma acquisito.

A titolo di esempio, Figura 6 riporta il picking dell'energizzazione (shot) n. 15 della tomografia.

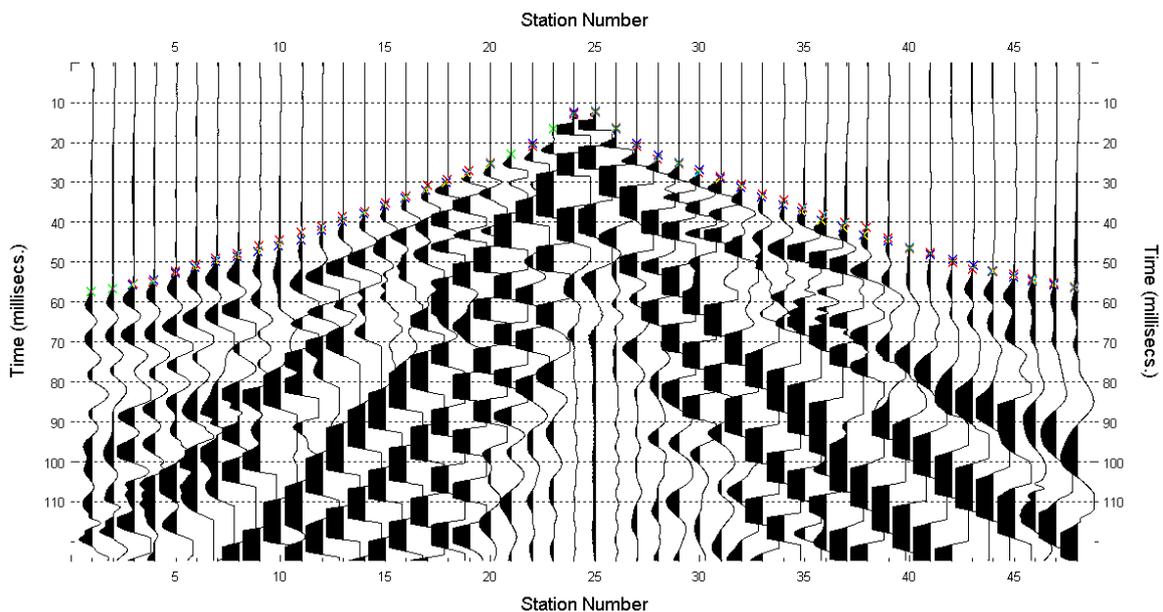


Figura 6 – Esempio di picking manuale dei primi arrivi delle onde P (shot n. 15).

Definita la topografia della superficie, la seconda fase dell'elaborazione prevede l'inversione di tutti i tempi di primo arrivo. Si producono le sezioni di velocità di propagazione delle onde P (Figura 7) e le relative mappe di copertura dei raggi sismici (Figura 8).

Sulle figure sono tracciate le intersezioni tra le tomografie. La numerazione degli shot in superficie coincide con la numerazione dei file registrati in campagna.

Si è scelto di adottare una scala verticale di quota relativa, ponendo lo zero alla quota del piano campagna.

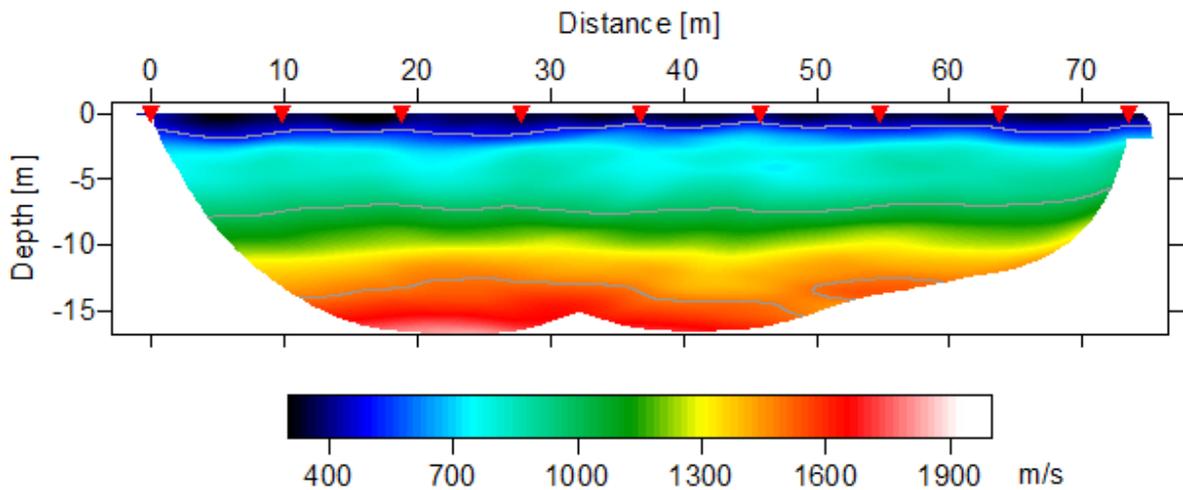


Figura 7 – Sezione tomografica di velocità delle onde P nel sottosuolo.

