# POLITECNICO DI TORINO



# Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Anno Accademico 2020/2021

Analisi dell'attenuazione delle onde superficiali per la caratterizzazione sismica del sito di Garner Valley

**Candidato:** Mauro Francavilla **Relatori:** Prof. Sebastiano Foti Ing. Mauro Aimar

# Indice

So	omma	ario		1	
In	trod	uzione		2	
1	Teo	ria del	a delle onde superficiali		
	1.1	Cenni	teorici sulla propagazione delle onde superficiali	4	
	1.2	Propa	gazione delle onde di Rayleigh in mezzi verticalmente ete-		
		rogene	ii	8	
<b>2</b>	Me	todolog	gie per la stima delle curve di dispersione e attenua-		
	zior	ne delle	e onde di Rayleigh	11	
	2.1	Transf	er Function method	12	
	2.2	Transf	er Function method with deconvolution	18	
	2.3	Genera	alized Half Power Bandwidth method	20	
	<ul><li>2.4 WaveDec method</li></ul>		Dec method	23	
			26		
		2.5.1	Stima delle curve di dispersione con FDBF	26	
		2.5.2	Frequency-domain Beam Forming Attenuation (FDBFa)	30	
3	Gar	rner Va	alley Down Hole Array (GVDA)	31	
	3.1	Indagi	ni precedentemente condotte in sito	35	
4	Ela	borazio	one dati	44	
	4.1	Acquis	sizione dei dati sul campo	44	
		4.1.1	Sorgente energizzante di tipo Shaker	45	
		4.1.2	Sistema di acquisizione	49	
		4.1.3	Descrizione degli stendimenti MASW	51	
	4.2	Stendi	mento analizzato	55	
		4.2.1	Stima delle curve di dispersione e di attenuazione: inter-		
			pretazione dei dati ottenuti dallo Shaker	61	

		4.2.2	Influenza delle condizioni di campo vicino e della sorgente	65
		4.2.3	Stima delle curve di dispersione e di attenuazione: inter-	
			pretazione dei dati ottenuti dalla mazza battente $\ . \ . \ .$	70
<b>5</b>	Pro	cedura	di Inversione	77
	5.1	Definiz	zione dei parametri del modello di sottosuolo $\ldots \ldots \ldots$	77
	5.2	Critici	tà generali del processo di inversione	78
	5.3	Metod	o di Inversione	79
	5.4	Inversi	ioni per la stima dei profili di velocità $\mathbf{V}_s$	80
		5.4.1	Approccio alternativo per la scalatura dei profili	81
	5.5	Analis	i dei risultati ottenuti con il processo di inversione $\ldots$	83
6	Con	clusio	ni	89
Ri	Riferimenti bibliografici 92			92

# Elenco delle figure

1.1	Esempio Onda di Love, componente orizzontale(SH) delle onde	
	superficiali ( immagine di Dr. Larry Braile, Purdue University )	5
1.2	Esempio Onda di Rayleigh, componente verticale(P-S) delle on-	
	de superficiali ( immagine di Dr. Larry Braile, Purdue Univer-	
	sity )	5
1.3	Ampiezza vs. profondità adimensionalizzata rispetto alla lun-	
	ghezza d'onda per l'onda di Rayleigh (estratto da Richart et Al.	
	1970 [22])	7
2.1	Legame segnale di input e di output - Estratto da Foti,2000 $\left[9\right]$	12
2.2	Esempio di regressione lineare per la stima delle velocità di fase	
	dell'onda, stendimento SN14 - frequenza 13.23Hz	15
2.3	Esempio di regressione non lineare per la stima delle ampiezze	
	dell'onda, stendimento SN14 - frequenza 13.23 Hz $\ldots$	16
2.4	a) Funzione di risposta in frequenza Half Power Bandwidth me-	
	thod; b) la curva rappresenta lo spettro FK dell'onda di Raylei-	
	gh ad una certa frequenza (immagine estratta da Badsar, 2011 $$	
	[4])	20
2.5	Estratto da Marano et al 2017 [19] $\ldots$	24
2.6	Esempio di spettro F-K ottenuto con metodo Frequency Domain	
	Beam Forming (FDBF)	29
3.1	Garner Valley Down Hole Array, immagine da Google maps $[33]$	31
3.2	Garner Valley Down Hole Array, immagine da Google maps $[33]$	31
3.3	Planimetria delle posizioni degli accelerometri e sensori di pres-	
	sione posti sul sito di GVDA; (NEES@UCSB - The Earthquake	
	Engineering Group, Earth Research Institute at UCSB)	33
3.4	Stratigrafia territorio GVDA ottenuta con diverse tipologie di	
	indagine (NEES@UCSB - The Earthquake Engineering Group,	
	Earth Research Institute at UCSB)	34

3.5	Planimetria punti di indagine nel sito di GVDA (estratto da	
	report R.Steller $[26]$ )	35
3.6	Andamento delle velocità di tagli o $\mathbf{V}_s$ e $\mathbf{V}_p$ di una indagine	
	Down-Hole con posizione dei sensori a diverse profondità (estrat-	
	to da report R.Steller $[26]$ )	37
3.7	a) Posizione prova passiva SWM condotta sul sito di GVDA;	
	stendimento triangolare in figura con 10 geofoni a distanza me-	
	dia di 49 m; b) Andamento delle velocità di tagli o $\mathbf{V}_s$ con breve	
	descrizione geologica associata, estratto da H si-Ping Liu et al $\left[13\right]$	38
3.8	Risultati di Down-Hole, PS suspension logging e SASW condot-	
	te sul sito GVDA (estratto Teague et al. $[28]$ )	40
3.9	$Configurazione \ stendimenti \ masw \ lineari(attivi), \ circolari(prove$	
	passive),(estratto Teague et al. $[28]$ )	41
3.10	Inversione delle velocità di taglio ottenuta con parametrizzazio-	
	ne layering ratio= $3.5$ , estratto Teague et al. [28]	42
3.11	Profili di velocità delle onde di taglio (Vs) invasivi e non inva-	
	sivi per il sito GVDA, posizioni dei sei sensori utilizzati per la	
	downhole (00-05), di fianco è indicata la rappresentazione della	
	geologia del sito che illustra gli spessori approssimativi di depo-	
	siti alluvionali e di granito decomposto (DG) che si sovrappone	
	al granito competente (GRNT) a 90 m di profondità. I profili	
	Vs includono quelli misurati utilizzando downhole (DH) e regi-	
	strazione delle sospensioni P e S (PS). I profili associati a prove	
	non invasive includono sei parametrizzazioni ottenute con Laye-	
	ring ratio di cui vengono rappresentati i profili medi (estratto	
	J.P. Vantassel & B.R. Cox [29])	43
4.1	Stendimenti MASW - Garner Valley Down Hole (GVDA); Sono	
	evidenziate le posizioni delle diverse sorgenti e dei ricevitori	44
4.2	Shaker di tipo Thumper (foto da Nees,UT Austin Experimental	
	Facility)	45

4.3	Massima Forza verticale/orizzontale sviluppabile dallo shaker	
	Thumper, disponibile nell' UT Austin Exp. Facil., in funzione	
	della frequenza - Thumper, foto da Nees,UT Austin Experimen-	
	tal Facility	46
4.4	Segnale di tipo "chirp", con banda dominante 5-30 Hz: a)Time-	
	history b) Spettro di Fourier	47
4.5	Contenuto in Frequenza della forzante trasmessa dal Thumper,	
	misurato sulla piastra di carico.	48
4.6	FairfieldNodal ZLand 3C, estratto da Instrumentation Center	
	IRIS PASSCAL	49
4.7	Funzione di calibrazione sensore FairfieldNodal ZLand 3C. I gra-	
	fici riportano frequenza sull'asse delle ascisse, sensitività e fase	
	sulle ordinate	50
4.8	Stendimenti MASW effettuati nel sito di GVDA. In rosso è	
	evidenziato il sistema di riferimento locale, centrato nel primo	
	ricevitore in basso a sinistra, che è usato in Fig. $4.9,4.10,4.11$ .	52
4.9	Posizione dei ricevitori e punti di energizzazione tramite Shaker;	
	Il sistema di riferimento locale è centrato nel primo ricevitore	
	in basso a sinistra in Fig. 4.8	52
4.10	Posizione dei ricevitori e punti di energizzazione tramite Mazza	
	battente; Il sistema di riferimento locale è centrato nel primo	
	ricevitore in basso a sinistra in Fig. 4.8	53
4.11	Posizione dei ricevitori e punti di energizzazione tramite Shaker	
	per gli stendimenti a spaziatura irregolare	54
4.12	Stendimenti bidimensionali nel sito di GVDA,in cui ogni rice-	
	vitore è colorato in funzione della frequenza fondamentale del	
	sito (f_0) ottenuta con misurazioni H/V (immagine estratta da	
	Stokoe et al. [27])	56

4.13	Stendimento SN14 (MASW), con posizioni della sorgente vi-	
	brante. Sono presenti 2 punti di applicazione con offset 4.5m e	
	35.5m lato strada, 2.5m e 33.5m lato parcheggio	57
4.14	Sismogramma per lo stendimento SN14, Shot point n°4 - Stack	
	1, con distanza 4.5 m dal primo ricevitore; La traccia del segnale	
	sorgente è riportata in corrispondenza dell'offset 0. $\ldots$ .	58
4.15	Stendimento SN14 (MASW), con posizioni della sorgente im-	
	pulsiva. Sono presenti 2 punti di applicazione a 5m e 15m da	
	entrambi i lati dello stendimento	59
4.16	Sismogramma per lo stendimento SN14, Shot point 2 - Stack 2,	
	con distanza 15 m dal primo ricevitore. La traccia del segnale	
	sorgente è riportata in corrispondenza dell'offset 0. $\ldots$ .	60
4.17	Spettro F-K per lo stendimento SN14 Shot-4, con distanza dal	
	ricevitore 4.5 m	61
4.18	Curva di Dispersione e curve di attenuazione, ottenute con FDB-	
	Fa per ogni punto di battuta.	62
4.19	Curve di dispersione e di attenuazione medie dei punti di battuta	
	eseguiti per lo stendimento SN14 - risultato ottenuto con metodo	
	FDBFa	63
4.20	Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta	
	per lo stendimento SN14 - risultato ottenuto con metodo WaveDec	64
4.21	Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta	
	eseguiti per lo stendimento SN14 - risultato ottenuto con metodo	
	GHPB	65
4.22	Confronto tra metodologia TFM e TFMD - stendimento SN14 $$ .	67
4.23	Confronto metodologie per la stima delle curve di dispersione	
	ed attenuazione, stendimento SN14 $\ .\ .\ .\ .\ .$	68
4.24	Spettro F-K per lo stendimento SN14 Shot-3, con distanza dal	
	ricevitore 5 m	70

4.25	Curve di Dispersione e curve di attenuazione, per lo stendimento	
	$\rm SN14$ ottenute con metodo FDBFa. I dati si riferis cono ai diversi	
	punti di battuta.	71
4.26	Curve di dispersione e di attenuazione medie degli shot points	
	eseguiti per lo stendimento SN14 con mazza battente - risultato	
	ottenuto con metodo FDBFa	72
4.27	Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta	
	eseguiti per lo stendimento SN14 con mazza battente - risultato	
	ottenuto con metodo WD	73
4.28	Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta	
	eseguiti per lo stendimento SN14 con mazza battente - risultato	
	ottenuto con metodo TFMD	74
4.29	Confronto metodologie FDBFa, WD e TFMD per la stima delle	
	curve di dispersione ed attenuazione per lo stendimento SN14 $$	
	energizzato con mazza battente	75
5.1	Curve di dispersione e di attenuazione, rappresentate in termini	
	di media con barre di errore pari a $\pm 1\sigma,$ ottenute combinando lo	
	stendimento SN14 e lo stendimento omologo della prova MASW	
	a spaziatura irregolare (Aimar, comunicazioni personali [2]); I	
	dati sono ottenuti mediante ricampionamento logaritmico della	
	lunghezza d'onda da 5 a 80 m con 27 campioni	84
5.2	Curve di dispersione e di attenuazione, rappresentate in termini	
	di media con barre di errore pari a $\pm 1\sigma$ , ottenute combinan-	
	do lo stendimento SN14 e lo stendimento omologo della prova	
	MASW a spaziatura irregolare (Aimar, comunicazioni perso-	
	nali [2]); I dati sono ottenuti mediante ricampionamento loga-	
	ritmico rispetto alla lunghezza d'onda. Il grafico è in funzio-	
	ne di velocità di fase e frequenza per la curva di dispersione e	
	attenuazione-frequenza per la curva di attenuazione	84
50		

## Elenco delle tabelle

4.1	Valori di velocità di fase e di attenuazione corrispondenti a fre-	
	quenze di 5, 10, 15, 20, 25, 30 Hz per i punti sperimentali mediati	
	di ogni metodo utilizzato	69
4.2	Valori di velocità di fase e di attenuazione corrispondenti a fre-	
	quenze di 5, 10, 15, 20, 25, 30 Hz per i punti sperimentali mediati	
	di ogni metodo utilizzato	76
5.1	Parametri del modello iniziale	86

### Elenco dei simboli

- $V_R$  Velocità delle onde di Rayleigh
- $V_S$  Velocità delle onde di taglio S
- $V_P$  Velocità delle onde di compressione P
- $\nu$  Coefficiente di Poisson
- f Frequenza
- D Rapporto di smorzamento
- $\lambda$  Lunghezza d'onda
- r Distanza dalla sorgente
- A Legge di attenuazione geometrica Ampiezza dell'onda
- $\alpha_R(\omega)$  Coefficiente di attenuazione dell'onda superficiale dipendente dalla frequenza
  - k Numero d'onda
  - K Numero d'onda a valori complessi in mezzi viscoelastici lineari
- $\Psi(r,\omega)$  Angolo di fase a valori complessi

#### Acronimi

- MASW Multi-channel Analysis of Surface Waves
- *TFM* Transfer Function Method
- TFMD Transfer Function Method with Deconvolution
- GHPB Generalized Half Power Bandwidth
- FDBF Frequency Domain Beam Former
- FDBFa Frequency Domain Beam Former Attenuation

### Sommario

Il presente lavoro riguarda la caratterizzazione sismica del sito di Garner Valley Down Hole Array (GVDA) condotta mediante l'analisi di indagini di tipo Multi-channel Analysis Surface Waves (MASW).

L'obiettivo di questa tesi consiste nella stima delle caratteristiche di rigidezza e dissipative a piccole deformazioni del sito, attraverso l'analisi delle curve di dispersione e di attenuazione delle onde superficiali.

