

Rapporti tecnici

INGV

**Caratterizzazione sismica del
Museo Archeologico di Aidone (Sicilia):
indagini preventive all'installazione
dell'Afrodite di Morgantina**

198



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

CARATTERIZZAZIONE SISMICA DEL MUSEO ARCHEOLOGICO DI AIDONE (SICILIA): INDAGINI PREVENTIVE ALL'INSTALLAZIONE DELL'AFRODITE DI MORGANTINA

Antonino D'Alessandro^{1,2}, Roberto D'Anna¹, Patrizia Capizzi², Giuseppe D'Anna¹, Giorgio Mangano¹,
Giuseppe Passafiume¹, Stefano Speciale¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti - Osservatorio Geofisico di Gibilmanna)

²Università degli Studi di Palermo (Dipartimento di Scienza della Terra e del Mare - DiSTeM)

198

Indice

Introduzione	5
1 . Sismicità storica.....	6
2. Indagini MASW.....	11
3 . Misure di rumore sismico.....	16
4. Conclusioni	20
Ringraziamenti.....	20
Bibliografia.....	21

Introduzione

Dopo circa 30 anni di esilio non voluto l'**Afrodite di Morgantina**, meglio conosciuta come Venere di Morgantina, statua preziosa e bellissima del quinto secolo a.C. per lunghi anni esposta al *Paul Getty Museum di Los Angeles*, è tornata in Sicilia. L'Afrodite fu trovata e trafugata da tombaroli che, nel 1977, effettuarono in contrada San Francesco ad Aidone scavi clandestini durante i quali venne alla luce un santuario dedicato a divinità della terra (Demetra). L'Afrodite, realizzata intorno al 400 a.C. da un allievo di Fidia, venne successivamente acquistata (1988) per 18 milioni di dollari dal Paul Getty Museum.

Durante la lunga permanenza al Getty Museum la statua, alta circa 2.4 metri, è stata installata su un piedistallo antisismico capace di resistere ai forti terremoti Californiani. In Sicilia la statua è ospitata da Aidone, un piccolo paese nella provincia di Enna con appena cinquemila abitanti.

La statua è stata assemblata dai tecnici del Paul Getty di Los Angeles con la collaborazione degli esperti del Parco archeologico di Morgantina e del centro di restauro regionale. L'Afrodite, installata il 22 marzo 2011 in una delle stanze del *Museo Archeologico di Aidone* (Fig. 1), sul suo originale piedistallo antisismico, sarà esposta al pubblico tra la primavera e l'estate di quest'anno (2011).



Figura 1. Afrodite (Venere) di Morgantina; foto della statua installata presso il Museo Archeologico di Aidone, per gentile concessione della Regione Sicilia, Ass. dei Beni Culturali e dell'Identità Siciliana, Servizio Parco Archeologico di Morgantina.

Alcune settimane prima dell'installazione delle statue sono state condotte, in collaborazione con l'Università di Palermo, alcune indagini geofisiche nel sito di installazione dell'Afrodite. Tali indagini sono state realizzate per stimare alcuni parametri sismologici necessari al corretto settaggio del piedistallo antisismico. Il Paul Getty Museum ha richiesto una relazione che riportasse le seguenti informazioni:

- la ricostruzione della sismicità storica risentita nel comune di Aidone;
- la determinazione della sua pericolosità sismica;
- la caratterizzazione sismica del sito di installazione dell'Afrodite.

Tramite ricerche bibliografiche è stata ricostruita la sismicità storica che ha interessato il comune di Aidone, e determinata la sua pericolosità sismica. Sono state inoltre condotte indagini sismiche attive e passive per valutare la qualità del sito di installazione ed individuare la presenza di eventuali effetti di risonanza nell'area ove sorge il Museo Archeologico di Aidone.

Nel presente rapporto tecnico, dopo una breve descrizione della sismicità storica risentita ad Aidone e della sua pericolosità sismica, verranno descritte le indagini di sismica attiva con onde di superficie (*Multichannel Analysis of Surface Waves, MASW*) e le indagini di sismica passiva (*Horizontal to Vertical spectral ratio, H/V*), eseguite presso il museo archeologico.

Le indagini di sismica attiva, sono state condotte al fine di determinare un modello medio di velocità delle onde S, mentre le misure sismiche passive sono state effettuate al fine di individuare la presenza di frequenze di risonanza all'interno dell'edificio.

1 . Sismicità storica

Il Museo Archeologico di Aidone, che ospiterà la Venere di Morgantina, è situato in Aidone, un piccolo paese collinare alle pendici dei Monti Erei nella Sicilia centro-orientale. La Sicilia orientale è una delle regioni italiane con maggiore attività sismica. Molti terremoti distruttivi hanno colpito quest'area, con intensità macrosismiche maggiori del X grado della scala MCS, e magnitudo (M_s) maggiori di 7. Nei secoli passati diversi eventi sismici hanno avuto effetti macrosismici ad oggi ancora visibili nell'abitato di Aidone.

Il verificarsi di numerosi eventi di intensità macrosismica maggiore di VIII della scala MCS [Boschi et al., 1995, 1997, 2000; Gruppo di lavoro CPTI, 2004; Stucchi et al., 2007;], indica in maniera inequivocabile come questa regione sia esposta al potenziale pericolo di vere e proprie catastrofi sismiche e rende conto del fatto che l'areale siciliano, specie nel suo settore orientale, sia considerato a ragion veduta tra le aree maggiormente sismiche dell'intero territorio Nazionale.

Gli studi di sismicità storica [Stucchi et al., 2007] hanno permesso di individuare, sette grandi terremoti Siciliani che hanno avuto ad Aidone effetti macrosismici di diversa intensità. In Fig. 2 è riportata la storia sismica del comune di Aidone estratta dal catalogo DBMI04 [Stucchi et al., 2007], dalla quale si può evincere che l'unico forte risentimento è il IX grado della scala MCS provocato dal terremoto del 1693.

Il terremoto della Val di Noto dell'11 gennaio 1693 rappresenta, assieme al terremoto di Messina del 28 dicembre 1908, l'evento catastrofico di maggiori dimensioni che abbia colpito il territorio italiano in tempi storici. La Fig. 3 mostra la mappa delle intensità macrosismiche risentite a seguito dell'evento del 1693. L'evento provocò la distruzione totale di oltre 45 centri abitati, interessando con effetti pari o superiori al IX grado MCS una superficie di circa 5600 km² e causando un numero complessivo di circa 60.000 vittime [Gruppo di lavoro CPTI, 2004].

La sequenza sismica che comprende questo terremoto con effetti davvero devastanti, iniziò il giorno 9 gennaio 1693 e si protrasse per circa 2 anni con un numero elevatissimo di repliche (circa 1500 eventi). L'evento principale (XI grado MCS) si verificò alle ore 9 della sera dell'11 gennaio, dopo che alcune scosse di minore intensità (circa VIII grado MCS) si erano già fatte sentire dalla sera del giorno 9. Il numero più elevato di vittime fu registrato nella città di Catania, dove morirono circa i 2/3 della popolazione.

Le caratteristiche dell'evento principale consentono di considerarlo, per molti aspetti, simile al terremoto del 4 febbraio 1169. Il database DISS [Basili et al., 2008] attribuisce il terremoto del 1693 alla faglia di Monte Lauro.

Durante il terremoto della Val di Noto morirono 50 persone e vennero distrutti diversi quartieri, edifici e chiese, perlopiù concentrati nella parte alta del paese. Ancora oggi ad Aidone, di quell'evento catastrofico, rimangono numerose testimonianze.

La Chiesa Madre di San Lorenzo (Fig. 4) è forse la chiesa più antica di Aidone, fondata nell’XI secolo su un’antica costruzione risalente al VII secolo. Questa Chiesa Matrice subì ingenti danni a seguito del terremoto del 1693. Successivamente fu ricostruita: dell’originario impianto normanno restano i contrafforti laterali e il portale. Con la ricostruzione furono aggiunte le cappelle laterali e il campanile, mai completato. Tracce dell’antica struttura sono visibili nei grandi conci parietali scoperti nella sacrestia, in corrispondenza dall’area absidale. La facciata fu ricostruita utilizzando il materiale antico: furono recuperate le due scanalature ad un lato della porta, che rappresentano le misure del palmo e della canna, ma non l’antica iscrizione i cui frammenti sono sparsi per tutta la facciata.