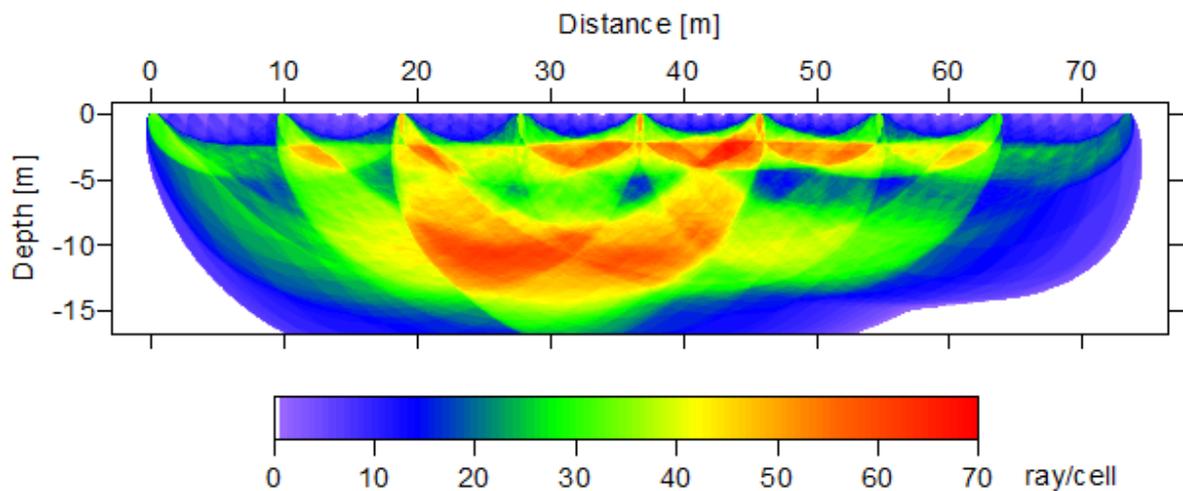
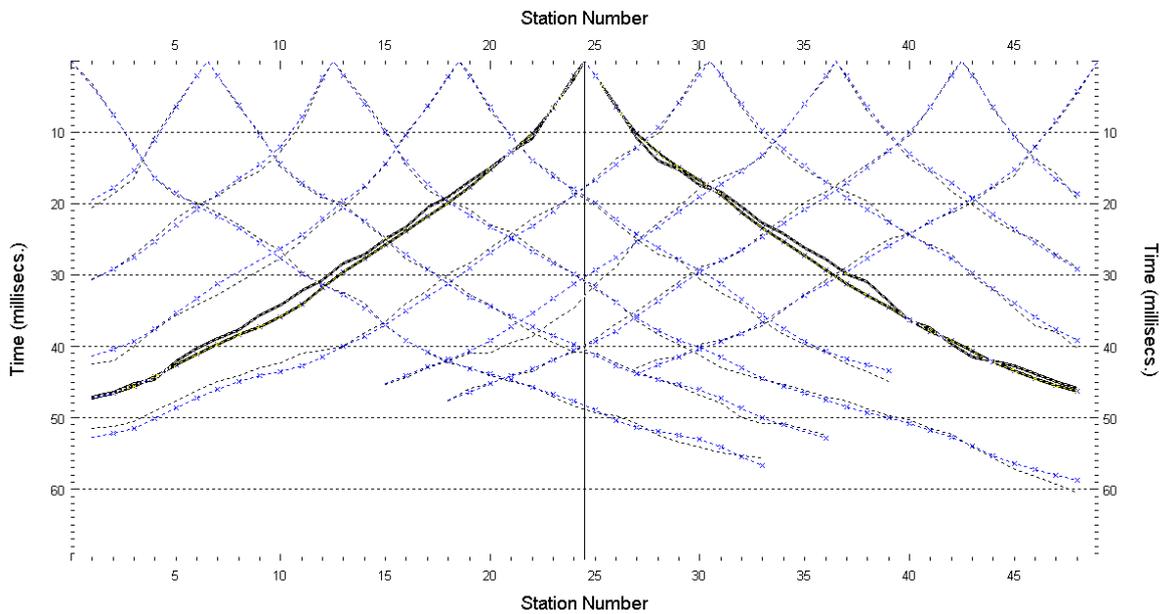


Figura 8 – Copertura dei raggi sismici della sezione tomografica di Figura 7.

La qualità del picking e dell'inversione è valutata mediante il confronto, per ogni shot, tra le dromocrone sperimentali e quelle calcolate.

A titolo di esempio, la Figura 9 riporta le dromocrone della tomografia con la traccia n. 15 in evidenza.



**Figura 9 – Dromocrone della tomografia,
(in evidenza lo shot n. 15)**

6.2 Prova per onde superficiali

Il dataset acquisito è composto da 20 sismogrammi, di cui 10 relativi all'energizzazione sul lato est dello stendimento e 10 sul lato ovest. Ciascuna registrazione contiene 48 tracce con spaziatura di 1.5 m.

La Figura 10 riporta lo stacking del sismogramma relativo all'energizzazione dall'estremo est.