I dati sperimentali provengono da una campagna di indagine effettuata con uno stendimento bidimensionale. Le onde superficiali sono state generate mediante una mazza battente e una sorgente vibrante controllata. Questo ha permesso di avere una notevole quantità di dati utili al confronto dei risultati ottenuti. Questo studio si è concentrato su alcuni specifici stendimenti lineari, per stimare le curve di dispersione ed attenuazione attraverso diverse metodologie presenti in letteratura.

I risultati ottenuti sono stati confrontati tra loro, in modo da valutare le prestazioni relative di ciascun metodo preso in esame per questo sito. Inoltre, in alcuni casi, si è analizzata l'influenza dovuta all'effetto della sorgente applicata, sia nella stima delle curve di dispersione che di attenuazione.

Infine, le curve di dispersione e di attenuazione sono state utilizzate per la stima dei profili di velocità di propagazione e del rapporto di smorzamento delle onde di taglio, mediante un processo di inversione. Tale procedura ha richiesto uno studio preliminare sui risultati di indagini svolte in passato nel sito di GVDA, al fine di vincolare adeguatamente i parametri relativi al modello di sottosuolo. Sulla base di queste informazioni, è stata effettuata un'inversione basata su un metodo Monte Carlo, che ha consentito di individuare un insieme di profili compatibili con il dato sperimentale ottenuto dall'analisi delle onde superficiali.

### Introduzione

L'obiettivo dell'elaborato consiste nell'interpretazione dei risultati di prove MASW effettuate nel sito di Garner Valley Downhole Array (GVDA). I dati utilizzati in questa tesi sono stati acquisiti dall'Ing. Mauro Aimar e dal professor Brady R. Cox dell' Utah State University.

Le indagini condotte hanno previsto l'applicazione di una sorgente vibrante e controllata (shaker) ed una di tipo impulsivo (mazza battente), al fine di poter effettuare un'analisi comparativa.

In particolare, l'analisi dei dati si è concentrata sull'elaborazione dei dati, per produrre una stima delle curve di dispersione e di attenuazione per la caratterizzazione sismica del sito, utilizzando diversi metodi proposti in letteratura per l'analisi delle onde superficiali.

La seconda parte dell'elaborato si concentra sul problema di inversione per la stima accoppiata dei profili delle velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  e dei profili del rapporto di smorzamento.

Sono stati utilizzati i risultati di indagini pregresse svolte nel sito di Garner Valley per confrontare i risultati ottenuti.

Il presente elaborato si articola in 5 capitoli di cui vengono descritti nel seguito i contenuti.

Il capitolo 1 presenta una breve introduzione alla teoria delle onde superficiali con particolare attenzione alle onde di Rayleigh.

Vengono fornite le basi della loro propagazione in un mezzo viscoelastico lineare per ricavare le informazioni sulla velocità di fase e sull'ampiezza, necessarie per la stima delle curve di dispersione e di attenuazione.

Nel capitolo 2 sono riportati gli elementi fondamentali delle diverse metodologie utilizzate per ottenere le stime delle curve di dispersione e di attenuazione a partire dai dati sperimentali di prove MASW.

Nel capitolo 3 è riportato un inquadramento territoriale e geologico del sito di Garner Valley.

In aggiunta, sono riportate alcune informazioni da studi pregressi che permettono di avere un elemento di confronto nella definizione dei parametri per la costruzione dei modelli di sottosuolo.

Successivamente, nel capitolo 4, sono riportati i risultati delle stime delle curve di dispersione e di attenuazione ottenute con i diversi metodi descritti nel capitolo 2.

In particolare, sono riportati i confronti tra le diverse curve tenendo anche conto della tipologia di sorgente sismica.

Infine, nel capitolo 5, avendo a disposizione un'indicazione sui parametri iniziali per lo sviluppo del modello di tentativo, è stato possibile procedere con il problema di inversione accoppiata per la stima dei profili di velocità di taglio dell'onda e i profili del rapporto di smorzamento associabili rispettivamente alle caratteristiche di deformabilità e dissipazione del sottosuolo.

Tutte le analisi sono state condotte utilizzando i codici di calcolo sviluppati in ambiente di Matlab, disponibili da studi pregressi.

### 1 Teoria delle onde superficiali

Le indagini multi-channel analysis of surface waves (MASW) sono delle indagini geofisiche di tipo non invasivo che sfruttano il contributo predominante delle onde di Rayleigh generato da una sorgente energizzante (es. mazza battente o shaker) e direttamente campionato da ricevitori (geofoni) posti in superficie. Esse si basano sullo studio della propagazione delle onde superficiali generate da una sorgente attiva.

## 1.1 Cenni teorici sulla propagazione delle onde superficiali

In generale, le onde che si propagano in un mezzo possono essere suddivise approssimativamente in due categorie principali: onde di volume e onde di superficie.

Nella seguente attività di tesi sono state prese in considerazione le onde di superficie, divise in:

- Onde di Love;
- Onde di Rayleigh;

Le onde di Love possono esistere solo in presenza di superficie libera e di uno strato superficiale deformabile al di sopra di un semispazio più rigido. In queste condizioni, l'energia rimane in parte intrappolata nello strato più deformabile per riflessioni multiple e dà luogo ad una perturbazione che induce spostamenti orizzontali in direzione trasversale rispetto alla direzione di propagazione (Figura 1.1).



**Figura 1.1:** Esempio Onda di Love, componente orizzontale(SH) delle onde superficiali ( immagine di Dr. Larry Braile, Purdue University )

Le onde di Rayleigh sono sempre generate quando esiste una superficie libera in un corpo continuo e presentano una componente verticale nello spazio tridimensionale generate da onde P di compressione ed una componente orizzontale indotta da onde S di taglio lungo la direzione verticale (Figura 1.2).



**Figura 1.2:** Esempio Onda di Rayleigh, componente verticale(P-S) delle onde superficiali ( immagine di Dr. Larry Braile, Purdue University )

Alcune metodologie utilizzate nel seguente studio prevedono l'utilizzo di ipotesi basate sulla propagazione delle onde di Rayleigh su superficie libera in un semispazio omogeneo, poichè nella modalità di acquisizione MASW classico non viene generato il contributo legato alle onde di Love.

Nel semispazio omogeneo, la definizione delle onde di Rayleigh nasce dalle equazioni del moto di Navier, che descrive la propagazione delle onde meccaniche:

$$(\lambda + \mu) \bigtriangledown \bigtriangledown \cdot u + \mu \bigtriangledown^2 \cdot u + \rho \cdot f = \rho \ddot{u} \tag{1.1}$$

dove u è il vettore di spostamento delle particelle,  $\rho$  rappresenta la densità media del mezzo,  $\lambda \in \mu$  sono le costanti di Lamè ed f le forze di volume. La velocità di propagazione dell'onda di Rayleigh è governata dall'equazione caratteristica:

$$s^{6} - 8s^{4} + (24 - 16\gamma^{2})s^{2} + 16(\gamma^{2} - 1) = 0$$
(1.2)

dove s è il rapporto tra velocità di propagazione dell'onda di Rayleigh e la velocità di propagazione delle onde S:

$$s = \frac{V_R}{V_S} \tag{1.3}$$

e  $\gamma$  il rapporto tra velocità delle onde di taglio S e di compressione P:

$$\gamma = \frac{V_S}{V_P} \tag{1.4}$$

Risolvendo l'equazione 1.2 si trova il valore di s che si nota essere dipendente dal coefficiente di Poisson in quanto le radici di  $s^2$  dipendono dal fattore  $\gamma$ espresso come  $\gamma^2 = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$  (Foti,2000 [9]).

Si può dimostrare (Viktorov 1967 [30]) che il coefficiente di Poisson in mezzi stratigrafici reali è contenuto in un range di  $0 < \nu < 0.5$ , per cui esiste soltanto una soluzione reale ed accettabile di s nel dominio compreso tra 0 e 1. La soluzione suggerita prevede:

$$s = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \tag{1.5}$$

da cui è possibile trovare il range di variazione del rapporto di velocità:

$$0.87 < \frac{V_R}{V_S} < 0.96 \tag{1.6}$$

E' possibile notare che l'onda superficiale che si genera per la presenza della superficie libera, viaggia con una velocità di poco inferiore rispetto a quella delle onde S.

Passando allo spostamento indotto dalle onde di Rayleigh, questo giace nello stesso piano della propagazione ma non è ne parallelo ne perpendicolare alla direzione di propagazione.

Infatti il moto diventa composizione del movimento indotto dalle onde P e dalle onde S e si manifesta secondo delle ellissi che invertono il loro segno ad una certa profondità.

Di conseguenza, si può affermare che queste onde non generano una pura distorsione o variazione di volume.

In Figura 1.3 viene mostrato come le componenti di moto orizzontali e verticali dell'onda riducano la loro ampiezza in funzione della profondità, dando indicazione sul moto delle particelle che risulta di tipo ellittico. Nello specifico, componente di spostamento la verticale, all'aumentare della proevidenzia un'influenza fondità, maggiormente marcata nelle zone più superficiali del semispazio omogeno.



Figura 1.3: Ampiezza vs. profondità adimensionalizzata rispetto alla lunghezza d'onda per l'onda di Rayleigh (estratto da Richart et Al. 1970 [22])

La componente orizzontale invece, riduce il suo contributo all'aumentare della profondità invertendo segno e verso di rotazione dell'ellisse ad una profondità di circa 1/2 della lunghezza d'onda.

Per tale motivo, l'ellisse è sempre più ridotta e la profondità z è legata alla lunghezza d'onda  $\lambda$  dell'onda armonica di Rayleigh data da:

$$\lambda = \frac{V_R}{f} \tag{1.7}$$

dove  $V_R$  è la velocità dell'onda di Rayleigh ed f la frequenza. Nello specifico a  $z_{max} = \lambda$  non si risente più degli effetti di propagazione dell'onda di Rayleigh.

### 1.2 Propagazione delle onde di Rayleigh in mezzi verticalmente eterogenei

Le onde di Rayleigh presentano una forte dispersività in mezzi verticalmente eterogenei, per cui dalle velocità variabili con la profondità si può definire la curva di dispersione, come la distribuzione delle velocità di fase in funzione della frequenza o della lunghezza d'onda.

La dipendenza V-f si deve al fatto che la profondità della zona in cui viaggia l'onda di Rayleigh dipende dalla frequenza ed in particolare:

- Onde ad alta frequenza (bassa λ) viaggiano in superficie con velocità più basse.
- Onde a bassa frequenza (alta λ) viaggiano più in profondità con velocità più alte.

In tali mezzi, inoltre, l'applicazione di una sorgente puntiforme in superficie produce delle onde armoniche di Rayleigh, P ed S la cui propagazione viene governate da un fattore di diffusione geometrica.

Questo fattore descrive l'attenuazione delle onde all'allontanarsi dalla sorgente energizzante e può essere stimato facendo delle specifiche considerazioni fisiche sui fronti d'onda.

L'applicazione di una sorgente puntiforme su di una superficie libera genera delle onde superficiali che si propagano con un fronte d'onda di tipo cilindrico oppure sferico, in funzione del tipo di onda, la cui legge di attenuazione energetica è governata da un rapporto inversamente proporzionale della distanza dalla sorgente "r":

$$A \propto \frac{1}{r^n} \tag{1.8}$$

con n:

- $n = \frac{1}{2}$ , per le onde di Rayleigh;
- n = 1 per le onde di volume nel mezzo;
- n = 2 per le onde P ed S, che corrono lungo la superficie;

Partendo dalla soluzione reale valida in un semispazio omogeneo elastico lineare isotropo, gli spostamenti risultanti dall'applicazione di una sorgente armonica puntiforme  $F_z \cdot e^{i\omega t}$  sono pari a:

$$u_z = F_z \frac{b_z}{\sqrt{r}} e^{i\left(\omega t - kr - \frac{\pi}{4}\right)} \tag{1.9}$$

$$u_r = F_z \frac{b_r}{\sqrt{r}} e^{i\left(\omega t - kr + \frac{\pi}{4}\right)} \tag{1.10}$$

dove  $u_z$  e  $u_r$  sono gli spostamenti verticali e radiali,  $b_z$  e  $b_r$  sono funzioni dei parametri meccanici del mezzo e k è il numero d'onda definito dalla seguente relazione:

$$k(\omega) = \frac{\omega}{V_R(\omega)} \tag{1.11}$$

Si specifica che queste formule sono valide in condizioni di campo lontano, ossia con distanza della sorgente r >  $\lambda$  (Foti,2000 [9]).

Focalizzando l'attenzione sugli spostamenti in direzione verticale e supponendo di valutarli in un semispazio questa volta viscoelastico lineare, si introduce all'equazione 1.9 un numero d'onda k complesso la cui velocità può essere sostituita da una velocità di fase nel dominio complesso che tenga conto dell'attenuazione.

$$K = k - i\alpha = \frac{\omega}{V_R(\omega)} - i\alpha(\omega) \tag{1.12}$$

dove  $\alpha(\omega)$  rappresenta l'attenuazione geometrica, il cui andamento in funzione della frequenza definisce la curva di attenuazione delle onde superficiali e  $V_R(\omega)$ rappresenta la velocità, dipendente dalla frequenza a causa della dispersività del materiale. Introdotto K nell'equazione 1.9 si possono separare ampiezza e fase dell'onda come segue:

$$u_z = F_z \frac{b_z}{\sqrt{r}} e^{-\alpha r} e^{i\left(\omega t - kr - \frac{\pi}{4}\right)}$$
(1.13)

dove la quantità  $\frac{e^{-\alpha r}}{\sqrt{r}}$  rappresenta l'effetto combinato del materiale e dell'attenuazione geometrica all'allontanarsi dalla sorgente.

Con questa formulazione nel dominio complesso della propagazione delle onde di Rayleigh è possibile stimare le curve di dispersione e le curve di attenuazione con specifiche metodologie presenti in letteratura.

# 2 Metodologie per la stima delle curve di dispersione e attenuazione delle onde di Rayleigh

Nel seguente capitolo vengono illustrati alcuni degli approcci matematici utilizzati nella geofisica per la stima accoppiata e disaccoppiata delle curve di dispersione e di attenuazione. Essi sono stati confrontati tra loro dopo un' attenta valutazione dei risultati ottenuti lungo alcuni stendimenti MASW del sito californiano in Garner Valley.

Gli approcci geofisici trattati in questa tesi sono:

- Transfer Function Method (TFM);
- Transfer Function Method with deconvolution (TFMD);
- Generalized Half Power Bandwidth Method (GHPB);
- WaveDec Method (Wavefront Decomposition WD);
- Frequency Domain Beam Forming Attenuation (FDBFa);

I sotto-capitoli presenti sono una guida iniziale per poter associare i diversi metodi utilizzati ai risultati ottenuti, riportati nei capitoli successivi.

#### 2.1 Transfer Function method

Introdotto in Rix et al, 2001 [23] il Transfer Function method (TFM) rappresenta una metodologia molto attendibile e concreta per la stima delle curve di dispersione e di attenuazione.