Il convento di San Michele (Fig. 4), appartenne all’ordine dei Benedettini ed ai Frati Minori Conventuali di San Francesco, fu ricostruito nel 1545 e fu sede di un “tribunale di sangue” della Santa Inquisizione di cui, dopo il terremoto del 1693, rimane un solo torrione, cosiddetto orgoglio, decorato da tre ordini di archi ciechi e dall’immagine dell’Arcangelo, simbolo della giustizia, scolpita su una lastra di pietra.

Storia sismica di Aidone [37.415, 14.446]

Numero di eventi: 7

Effetti						In occasione del terremoto del:			
Is	Anno	Me	Gi	Or	Mi	Area epicentrale	Np	Ix	Mw
9	1693	01	11	13	30	Sicilia orientale	181	11	7.41
2	1894	11	16	17	52	Calabria meridionale	299	9	6.05
NF	1905	09	08	01	43	Calabria	827	10-11	7.06
NF	1909	07	01	06	24	CALABRO MESSINESE	35	8	5.55
5	1959	12	23	09	29	PIANA DI CATANIA	108	6-7	5.23
NF	1980	01	23	21		MODICA	122	5-6	4.63
4	1990	12	13	00	24	Sicilia sud-orientale	304	7-8	5.68

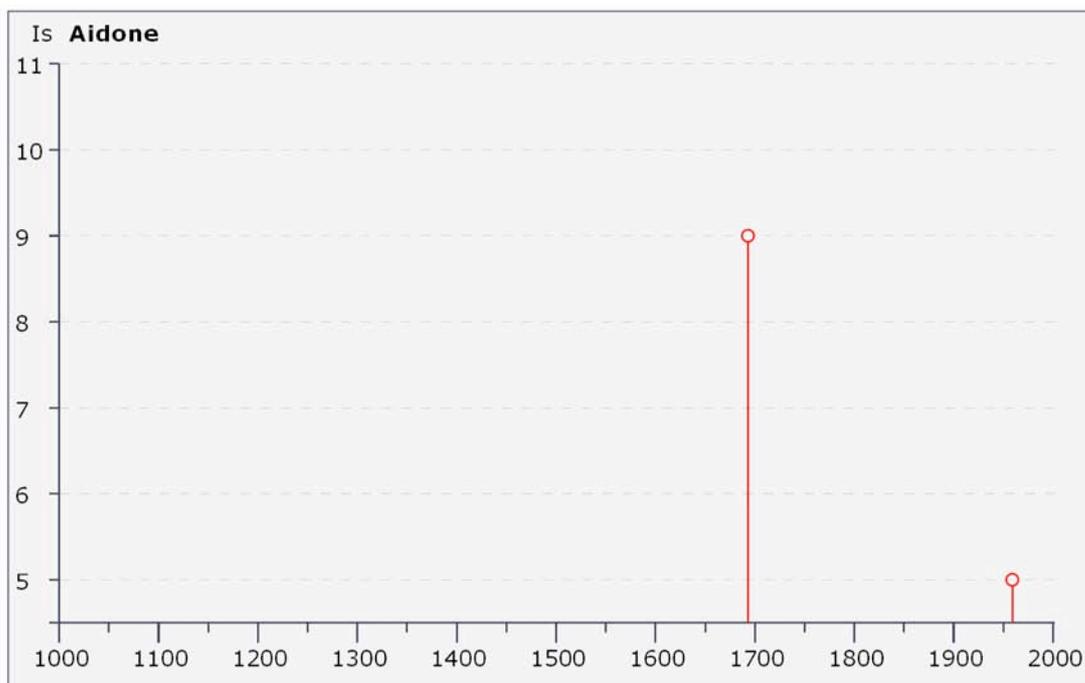


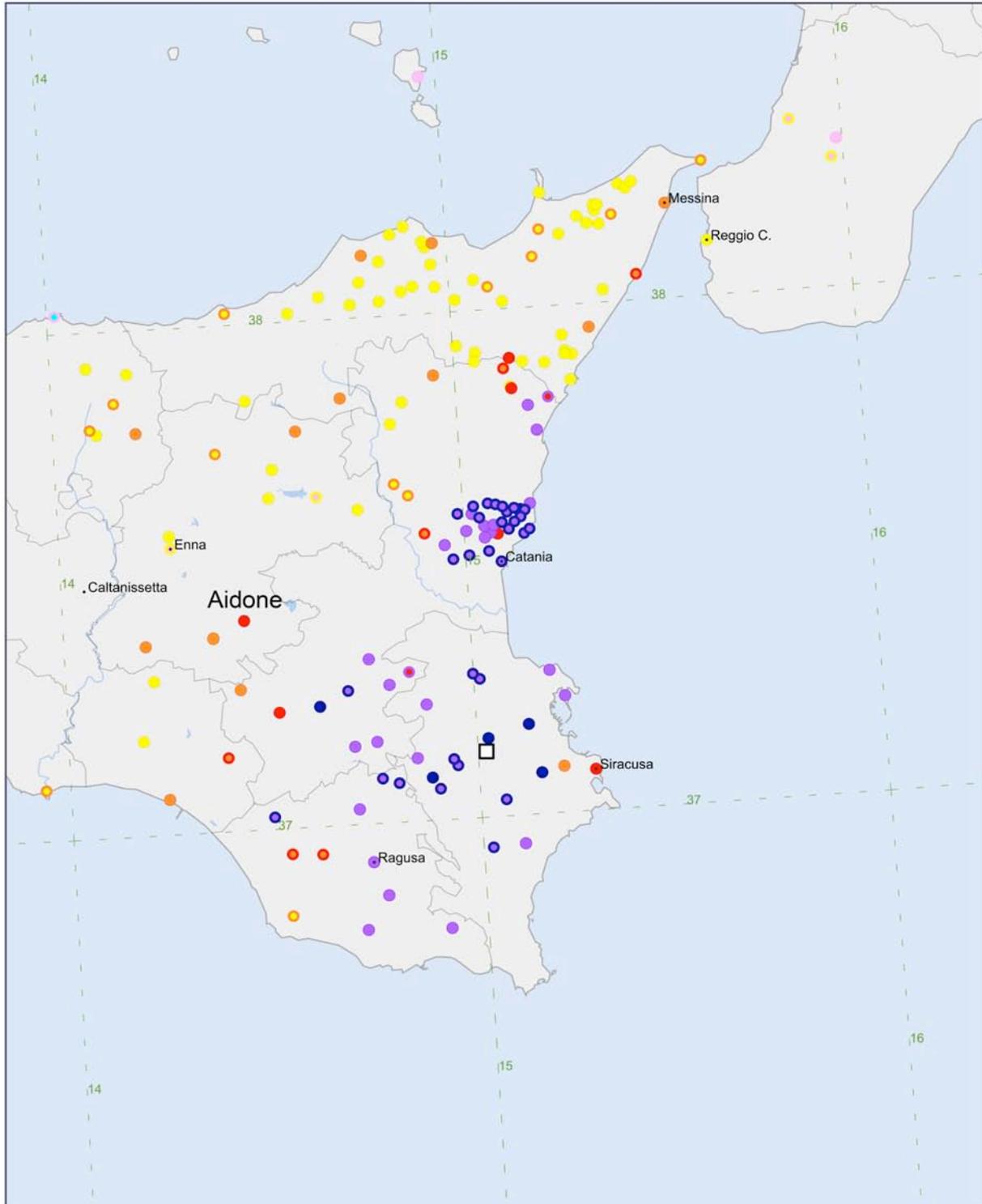
Figura 2. Storia sismica di Aidone estratta dal catalogo DBMI04 [Stucchi et al., 2007].

Terremoto del 11.01.1693 13:30:--

Io 11 Mw 7.41

Area epicentrale Sicilia orientale - Studio CFTI (BOA997)

Np 181



INGV - DBMI04

<http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>



Figura 3. Mappa delle intensità macrosismiche risentite a seguito dell'evento del 1693 estratta dal catalogo DBMI04 [Stucchi et al., 2007].



Figura 4. Chiesa madre di San Lorenzo (sinistra) e resti del campanile del convento di San Michele (destra) ad Aidone.

La chiesa di San Domenico (Fig. 5) fu costruita nel XV secolo. Dopo il terremoto del 1693 subì importanti rimaneggiamenti. Dopo la restaurazione, nel 1900, divenne sede delle scuole elementari maschili fino al 1950. Successivamente crollò e venne abbandonata. In seguito è stata completamente ristrutturata ed attualmente i locali sono vuoti, in attesa di essere utilizzati dall'amministrazione comunale.