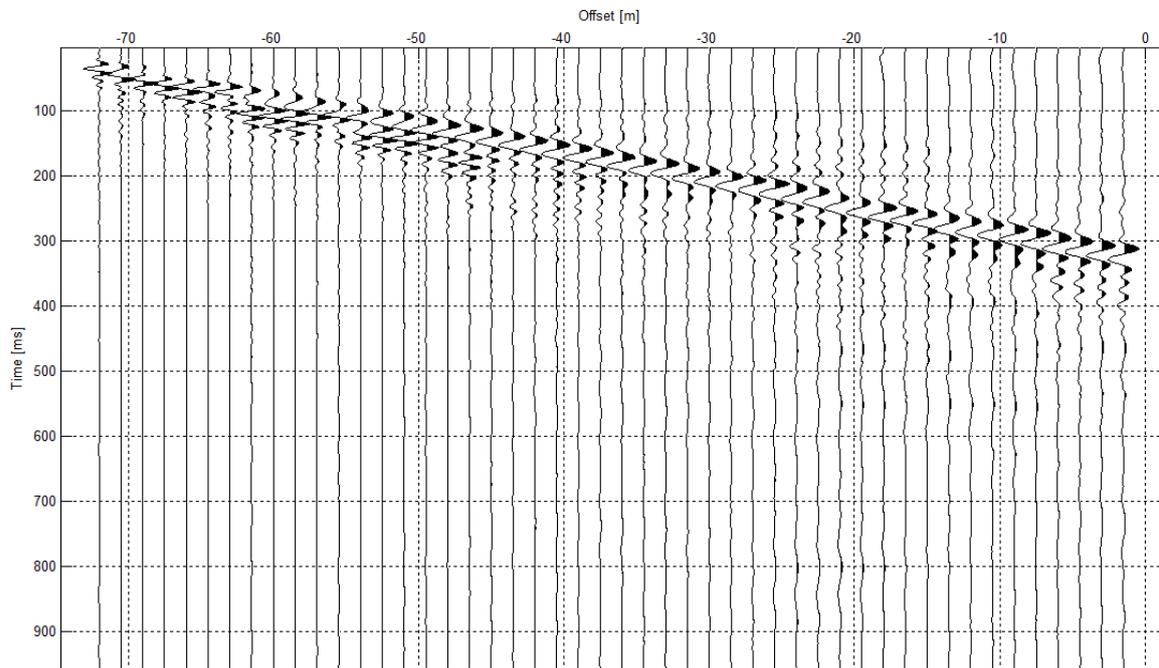


Figura 10 –Selezione del sismogramma della prova SW – Energizzazione lato est.

Il dato è trasformato in dominio f-k (Figura 11) e sono estratte e pulite le curve di dispersione (Figura 12).

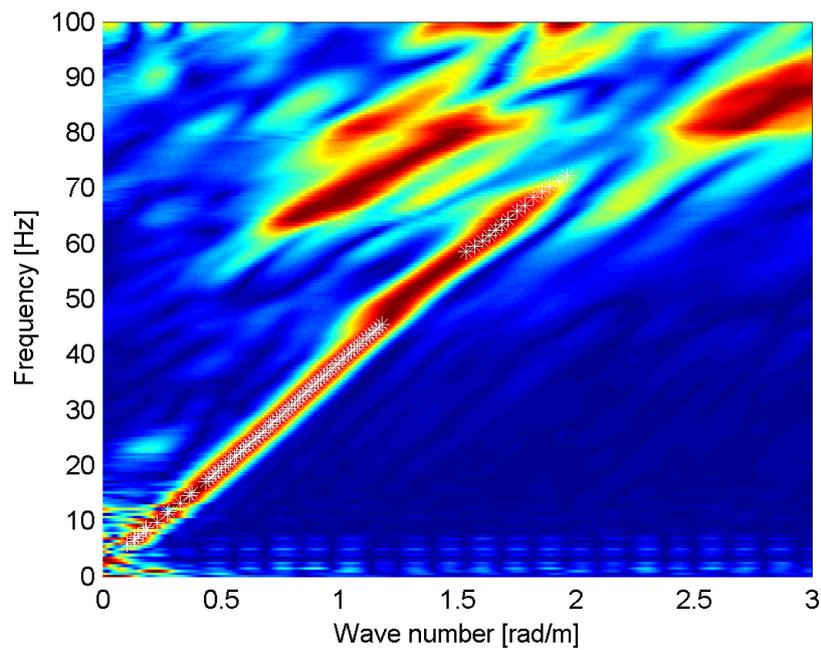


Figura 11 – Spettro f-k del sismogramma di Figura 10.

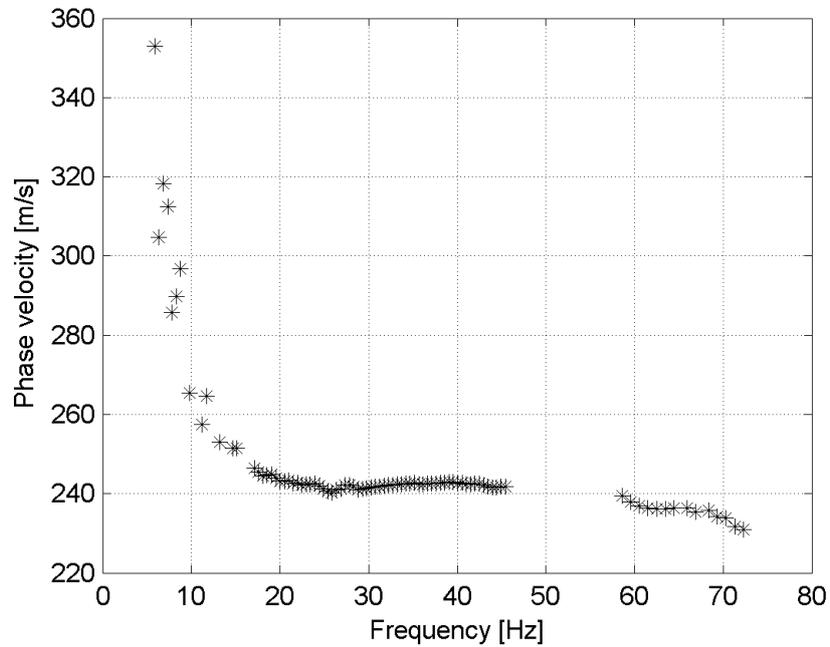


Figura 12 – Curva di dispersione estratta dallo spettro di Figura 11.

Il modo fondamentale delle curve di dispersione può essere mostrato in funzione della lunghezza d'onda λ diviso 2.5 (Figura 13) che dà un'idea qualitativa della profondità indagata e permette una valutazione preliminare sull'affidabilità dei risultati in funzione della profondità. La scala colori rappresenta la velocità di propagazione delle onde S per ogni lunghezza d'onda.