Il TFM si basa sull'analisi del moto delle particelle in un mezzo viscoelastico lineare nel dominio delle frequenze, nello specifico la funzione di trasferimento dello spostamento (Lai and Rix 1998 [18]).

Chiamata anche funzione di risposta in frequenza, la funzione di trasferimento permette di valutare il segnale in uscita rispetto a un segnale in ingresso nel dominio della frequenza (Oppenheim e Willsky 1997 [21]), e per tale motivo la sua definizione è rappresentata dal rapporto tra questi due segnali campionati (Figura 2.1).



Figura 2.1: Legame segnale di input e di output - Estratto da Foti,2000 [9]

In particolare, nelle analisi presenti in questa tesi, l'input sismico è rappresentato da un segnale sorgente (mazza battente o shaker), i ricevitori lungo lo stendimento MASW forniscono l'output e infine la funzione di trasferimento (system, Figura 2.1) trasporta tutte le informazioni necessarie per caratterizzare il sistema e può essere ottenuta scegliendo un modello di suolo coerente (deposito di terreno).

Ottenuta la funzione di trasferimento sperimentale con queste misurazioni ripetute per ogni ricevitore, viene utilizzata un'analisi di regressione accoppiata per stimare la velocità e l'attenuazione dell'ampiezza di fase delle onde di Raylegh prodotte.

Nello specifico sono noti gli spostamenti verticali  $U_z$  ad una certa distanza dalla sorgente "r" e ad una data frequenza  $\omega$  (Lai 1998 [18]).

Di seguito viene riportata una formulazione più compatta che governa gli spostamenti  $U_z$  nel dominio complesso di un mezzo viscoelastico lineare (v. eq. 1.9)

$$U_z(r,\omega) = F_z \cdot G(r,\omega)e^{i[\omega \cdot t - \Psi(r,\omega)]}$$
(2.1)

dove la  $F_z$  è la sorgente armonica e dinamica prodotta,  $G(r, \omega)$  rappresenta la legge di attenuazione geometrica e  $\Psi(r, \omega)$  è un angolo di fase a valori complessi.

Da questa equazione si può determinare la funzione di trasferimento dello spostamento, definita come rapporto spostamento - forzante in ingresso:

$$T(r,\omega) = \frac{U_z(r,\omega)}{F_z \cdot e^{i\omega t}} = G(r,\omega)e^{-i\cdot\Psi(r,\omega)}$$
(2.2)

Questa espressione non può essere utilizzata direttamente per il processo di regressione su dati sperimentali perché l'angolo di fase  $\Psi(r, \omega)$  dipende implicitamente dalla distanza sorgente-ricevitore.

Introducendo l'ipotesi che questo angolo di fase corrisponda ad un unico modo di propagarsi dell'onda, la sua dipendenza dalla distanza tra sorgente e ricevitore diventa lineare con un coefficiente complesso  $K(\omega)$  chiamato numero d'onda complesso (v. eq. 1.12).

Pertanto, la funzione di trasferimento dello spostamento diventa:

$$T(r,\omega) = \frac{U_z(r,\omega)}{F_z \cdot e^{i\omega t}} = G(r,\omega)e^{-i\cdot K(\omega)\cdot r}$$
(2.3)

esplicitata in funzione della distanza "r".

Inoltre, questo metodo tiene conto di una legge di diffusione geometrica nel

semispazio omogeneo pari a:

$$G(r,\omega) = \frac{b}{\sqrt{r}} \tag{2.4}$$

dove b è una costante ed r è la distanza dalla sorgente.

Infatti, questa funzione non è nota a priori in un mezzo eterogeneo e viene stimata attraverso una procedura iterativa che consiste nell' effettuare una prima iterazione considerando la legge di diffusione geometrica nel semispazio omogeneo.

In seguito, utilizzando il profilo di rigidezza a taglio risultante (Foti, 2000 [9]) si valuta la funzione  $G(r, \omega)$  e si ripete il processo.

In questo lavoro di tesi, per semplicità, non è stato impostato l'approccio iterativo e la stima delle curve di disperisione e di attenuazione si è basata sulla sola legge di attenuazione geometrica per mezzi omogenei.

Dato che l'equazione di propagazione è in campo complesso, il processo di regressione può essere sfruttato utilizzando un algoritmo ai minimi quadrati valido anche nello spazio dei numeri complessi.

La regressione si articola in più fasi. La procedura prevede la valutazione della componente di fase con una regressione lineare della fase che permette di stimare la curva di dispersione.



**Figura 2.2:** Esempio di regressione lineare per la stima delle velocità di fase dell'onda, stendimento SN14 - frequenza 13.23Hz

L'immagine di Figura 2.2 mostra un esempio di regressione lineare effettuata per una frequenza di 13.23 Hz.

Il risultato in questo caso sembra molto attendibile considerando l'andamento lineare che segue quasi perfettamente l'andamento dei dati sperimentali disponibili.

In seguito, l'ampiezza dell'onda, può essere studiata con una regressione non lineare che permette di restituire delle stime attendibili della curva di attenuazione a partire dall'analisi del decadimento spaziale dell'ampiezza in funzione della distanza dalla sorgente.

Il decadimento spaziale, infatti, è governato da una legge esponenziale con l'esponente proporzionale all'attenuazione del materiale  $\alpha_R$ .

Nello specifico, l'ampiezza in una data posizione del ricevitore r può essere scritta in termini di ampiezza in un punto di riferimento  $r_0$  come di seguito:

$$A(r) = A(r_0)e^{-\alpha_R(\omega)(r-r_0)}$$
(2.5)

dove  $\alpha_R$  è il coefficiente di attenuazione, r<sub>0</sub> ed r sono le distanze dalla sorgente sismica lungo una retta e A(r<sub>0</sub>) e A(r) sono le corrispondenti ampiezze d'onda di Rayleigh (Foti,2004 [11]). A questo punto, conoscendo i valori dell'ampiezza sperimentale nelle diverse posizioni dello stendimento, il coefficiente di attenuazione può essere ottenuto mediante un processo di regressione non lineare alle singole frequenze (esempio Figura 2.3)



Figura 2.3: Esempio di regressione non lineare per la stima delle ampiezze dell'onda, stendimento SN14 - frequenza 13.23Hz

Anche in questo caso la regressione non lineare presenta degli ottimi risultati.

Infine, si esegue una regressione con stima accoppiata dei punti, in cui le relazioni di dispersione e attenuazione devono essere soddisfatte contemporaneamente dal numero d'onda complesso che contiene tutte le informazioni necessarie(v.eq. 1.12).

Il fitting disaccoppiato di ampiezza e fase è stato utilizzato come punto di partenza per sviluppare il fitting accoppiato di attenuazione e velocità (basato su minimi quadrati non lineari in campo complesso, Foti 2004 [11]).

Infine, la regressione restituisce il numero d'onda complesso (v. equazione 1.12), da cui è possibile ottenere dalle sue componenti, reale e immaginaria, la velocità di fase e il coefficiente di attenuazione.

In conclusione, si può affermare che il metodo TFM rappresenta un valido approccio per la stima delle curve di dispersione e di attenuazione delle onde di Rayleigh, ma l'ipotesi di attendibilità del risultato è valida solo nel caso in cui ci sia un solo modo fondamentale di propagarsi dell'onda poichè la presenza di modi superiori potrebbe influenzare la qualità del risultato prodotto.

#### 2.2 Transfer Function method with deconvolution

Al metodo convenzionale della Transfer function si aggiunge una tipologia di approccio che prevede la deconvoluzione delle tracce (Foti-2003)[10].

Il metodo della Transfer Function con deconvoluzione presenta dei vantaggi significativi nella stima di fase e ampiezza quando i dati della sorgente non sono accessibili.

Infatti, la procedura consiste nel valutare la funzione di trasferimento sperimentale applicando il concetto di deconvoluzione ad un insieme di tracce sismiche (ricevitori), senza la necessità di utilizzare il dato relativo alla sorgente sismica. Per ovvie ragioni la procedura può essere ripetuta su qualsiasi ricevitore.

In analogia con il TFM, il metodo della funzione di trasferimento con deconvoluzione sfrutta lo spostamento verticale  $U_z(r, \omega)$  indotto da una sorgente armonica prodotta in superficie (v.eq.2.1).

La funzione di trasferimento, in questo caso, si può stimare come rapporto di  $U(\omega)$  tra i diversi ricevitori e quindi:

$$\tilde{F}(r,\omega) = \frac{U_z(r,\omega)}{U_{z1}(r,\omega)} = \frac{G(r,\omega)e^{-i\Psi(r,\omega)}}{G(r_1,\omega)e^{-i\Psi(r_1,\omega)}}$$
(2.6)

In questo particolare esempio il primo ricevitore rappresenta il segnale di riferimento.

Assumendo  $G(r, \omega) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$  (mezzo omogeneo), si ottiene:

$$F(r,\omega) = \frac{\sqrt{r_1}}{\sqrt{r}} e^{-iK(\omega)(r-r_1)}$$
(2.7)

Analogamente al TFM, usando i valori sperimentali della funzione di trasferimento è possibile stimare la curva di dispersione e con una regressione non lineare delle ampiezze dell'onda stimare la curva di attenuazione.

Tuttavia, anche questp metodo si basa sull'assunzione secondo cui il campo d'onda di Rayleigh è dominato da un unico modo di propagarsi. Resta meno attendibile il risultato quando l'effetto della sovrapposizione modale è rilevante. Inoltre, il metodo TFM può risentire delle incertezze relative all'accoppiamento fisico tra la sorgente e il terreno sottostante, introducendo delle possibili distorsioni di ampiezza difficili da valutare. Rispetto al metodo TFM semplice, la deconvoluzione delle tracce supera il problema legato all'interfaccia sorgente-terreno.

#### 2.3 Generalized Half Power Bandwidth method

Il metodo Half Power Bandwidth nasce nel campo della dinamica delle strutture con lo scopo di determinare il rapporto di smorzamento modale  $\xi$  di una struttura.

Tale metodo prevede di misurare l'ampiezza delle oscillazioni della struttura all'applicazione di una forzante armonica a frequenze crescenti.

Dall'ampiezza della banda nella risposta in frequenza della struttura è possibile determinare lo smorzamento modale  $\xi$ .

L' Half Power Bandwidth  $\Delta \omega$  è definita come la banda in cui l'ampiezza della funzione di risposta in frequenza è  $\gamma = 1/\sqrt{2}$  volte il valore di picco (Figura 2.4). Si dimostra che applicando questo fattore moltiplicativo si ottengono le corrispondenti frequenze  $f_{min}$  ed  $f_{max}$  che sono dette valori di half-power (Figura 2.4a))(Chopra 2007 [7]), da cui è possibile ottenere una stima attendibile dello smorzamento.



**Figura 2.4:** a) Funzione di risposta in frequenza Half Power Bandwidth method; b) la curva rappresenta lo spettro FK dell'onda di Rayleigh ad una certa frequenza (immagine estratta da Badsar,2011 [4])

In Figura 2.4 a) è rappresentata la funzione di risposta in frequenza per un sistema a un grado di libertà debolmente smorzato, il cui rapporto di smorzamento modale  $\xi$  vale:

$$\xi = \frac{\Delta\omega}{2\cdot\omega_{res}} \tag{2.8}$$

dove  $\omega_{res}$  è la frequenza di risonanza (Badsar et al-2010 [3]).

L' Half Power Bandwidth viene generalizzato con l'utilizzo di una larghezza di banda  $\Delta \omega$  valutata per un'ampiezza simile a quella del picco. Quindi il fattore moltiplicativo  $\gamma$  è circa pari a 1 ( $\gamma \approx 0, 99$ ).

Questa assunzione viene fatta perchè è possibile applicare il metodo anche a sistemi a più gradi di libertà che presentano una serie di picchi sul grafico di risposta in frequenza e dunque per evitare che questi interferiscano tra loro, è stata scelta questa metodologia che permette di isolare il problema. In questo modo, si possono distinguere in maniera più accurata i picchi legati ai diversi modi di vibrare e ottenere una stima accurata di smorzamento per ciascuno di essi.

Nell'analisi delle onde di Rayleigh, una volta individuato il picco dello spettro F-K corrispondente al modo in esame (Fig. 2.4), si può stimare il corrispondente coefficiente di attenuazione come:

$$\alpha(\omega) = \frac{\Delta k_r(\omega)}{2 \cdot \sqrt{\gamma^{-2} - 1}} \tag{2.9}$$

e facilmente ci si riconduce alle formule iniziali ponendo il fattore moltiplicativo  $\gamma = 1/\sqrt{2}$  (Badsar et al-2010 [3]).

Questo metodo permette di stimare con più accuratezza la curva di attenuazione per casi in cui ci siano più modi di propagarsi dell'onda di Rayleigh e non solo il modo fondamentale.

Inoltre, il metodo stima lo spettro F-K effettuando una trasformazione di Hankel che permette di considerare la simmetria cilindrica del campo d'onda (Forbriger 2003a [8]).

In Badsar et al-2010 [3] il confronto fatto con altri metodi di processamento dati ha evidenziato la differenza in termini di qualità di risultati confermando le aspettative creatisi in fase di sperimentazione del metodo.

Tuttavia, il GHPB può presentare delle criticità nella stima delle curve di attenuazione.

Infatti, il metodo sembra lavorare molto bene alle medio-alte frequenze, restituendo in maniera ottimale i punti sperimentali relative alle curve di attenuazione, ma alle basse frequenze l'attendibilità del risultato si riduce.

Questa particolarità si è verificata anche durante le analisi condotte per gli stendimenti studiati.

#### 2.4 WaveDec method

L'acronimo WaveDec sta per Wavefront Decomposition (Maranò et al [19]).

Il metodo inizialmente era stato ideato per misurazioni di tipo passivo ma è stato esteso per misurazioni attive (Bergamo-WorkshopAquila [5]).

Il metodo studia la propagazione delle onde di Rayleigh e tenendo conto della curvatura del fronte d'onda permette di eliminare il problema geometrico delle distanze sorgenti-ricevitori.

Infatti, la particolarità del metodo sta nel superamento delle tecniche tradizionali che ritengono necessaria una certa lontananza dai geofoni per evitare gli effetti di campo vicino (Foti,2000 [9]) ed ottenere una stima ottimale dello sviluppo delle onde sismiche di Rayleigh.

Tale approccio si basa sullo studio del campo di spostamento dovuta a una sorgente puntiforme e ad una singola forza in direzione verticale.

Sia  $p_s$  la posizione della sorgente, quindi  $r = p - p_s$  è la distanza tra una posizione arbitraria "p" e la sorgente.