Il Castello di Aidone (Fig. 5), risalente all'XI secolo, (all'epoca normanna, ma forse fu preceduto da una fortificazione saracena), sorgeva nel punto più alto della Città. Il castello fu costruito sulla roccia e dominava sulla vallata del Gornalunga. Dopo il terremoto del 1693 restarono pochi ruderi; da castello, austera dimora nobile, divenne tetro carcere, per ridursi, infine, ad avanzo di mura, da cui la denominazione "Castellaccio".

In Fig. 6 è riportata la mappa della pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima al suolo (PGA) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ($V_s > 800/m$), come previsto dall'Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n. 3519, All.1b, estratta da: <http://zonesismiche.mi.ingv.it>.

Al fine di avere un quadro preciso della pericolosità sismica del comune di Aidone, in Tab. 1 sono riportati i valori di PGA attesa per diversi livelli di probabilità di accadimento in 50 anni ed equivalenti periodi di ritorno. I dati riportati in Tab. 1 sono stati estratti dalla mappa digitale della pericolosità sismica disponibile su <http://esse1.mi.ingv.it/>. I valori di PGA riportati sono stati stimati con la tecnica proposta da Cornell [Cornell, 1968; Bender and Perkins, 1987; Gruppo di Lavoro MPS, 2004]. Per ogni valore di PGA stimato, sono stati determinati tre intervalli di confidenza in termini di percentile.



Figura 5. Castello di Aidone (sinistra) e Chiesa di San Domenico (destra).

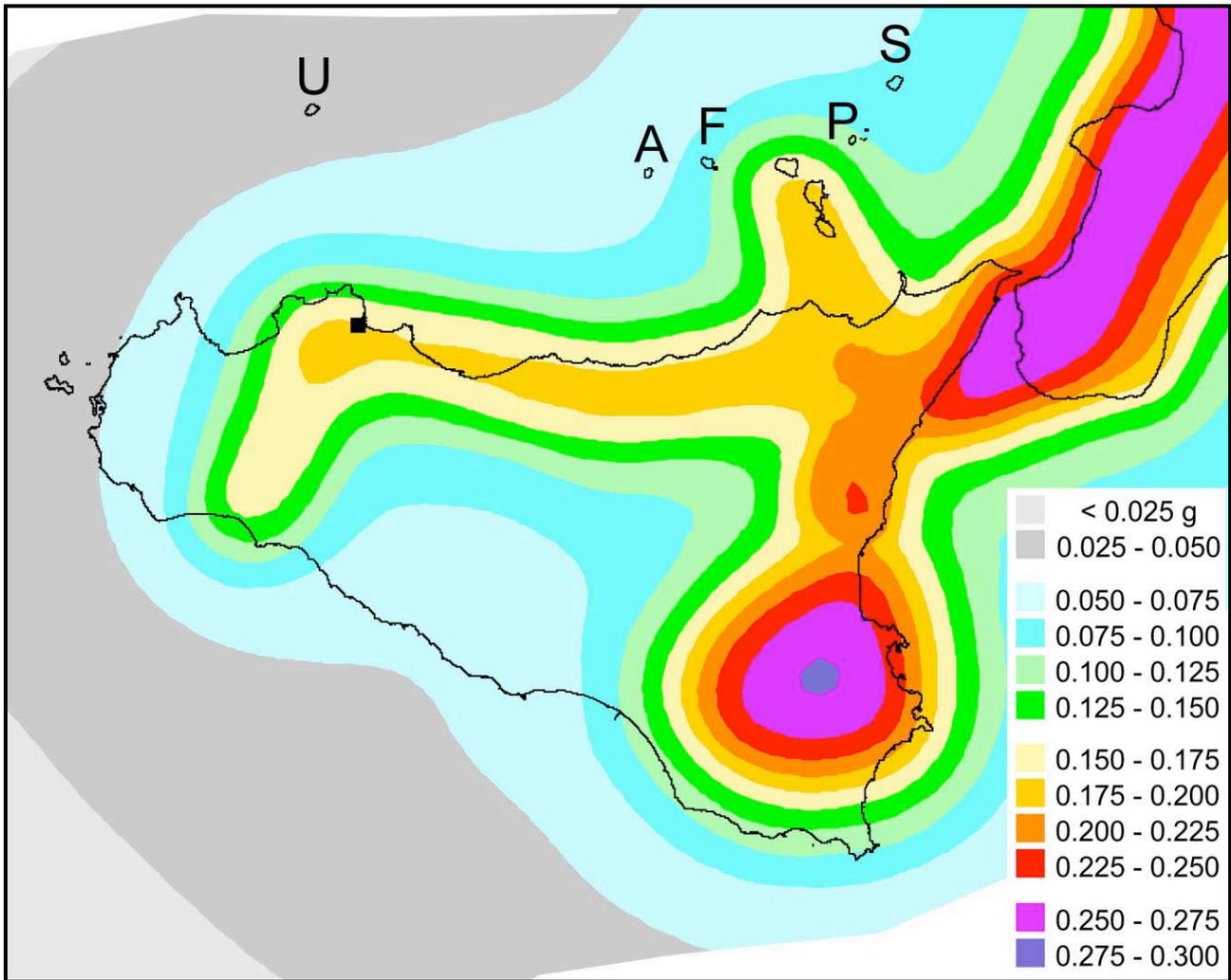


Figura 6. Mappa della pericolosità sismica espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ($V_s > 800\text{ m}$), Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n. 3519, All.1b; estratta da: <http://zonesismiche.mi.ingv.it>.

Shaking parameter		Probability in 50 years/period of return				
		2%	5%	10%	22%	30%
PGA (g)		2475y	975y	475y	201y	140y
Percentile	16	0.1662	0.1193	0.0929	0.063	0.0515
	50	0.2158	0.1500	0.1008	0.0684	0.0594
	84	0.2825	0.1753	0.126	0.0818	0.0685

Tabella 1. Valori di PGA stimati per il comune di Aidone per differenti livelli di probabilità in 50 anni, o differenti periodi di ritorno, e percentile. I dati sono stati estratti dalla mappa digitale della pericolosità sismica presente al sito <http://esse1.mi.ingv.it/> e risultano riferiti a suoli rigidi ($V_s > 800\text{ m}$).

2. Indagini MASW

In un campo d'onde generato da una sorgente di tipo impulsivo, come quella utilizzata nelle comuni prospezioni sismiche con onde di volume, la maggior parte dell'energia sismica generata (circa il 70%) si propaga come onde di superficie, in particolare come modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

In un semispazio in cui la velocità varia con la profondità le onde di Rayleigh risultano dispersive ovvero la velocità di fase (velocità con la quale si propagano i fronti d'onda in fase) e la velocità di gruppo (velocità con la quale si propaga l'energia, ovvero l'involuppo della forma d'onda) sono diverse. Il fenomeno della dispersione, implica una diversa velocità di propagazione delle onde sismiche al variare della frequenza e quindi della lunghezza d'onda.