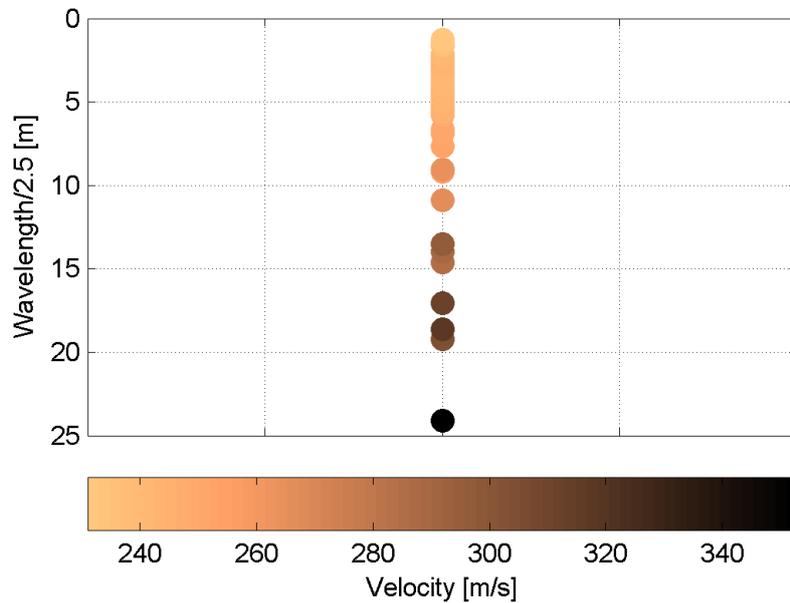


Figura 13 – Modo fondamentale delle curve di dispersione espresso in funzione di $\lambda/2.5$.

Si definisce un intervallo di variabilità dei parametri di modello (spessore degli strati, velocità delle onde di taglio, densità, coefficiente di Poisson), compatibile con la geologia del sito e si producono alcune migliaia di modelli di Vs compatibili con l'intervallo di variabilità dei parametri (Tabella 3)

Tabella 3. Intervallo di variabilità dei parametri di modello.

Numero di profili generati	10000
Numero di strati	3
Densità associata ad ogni strato (kg/dm^3)	1.8 - 1.9 - 1.9
Coefficiente di Poisson	0.3 - 0.3 - 0.45
Vs minima (m/s)	200 - 250 - 350
Vs massima (m/s)	250 - 320 - 500
Spessore minimo (m)	2 - 5
Spessore massimo (m)	3 - 15

Il problema diretto viene risolto per tutti i modelli estratti. Tramite un test statistico, si individuano i soli modelli in cui si minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali e il set di dati calcolati (Figura 14 e Figura 15).

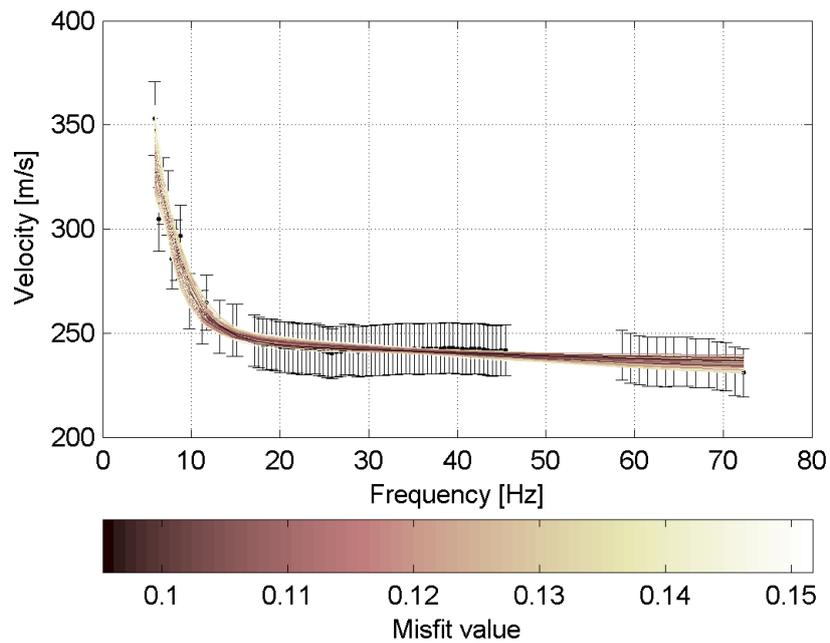


Figura 14 – Curve di dispersione delle possibili soluzioni che descrivono il dato sperimentale in modo statisticamente equivalente.

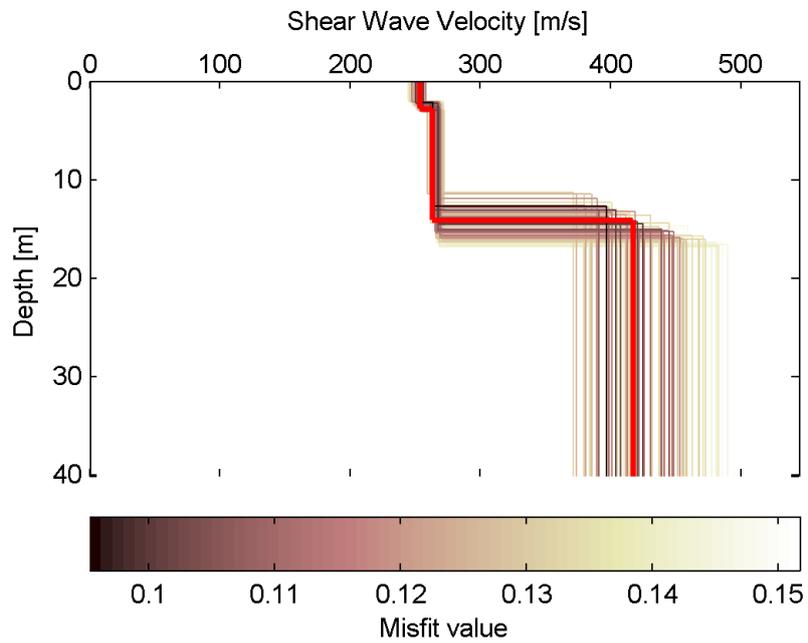


Figura 15 – Set di modelli delle possibili soluzioni che descrivono il dato sperimentale in modo statisticamente equivalente. In evidenza il profilo definitivo.