L'approccio tiene conto dello spostamento spettrale a tre componenti nella posizione p, indotto da una singola onda di Rayleigh:

$$\widetilde{u}_x(\omega, p) = -\sin\xi \cos\Psi H_1^2(\kappa r)s(\omega)$$
(2.10)

$$\widetilde{u}_y(\omega, p) = -\sin\xi \sin\Psi H_1^2(\kappa r) s(\omega)$$
(2.11)

$$\widetilde{u}_z(\omega, p) = \cos\xi H_0^2(\kappa r) s(\omega), \qquad (2.12)$$

valide per  $\omega > 0$ ,  $\xi$  è l'angolo di ellitticità dell'onda di Rayleigh,  $\Psi$  è l'angolo azimutale formato dal vettore r = p - p<sub>s</sub> e misurato in senso antiorario dall'asse x,  $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$  è il numero d'onda, e  $\lambda$  è la lunghezza d'onda.

Con  $H_v^2$  si indicano le funzioni di Hankel del secondo ordine v (Abramowitz, 1964[1]), mentre la quantità  $s(\omega)$  è lo spettro della funzione applicata alla sorgente.

Le funzioni di Hankel permettono di modellare la dipendenza dello spostamento indotto dalle onde di Rayleigh in funzione della distanza sensore-sorgente r. Queste funzioni tengono conto della cilindricità del fronte d'onda e governano l'influenza geometrica restituendo ottimi risultati sia per sorgenti lontane che vicine allo stendimento.

Come discusso nel capitolo 1 l'ampiezza del movimento delle particelle diminuisce all'aumentare della profondità evidenziando un' influenza maggiormente marcata nelle zone più superficiali del semispazio omogeno.

In Figura 2.5 (da Maranò et al - WaveDec [19]), viene mostrata l'interpretazione geometrica di  $\xi$  che rappresenta l'angolo di ellitticità dell'onda di Rayleigh, dove H e V sono definite rispettivamente come componenti orizzontali e verticali dell'ampiezza dell' onda.



Figura 2.5: Estratto da Marano et al 2017 [19]

Il metodo ottiene buoni risultati nella stima delle curve di dispersione e sostituendo  $\kappa = \mathbf{k} - \mathbf{i}\alpha$  alle equazioni (v. eq. 2.10, 2.11, 2.12) è possibile stimare anche l'ampiezza dell'attenuazione.

La stima dei parametri d'onda  $\theta$  (contenente k e  $\alpha$ ) fa riferimento ad una funzione di *"Massima Verosimiglianza"* che sfrutta sia il parametro  $\theta$  che y.

$$p_Y(y|\theta) = \prod_{l=1}^{L} \prod_{k=1}^{K} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_l^2)}} e^{-\frac{[y_k^{(l)} - u(p_l, t_k)]^2}{2\sigma_l^2}}$$
(2.13)
dove y rappresenta i dati misurati,  $\theta$  rappresenta il parametro che contiene informazioni sull'onda (ossia k e  $\alpha$ ), L rappresenta il numero di canali (ricevitori) disponibili, K il tempo di campionamento,  $y_k$  e u $(p_l, t_k)$  spostamento osservato/simulato dove  $p_l$  rappresenta la posizione dei diversi canali e ancora  $\sigma_l^2$  rappresenta la varianza del rumore nel segnale.

Il metodo prevede di trovare  $\theta$  che massimizza  $p_Y(y|\theta)$ .

Questa funzione viene poi affiancata ad uno specifico modello grafico chiamato Grafico Fattoriale che permette di rappresentare al meglio la funzione Densità di Probabilità.

Sulla base delle assunzioni fatte, questo approccio restituisce ottimi risultati in termini di curva di dispersione e di attenuazione.

Le curve ottenute rappresentano un risultato molto incoraggiante sia per il modo fondamentale di propagazione dell'onda che per i modi di propagazione superiori. Inoltre, i risultati ottenuti alle basse frequenze evidenziano l'efficienza del metodo nel ridurre notevolmente l'influenza di possibili effetti di campo vicino.

# 2.5 Frequency-domain Beam Forming Attenuation (FDB-Fa)

Il beam-forming è una tecnica di filtraggio spaziale utilizzata in un'ampia varietà di campi e applicazioni, come comunicazione wireless, imaging ecografico, sismologia, che determina le capacità di cattura del segnale dei ricevitori in una particolare direzione di trasmissione del segnale (Johnson e Dudgeon, 1993 [15]).

In campo sismico è anche utilizzato in prove di indagine geofisica per la stima delle curve di dispersione.

D'altra parte, è stata implementata una generalizzazione di tale tecnica per la derivazione delle curve di attenuazione. Le seguenti sezioni illustrano i dettagli delle due tecniche.

#### 2.5.1 Stima delle curve di dispersione con FDBF

Il metodo FDBF stima la velocità di fase  $V(\omega)$  per ogni frequenza calcolando la seguente quantità:

$$P(\omega, u) = \int_{-\infty}^{+\infty} |S(\omega)|^2 |B(k - k_0)|^2 d\omega$$
 (2.14)

dove  $S(\omega)$  è la trasformata di Fourier del segnale registrato.

La funzione B(k) è chiamata funzione di risposta (o beam pattern). Essa non dipende dal segnale stesso, ma solo dalla distanza  $r_i$  delle stazioni e dal numero d'onda assunto k.

La funzione beam pattern è definita nel seguente modo:

$$B(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} e^{jr_i k}$$
(2.15)

Questa è una funzione complessa e periodica. In aggiunta, la funzione di risposta beam pattern è utile per la gestione del problema di aliasing spaziale. Infatti la funzione B(k) è uguale a 1, quando:

- $\mathbf{k} = 0;$
- $\mathbf{k} = \mathbf{k}_{Nyq};$

Per tale motivo, quando la funzione di beam assume valore unitario è possibile ricavare la stima precise del valore di  $k_{Nyq}$ .

Nel caso specifico di configurazione lineare 1-D con spaziatura equidistante, la funzione di risposta beam pattern sarà periodica nella sua componente x con una periodicità  $K_{Nyq}$  pari a:

$$K_{Nyq} = \frac{2\pi}{\Delta x} \tag{2.16}$$

Questa espressione coincide con la formula di Nyquist-Shannon (Foti,2000 [9]).

Nelle applicazioni pratiche, il beamformer convenzionale nel dominio della frequenza (FDBF), calcola la potenza come:

$$P_{FDBF}(k,f) = e^{H}(k)R(\omega)e(k)$$
(2.17)

L'equazione è la rappresentazione discreta dell' equazione 2.14.

Il termine  $R(\omega)$  rappresenta la matrice di correlazione spazio spettrale del segnale, che contiene per ogni frequenza le informazioni sulle proprietà spaziali del campo d'onda.

Per ricavarla, i dati di ogni singolo stendimento vengono registrati nel dominio del tempo, ottenendo un vettore dati x(n) per ogni sensore. Tale vettore ha lunghezza N e viene diviso in B numero di blocchi di lunghezza L = N/B. In questo modo, si può stimare la matrice spazio-spettrale per ogni frequenza

 $\omega$ usando il metodo di Bartlett (Zywicky 1999 [31]):

$$R_{i,j}(\omega) = \frac{1}{B} \sum_{n=1}^{B} S_{i,n}(\omega) S_{j,n}^{*}(\omega)$$
(2.18)

dove  $R_{i,j}(\omega)$  è lo spettro di potenza tra i-esimo e j-esimo sensore,  $S_{i,n}(\omega) =$  gli spettri di Fourier dei dati del sensore i-esimo nel blocco n-esimo, e \* indica l'operatore complesso coniugato.

Nell'equazione 2.17 compare il vettore e(k) che si calcola come:

$$e(k) = [exp(-jk \cdot x_1), exp(-jk \cdot x_2), ..., exp(-jk \cdot x_N)]^T$$
(2.19)

Questo rappresenta il vettore di sfasamento esponenziale associato a un numero d'onda di tentativo k, e  $x_i$  rappresenta la distanza dell'i-esimo ricevitore dalla sorgente.

Il vettore di sfasamento cerca di governare onde piane che si propagano lungo una direzione con una certa velocità di fase e permette di individuare diversi picchi nella stima dello spettro f-k.

Il termine H invece, indica la trasposizione Hermitiana.

In alternativa a e(k), si può utilizzare un vettore associato al fronte d'onda cilindrico h(k), al fine di ridurre gli effetti di campo vicino dovuti a fronti d'onda non planari (Zywicky 1999 [31]):

$$h(k) = exp\left(-j[\phi(H_0^{(2)}(k \cdot x_1)), \phi(H_0^{(2)}(k \cdot x_2)), \dots \phi(H_0^{(2)}(k \cdot x_N))]^T\right) \quad (2.20)$$

dove  $\phi$  è l'angolo di fase e  ${\rm H}_0^{(2)}$ rappresenta la funzione di Hankel.

L'equazione 2.17 permette di valutare uno spettro f-k, dai cui picchi si individua per ogni frequenza la velocità di fase per la stima della curva di dispersione.

Un esempio è riportato in Figura 2.6, dove lo spettro F-K è caratterizzato da un picco singolo, per cui l'onda presenta un singolo modo dominante.

I picchi secondari, se presenti, possono rappresentare altri modi di vibrare dell'onda di Rayleigh.



**Figura 2.6:** Esempio di spettro F-K ottenuto con metodo Frequency Domain Beam Forming (FDBF)

Dal numero d'onda k dell'energia dell'onda di propagazione dominante con frequenza f, si può determinare la velocità di fase attraverso la seguente relazione:

$$V_r = \lambda_r \cdot f = \frac{2\pi f}{k} \tag{2.21}$$

dove $\lambda_r$ rappresenta la lunghezza d'onda.

Determinata la velocità di fase frequenza per frequenza, si ottiene la curva di dispersione.

### 2.5.2 Frequency-domain Beam Forming Attenuation (FDBFa)

Per quanto riguarda la stima della curva di attenuazione, è stata utilizzata una nuova metodologia, detta Frequency Domain Beam Former Attenuation (FDBFa) (comunicazioni personali Aimar [2]).

Questo approccio sfrutta l'applicazione di una trasformazione T al fronte d'onda, in cui la stima dell'attenuazione può essere derivata applicando un'analisi di dispersione al campo d'onda ottenuto.

La trasformazione T introdotta, consiste nell'applicazione di una potenza con esponente uguale all'unità immaginaria.

$$T(\bullet) = [\bullet]^i \tag{2.22}$$

Se applicato al campo d'onda, si ottiene una funzione:

$$V(r,\omega) = T[U(r,\omega)] = U^{i}(r,\omega)$$
(2.23)

funzione dello spazio e della frequenza che può essere vista come un'onda piana in cui  $\alpha$  corrisponde al numero d'onda, mentre k controlla la variazione in ampiezza dello spostamento delle particelle.

Pertanto, per stimare la vera attenuazione del campo d'onda, si può applicare il metodo FDBF (Frequency domain Beam Forming) per ridefinire il numero d'onda sullo pseudo campo d'onda V.

La metodologia trattata fornisce solo una stima del coefficiente di attenuazione mentre la velocità di fase deve essere calcolata separatamente.

Questo significa che l'approccio si basa su una stima disaccoppiata delle caratteristiche di dispersione e attenuazione del campo d'onda.

D'altra parte, non ci sono ambiguità nell'associazione delle stime di velocità e di attenuazione poiché come ipotesi si assume un singolo modo di propagazione dell'onda.

## 3 Garner Valley Down Hole Array (GVDA)

Garner Valley DownHole Array è un sito che si trova nella California meridionale a 500 metri dal lago Hemet in una piccola valle all'interno della Peninsular Ranges Batholith e dista 115 km a nord-est da San Diego, 150 km a sud-est di Los Angeles, 7 km a est della faglia di San Jacinto e 35 km a ovest della faglia di San Andreas (Fig. 3.1, 3.2).



Figura 3.1: Garner Valley Down Hole Array, immagine da Google maps [33]



Figura 3.2: Garner Valley Down Hole Array, immagine da Google maps [33]

Il sito è situato in prossimità di numerose faglie attive e caratteristiche geologiche del sito suggeriscono presenza di terreno alluvionale a bassa densità con falda freatica prossima alla superficie, che varia di qualche metro a seconda della stagione e dal numero di precipitazioni totali.

Infatti, negli anni più piovosi la falda freatica è appena sotto la superficie nei mesi invernali e primaverili. Mentre nei mesi estivi e autunnali, o tendenzialmente in annate poco piovose, la falda freatica scende da 1 a 3 metri sotto la superficie.

Infine, la valle presenta il substrato roccioso a 88 metri di profondità.

GVDA fa parte di una regione sismicamente attiva della California e negli anni è diventato un polo di ricerca sulla caratterizzazione sismica ospitando numerosi sondaggi geognostici/perforazioni e studi sul comportamento del terreno. Già dal 1989 il sito GVDA anno dopo anno è stato attrezzato con diversi strumenti utili per la ricerca.

- Accelerometri di superficie posizionati lungo uno stendimento lineare lungo la valle;
- Accelerometri downhole (da 6 m fino a 500 m in profondità nel sottosuolo);
- Sensori di pressione interstiziale;
- Sensori di pressione dell'acqua per pozzi profondi;
- Sensori barometrici, di profondità della falda e vari sensori meteorologici;

Grazie a questi strumenti installati, con il verificarsi di eventi locali, regionali e persino telesismici, è possibile catturare tutti i movimenti che avvengono nel sottosuolo.

Inoltre, è stata costruita una struttura a un solo piano per monitorare la risposta dinamica in seguito ad eventi sismici (Soil foundation structure interaction, SFSI). In aggiunta, a circa 3 km di distanza dal sito, più ai margini della valle, sono installati altri sensori direttamente sull'affioramento del substrato roccioso esposto per registrarne i movimenti.

In Figura 3.3 è riportata una mappa con i sensori installati in sito e in Figura 3.4 viene riportato un estratto stratigrafico individuato con le indagini svolte.



**Garner Valley Downhole Array** 

Figura 3.3: Planimetria delle posizioni degli accelerometri e sensori di pressione posti sul sito di GVDA; (NEES@UCSB - The Earthquake Engineering Group, Earth Research Institute at UCSB)

### **Garner Valley Downhole Array (GVDA)**





I risultati delle indagini evidenziato una stratigrafia del sottosuolo piuttosto lineare:

- Uno strato superficiale di sabbia limosa di circa 2 m di profondità;
- Uno strato più profondo di circa 4 m di limo sabbioso con presenza di materiali argillosi;
- Da 6 m a 12 m dalla superficie la stratigrafia mostra materiali sabbiosi con transizioni di tipo limo-sabbiosi;
- Uno strato di sabbia con elementi di tipo limosi;
- Più in profondità uno strato di Granito decomposto fino ad una profondità di circa 88 m.

### 3.1 Indagini precedentemente condotte in sito

Il sito GVDA durante gli anni è stato luogo di numerose indagini che hanno rivelato il quadro geologico generale del terreno sottostante.