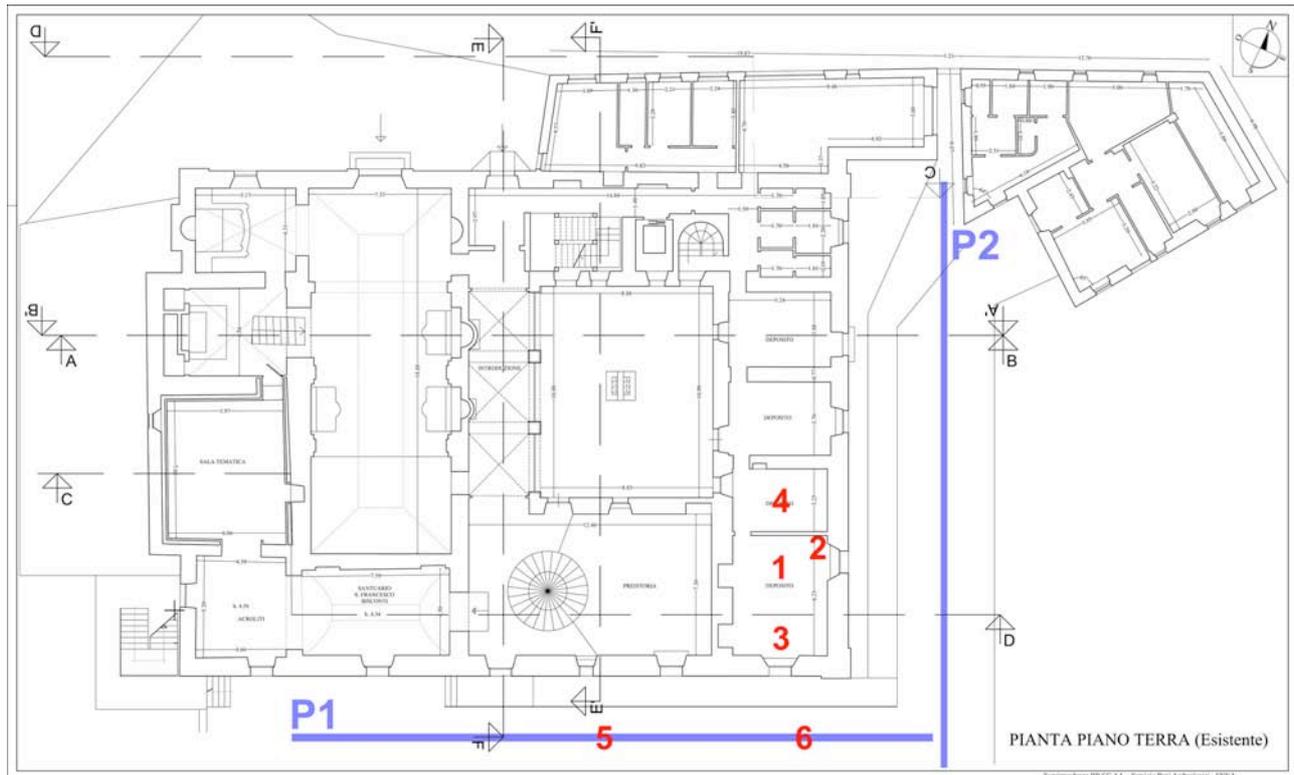


Figura 8. Pianta del Museo Archeologico di Aidone con ubicazione dei due stendimenti sismici realizzati nell'esecuzione delle misure MASW (P1 e P2). Sono inoltre riportati i 6 siti prescelti per la misurazione del campo di velocità dei microtremori. Il punto 1 indica il sito di installazione dell'Afrodite di Morgantina.

Sebbene nelle comuni indagini sismiche con le onde di volume (riflessione e rifrazione) le onde di superficie siano considerate rumore, le loro caratteristiche dispersive permettono di utilizzarle per studiare le proprietà elastiche delle rocce attraversate.

L'estrazione della curva di dispersione della velocità di fase del modo fondamentale delle onde di Rayleigh e sua successiva inversione geofisica, permette di determinare modelli mono-dimensionali della velocità delle onde di taglio (V_s).

Il dettaglio superficiale e la profondità di indagine dei metodi basati sulle onde di superficie dipendono principalmente dall'intervallo di frequenze indagato. L'ampiezza delle onde di Rayleigh infatti si attenua velocemente con la profondità, riducendosi significativamente già ad una profondità pari a circa la metà della lunghezza d'onda considerata. Per tale ragione è opportuno utilizzare sensori sismici con una banda di frequenza sufficientemente larga da consentire di acquisire sia le alte frequenze, necessarie per una buona risoluzione superficiale, sia le basse frequenze, necessarie ad esplorare gli strati più profondi.

Al fine di caratterizzare le prime decine di metri di sottosuolo del Museo Archeologico di Aidone, sono state realizzate alcune indagini MASW [Park et al., 1999]. Queste prospezioni hanno permesso di determinare un modello medio 1D della velocità delle onde S. La Fig. 8 mostra la posizione dei due stendimenti realizzati in occasione di questa campagna di misure.

Le configurazioni geofoniche e le routine di acquisizione utilizzate sono le stesse di quelle di una convenzionale indagine di sismica a rifrazione. Al fine di ottenere una adeguata risoluzione, profondità di indagine ed evitare fenomeni di *aliasing* spaziale, entrambi gli stendimenti sono stati realizzati con 24 geofoni con interdistanza di 1 m. Sono stati utilizzati geofoni 1D (solo componente verticale) con frequenza fondamentale di 4.5 Hz. Sono state realizzate in totale quattro energizzazioni esterne allo stendimento sismico poste ad una distanza di 3 e 5 metri sia dal primo che dall'ultimo geofono. Una massa del peso di 5 kg, battente su una piastra metallica fissata al terreno in posizione verticale, è stata utilizzata come sorgente di onde sismiche. La Fig. 9 mostra lo stendimento realizzato per l'acquisizione P1.

I dati sono stati acquisiti tramite il sismografo 24 bit a 48 canali Terraloc MK6 della ABEM. Questo è munito di un software interno di elaborazione che permette un rapido controllo della qualità della registrazione e un processing preliminare dei dati in situ.

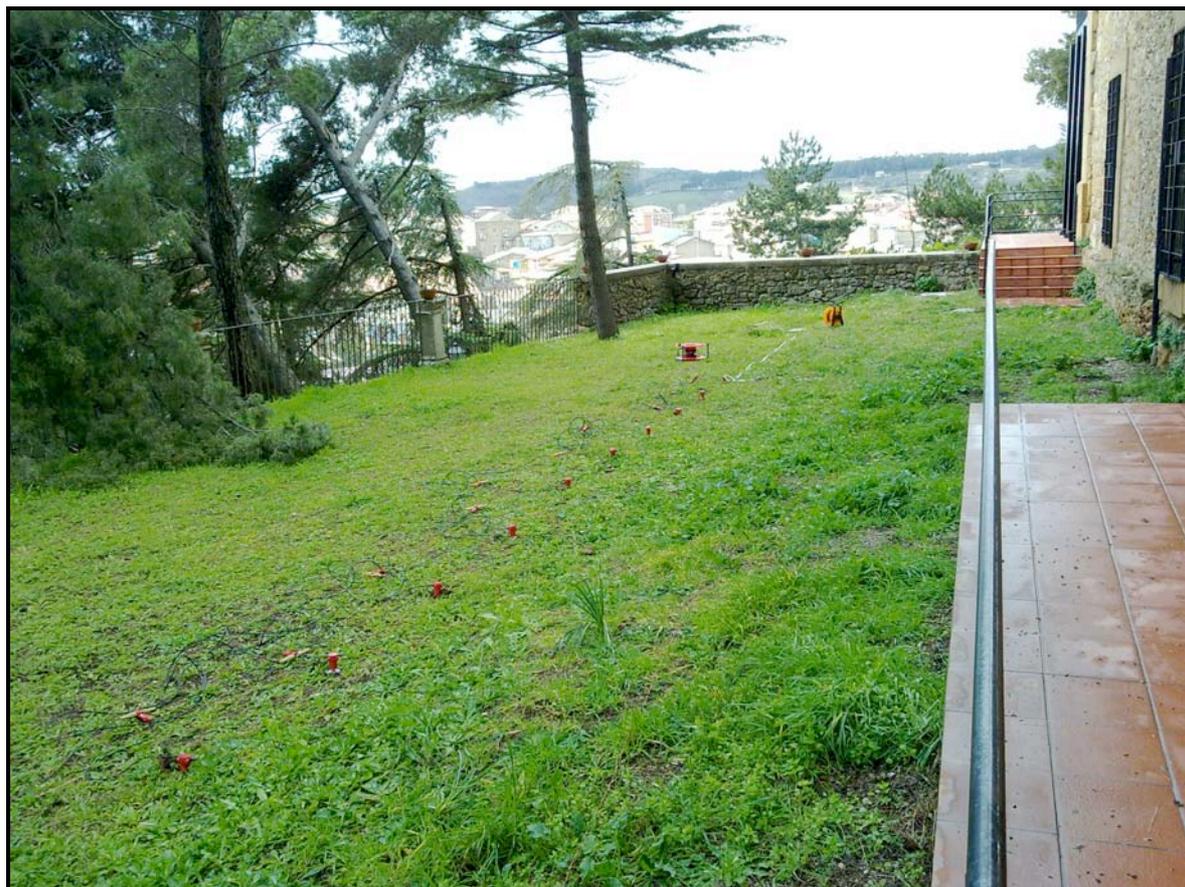


Figura 9. Stendimento geofonico P1 (Fig. 8) realizzato in occasione delle indagini MASW effettuate presso il Museo Archeologico di Aidone.

Le impostazioni dei parametri di acquisizione, scelte in funzione del tipo di indagine eseguita, della lunghezza dello stendimento, del grado di risoluzione ricercato, delle condizioni ambientali rispetto alle fonti di rumore, sono riportate in Tab. 2. La Fig. 10 mostra un esempio di 24 tracce sismiche (componenti verticali normalizzate) acquisite dallo stendimento P2 (Fig. 8).

Al fine di incrementare il rapporto segnale-rumore è stato effettuato, su tutte le registrazioni, un processo di sommatoria sincrona della tracce sismiche (*stacking*) con numero di *stacks* pari a cinque.