Per ognuno di questi modelli si calcola il valore di V_{S30} dal piano di imposta delle fondazioni, secondo la formulazione proposta nel D.M. 14/01/2008. Dalla distribuzione di tutti i valori di V_{S30} stimati (Figura 16) è possibile ricavare valore medio (333 m/s) e relativa deviazione standard (5 m/s).

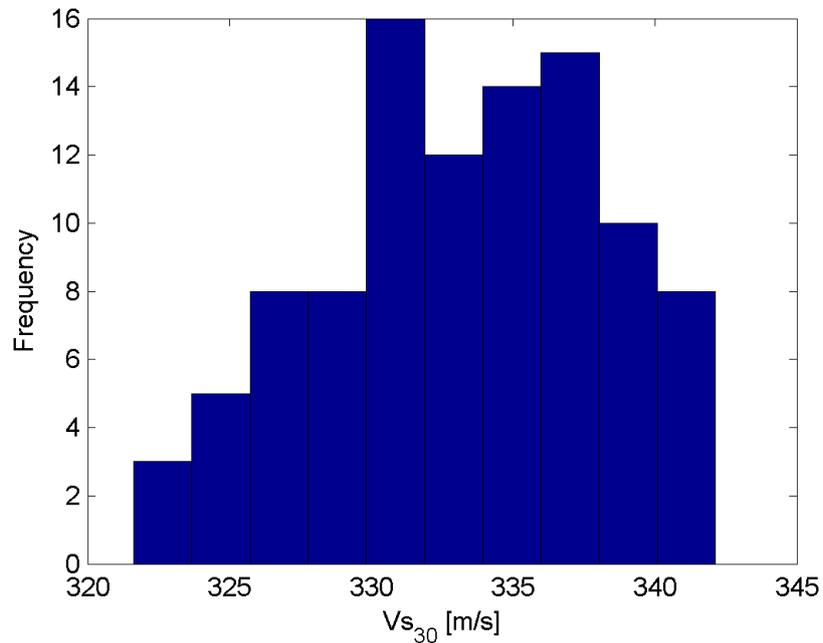


Figura 16 – Curva di distribuzione dei valori di V_{s30} stimati dal piano di imposta delle fondazioni.

Le informazioni geologiche note a priori e quelle desunte dall'indagine tomografica permettono di selezionare ulteriormente i modelli che descrivono il dato in modo statisticamente equivalente. In questo modo si seleziona il profilo che meglio si adatta a queste informazioni. (Figura 17).

La profondità di indagine è qualitativa ed è riferita alla quota media del piano campagna.

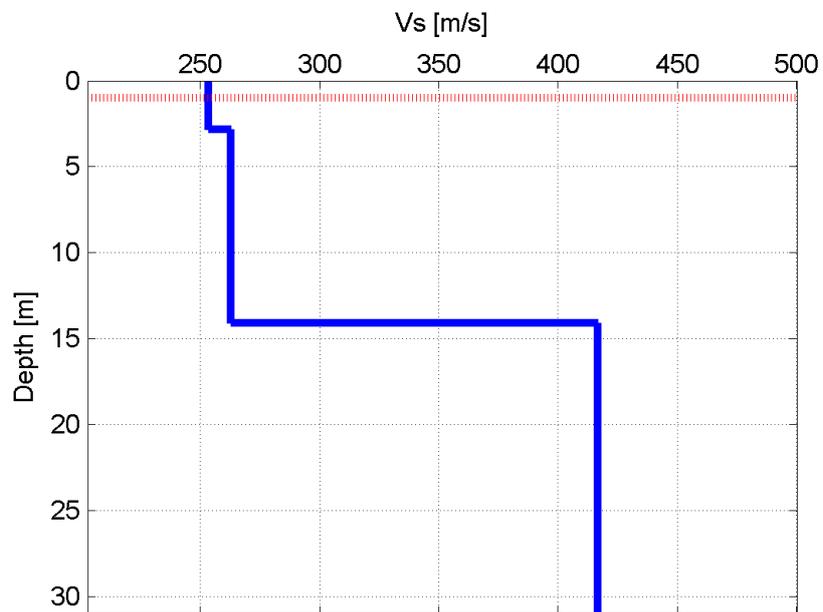


Figura 17 – Profilo stratigrafico di Vs (profondità da piano campagna) con indicazione del piano di imposta delle fondazioni.

In Figura 18 le curve di dispersione relative al profilo scelto di Figura 17 sono sovrapposte agli spettri f-k, mentre in Figura 19 sono sovrapposte alle curve di dispersione sperimentali.