Tra le prime indagini effettuate nel sito di Garner Valley, le Down-Hole hanno rappresentato un punto di riferimento importante per valutare la caratterizzazione sismica del sito.

Di seguito in Figura 3.6 sono riportati i risultati delle prime indagini condotte in sito e in Figura 3.5 la planimetria dei punti di indagine sul sito di GVDA.



**Figura 3.5:** Planimetria punti di indagine nel sito di GVDA (estratto da report R.Steller [26])





Figura 3.6: Andamento delle velocità di taglio  $V_s \in V_p$  di una indagine Down-Hole con posizione dei sensori a diverse profondità (estratto da report R.Steller [26])

L'indagine Down-Hole svolta lungo il pozzo trivellato mostra chiaramente le variazioni di velocità delle onde di taglio  $V_s$  al variare della profondità. Questo permette di identificare le interfacce stratigrafiche presenti nel sito. In superficie i primi 3 metri di profondità presentano rigidezza maggiore rispetto al materiale più in profondità, con velocità di circa 400-500 m/s. Tuttavia, l'esito delle indagini mostrano una variazione lineare delle velocità delle onde di taglio con la profondità, ed in particolare da 20 m fino a 50 m (limite massimo di risoluzione per queste prove) si raggiunge la velocità di 500 m/s evidenziando una rigidezza maggiore del materiale dovuta alla decomposizione granitica del sottosuolo.

In Figura 3.7 è riportato il risultato di alcune prove passive SWM effettuate nel sito di GVDA nei primi anni 2000, condotte con una configurazione triangolare di 10 geofoni a distanza media di 49 m.

Queste indagini hanno restituito l'andamento delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  fino ad una profondità di 300 m (Hsi-Ping Liu et al [13]).



(a) Posizione prova passiva SWM



Figura 3.7: a) Posizione prova passiva SWM condotta sul sito di GVDA; stendimento triangolare in figura con 10 geofoni a distanza media di 49 m; b) Andamento delle velocità di taglio  $V_s$  con breve descrizione geologica associata, estratto da Hsi-Ping Liu et al [13]

L'esito dell'indagine superficiale dà indicazioni su un range di variazione

delle velocità che si attestano intorno ai 200 m/s corrispondenti ad uno strato di circa 5-6 m di sabbia limosa con una transizione a velocità di circa 300 m/s corrispondenti ad elementi ghiaiosi dai 18 m ai 25 m. Inoltre, al di sotto dei 25 m le velocità aumentano fino a valori di 500-600 m/s in cui la rigidezza del materiale aumenta in maniera significativa a causa della presenza di granito decomposto che si estende fino a circa 90 m di profondità.

Dai 90 m in poi la velocità  $V_s$  raggiunge i 1200 m/s fino a velocità di 3000 m/s a profondità di 220 m.

Con il passare degli anni, l'esecuzione di perforazioni a profondità elevate (150 m, 300 m, 500 m) e numerosi carotaggi ha permesso di confrontare i risultati ottenuti dalle indagini sulle onde superficiali.

In Figura 3.8 riportata di seguito, vengono mostrati i risultati di varie indagini a medio-grandi profondità condotte nel sito.



**Figura 3.8:** Risultati di Down-Hole, PS suspension logging e SASW condotte sul sito GVDA (estratto Teague et al. [28])

Tutti i profili di velocità delle onde di taglio  $V_s$  indicano una transizione da materiali a bassa rigidezza con velocità di circa 180-270 m/s a velocità più alte (circa 500-600 m/s) nell'intorno dei 18-25 m di profondità in corrispondenza di variazioni di rigidezza dell'interfaccia stratigrafica (Teague et al. [28]). Il terreno più in superficie indica la presenza di materiale di tipo limo-sabbioso con transizioni di tipo granitico dai 25 metri fino a 88-90 m di profondità. Le indagini di tipo superficiale (SASW) evidenziano una variabilità marcata delle velocità negli strati superficiali, dovuta probabilmente a presenza di eterogeneità del sito.

Di recente, Teague et al [28] hanno condotto una serie di prove non invasive nel sito GVDA.

In Figura 3.9 sono riportati gli stendimenti sviluppati nel sito di GVDA (Teague et al. [28]):



**Figura 3.9:** Configurazione stendimenti masw lineari(attivi), circolari(prove passive),(estratto Teague et al. [28])

L'esito delle inversioni prodotte sono riportate di seguito in Figura 3.10:



**Figura 3.10:** Inversione delle velocità di taglio ottenuta con parametrizzazione layering ratio=3.5, estratto Teague et al. [28]

L'inversione ottenuta in Teague et al. [28] è stata ottenuta con una tecnica di parametrizzazione stratigrafica basata su un coefficiente chiamato Layering ratio (Brady R. Cox and David P. Teague [6]).

Anche in questo caso l'andamento delle inversioni prodotte si allinea con l'esito dei risultati prodotti in indagini pregresse.

In aggiunta, viene mostrato in Figura 3.11 il confronto dei risultati di inversioni di alcune prove di tipo invasivo e non invasivo condotte nel sito di GVDA:



**Figura 3.11:** Profili di velocità delle onde di taglio (Vs) invasivi e non invasivi per il sito GVDA, posizioni dei sei sensori utilizzati per la downhole (00-05), di fianco è indicata la rappresentazione della geologia del sito che illustra gli spessori approssimativi di depositi alluvionali e di granito decomposto (DG) che si sovrappone al granito competente (GRNT) a 90 m di profondità. I profili Vs includono quelli misurati utilizzando downhole (DH) e registrazione delle sospensioni P e S (PS). I profili associati a prove non invasive includono sei parametrizzazioni ottenute con Layering ratio di cui vengono rappresentati i profili medi (estratto J.P. Vantassel & B.R. Cox [29])

## 4 Elaborazione dati

## 4.1 Acquisizione dei dati sul campo

Le prove MASW presso il sito GVDA sono state effettuate su 14 stendimenti in due direzioni tra loro perpendicolari (Figura 4.1).

L'indagine MASW è stata svolta impiegando due diverse tipologie di sorgente:

- Uno Shaker, di cui si danno i dettagli nel paragrafo 4.1.1;
- Una Mazza battente;



**Figura 4.1:** Stendimenti MASW - Garner Valley Down Hole (GVDA); Sono evidenziate le posizioni delle diverse sorgenti e dei ricevitori.

### 4.1.1 Sorgente energizzante di tipo Shaker

Lo Shaker utilizzato per le prove MASW eseguite su GVDA è uno specifico modello chiamato Thumper, montato su di un camion di modello International 4300 (Figura 4.2).



**Figura 4.2:** Shaker di tipo Thumper (foto da Nees,UT Austin Experimental Facility)

Lo shaker di tipo Thumper è uno scuotitore di media forza energizzante molto utile per eseguire test in aree urbane.

Come mostrato in Figura 4.3, la forza massima di uscita è di circa 27 kN sia in fase di scuotimento verticale che orizzontale, che è raggiunta a frequenze comprese tra 17 - 200 Hz.



Figura 4.3: Massima Forza verticale/orizzontale sviluppabile dallo shaker
Thumper, disponibile nell' UT Austin Exp. Facil., in funzione della frequenza
Thumper, foto da Nees, UT Austin Experimental Facility

Da un punto di vista pratico, in Figura 4.3 è rappresentato il contenuto massimo in frequenza, ma in sito è possibile applicare anche forze minori e non necessariamente costanti con la frequenza.

In questo caso si è utilizzato un range in frequenza del segnale di input che va da una frequenza minima di 5 Hz ad un massimo di 30 Hz.

Nello specifico, il segnale adottato per queste prove è di tipo "chirp" (Figura 4.4) (Kallivokas et al [16]):

$$f(t) = \sin\left(2\pi\left(f_0 + \frac{\beta t}{2}\right)t\right) \tag{4.1}$$

dove  $f_0$  è la frequenza di partenza,  $\beta$  è un parametro dipendente dal range in frequenza ( $f_{max}$  -  $f_{min}$ ) e t, pari a 12 s, rappresenta la durata del segnale nel tempo.

Nel segnale, la frequenza iniziale può essere limitata in base alla frequenza risonante del geofono e  $\beta$  può essere determinato dal rapporto tra la banda in frequenza desiderata e la durata totale del segnale.

Nel nostro caso, la banda in frequenza dominante è compresa tra i 5 Hz e 30 Hz, riportati in Figura 4.4:



**Figura 4.4:** Segnale di tipo "chirp", con banda dominante 5-30 Hz: a)Timehistory b) Spettro di Fourier

In Figura 4.4 b) è riportato lo spettro di frequenza ottenuto applicando la trasformata di Fourier per passare dal dominio del tempo a quello in frequenza, in cui è evidente la componente concentrata nell'intervallo 5-30 Hz.

Di seguito in Figura 4.5 è riportato il contenuto in frequenza della forzante effettivamente applicata dal Thumper in un punto di battuta. Questo è qualitativamente differente dall'andamento teorico in 4.4 b). Infatti, il contributo vibrazionale della sorgente viene misurato direttamente sulla piastra di carico opportunamente disposta in sito e inevitabilmente si discosterà rispetto al segnale teorico.



Figura 4.5: Contenuto in Frequenza della forzante trasmessa dal Thumper, misurato sulla piastra di carico.

Si evince comunque che il carico applicato rientra principalmente nell'intervallo di frequenza di progetto, ad eccezione del rumore ad alta frequenza che probabilmente ha origine dagli effetti di interazione piastra-veicolo-terreno.

#### 4.1.2 Sistema di acquisizione

Per registrare il segnale emesso dallo scuotitore o dalla mazza battente, sono stati utilizzati dei geofoni posizionati sul terreno.

I sensori in questione sono i FairfieldNodal ZLand 3C.

Riportati in Figura 4.6, sono dei sensori e registratori di dati compatti con un alimentatore autonomo ed acquisiscono l'onda in maniera indipendente archiviandola in un'unità di memoria presente all'interno.

Solo a valle dell'indagine, è possibile scaricare tutti i dati registrati da ogni singolo geofono. Inoltre, i sensori presentano un collegamento satellitare al fine di geolocalizzarli.



Figura 4.6: FairfieldNodal ZLand3C, estratto da InstrumentationCenter IRIS PASSCAL

Questi particolari geofoni permettono di campionare il segnale proveniente dalla propagazione delle onde superficiali secondo specifiche caratteristiche:

- Datalogger che converte il segnale di input con una frequenza d'angolo di 5Hz e un ADC(Analog Digital Converter) a 24 bit.
- Alimentazione a batteria a ioni di litio con una durata di circa 35 giorni a registrazione continua.
- Dimensioni fisiche: 16,3 cm x 11,7 cm con ulteriore punta centrale da 11,7 cm.
- Peso: 2,8 kg.

- Frequenza di campionamento: 250, 500, 1000 o 2000 cps.
- Capacità di archiviazione: 32 GB.

In Figura 4.7 viene riportata la funzione di calibrazione dei sensori utilizzati, con frequenza naturale 40 Hz:



**Figura 4.7:** Funzione di calibrazione sensore FairfieldNodal ZLand 3C. I grafici riportano frequenza sull'asse delle ascisse, sensitività e fase sulle ordinate

### 4.1.3 Descrizione degli stendimenti MASW

Gli stendimenti MASW bidimensionali realizzati nel sito di Garner Valley (Fig.4.1 e Fig. 4.8) sono stati sviluppati per definire un modello tridimensionale del sottosuolo indagato, e ricostruire in dettaglio le interfacce stratigrafiche presenti.

Ciascuno stendimento 2D realizzato in sito presenta una maglia di 14 geofoni lungo le due direzioni con un interasse di 5 m tra un sensore e l'altro e questo ha permesso di raggiungere una lunghezza di circa 65 m dello stendimento.

Inoltre, i sensori posti lungo gli stendimenti sono stati sepolti nel terreno per evitare che vibrazioni e rumori ambientali disturbassero il dato proveniente dalla sorgente (Foti et al., 2018 [12]).

Negli stendimenti che verranno trattati successivamente nel capitolo, il segnale sismico di tipo Thumper (Fig.4.2) è stato generato solo in alcune posizioni in sito, a causa delle dimensioni notevoli dell'energizzatore e degli spazi disponibili.

A tal proposito, è stato selezionato uno degli stendimenti che presentassero più punti energizzanti possibili.



**Figura 4.8:** Stendimenti MASW effettuati nel sito di GVDA. In rosso è evidenziato il sistema di riferimento locale, centrato nel primo ricevitore in basso a sinistra, che è usato in Fig. 4.9, 4.10, 4.11

In Figura 4.9 sono riportati tutti i punti di applicazione dello shaker.



**Figura 4.9:** Posizione dei ricevitori e punti di energizzazione tramite Shaker; Il sistema di riferimento locale è centrato nel primo ricevitore in basso a sinistra in Fig. 4.8.

Gli stessi stendimenti MASW sono stati energizzati con una mazza battente da 10 Kg. I relativi punti di energizzazione sono posizionati a 5 e a 15 metri dall'ultimo ricevitore, sia da un lato dello stendimento che dall'altro (Fig. 4.10).



Figura 4.10: Posizione dei ricevitori e punti di energizzazione tramite Mazza battente; Il sistema di riferimento locale è centrato nel primo ricevitore in basso a sinistra in Fig. 4.8.

Infine, si precisa che oltre agli stendimenti riportati in Figura 4.9 e 4.10, sono stati realizzati alcuni stendimenti con interspazio irregolare tra i sensori (Figura 4.11).

Alcuni di questi dati sono stati mediati con i risultati ottenuti, per ottenere un andamento più attendibile e robusto dei punti sperimentali (v. capitolo 5.5).



**Figura 4.11:** Posizione dei ricevitori e punti di energizzazione tramite Shaker per gli stendimenti a spaziatura irregolare.

### 4.2 Stendimento analizzato

Nel capitolo vengono mostrate le curve di dispersione e di attenuazione ottenute con le diverse metodologie trattate nel capitolo 2, le quali sono in seguito confrontate.

I dati processati con i vari metodi sono stati corretti e puliti al fine di scartare eventuali punti sperimentali poco attendibili. Questi possono essere dovuti a disturbi del segnale campionato, a problemi nella stima del dato che inducono variazioni repentine di velocità di fase o di attenuazione, oppure a possibili effetti di campo vicino e di aliasing del segnale.

Dopo un'attenta valutazione degli stendimenti e dei punti di battuta ad essi associati, è stato scelto di proseguire le analisi lungo lo stendimento SN14 (Fig 4.13 e 4.15).

Inoltre, si precisa che in fase di selezione dello stendimento da analizzare, l'esito di alcune prove H/V condotte per individuare la frequenza fondamentale del sito, ha fornito un notevole supporto per la scelta definitiva dello stendimento SN14 (Stokoe et al. [27]).