TIPO DI INDAGINE	INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO	NUMERO DI CAMPIONI	DURATA DI REGISTRAZIONE	NUMERO DI STACKS
MASW	250 μ s	4096	1024 ms	5

Tabella 2. Parametri di acquisizione dei profili sismici di tipo MASW acquisiti.

L'elaborazione e l'interpretazione dei dati sismici di tipo MASW è stata eseguita con l'ausilio del software winMASW [winMASW User manual, 2011]. Tale software consente di analizzare ed invertire i dati sismici acquisiti in campagna (*common-shot gathers*) per ricavare un modello 1D della velocità delle onde S e un corrispondente valore di V_{S30} . Il modello di V_S viene ottenuto tramite inversione delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh, determinate tramite la tecnica MASW [Dal Moro et al., 2006; 2007].

La procedura si sviluppa in due operazioni svolte in successione:

- determinazione dello spettro di velocità sul quale identificare la curva di dispersione [Dal Moro et al., 2006];
- inversione della curva di dispersione (precedentemente individuata) attraverso l'utilizzo di algoritmi genetici [Dal Moro et al., 2007].

Lo spettro di velocità viene generalmente determinato tramite una trasformata FK (Frequency-Wavenumber). Questa viene ottenuta calcolando una trasformata doppia di Fourier (trasformata 2D), che restituisce l'energia posseduta dalle onde sismiche registrate in funzione del numero d'onda e della frequenza.

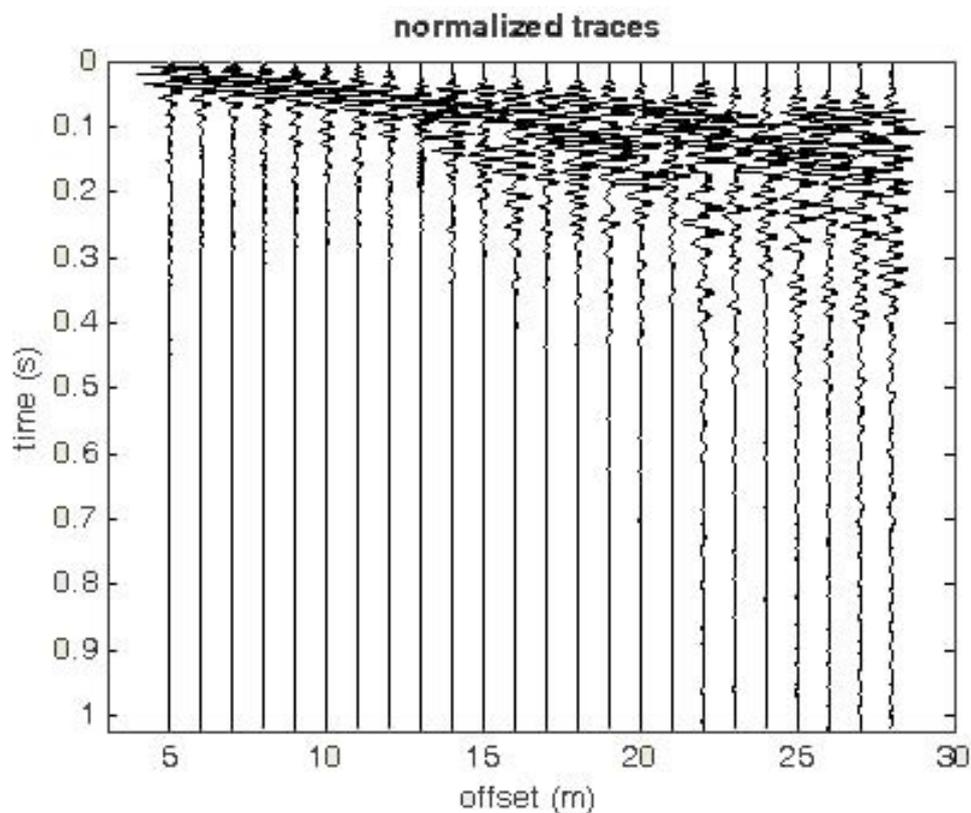


Figura 10. Esempio di registrazione a 24 canali (componenti verticali normalizzate) effettuata per lo stendimento P2 (Fig. 8).

La velocità di fase V_f viene così determinata tramite la semplice relazione esistente tra il numero d'onda k , e la frequenza angolare ω ($V_f = \omega/k$). Il picking dei massimi di ampiezza riportati nello spettro di velocità permette di determinare, nell'ipotesi che esso sia dominante, la velocità di fase del modo fondamentale delle onde di Rayleigh.

I comuni metodi lineari di inversione forniscono soluzioni che possono dipendere fortemente dal modello di partenza. A causa della natura non lineare del problema inverso geofisico, un algoritmo di inversione lineare può convergere verso un minimo locale presente nello spazio dei modelli, molto distante da una soluzione ottimale, ovvero da un minimo globale. I metodi di inversione lineare, convergono quindi verso il minimo globale solo se viene fornito loro un modello di partenza già molto vicino alla soluzione ottimale.

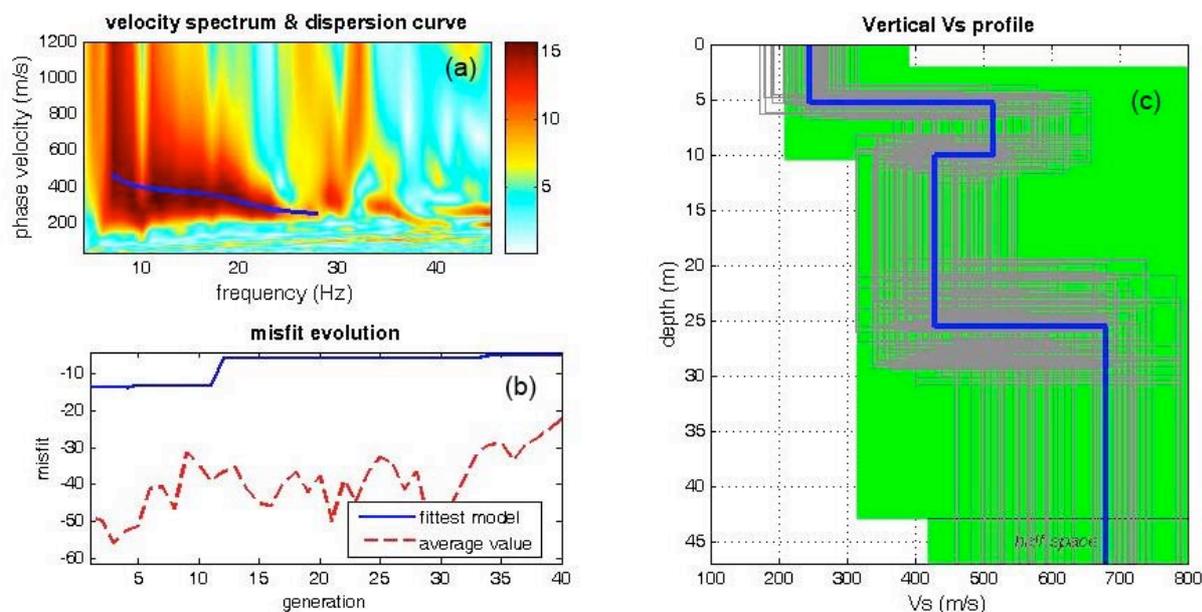


Figura 11. (a) esempio di spettro di velocità con riportata in blu la relativa curva di dispersione individuata dal picking manuale dei massimi spettrali, (b) variazione del misfit durante il processo di inversione; (c) spazio di ricerca dei modelli con indicato in blu il modello finale.

Profilo	Misura	Vs30
P1	Energizzazione a -5 metri dal I geofono	475 m/s
P1	Energizzazione a -3 metri dal I geofono	476 m/s
P1	Energizzazione a +3 metri dall'ultimo geofono	487 m/s
P1	Energizzazione a +5 metri dall'ultimo geofono	506 m/s
P2	Energizzazione a -5 metri dal I geofono	438 m/s
P2	Energizzazione a -3 metri dal I geofono	442 m/s
P2	Energizzazione a +3 metri dall'ultimo geofono	422 m/s
P2	Energizzazione a +5 metri dall'ultimo geofono	415 m/s

Tabella 3. Valori di Vs30 determinati per gli 8 profili MASW realizzati.