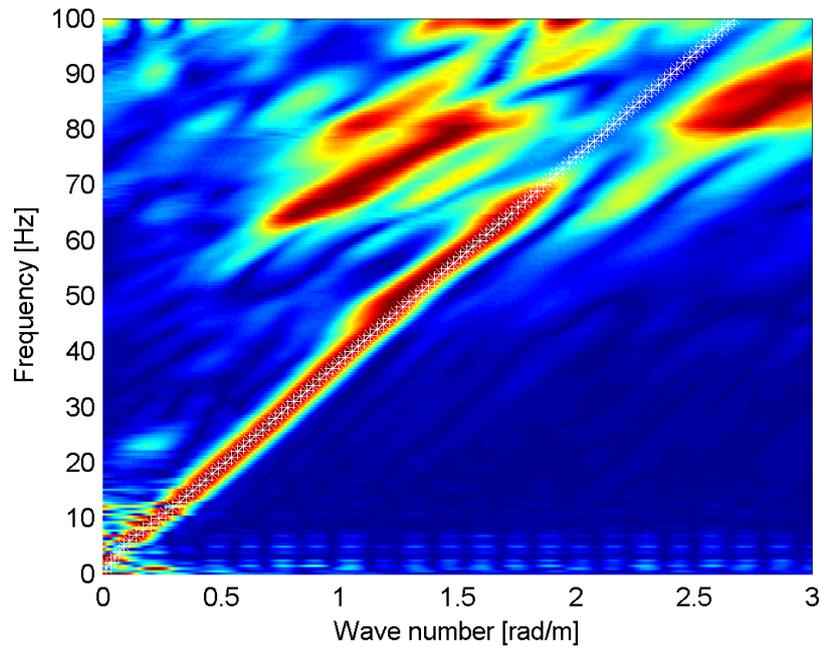


Figura 18 – Spettri f-k normalizzati e fitting delle curve di dispersione.

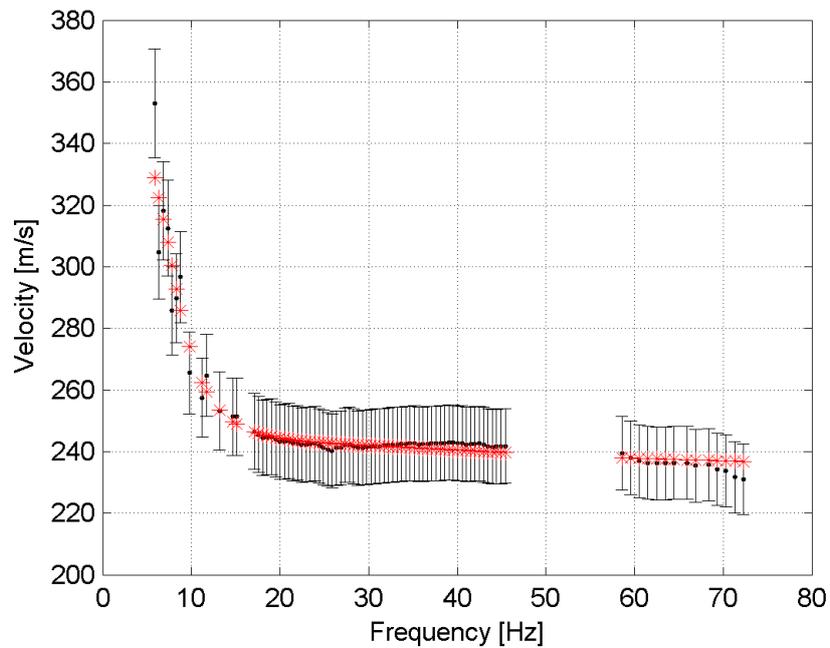


Figura 19 – Curve di dispersione da modello (punti rossi) e curve di dispersione sperimentali con relativa incertezza (barre nere).

I parametri del modello di Figura 17 sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4. Profilo Vs - Parametri del modello di Figura 17.

Strato (numero)	Velocità (m/s)	Spessore (m)	Profondità da p.c. (m)
1	253	2.8	0 - 2.8
2	263	11.3	2.8 - 14.1
3	417		da 14.1

Il valore di V_{s30} del modello finale, calcolato alla quota del piano di imposta delle fondazioni (-1 m da piano campagna) è **331** m/s.

7 INTERPRETAZIONE GEOFISICA

L'analisi delle tomografie sismiche a rifrazione in onde P e delle relative mappe di copertura dei raggi sismici (Figura 7 e Figura 8) permette le seguenti considerazioni:

- Si notano due rifrattori
- Lo strato superficiale (materiale eterogeneo di riporto) è caratterizzato da bassi valori di velocità delle onde P (350-500 m/s) e spessore di circa 2.5-3 m.
- Il secondo strato (primo rifratore) è formato dal terreno naturale composto da limi e sabbie ed è caratterizzato da valori di velocità di 700-900 m/s. Lo strato è caratterizzato da un notevole contenuto di acqua interstiziale.
- Il secondo rifratore identifica la zona satura, alla profondità di circa 9-10 m da piano campagna.

Il profilo di Vs (Figura 17 e Tabella 4) mostra:

- Uno strato superficiale di ridotto spessore (2.8 m) riconducibile al materiale di riporto ($V_s \approx 250$ m/s).

- Un secondo strato formato da terreno naturale poco compatto caratterizzato da valori di velocità delle onde S di circa 260 m/s fino alla profondità di circa 14 m.
- Oltre i 14 m di profondità si nota probabilmente il medesimo strato, ma con un grado di compattazione maggiore ($V_s \approx 420$ m/s).

8 PARAMETRO VS30

Il D.M. 14/01/2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni) disciplina la progettazione e la costruzione di nuovi edifici soggetti ad azioni sismiche, oltre alla valutazione della sicurezza e degli interventi di adeguamento su edifici esistenti soggetti al medesimo tipo di azioni.

La definizione dell'azione sismica a cui gli edifici sono soggetti è legata alla determinazione di alcuni fattori importanti per l'edificio stesso, tra i quali la classificazione del suolo di fondazione su cui l'edificio verrà costruito.

V_{S30} è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}}$$

h_i = spessore (in m);

V_i = velocità delle onde di taglio dello strato i-esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori;

N = numero di strati.