In Figura 4.12 sono riportati i valori della frequenza fondamentale del sito GV-DA.

Si nota chiaramente come in corrispondenza dello stendimento SN14 la frequenza fondamentale del sito si attesti indicativamente su 1.8/1.9 Hz, a differenza degli altri stendimenti che presentano maggiore variabilità lungo l'array. Nel complesso, questo aspetto ha rappresentato un ulteriore vantaggio nella scelta effettuata sullo stendimento da analizzare, in quanto fornisce un' indicazione sulla limitata variabilità laterale che si trova lungo di esso.



Figura 4.12: Stendimenti bidimensionali nel sito di GVDA, in cui ogni ricevitore è colorato in funzione della frequenza fondamentale del sito ( $f_0$ ) ottenuta con misurazioni H/V (immagine estratta da Stokoe et al. [27])

Lo stendimento SN14 è caratterizzato da 14 sensori, posizionati in sito con un interspazio di 5 m. In esso, il dato sperimentale è stato acquisito sia con sorgente vibrante (Shaker) che con una sorgente impulsiva (Mazza battente). Il segnale emesso dalla sorgente tramite Shaker è stato applicato in 2 diversi punti da entrambi i lati dello stendimento.



**Figura 4.13:** Stendimento SN14 (MASW), con posizioni della sorgente vibrante. Sono presenti 2 punti di applicazione con offset 4.5m e 35.5m lato strada, 2.5m e 33.5m lato parcheggio.

I punti di battuta dal lato strada distano dal primo ricevitore rispettivamente 4.5 m e 35.5 m, mentre i punti di battuta energizzati dal lato parcheggio distano rispettivamente 2.5 m e 33.5 m dall'ultimo sensore lungo lo stendimento.

Per ogni punto di battuta effettuato con shaker ("Shot points") sono state eseguite una serie di energizzazioni ("Stacks") di cui viene riportato un esempio di sismogramma, in questo caso riferito allo Shot n°4 - Stack 1 lato parcheggio:



**Figura 4.14:** Sismogramma per lo stendimento SN14, Shot point n°4 - Stack 1, con distanza 4.5 m dal primo ricevitore; La traccia del segnale sorgente è riportata in corrispondenza dell'offset 0.

Per lo stendimento SN14 sono state effettuate anche misurazioni con energizzazione tramite mazza battente.

La Figura 4.15 mostra lo stendimento MASW in esame, evidenziando i punti di battuta con mazza battente posizionati rispettivamente a 5 m e a 15 m da entrambi i lati dello stendimento:



Figura 4.15: Stendimento SN14 (MASW), con posizioni della sorgente impulsiva. Sono presenti 2 punti di applicazione a 5m e 15m da entrambi i lati dello stendimento

Anche in questo caso, per ogni punto di battuta con mazza battente ("Shot points") sono state eseguite una serie di energizzazioni ("Stacks"). Viene riportato un esempio di sismogramma in questo caso riferito allo Shot point 2 - Stack 2:



Figura 4.16: Sismogramma per lo stendimento SN14, Shot point 2 - Stack 2, con distanza 15 m dal primo ricevitore. La traccia del segnale sorgente è riportata in corrispondenza dell'offset 0.

Lo stendimento SN14 è quello che ha restituito i risultati migliori per quasi ogni tipologia di metodo utilizzato per la stima della curva di dispersione e di attenuazione.

Tale stendimento è stato anche oggetto di studio nel processo di inversione nel capitolo 5, per la stima dei profili delle velocità di taglio e del rapporto di smorzamento.
## 4.2.1 Stima delle curve di dispersione e di attenuazione: interpretazione dei dati ottenuti dallo Shaker

In questa sezione si riportano i principali risultati ottenuti con i metodi in esame cioè FDBFa, WD, GHPB, TFM. Quest'ultimo metodo è trattato in una sezione a parte, in quanto i relativi risultati sono stati usati per indagare l'effetto della sorgente sulle stime dell'attenuazione  $\alpha$ .

Il metodo FDBFa è quello che ha prodotto il risultato più attendibile, i cui dati sperimentali risultanti sono stati utilizzati nelle inversioni (capitolo 5).

Partendo dai sismogrammi che rappresentano il risultato dei dati campionati dai sensori posti in sito, è stato possibile ricavare lo spettro F-K.

In questo modo, è stato possibile individuare i modi fondamentali di propagazione dell'onda.



**Figura 4.17:** Spettro F-K per lo stendimento SN14 Shot-4, con distanza dal ricevitore 4.5 m

La Figura 4.17 rappresenta uno spettro F-K abbastanza pulito in cui è visibile chiaramente il modo fondamentale.

I punti sperimentali ottenuti con il metodo FDBFa vengono mostrati in Figura 4.18 dove sono riportate le curve di dispersione e di attenuazione ottenute per

ogni singolo punto di battuta.



**Figura 4.18:** Curva di Dispersione e curve di attenuazione, ottenute con FDBFa per ogni punto di battuta.

Le curve di dispersione hanno un andamento molto simile tra loro, sebbene non sia stato possibile investigare a frequenze sotto i 5 Hz.

Ciò ha limitato notevolmente la profondità di indagine nelle successive inversioni, mostrate nel capitolo 5. Per questo motivo, il risultato appena ottenuto è stato mediato con il corrispondente sullo stendimento irregolare (Figura 4.11) per cercare di migliorare la stima del dato sperimentale alle basse frequenze.

Le curve di attenuazione mostrano un andamento concorde tra loro, a differenza di alcuni punti associati all'ultimo punto di battuta, probabilmente a causa di rumore ambientale che tende ad alterare l'andamento alle alte frequenze.

In Figura 4.19 sono riportate le curve medie di dispersione e di attenuazione, ottenute combinando i punti di battuta studiati, con le rispettive barre di errore che rappresentano intervalli di  $\pm 1\sigma$  (scarto quadratico medio).



**Figura 4.19:** Curve di dispersione e di attenuazione medie dei punti di battuta eseguiti per lo stendimento SN14 - risultato ottenuto con metodo FDBFa.

Le stime delle curve di dispersione e di attenuazione hanno restituito degli ottimi risultati anche con il metodo WaveDec.

Il risultato dei punti sperimentali ottenuti con questo approccio mostra un andamento molto simile ai risultati ottenuti con metodo FDBFa, a meno di qualche piccola variazione nelle curve di dispersione tra i 15 Hz e i 20 Hz ed alcuni punti sperimentali a frequenze intorno a 30 Hz.

In Figura 4.20 sono rappresentate le stime delle curve ottenute con approccio WaveDec:



**Figura 4.20:** Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta per lo stendimento SN14 - risultato ottenuto con metodo WaveDec

I risultati finora descritti mostrano degli andamenti attendibili e concordi tra loro per entrambi i metodi FDBFa e WD.

Tuttavia, non tutti gli approcci trattati in questo lavoro di tesi hanno restituito buoni risultati.

Ad esempio, il metodo GHPB ha prodotto una stima delle curve di dispersione e di attenuazione caratterizzata da punti sperimentali di difficile interpretazione soprattutto se confrontati con i risultati ottenuti con i restanti metodi.

Le curve di dispersione in Figura 4.21 infatti, mostrano un andamento leggermente diverso tra i punti di battuta. Per lo Shot 1 e per lo Shot 4 i valori della velocità di fase risultano leggermente sottostimati rispetto a quelli dello Shot 2 e 3 i quali sono simili ai risultati ottenuti con il metodo FDBFa e WD.

L'attenuazione è invece sovrastimata rispetto ai risultati ottenuti per gli altri metodi, con un notevole scostamento da questi. Inoltre, il metodo GHPB presenta una variabilità molto alta nella stima delle curve di attenuazione per i diversi punti di battuta, rispetto agli altri metodi che presentano un range di variazione più basso.



**Figura 4.21:** Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta eseguiti per lo stendimento SN14 - risultato ottenuto con metodo GHPB

#### 4.2.2 Influenza delle condizioni di campo vicino e della sorgente

L'interpretazione dei dati sperimentali per la stima delle curve di dispersione e di attenuazione dello stendimento SN14 si è anche focalizzata su alcune problematiche che possono verificarsi nell'analisi di prove MASW:

- Effetti di campo vicino (near-fields);
- Influenza della sorgente al contatto piastra-terreno;

Gli effetti di campo vicino sono dovuti alle possibili interferenze tra le onde di volume e le onde di superficie di Rayleigh, che possono portare ad una interpretazione poco attendibile del dato sperimentale.

Le onde di volume per definizione si attenuano molto più rapidamente rispetto alle onde di superficie, e solo a una certa distanza (pari alla lunghezza d'onda  $\lambda$  in mezzi normalmente dispersivi; Foti, 2000 [9]), il campo d'onda viene governato dalle onde di Rayleigh. Per questo motivo, questo problema si manifesta tipicamente a basse frequenze, soprattutto quando la minima distanza tra sorgente e sensori non è sufficientemente elevata.

La soluzione ottimale a questo problema prevede di energizzare in più punti di battuta a distanza crescente dai ricevitori, in modo da soddisfare le seguenti condizioni:

- Shot vicini allo stendimento sono ideali per valutare le caratteristiche di propagazione dell'onda ad alte frequenze;
- Shot distanti sono ideali per mitigare l'effetto delle condizioni di campo vicino alle basse frequenze;

L'effetto combinato di queste caratteristiche può incrementare l'attendibilità del dato acquisito.

Inoltre, un'ulteriore possibilità è quella di eliminare, in fase di analisi, il dato relativo ai ricevitori più vicini al punto di battuta.

Nello specifico, in questa tesi, il problema degli effetti di campo vicino è quello che ha influenzato meno l'andamento dei punti sperimentali.

Infatti, il processamento dei dati può anche essere influenzato dal contributo della sorgente misurata sulla piastra di carico. Il suo ruolo è evidenziato dall'analisi dei risultati ottenuti con il metodo TFM.

L'interazione Thumper-piastra di carico-terreno infatti, può influire nella stima della funzione di trasferimento e quindi nella stima delle curve di dispersione e di attenuazione.

D'altra parte, è possibile trascurare il contributo della sorgente, impiegando il metodo TFMD.

In Figura 4.22 è riportato il confronto tra TFM ed il metodo TFMD per lo stendimento SN14.

In particolare, i risultati mostrati di seguito sono riferiti alle medie tra tutti i punti di battuta eseguiti durante l'acquisizione in sito.



Figura 4.22: Confronto tra metodologia TFM e TFMD - stendimento SN14

In questo caso, è evidente come l'effetto della sorgente abbassi significativamente l'andamento della curva di dispersione tra 14 e 20 Hz. Il metodo TFMD, invece, restituisce un andamento più lineare e simile ai risultati ottenuti con gli altri metodi.

Anche la curva di attenuazione ottenuta con TFM mostra un andamento molto diverso da quelle ottenute finora, con una sovrastima tra 13 Hz e 25 Hz.

In conclusione, in Figura 4.23 vengono riportate le curve di dispersione e di attenuazione ottenute con i diversi metodi.

Si nota che, mediando tutti i punti di battuta per ogni tipologia di metodo trattato, le curve di dispersione hanno un andamento simile tra loro a meno del TFM e del GHPB. Quest'ultimo, infatti, alle alte frequenze sottostima i valori delle velocità di fase. Inoltre, anche le curve di attenuazione presentano qualche differenza. Questo si nota soprattutto nel TFM, per i motivi già discussi in 4.2.2, e nel GHPB dove vengono sovrastimati i valori dell'attenuazione a partire da 10 Hz in frequenza.



**Figura 4.23:** Confronto metodologie per la stima delle curve di dispersione ed attenuazione, stendimento SN14

Freq.	FDBFa		WD		$\operatorname{TFM}$		TFMD		GHPB	
-	V	alpha	V	alpha	V	alpha	V	alpha	V	alpha
[Hz]	[m/s]	[1/m]	[m/s]	[1/m]	[m/s]	[1/m]	[m/s]	[1/m]	[m/s]	[1/m]
5	317	0.0012	-	-	313.7	0.0055	328.5	0.008	316.2	0.005
10	186.7	0.0045	187.8	0.008	185	0.008	186.8	0.006	188	0.012
15	182.4	0.007	181.6	0.01	171.2	0.017	178.8	0.009	179.3	0.022
20	179.1	0.009	179.6	0.016	174.6	0.022	178.12	0.013	176.2	0.03
25	178.2	0.025	177.5	0.025	179.5	0.02	177.7	0.023	171.9	0.03
30	178	0.033	177.6	0.032	178.4	0.023	177.8	0.028	171.6	0.046

Infine, in Tab. 4.1 sono riportati per corrispondenza alcuni valori numerici riferiti alle curve mediate, ottenute con i diversi metodi utilizzati.

**Tabella 4.1:** Valori di velocità di fase e di attenuazione corrispondenti a frequenze di 5, 10, 15, 20, 25, 30 Hz per i punti sperimentali mediati di ogni metodo utilizzato

## 4.2.3 Stima delle curve di dispersione e di attenuazione: interpretazione dei dati ottenuti dalla mazza battente

Per lo stendimento SN14 sono state effettuate anche misurazioni con energizzazione tramite mazza battente. La Figura 4.15 mostra lo stendimento MASW in esame, evidenziando i punti di battuta con mazza battente.

Anche in questo caso partendo dai sismogrammi ( un esempio è riportato in Figura 4.16), è stato possibile ricavare lo spettro in frequenza-numero d'onda su cui è stato effettuato il picking per individuare i modi fondamentali di propagazione dell'onda, nell'ambito dell'analisi con il metodo FDBFa.



**Figura 4.24:** Spettro F-K per lo stendimento SN14 Shot-3, con distanza dal ricevitore 5 m.

Lo spettro riportato in Figura 4.24 evidenzia chiaramente il modo fondamentale su cui il picking ha restituito degli ottimi risultati per il metodo FDBFa i quali vengono mostrati di seguito:



**Figura 4.25:** Curve di Dispersione e curve di attenuazione, per lo stendimento SN14 ottenute con metodo FDBFa. I dati si riferiscono ai diversi punti di battuta.

In Figura 4.25 sono riportate le curve di dispersione e di attenuazione ottenute per ogni singolo punto di battuta.

Le curve di dispersione presentano un andamento molto simile tra loro e risultano perfettamente in linea con i risultati ottenuti per lo stesso stendimento energizzato con sorgente vibrante.

Le curve di attenuazione, invece, evidenziano un intervallo di variabilità molto più elevato rispetto alle corrispondenti stime ottenute con sorgente di tipo shaker.