Gli algoritmi genetici offrono invece un'ampia esplorazione dello spazio dei modelli [Mitchell, 1996]. A differenza dei metodi lineari non è necessario fornire alcun modello di velocità partenza. È invece necessario definire uno "spazio di ricerca" (*search space*) all'interno del quale vengono valutate le diverse possibili soluzioni [Mitchell, 1996]. Quella finale viene infine proposta con una stima della sua attendibilità (deviazioni standard) ottenuta grazie all'utilizzo di tecniche statistiche.

Una spettro di velocità tipico, con riportata la curva di dispersione individuata dai massimi di energia è mostrata in Fig. 11a. Nella stessa figura è riportato un esempio di spazio di ricerca dei modelli (Fig. 11c) e la variazione dei misfit durante il processo di inversione (Fig. 11b). L'analisi dei dati ottenuti dalle otto energizzazioni eseguite lungo i due allineamenti sismici, ha permesso la determinazione di 8 distinti modelli 1D di velocità delle onde di taglio e dei rispettivi valori di Vs30.

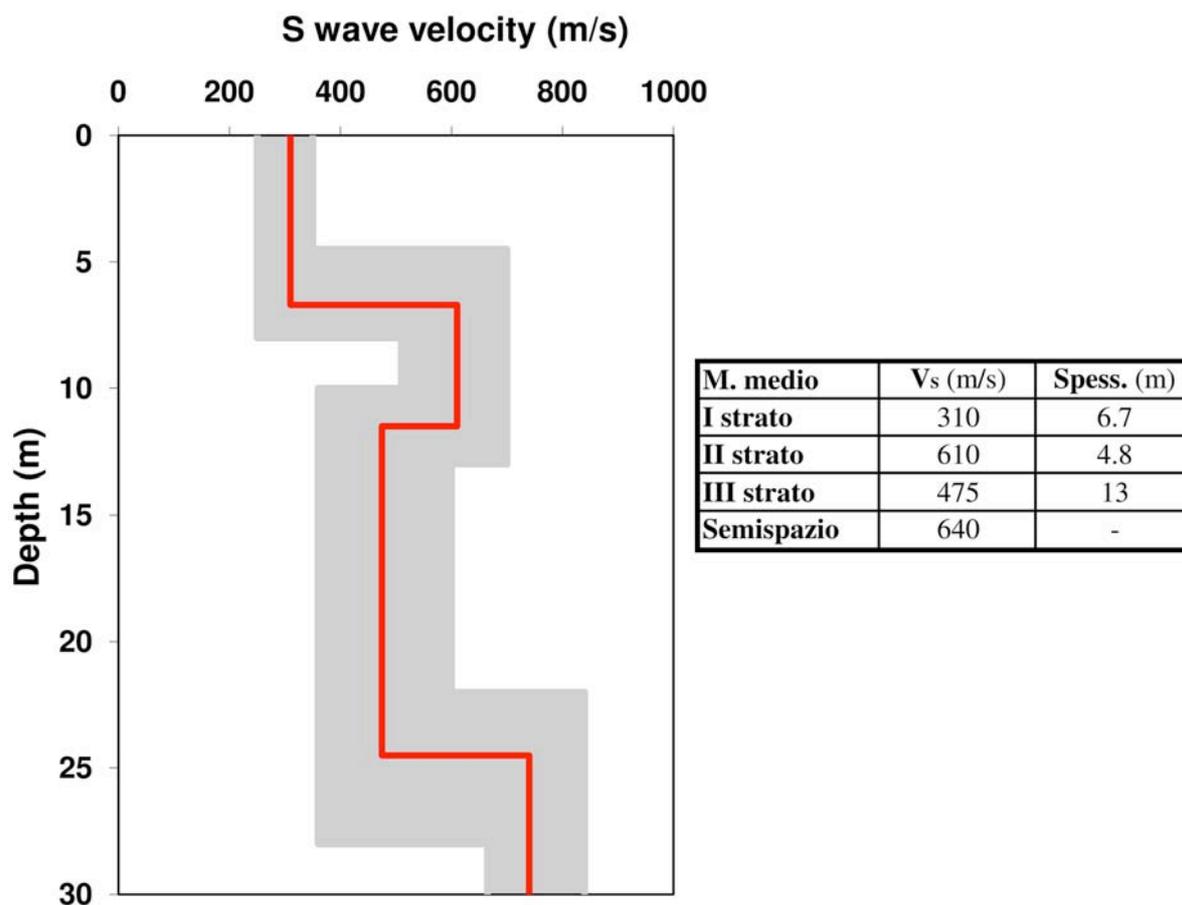


Figura 12. Modello di velocità medio delle onde S (linea rossa) con relativa area di variabilità (area grigia) ottenuto dalle indagini MASW effettuate presso il Museo Archeologico di Aidone.

La Tab. 3 mostra i valori del parametro V_{s30} calcolati per gli 8 modelli ottenuti. In base alla classificazione dei terreni prevista dalle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008 e successive modifiche del 04.02.2008, il tipo di suolo ricade nella categoria B: *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $NSPT_{30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).*

I modelli medi di velocità sono stati sintetizzati in un unico modello medio di velocità, con relativa area di variabilità (Fig. 12). L'area di variabilità è stata ottenuta determinando, per ognuno degli 8 modelli, i valori minimi e massimi di velocità e spessore degli strati.

Il modello medio di velocità mostra velocità delle onde S comprese tra 310 e 640 m/s con un inversione di velocità tra i 11.5 e 24.5 m di profondità. Gli intervalli di variabilità risultano di moderata entità, non superando i circa 250 m/s di velocità e i 6 m di spessore nelle zone più ampie.

Sulla base delle informazioni geologiche ricavate per l'area in esame dalla Carta Geologica d'Italia (<http://www.isprambiente.gov.it/site/it-IT/>), dai rilevamenti geologici effettuati direttamente in campagna, e dai dati di stratigrafia di alcuni pozzi realizzati per fini idrici dall'Ente Sviluppo Agricolo (<http://www.entesviluppoagricolo.it/>), è stata ricostruita la geologia dell'area prossima al Museo Archeologico di Aidone. La geologia dell'area in esame risulta costituita essenzialmente da arenarie e sabbie marine plioceniche scarsamente cementate, sulla quale si sovrappongono depositi continentali recenti, quali alluvioni oloceniche costituite da argille e limi e da detriti di falda probabilmente provenienti dall'alterazione del substrato arenaceo-sabbioso.

I dati stratigrafici in possesso, hanno permesso di correlare il primo e il terzo strato a detriti di falda recenti, il secondo strato più veloce alle argille oloceniche e infine il quarto strato alle arenarie plioceniche.

3. Misure di rumore sismico

L'8 marzo 2011 sono state effettuate alcune misure di rumore sismico presso il Museo Archeologico di Aidone. Le acquisizioni di rumore sismico sono state effettuate al fine di determinare, tramite la tecnica dei rapporti spettrali H/V su singola stazione proposta da Nakamura [1989], effetti di amplificazione locale del moto del sito. Sono stati complessivamente indagati 6 siti, quattro di questi interni all'edificio del museo (Fig. 8, punti 1, 2, 3 e 4), e due esterni nel giardino a sud-est dell'edificio in corrispondenza dell'acquisizione MASW P1 (Fig. 8, punti 5 e 6)

Tutte le misure di noise sismico sono state effettuate con sensori 3D ad alta sensibilità prodotti dalla Lennartz ed acquisiti in formato digitale tramite il datalogger a 24 bit della RefTek, modello 130.

Per ognuno dei 6 punti indagati sono stati acquisiti 90 minuti di rumore sismico, utilizzando simultaneamente due sensori di velocità della Lennartz, modelli LE-3D/20s e the LE-3D-LITE/1s. L'utilizzo di due sensori ha permesso di avere misure ridondanti, per una stima più robusta dei parametri spettrali del moto del suolo e di estendere il range di frequenze analizzabile. Infatti, i sensori LE-3D/20s e LE-3D-LITE/1s prodotti dalla Lennartz, hanno una risposta in ampiezza piatta negli intervalli di frequenza 0.05-40 Hz e 1-80 Hz, rispettivamente. La scelta di acquisire per ogni sito, contemporaneamente con in due sensori, ha così permesso di indagare un ampio intervallo di frequenze compreso tra 0.05 e 80 Hz.



Figura 13. Stazione sismica in acquisizione durante le misure effettuate 8 marzo 2011 presso il Museo Archeologico di Aidone: sulla sinistra la stazione in acquisizione al punto 5, esterno al museo; sulla destra la stazione in acquisizione al punto 1, interno al museo e sito d'installazione dell'Afrodite di Morgantina.