8.1 Stima del Parametro VS30

E' stato dimostrato (Comina et al., 2010) che, data un'adeguata profondità di investigazione, la non unicità della soluzione non costituisce un problema per la stima della V_{S30} . e che il metodo delle onde superficiali fornisce risultati comparabili a quelli ottenuti con metodi invasivi quali down-hole test (DH) o seismic dilatometer test (SDMT).

Per questo motivo, la metodologia proposta non fornisce un unico profilo di V_s , ma un set di possibili soluzioni che descrivono il dato sperimentale in modo statisticamente equivalente.

Per ogni modello si calcola il valore di V_{S30} secondo la formulazione proposta nel D.M. 14/01/2008 e dalla distribuzione dei valori di V_{S30} stimati è possibile ricavare un valore modale che rappresenta il parametro V_{S30} del sito.

9 TOMOGRAFIA SISMICA – Nota tecnica

9.1 Introduzione teorica

La tomografia sismica per onde P è una tecnica che sfrutta la velocità di propagazione delle onde sismiche di compressione, al fine di ottenere informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali che sono attraversati dal fronte d'onda. Tale metodo di indagine, rispetto ai metodi classici quali la sismica a rifrazione, non schematizza il terreno sottostante a strati con caratteristiche omogenee, ma permette di determinare la velocità di propagazione in funzione della profondità, evidenziando eventuali discontinuità laterali e interfacce non piane tra gli strati a diverse caratteristiche.

L'acquisizione dei dati avviene posizionando uno stendimento di geofoni a spaziatura preferibilmente costante sulla direzione lungo la quale si intende ottenere una sezione con l'andamento delle velocità ed energizzando in un numero generalmente dispari di punti (uno al centro dello stendimento e gli

altri distribuiti simmetricamente). Ogni singola acquisizione è sommata alle successive al fine di aumentare il rapporto segnale/rumore.

9.2 Modalità di acquisizione

L'energizzazione in più punti prestabiliti lungo la linea è stata eseguita con mazza da 4 kg su piastra metallica di ripartizione, impiegando un trigger elettrico. In ogni punto di energizzazione i colpi sono ripetuti e il segnale sommato (operazione di stacking) fino a quando l'operatore al sismografo non ritenga che il rapporto segnale/rumore sia accettabile.

9.3 Elaborazione dei dati tomografici

L'elaborazione dei dati prevede l'esecuzione del picking manuale dei primi arrivi delle onde P, il cui risultato è generalmente visualizzato sotto forma di dromocrone (grafici rappresentanti i tempi di primo arrivo in funzione della distanza dalla sorgente).

I tempi di primo arrivo, espressi in millisecondi, insieme alle coordinate spaziali di ogni geofono, sono poi forniti in input al programma di inversione, il quale effettua una prima interpretazione attraverso il metodo classico della sismica a rifrazione e crea un modello di primo tentativo per poter inizializzare il processo di inversione. Il programma procede suddividendo la sezione in celle alle quali assegna un certo valore di velocità delle onde di compressione, dedotto dal modello di primo tentativo creatosi in precedenza. Successivamente viene simulata l'energizzazione in ogni punto di scoppio.

Si suppone che la traiettoria dei raggi sismici dal punto di scoppio al singolo geofono sia curvilinea e che la velocità di propagazione lungo tale traiettoria sia differente a seconda della velocità che è stata assegnata dal programma ad ogni singola cella attraversata dal percorso sismico. Ne risulta che per ogni punto di energizzazione:

$$T_i = \int_S^R \frac{1}{V} ds$$

dove:

T_i = tempo di primo arrivo al geofono i -esimo;

S = punto di energizzazione;

R = ricevitore;

V = velocità di propagazione delle onde di compressione;

ds = tratto infinitesimo di percorso.

I tempi di primo arrivo ricavati dalla simulazione vengono poi confrontati con i tempi di primo arrivo sperimentali e, in base agli scarti, vengono corrette le velocità relative alle celle attraversate dai percorsi sismici. Il processo di inversione è iterativo e si ottiene il risultato finale quando il valore degli scarti è inferiore ad un valore soglia deciso dall'operatore oppure dopo un particolare numero di iterazioni anch'esso deciso dall'operatore.

Il risultato consiste in una sezione verticale con andamento delle velocità delle onde P nel sottosuolo e una sezione con i valori di "copertura" che riporta per ogni cella della sezione stessa il numero di raggi sismici che la attraversano nell'ultima iterazione. La sezione con i valori di copertura è utile alla definizione di affidabilità delle velocità ottenute, poiché alti valori di copertura sottintendono una maggiore accuratezza.

10 PROVE PER ONDE SUPERFICIALI – Nota tecnica

10.1 Introduzione teorica

Il metodo delle onde superficiali attive (anche detto S.W.M. – Surface Wave Method) è un metodo di caratterizzazione sismica basato sull'analisi della

dispersione geometrica delle onde superficiali. La procedura consiste nella valutazione delle caratteristiche dispersive del sito a partire dall'acquisizione e il trattamento dei dati sismici e nella loro successiva analisi per determinare le proprietà meccaniche del sottosuolo. La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh in un semispazio elastico, omogeneo e isotropo, è indipendente dalla frequenza e il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi a una profondità circa pari a una lunghezza d'onda. La profondità raggiunta dalla perturbazione dipende, quindi, dalla lunghezza d'onda e, in mezzi omogenei, a diverse lunghezze d'onda corrisponde un'unica velocità di fase (V_R). In un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito, cioè, da strati aventi proprietà meccaniche differenti, il comportamento delle onde superficiali diventa dispersivo: a frequenze diverse corrispondono differenti velocità di fase. Lunghezze d'onda diverse interessano, infatti, strati diversi ai quali sono associate proprietà meccaniche specifiche: ogni lunghezza d'onda (e quindi ogni frequenza) si propaga a una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche degli strati interessati dalla propagazione.