L'andamento medio della curva di attenuazione presenta un forte incremento alle basse frequenze, probabilmente dovuto all'influenza degli effetti di campo vicino. Infatti, alcuni punti di battuta eseguiti con mazza battente hanno una distanza minore dai ricevitori rispetto allo shaker. Inoltre, la mazza battente genera un segnale solitamente buono per le medio-alte frequenze, ma a basse frequenze la qualità del segnale generato si riduce poichè riscontra delle difficoltà a generare adeguata energia. Questo si traduce in una stima dell'attenuazione poco attendibile. In Figura 4.26 vengono riportate le curve medie di dispersione e di attenuazione ottenute con FDBFa per la mazza battente:



**Figura 4.26:** Curve di dispersione e di attenuazione medie degli shot points eseguiti per lo stendimento SN14 con mazza battente - risultato ottenuto con metodo FDBFa

Anche con la mazza battente, il metodo WD ha restituito una stima attendibile delle curve di dispersione e di attenuazione.

L'andamento dei punti sperimentali, infatti, è molto simile al risultato ottenuto con metodo FDBFa.

In Figura 4.27 vengono mostrate le curve di dispersione e di attenuazione ottenute con metodo WD:



**Figura 4.27:** Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta eseguiti per lo stendimento SN14 con mazza battente - risultato ottenuto con metodo WD

Per quanto riguarda i risultati ottenuti con il metodo TFMD (Figura 4.28), l'andamento delle curve di dispersione si allinea con quello ottenuto sia con FDBFa che con WD, mentre l'andamento delle curve di attenuazione evidenzia una forte variabilità alle alte frequenze. Inoltre, a basse frequenze,  $\alpha(\omega)$  è notevolmente superiore a corrispondenti stime da altri metodi, probabilmente a causa dell'influenza di effetti di campo vicino.



**Figura 4.28:** Curve di dispersione e di attenuazione per ogni punto di battuta eseguiti per lo stendimento SN14 con mazza battente - risultato ottenuto con metodo TFMD

Infine, si precisa che non sono stati riportati i risultati ottenuti con TFM e GHPB poichè presentano dati non confrontabili e utili alla visualizzazione.



Di seguito viene riportato un confronto tra i restanti metodi trattati:

Figura 4.29: Confronto metodologie FDBFa, WD e TFMD per la stima delle curve di dispersione ed attenuazione per lo stendimento SN14 energizzato con mazza battente

Come evidente, i risultati ottenuti da FDBFa, WD e TFMD in termini di curve di dispersione presentano un andamento compatibile tra di loro. Stesso discorso vale per le curve di attenuazione, sebbene ci sia una sovrastima rispetto al risultato ottenuto con shaker. Ciò si deve in parte all'influenza delle condizioni di campo vicino. Anche in questo caso in Tab. 4.2 sono riportati per corrispondenza, alcuni valori numerici riferiti alle curve mediate ottenute con i diversi metodi utilizzati per lo stendimento SN14 energizzato con mazza battente.

Freq.	FD	BFa	W	/D	TFMD		
-	V	alpha	V	alpha	V	alpha	
[Hz]	[m/s]	[1/m]	[m/s]	[1/m]	[m/s]	[1/m]	
5	267.8	0.016	255.6	0.012	266.3	0.013	
10	188.0	0.01	185.5	0.008	186.4	0.014	
15	183.0	0.013	181.8	0.01	181.4	0.011	
20	180.5	0.016	178.3	0.018	179.3	0.018	
25	178.1	0.021	176.8	0.025	177.3	0.02	
30	178	0.028	175.6	0.032	177.5	0.027	

**Tabella 4.2:** Valori di velocità di fase e di attenuazione corrispondenti a frequenze di 5, 10, 15, 20, 25, 30 Hz per i punti sperimentali mediati di ogni metodo utilizzato

### 5 Procedura di Inversione

I dati elaborati sono stati utilizzati per la stima dei profili di velocità delle onde di taglio  $V_s$  e del rapporto di smorzamento D, attraverso una procedura di inversione delle curve di dispersione e di attenuazione ottenute.

I dati riportati fanno riferimento alle inversioni ottenute per lo stendimento SN14 con energizzazione tramite shaker.

I punti sperimentali relativi alle curve di dispersione e di attenuazione ottenuti da tale stendimento rappresentano il punto di partenza per identificare la natura del sottosuolo indagato.

In particolare, in questo lavoro di tesi è stato utilizzato un metodo di ricerca globale di tipo stocastico, che genera una serie di modelli di sottosuolo di tentativo da cui vengono confrontate le curve sperimentali ottenute con quelle teoriche attraverso un parametro chiamato misfit che permette di valutarne le differenze (Foti et al, 2017 [12]).

### 5.1 Definizione dei parametri del modello di sottosuolo

Tipicamente, l'analisi delle onde superficiali viene implementata modellando il sottosuolo come una successione di strati lineari elastici, omogenei e isotropi, separati da interfacce orizzontali.

Ogni strato deve essere caratterizzato da una serie di parametri:

- Spessore;
- Velocità delle onde di taglio;
- Rapporto di smorzamento;
- Densità;
- Coefficiente di poisson;

La procedura di parametrizzazione consiste nel selezionare un range di variazione di questi parametri nell'intorno dei punti sperimentali.

Queste caratteristiche vengono opportunamente selezionate basandosi su informazioni del sito già note. Nel nostro caso, la selezione si è basata su esiti di indagini pregresse svolte su GVDA (v. capitolo 3).

Tuttavia, nella selezione si tiene conto dell'influenza che ogni singolo parametro può avere sulla scelta del modello iniziale.

L'influenza maggiore nella parametrizzazione è rappresentata dal numero di strati, dal loro spessore e dai range di variazione delle velocità delle onde di taglio e del rapporto di smorzamento, al variare della profondità.

Invece, la densità di massa e il il rapporto di Poisson esercitano un'influenza minore sulle inversioni. Pertanto, essi vengono fissati sulla base di informazioni note a priori o selezionati con valori standard.

### 5.2 Criticità generali del processo di inversione

Una delle principali limitazioni del metodo di inversione è legato al problema della non unicità della soluzione, nel quale modelli diversi possono essere ugualmente compatibili con il dato sperimentale. Questo si verifica anche a causa delle incertezze legate alla stima delle curve di dispersione e di attenuazione.

Pertanto, diversi modelli con diverse velocità o spessori degli strati del sottosuolo possono essere soluzione del problema. Questo aspetto viene tenuto in conto durante l'inversione, come illustrato in sez. 5.3.

### 5.3 Metodo di Inversione

Il metodo utilizzato è basato sul metodo Monte Carlo.

Questo approccio impiega un generatore di profili casuali per campionare lo spazio parametrico (Socco e Boiero, 2008 [24]). Nello specifico, le inversioni con metodo Monte Carlo sfruttano l'utilizzo di una funzione di densità di probabilità (PDF) per generare i possibili profili di velocità e rapporto di smorzamento associati al terreno sottostante.

Tuttavia, questo approccio presenta alcuni aspetti critici legati al campionamento dello spazio parametrico e alla visualizzazione dei risultati.

Il problema del campionamento dello spazio parametrico si definisce su grandi spazi dimensionali e si deve alla difficoltà di indagare l'intero spazio dei parametri con un numero limitato di profili generati. Questo problema viene risolto nel metodo proposto da Socco e Boiero [24] che sfrutta una proprietà del problema agli autovalori delle onde di Rayleigh (ossia la proprietà di scala) per ottimizzare la procedura (v. paragrafo 5.4).

Tuttavia, in questa tesi viene utilizzato un approccio alternativo che generalizza il metodo proposto da Socco, ma con alcune differenze.

Un' altra criticità del metodo Monte Carlo riguarda la visualizzazione dei risultati ottenuti, che tiene conto della non unicità della soluzione al problema dell'inversione.

L'approccio più semplice prevederebbe di mostrare tutti i profili ottenuti, ma questo potrebbe portare a un risultato difficile da confrontare ed interpretare. In questa tesi, per ovviare al problema, è stato scelto un numero pari ai 30 profili migliori ottenuti.

#### 5.4 Inversioni per la stima dei profili di velocità $V_s$

Il problema del campionamento del modello su grandi spazi parametrici con un numero elevato di dimensioni può essere risolto applicando un nuovo metodo di campionamento proposto da Socco e Boiero [24].

Questo metodo sfrutta le proprietà di scala della soluzione al problema degli autovalori delle onde di Rayleigh per mitigare l'effetto della dimensionalità del problema.

Le proprietà di scala rappresentano la scalatura della soluzione modale con la lunghezza d'onda. In particolare, le velocità e le frequenze scalano se tutte le velocità dello strato considerato sono scalate. Inoltre, la frequenza scala se tutti gli spessori dello strato sono scalati.

Pertanto, ogni modello campionato in maniera casuale viene utilizzato per calcolare una curva di dispersione sintetica che viene spostata il più vicino possibile a quella sperimentale.

In questo modo, la distanza tra le curve sperimentali e teoriche viene ridotta artificialmente e questo sposta ciascun modello di sottosuolo randomizzato più vicino al modello reale.

Il metodo proposto da Socco e Boiero [24] prevede la scalatura dei profili prendendo come riferimento i punti medi (baricentri) delle curve di dispersione. A valle della scalatura, si confrontano la curva di dispersione sperimentale e la curva scalata mediante una funzione di misfit pari a:

$$S = \frac{\sum_{i=0}^{l} (v_{ti} - v_{ei})^2 W_i \sigma_{ei}^2}{l - (2n - 1)}$$
(5.1)

dove  $v_{ti}$  e  $v_{ei}$  sono rispettivamente i valori di velocità teorici e sperimentali all'i-esima frequenza, W è un valore che da peso ai problemi di campionamento,  $\sigma_{ei}$  rappresenta il vettore delle incertezze sui dati, l rappresenta il numero di punti dati nella curva di dispersione e infine n è il numero di strati del modello.

In questo lavoro di tesi, sulla base della metodologia proposta da Socco e Boiero, viene utilizzato un approccio alternativo di scalatura dei profili proposto da Aimar (comunicazioni personali ing.Aimar [2]), esteso sulla componente di attenuazione dell'onda ed esposto nel prossimo paragrafo.

#### 5.4.1 Approccio alternativo per la scalatura dei profili

Il nuovo approccio di scalatura dei profili presenta alcuni aspetti chiave che differiscono dal metodo di Socco e Boiero [24].

In primo luogo, il metodo di scalatura proposto da Socco fa riferimento ad un processo di inversione calcolato su un modello di tipo elastico, mentre il nuovo approccio ne rappresenta l'estensione su modelli viscoelastici.

In particolare, si osserva che una scalatura delle velocità dell'onda S porta ad un ridimensionamento equivalente sia delle velocità di fase che delle frequenze per la curva di dispersione, mentre la scalatura delle curve di attenuazione dipende da una scalatura equivalente sugli spessori degli strati e del rapporto di smorzamento (comunicazioni personali Aimar [2]).

Inoltre, il metodo proposto da Socco e Boiero [24] effettua la scalatura sulla base del rapporto delle coordinate baricentriche della curva di dispersione sintetica rispetto alle coordinate baricentriche della curva sperimentale. In questo modo, dividendo tutti i punti della curva di dispersione teorica per tale rapporto, si ottiene una nuova curva di dispersione il cui baricentro coincide con quello del dato sperimentale.

In questa tesi, invece, il metodo alternativo si basa sull'applicazione di un coefficiente di scala alle coordinate dei punti delle curve teoriche di dispersione e di attenuazione, valutando la distanza tra le curve teoriche scalate e le curve sperimentali sotto forma di errore quadratico medio tra dato scalato e dato sperimentale.

Per trovare i parametri di scalatura ottimali viene utilizzato un algoritmo di ottimizzazione locale implementato in Matlab.

In generale, questo approccio alternativo permette di sfruttare tutti i punti sperimentali delle curve di dispersione e di attenuazione, a differenza del metodo proposto da Socco e Boiero, che si concentra soltanto sulle coordinate baricentriche ignorando la forma delle curve stimate.

Infatti, questo metodo garantisce soltanto che la curva teorica e sperimentale coincidano nel loro baricentro, ma non si applica nessun vincolo ai punti restanti delle curve.

L'approccio alternativo utilizzato invece, tiene conto in maniera più dettagliata della geometria della curva, garantendo così una migliore aderenza tra dato teorico e sperimentale.

A supporto dell'inversione in questo caso viene utilizzata la funzione di misfit simile a quella proposta da Socco, ma generalizzata tenendo conto dell'attenuazione:

$$M = \frac{1}{2n} \left( \sum_{i=1}^{n} \frac{(V_{i,e} - V_{i,t})^2}{\sigma_{v,i}^2} + \sum_{i=1}^{n} \frac{(\alpha_{i,e} - \alpha_{i,t})^2}{\sigma_{\alpha,i}^2} \right)$$
(5.2)

Dove n è il numero di campioni, mentre i restanti termini sono riferiti a velocità ed attenuazione teoriche e sperimentali.

Per effetto di questa formulazione, quando il misfit assume valore unitario, le curve teoriche di dispersione e di attenuazione distano mediamente una deviazione standard dalle corrispondenti curve sperimentali.

# 5.5 Analisi dei risultati ottenuti con il processo di inversione

Sulla base degli stendimenti analizzati e le relative curve di dispersione e di attenuazione ottenute per lo stendimento SN14, vengono mostrati i risultati delle inversioni prodotte e l'effetto della scalatura sui profili randomizzati. La scelta della parametrizzazione è stata accuratamente selezionata dopo aver valutato i numerosi studi effettuati sul territorio di Garner Valley Down Hole Array, descritti nel capitolo 3.

I dati sperimentali disponibili per lo stendimento analizzato (SN14) sono stati integrati con i dati sperimentali ottenuti da una linea analoga estratta dallo stendimento irregolare in Figura 4.11 (Aimar, comunicazioni personali [2]). Inoltre, viene specificato che i valori sperimentali utilizzati sono stati ottenuti per effetto di un ricampionamento logaritmico delle lunghezze d'onda.

Il ricampionamento è stato effettuato su un range da 5 a 80 m della lunghezza d'onda  $\lambda$  con un numero totale di campioni pari a 27 (Figura 5.1 e 5.2), per ottenere una distribuzione più uniforme dei punti sperimentali disponibili (Olafsdottir 2018 [20]).



Figura 5.1: Curve di dispersione e di attenuazione, rappresentate in termini di media con barre di errore pari a  $\pm 1\sigma$ , ottenute combinando lo stendimento SN14 e lo stendimento omologo della prova MASW a spaziatura irregolare (Aimar, comunicazioni personali [2]); I dati sono ottenuti mediante ricampionamento logaritmico della lunghezza d'onda da 5 a 80 m con 27 campioni.



Figura 5.2: Curve di dispersione e di attenuazione, rappresentate in termini di media con barre di errore pari a  $\pm 1\sigma$ , ottenute combinando lo stendimento SN14 e lo stendimento omologo della prova MASW a spaziatura irregolare (Aimar, comunicazioni personali [2]); I dati sono ottenuti mediante ricampionamento logaritmico rispetto alla lunghezza d'onda. Il grafico è in funzione di velocità di fase e frequenza per la curva di dispersione e attenuazione-frequenza per la curva di attenuazione.