Per risolvere la massima frequenze del sensore LE-3D-LITE/1s, pari ad 80 Hz, e ridurre il rumore di quantizzazione, migliorando così la stima dei parametri spettrali del rumore sismico, è stata utilizzata una frequenza di campionamento pari a 200 Hz. Per migliorare la risoluzione del segnale di rumore è stato inoltre ipostato, sul digitalizzatore RefTek-130, un guadagno di 32x.

La Fig. 13 mostra la stazione sismica in acquisizione in due punti di misura, uno esterno (punto 5) e uno interno al museo archeologico di Adone (punto 1) in corrispondenza del sito di installazione dell'Afrodite di Morgantina.

Durante l'indagine di sismica passiva, sono stati acquisiti complessivamente oltre 18 ore di rumore sismico ambientale. I segnali acquisiti sono stati corretti per la funzione di trasferimento dalla catena sensore-digitalizzatori e convertiti in m/s.

In Fig. 14 è riportato un esempio del segnale di velocità vettoriale relativo al rumore sismico registrato dal sensore LE-3D/20s nel sito 1. Nei segnali, di durata complessiva pari a 90 minuti, è possibile individuare alcuni segnali transienti attribuibili alle folate di vento che hanno caratterizzato la giornata di acquisizione.

Il controllo di qualità del rumore sismico è stato effettuato determinando gli spettri di potenza (PSD). I PSD di accelerazione sono stati determinati trasformando il segnale di velocità in segnale di accelerazione, tramite una semplice operazione di derivazione temporale, e utilizzando il metodo del periodogramma mediato applicato a finestre di 100 s. Un esempio di PSD così calcolato per il sito 1 è riportato in Fig. 15 con

sovrapposti gli spettri di riferimento di Peterson [1993]. Quest'ultimi rappresentano il limite superiore ed inferiore dei PSD di accelerazione della componente verticale del rumore, che l'autore ha determinato analizzando gli spettri di rumore stimati per numerose stazioni dislocate sull'intera superficie terrestre.

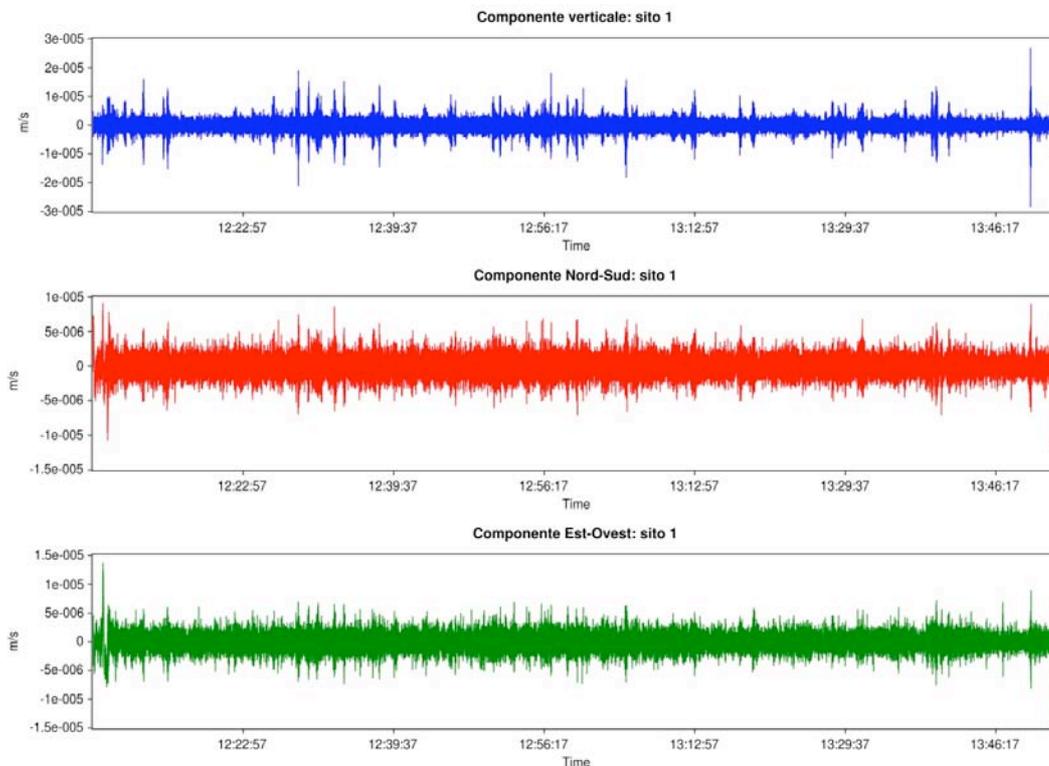


Figura 14. Esempio di 90 minuti di registrazione delle tre componenti del campo dei microtremori, registrate dal sensore LE-3D/20s nel sito 1.

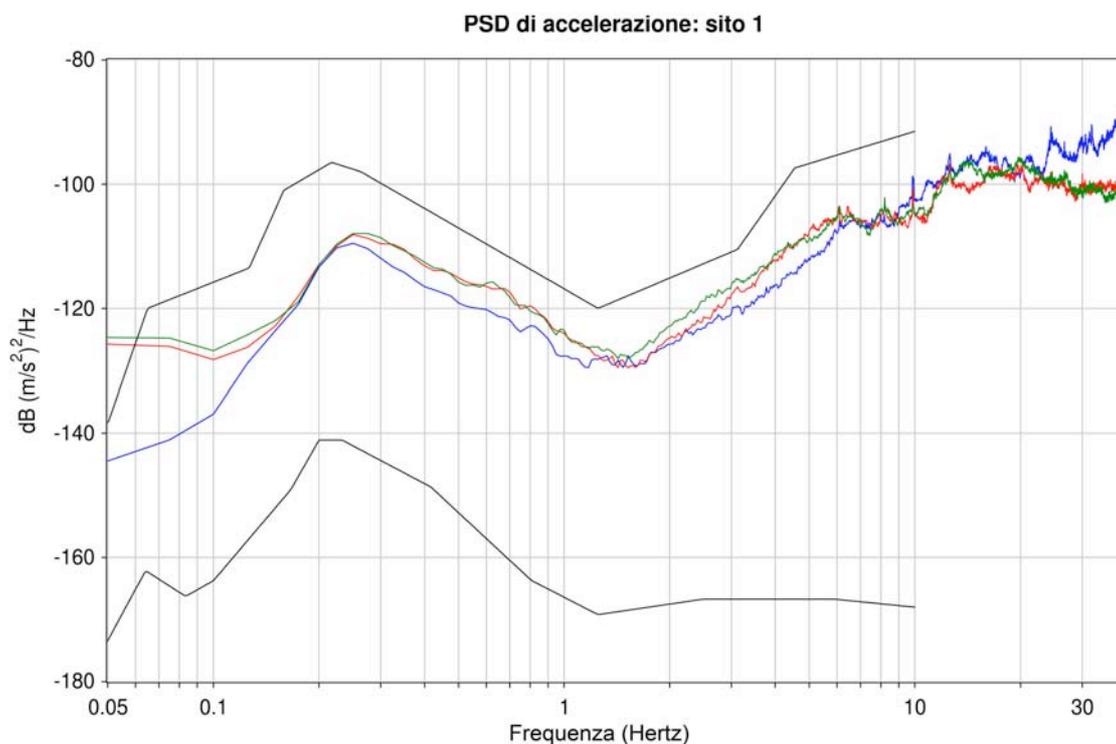


Figura 15. PSD di accelerazione del rumore sismico registrato dal sensore LE-3D/20s nel sito 1: in blu la componente verticale, in rosso la componente Nord-Sud, in verde la componente Est-Ovest. Per confronto sono riportati gli spettri di riferimento di Peterson [1993].