Nel caso di un mezzo eterogeneo, quindi, le onde superficiali non hanno una singola velocità, ma diverse velocità di fase in corrispondenza delle diverse frequenze: tale fenomeno, dipendente dalla distribuzione spaziale delle proprietà sismiche del sottosuolo, è noto come dispersione geometrica e la relazione che lega la frequenza alla velocità di fase prende il nome di curva di dispersione.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo, è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse velocità di propagazione, a ognuna delle quali corrisponde un modo di vibrazione del sito. Differenti modi di vibrazione possono manifestarsi simultaneamente.

Da un punto di vista teorico, per quanto riguarda il modo fondamentale, alle alte frequenze, la velocità di fase coincide con la velocità delle onde di Rayleigh dello strato più superficiale, mentre, alle basse frequenze, l'effetto degli strati più profondi diventa importante e la velocità di fase tende

asintoticamente alla velocità di propagazione delle onde di taglio dello strato più profondo come se questo fosse esteso infinitamente in profondità. La curva di dispersione gioca un ruolo centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni; infatti, è funzione delle caratteristiche di rigidità del mezzo e può essere utilizzata per un processo inverso avente come obiettivo la stima delle caratteristiche di rigidità stesse.

10.2 Modalità di acquisizione

La fase di acquisizione prevede l'utilizzo di una sorgente, impulsiva o controllata, tramite la quale viene creata una perturbazione che si propaga lungo la superficie libera e viene rilevata da uno o più ricevitori posti lungo dispositivi lineari sul piano campagna. La sorgente è posta a un estremo dello stendimento di misura e di norma si effettuano energizzazioni ai due lati opposti dello stendimento per avere ridondanza di informazione e gestire eventuali disomogeneità del sottosuolo. L'obiettivo è indagare la propagazione delle onde superficiali in una banda di frequenza più ampia possibile, poiché ciò consente di ottenere informazioni sulle proprietà degli strati profondi, che influenzano le componenti a bassa frequenza, e di risolvere con adeguata risoluzione gli strati più superficiali, che influenzano in maniera significativa soprattutto le componenti ad alta frequenza. Questo implica la scelta di corretti parametri di acquisizione (nello spazio e nel tempo) atti a permettere un'adeguata risoluzione spettrale nella fase di elaborazione.

Il campionamento temporale deve garantire che tutto il treno d'onda relativo alla propagazione delle onde superficiali sia registrato, quindi la durata dell'acquisizione (T) deve essere maggiore o uguale al tempo necessario per l'armonica più lenta a raggiungere il sensore più lontano. L'intervallo di campionamento (dt) deve garantire la stima delle armoniche di interesse in base alle regole del campionamento (frequenza di campionamento almeno doppia (meglio pari a cinque volte) della frequenza più alta da registrare).

Il campionamento spaziale deve consentire di stimare in modo affidabile le lunghezze d'onda di interesse. In particolare la lunghezza dello stendimento di misura (L) non deve essere inferiore alla metà della massima lunghezza d'onda e la distanza intergeofonica (d_l) deve essere metà della minima lunghezza d'onda.

Inoltre, poiché dal punto di vista fisico le onde di superficie sono sensibili alle proprietà del mezzo in cui si propagano, fino ad una profondità pari a circa 0.4 volte la lunghezza d'onda massima, la lunghezza L deve essere definita anche in funzione della profondità d'indagine desiderata.

10.3 Elaborazione dati di onde superficiali

Obiettivo dell'elaborazione è la stima della curva di dispersione caratteristica del sito, che esprime la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza.

La procedura può essere sintetizzata nei seguenti punti:

- I dati di campagna vengono trasformati tramite una doppia trasformata di Fourier in dominio f - k (frequenza-numero d'onda). I massimi di energia sono associabili alle onde di Rayleigh (Tselentis and Delis, 1998) e vengono riconosciuti gli eventi coerenti in ampi intervalli di frequenza, discriminando gli eventi associabili ai diversi modi di propagazione.
- Le curve di dispersione sperimentali sono ricavate con un algoritmo di ricerca dei massimi spettrali. Per ogni frequenza f , il picco spettrale è associato a un determinato valore del numero d'onda k , da cui è possibile ricavare la velocità di fase delle onde di Rayleigh attraverso la relazione:

$$V_R(f) = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{k}$$

- Il modello di sottosuolo viene schematizzato come un mezzo elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è

rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati.

- Si definisce uno spazio dei parametri di modello (spessore degli strati, velocità delle onde di taglio, densità, coefficiente di Poisson), compatibile con la geologia del sito.
- Tramite un algoritmo di inversione probabilistica, si producono alcune migliaia di profili di Vs (modelli) compatibili con il range di variabilità dei parametri.
- Il problema diretto viene risolto per tutti i modelli estratti e si individuano i soli modelli in cui si minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione simulata). La procedura è condotta con tecniche di ricerca globale della soluzione (Wathelet et al, 2004; Socco and Boiero, 2008).

11 BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- Ryden, N. and Park, C.B., 2006. Fast simulated annealing inversion of surface waves on pavement using phase-velocity spectra. *Geophysics* 71, R49-R58.
- Socco, L.V., Strobbia, C., 2004. Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial. *Near Surface Geophysics* 2, 165-185.
- Socco, L.V., and D. Boiero, 2008, Improved Monte Carlo inversion of surface wave data: *Geophysical Prospecting*, 56, 357-371.
- Tselentis, G.A., and G. Delis, 1998, Rapid assessment of S-wave profiles from the inversion of multichannel surface wave dispersion data: *Annali di Geofisica*, 41, 1-15.
- Wathelet, M., D. Jongmans, and M. Ohrnberger, 2004, Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements: *Near Surface Geophysics*, 2, 211-221.