E' stato scelto questo tipo di dato sperimentale perchè si è visto un migliormento in termini di quantità di punti disponibili alle basse frequenze rispetto al ricampionamento lineare o logaritmico in frequenza. Questo ha permesso di avere un guadagno nelle stime di velocità e rapporto di smorzamento in profondità.

In particolare, è stato possibile estendere i dati e di prevedere l'andamento del rapporto di smorzamento e delle velocità delle onde di taglio fino ad una profondità di circa 32 m.

Infatti, dalla curva di dispersione è possibile definire la massima profondità indagata, pari a:

$$z_{max} = \frac{\lambda_{max}}{2.5} \tag{5.3}$$

In altri termini,  $z_{max}$  è circa pari a metà della massima lunghezza d'onda definita attraverso il rapporto della velocità di fase massima e dalla frequenza minima dei punti sperimentali (Foti, 2000 [9]).

La Figura 5.3 rappresenta la parametrizzazione iniziale selezionata, che costituisce il punto di partenza del problema di inversione:



Figura 5.3: Parametrizzazione utilizzata per le inversioni

Indice di Strati	Spessore		Velocità Vs		Rapp. Smorz.		Poisson ratio	Densità
[-]	[m]		[m/s]		[%]		[-]	$[t/m^3]$
-	Min	Max	Min	Max	Min	Max	-	-
1	2	4	190	210	2	6	0.3	1.8
2	4	6	190	270	0.7	3	0.3	1.8
3	6	9	200	350	0.4	2.8	0.3	1.8
Halfspace	-	-	280	850	0.1	2	0.3	1.8

In Tab. 5.1 sono riportati nel dettaglio tutti i valori utilizzati per la parametrizzazione del modello iniziale:

Tabella 5.1: Parametri del modello iniziale

Una volta impostata la parametrizzazione, l'inversione è stata effettuata utilizzando un algoritmo sviluppato in Matlab, che implementa la metodologia descritta in cap. 5.4, assegnando un numero di profili di tentativo N. In particolare da N = 25000 profili di tentativo, sono stati selezionati i 30 profili con misfit più basso. I risultati prodotti sono riportati in Figura 5.4 di seguito:



Figura 5.4: Inversioni accoppiate velocità-rapporto di smorzamento; il primo grafico in alto a sinistra mostra l'andamento dei profili di velocità delle onde di taglio  $V_s$  al variare della profondità; il secondo grafico in basso a sinistra mostra le curve di dispersione accettate, che cadono all'interno del range di variazione dei punti sperimentali; il terzo grafico in alto a destra mostra l'andamento dei profili del rapporto di smorzamento in funzione della profondità; il quarto grafico in basso a destra mostra le curve di attenuazione accettate, che ricadono all'interno dei range di variazione dei punti sperimentali; in basso a destra è riportata l'indicazione dei valori del misfit.

Il risultato delle inversioni accoppiate di velocità e rapporto di smorzamento risulta coerente con i profili ottenuti in indagini pregresse svolte nel sito

#### GVDA.

Infatti, questo risultato evidenzia uno strato più superficiale di circa 2 m con transizione tra i 2 e i 6 m di profondità in cui si raggiunge una velocità tra i 200 m/s e 250 m/s e rapporto di smorzamento compreso tra lo 0,5% e il 2%. Questo strato corrisponde allo strato di materiali limo-sabbiosi.

In seguito, le velocità di propagazione dell'onda di taglio si assestano nell'intorno dei 200 m/s fino ad una profondità di circa 15 m, mentre il rapporto di smorzamento è compreso tra lo 0,2% e lo 0,8%.

Infine, si nota un sostanziale incremento di velocità fino a 500-600 m/s dovuto all'interfacciarsi di un materiale aventi migliori caratteristiche meccaniche (granito alterato).

Si evidenzia anche una variabilità molto elevata del rapporto di smorzamento soprattutto nell'halfspace, dovuto alle seguenti possibili cause:

- Difficoltà nell'ottenere un perfetto allineamento tra dati sintetici e i punti sperimentali nella curva di attenuazione, probabilmente dovuta a un'imperfetta parametrizzazione iniziale. A questo, si aggiunge il fatto che la curva di dispersione presenta un andamento regolare con la frequenza, mentre i punti sperimentali nella curva di attenuazione presentano un andamento altalenante difficile da cogliere;
- La ridotta sensibilità delle curve di attenuazione a variazioni del rapporto di smorzamento in profondità;

Una possibile soluzione per mitigare il problema della variabilità del rapporto di smorzamento potrebbe consistere nello sviluppo di metodi di stima dei valori di  $\alpha$  da indagini di tipo passivo. In questo modo, si aumenterebbe significativamente il limite di risoluzione in profondità del sito investigato.

# 6 Conclusioni

Questo elaborato presenta diverse metodologie per lo sviluppo delle caratteristiche di rigidezza e dissipative del terreno del sito di Garner Valley attraverso la stima delle curve di dispersione e di attenuazione delle onde superficiali. Lo studio è stato condotto attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti in sito, mediante prove MASW. I dati utilizzati in questa tesi, derivano da una campagna di indagine svolta nel sito di GVDA, in cui è stata realizzata una maglia bidimensionale composta da stendimenti MASW al fine di sviluppare un modello tridimensionale del sottosuolo indagato.

In questo elaborato, è stato selezionato uno stendimento, i cui dati sono stati acquisiti mediante 14 geofoni con interasse di 5 m e sono stati generati con una sorgente vibrante ed una mazza battente.

I dati sperimentali sono stati processati impiegando le seguenti metodologie per l'interpretazione di dati da onde superficiali:

- Transfer Function method (TFM);
- Transfer Function method with deconvolution (TFMD);
- Generalized Half Power Bandwidth (GHPB);
- WaveDec method (WD);
- Frequency Domain Beam Forming-Attenuation (FDBFa);

Per ognuna delle metodologie utilizzate, sono state stimate le curve di dispersione e di attenuazione, che sono state in seguito confrontate per valutare eventuali criticità di ciascun metodo.

A tal proposito, tutte le metodologie hanno prodotto stime di curve di dispersione attendibili e tra di loro comparabili. Un'eccezione è il metodo GHPB, che tende a sottostimare le velocità di fase a frequenze medio-alte. Inoltre, il metodo TFM ha prodotto un risultato poco attendibile a frequenze intermedie a causa delle incertezze nella misura della sorgente. Le curve di attenuazione, invece, presentano un range di variazione più ampio tra i diversi punti di battuta eseguiti per lo stendimento in esame, indipendentemente dal metodo. In aggiunta, esse risentono fortemente degli effetti di campo vicino che si traducono con delle sovrastime dei valori di attenuazione a basse frequenze.

Questo aspetto si è evidenziato nell'analisi dei dati con mazza battente, che sono stati generati con distanze ridotte tra sorgente e ricevitori.

In alcuni casi, si sono notate differenze tra le stime ottenute sia ignorando la sorgente (con il metodo TFMD) che includendola (metodo TFM). In quest'ultimo caso, i dati sperimentali, ottenuti con il metodo TFM, possono risentire di effetti di accoppiamento tra la piastra di carico e terreno (visto che la forzante è misurata dalle accelerazioni della piastra stessa), che possono ridurre l'attendibilità.

Questo problema viene superato con l'applicazione del metodo TFMD che ignora il contributo energizzante.

Le successive fasi di analisi si sono focalizzate sui risultati del metodo FDBFa, che sono stati ricampionati su scala logaritmica sulle lunghezze d'onda. Questa operazione ha permesso di avere una distribuzione più uniforme dei punti sperimentali, con un notevole guadagno nel numero di punti a disposizione, soprattutto in profondità.

Tali dati sono stati oggetto di un processo di inversione per la stima accoppiata dei profili delle velocità di propagazione di taglio  $V_s$  e di rapporto di smorzamento D.

La ricerca dei profili di tentativo si è basata su un algoritmo di ricerca globale di tipo stocastico, partendo da una parametrizzazione iniziale suggerita da studi condotti in passato sul sito GVDA.

La procedura di inversione ha previsto la generazione di 25000 modelli di sottosuolo di tentativo, dai quali sono stati selezionati 30 profili di velocità e rapporto di smorzamento compatibili con il dato sperimentale.

I risultati ottenuti mostrano evidenze comparabili rispetto alla stratigrafia indi-

viduata in campagne di indagine svolte in passato sul sito di GVDA. Infatti, le interfacce stratigrafiche individuate corrispondono alle transizioni da materiali di tipo sabbia-limosa a materiali di tipo limo-sabbioso con un cambiamento sostanziale di velocità intorno a 15 m di profondità, associato a materiali di tipo granitico. Inoltre, i valori di  $V_s$  ai diversi strati sono coerenti con quelli ottenuti in atri studi.

Tuttavia, dall'esito delle inversioni, si nota una forte variabilità del rapporto di smorzamento soprattutto in corrispondenza dello strato più in profondità. Questo può essere legato alle difficoltà nel fitting dei punti sperimentali della curva di attenuazione e alla scarsa sensibilità dei valori di attenuazione alle variazioni del rapporto di smorzamento negli strati più in profondità.

Dall'esperienza acquisita nello studio dei dati sperimentali prodotti da questa indagine MASW, si osserva come il problema delle stime delle curve di dispersione e di attenuazione sia influenzato dalla modalità di acquisizione dei dati (in primis, geometria dello stendimento) e di come quest'ultima condizioni il limite di risoluzione per la definizione degli strati in profondità.

In conclusione, i risultati ottenuti evidenziano una buona prestazione delle diverse metodologie per la stima delle caratteristiche di dispersione e attenuazione delle onde superficiali.

Inoltre, i profili stimati di  $V_s$  e D presentano un buon livello di attendibilità e consistenza con altre prove sperimentali. Questo aspetto contribuisce positivamente all'applicabilità delle indagini MASW per la stima delle proprietà dissipative a piccole deformazioni in sito.

# Riferimenti bibliografici

- Abramowitz, M. & Stegun "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables", 1964
- [2] Aimar, comunicazioni personali
- [3] Badsar, M Schevenels, W Haegeman "Determination of the material damping ratio in the soil from SASW tests using the half-power bandwidth method", Geophysical Journal, 2010
- [4] Badsar "In situ determination of material damping in the soil at small deformation ratios", PhD thesis, Catholic University of Leuven, Leuven, 2011.
- [5] Bergamo, Marano "Wavefield decomposition technique applied to active surface wave surveys: towards joint estimation of shear modulus and dissipative properties of the near-surface", WorkshopAquila, L'Aquila, 2019
- [6] Brady R. Cox and David P. Teague "Layering ratios: a systematic approach to the inversion of surface wave data in the absence of a priori information", 2016
- [7] Chopra, A. "Dynamics of Structures", 3rd edn. Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 2007
- [8] Forbriger "Inversion of shallow-seismic wavefields: I. Wavefield transformation", T Forbriger - Geophysical Journal International, 2003
- [9] Foti "Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves" Politecnico di Torino, 2000
- [10] Foti "Small-strain stiffness and damping ratio of Pisa clay from surface wave tests", Geotechnique, 2003

- [11] Foti "Using transfer function for estimating dissipative properties of soils from surface-wave data", Near Surface Geophysics, 2004
- [12] Foti S., Hollender F., Garofalo F., Albarello D., Asten M., Bard P., Comina C., Cornou C., et al. (2017), "Guidelines for the good practice of surface wave analysis": a product of the InterPACIFIC project, Bull Earthquake Eng. (2017)
- [13] Hsi-Ping Liu et al "Comparison of Phase Velocities from Array Measurements of Rayleigh Waves Associated with Microtremor and Results Calculated from Borehole Shear-Wave Velocity Profiles", Bulletin of the Seismological Society of America, 2000
- [14] Jianhua Li, 2008 "Study of surface wave methods for deep shear wave velocity profiling applied in the upper mississippi embayment", Jianhua Li, Dr. Brent L. Rosenblad, Dissertation Supervisor, 2008, University of Missouri Columbia
- [15] DH Johnson, DE Dudgeon "Array processing: Concepts and techniques", 1993
- [16] LF Kallivokas, A Fathi, S Kucukcoban Site characterization using full waveform inversion, UniversityofTexasatAustin, 2013
- [17] Lai et al "Simultaneous measurement and inversion of surface wave dispersion and attenuation curves", CG Lai, GJ Rix, S Foti, V Roma -Soil Dynamics and Earthquake, 2002
- [18] Lai C.G. and Rix G.J. "Simultaneous inversion of Rayleigh phasevelocity and attenuation for near-surface site characterization", Technical Report GIT-EE/GEO-98-2, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 1998.
- [19] Maranò et al, WaveDec "Analysis of Rayleigh waves with circular wavefront: a maximum likelihood approach, Zurigo(SZ)

- [20] Elin Asta Olafsdottira, Bjarni Bessasona, Sigurdur Erlingssona, "Combination of dispersion curves from MASW measurements" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018
- [21] Oppenheim, A. and Willsky, A. "Signals and Systems", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1997
- [22] Richart F.E. Jr, Wood R.D., Hall J.R. Jr "Vibration of soils and foundations", Prentice-Hall, New Jersey, 1970
- [23] Rix et al "Simultaneous measurement of surface wave dispersion and attenuation curves" GJ Rix, CG Lai, S Foti, Geotechnical Testing Journal, 2001
- [24] Socco L.V., Foti, S. & Boiero, D., 2010 "Surface-wave analysis for building near-surface velocity models – established approaches and new perspectives"
- [25] LV Socco, C. Strobbia, 2004 "Surface-wave method for near-surface characterization: a tutorial", Near surface geophysics
- [26] Robert Steller "New Borehole Geophysical Results at GVDA", 2004
- [27] Kenneth H. Stokoe et al "NHERI@UTexas Experimental Facility With Large-Scale Mobile Shakers for Field Studies", 2020
- [28] David P. Teaguea, Brady R. Coxb, Ellen M. Rathjeb, "Measured vs. predicted site response at the Garner Valley Downhole Array considering shear wave velocity uncertainty from borehole and surface wave methods", 2018
- [29] J.P. Vantassel, B.R. Cox "Multi-reference-depth site response at the Garner Valley Downhole Array" University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 2019

- [30] AA Viktorov, BA Efimenko, VG Zolotukhin... Soviet Atomic "Differential albedo for gamma rays from a point unidirectional source", 1967
- [31] Zywicki, D.J. "Advanced signal processing methods applied to engineering analysis of seismic surface waves", 1999
- [32] Shaker-Thumper, "https://utexas.designsafe-ci.org/equipment-portfolio/"
- [33] Immagine-GVDA-Google Maps, "https://www.google.com/maps/place/Lake-Hemet"