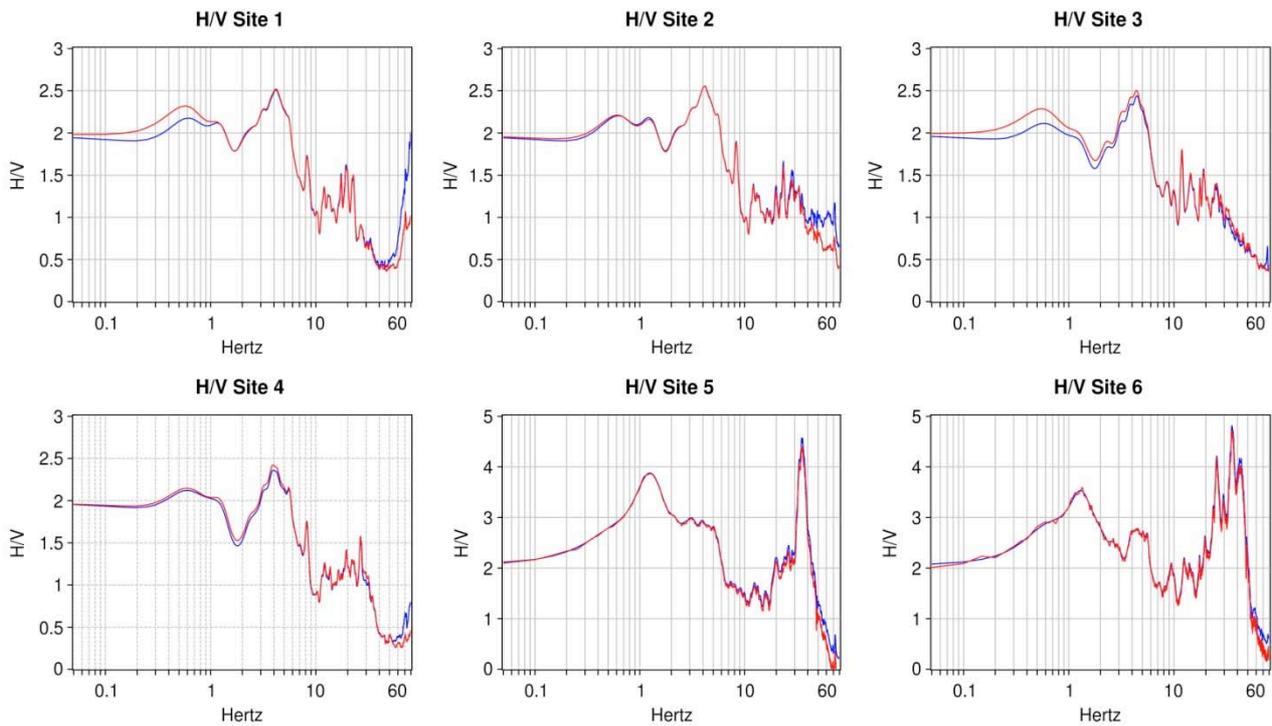


Figura 16. Rapporti spettrali H/V per i sei siti indagati e per i due differenti sensori sismici utilizzati: rosso=LE-3D/20s, blu=LE-3D/1s.

Gli spettri di Peterson [1993] vengono generalmente usati per avere una immediata informazione, di carattere qualitativo, sul rumore acquisito. Spettri di rumore molto differenti in forma, o non contenuti negli spettri di riferimento di Peterson [1993], possono indicare una cattiva installazione del sensore o errori nella procedura di correzione per la funzione di trasferimento della catena sensore-digitalizzatore.

È possibile notare come sia i PSD di accelerazione della componente verticale, che quelli delle componenti orizzontali, siano contenuti nei limiti degli spettri di riferimento di Peterson [1993] e come essi ne seguano perfettamente l'andamento nel dominio delle frequenze.

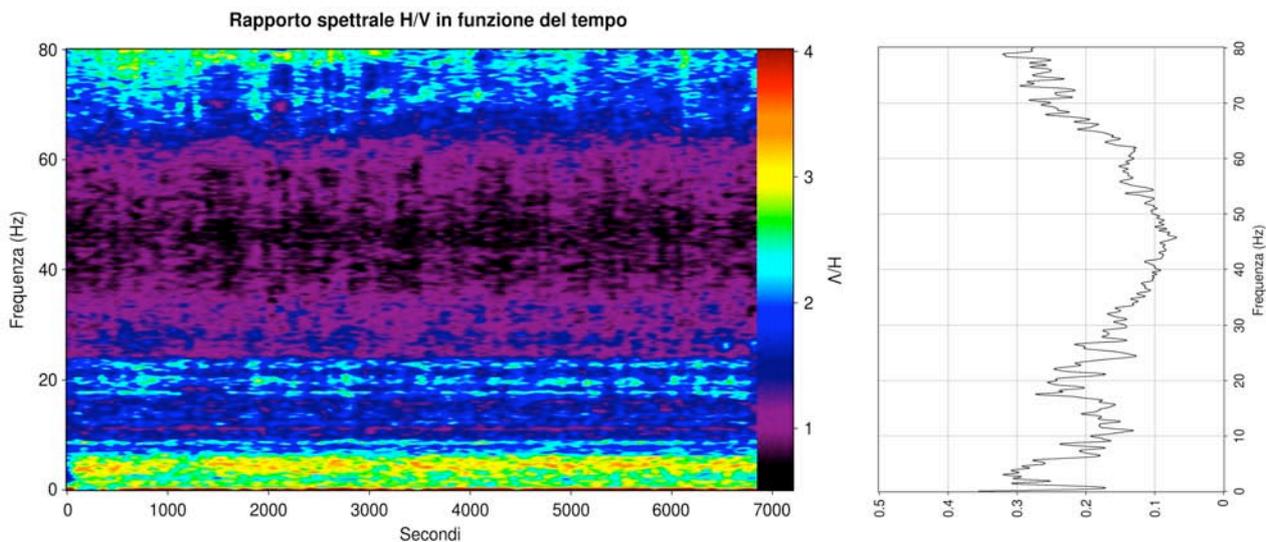


Figura 17. Rapporti spettrali H/V in funzione del tempo e relativa deviazione standard in funzione della frequenza determinati per il sito 1 su una finestra temporale di 2 ore.

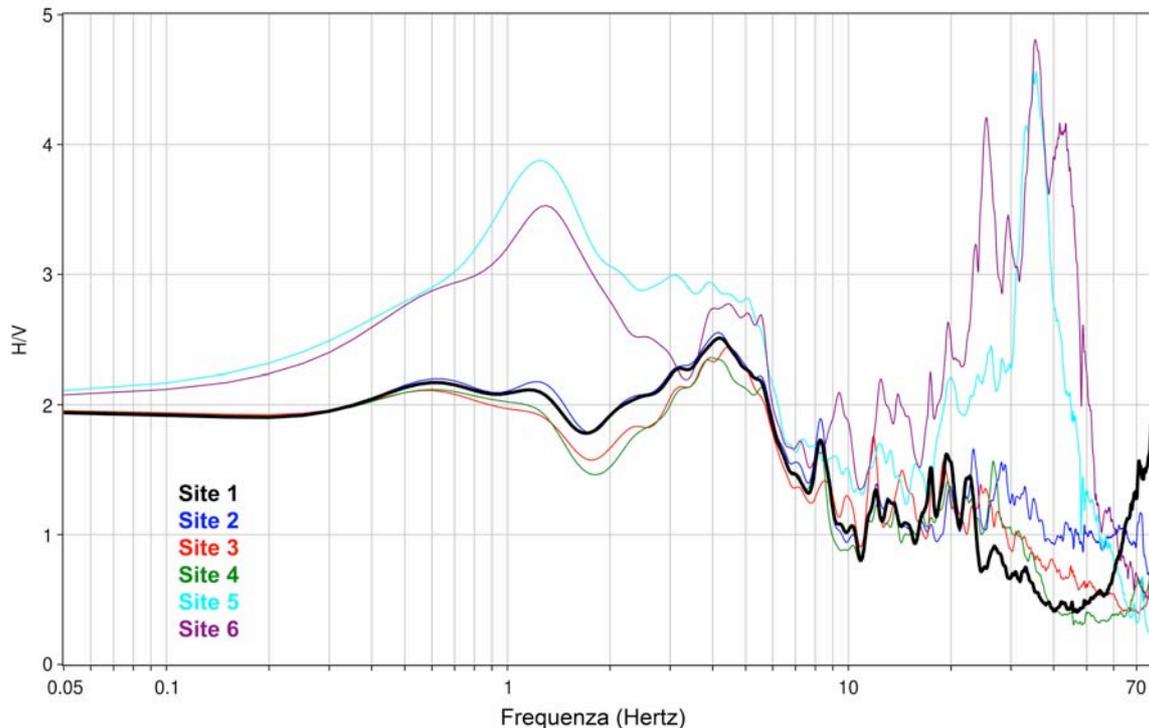


Figura 18. Sovrapposizione dei rapporti spettrali H/V determinati dai segnali registrati dal sensore LE-3D/20s nei 6 siti indagati. È possibile notare considerevoli differenze tra i rapporti spettrali H/V determinati per il siti all'esterno e all'interno del museo archeologico di Aidone.

Per ottenere una stima statisticamente robusta del rapporto spettrale H/V [Nakamura, 1989] nei sei siti indagati, abbiamo utilizzato finestre temporali di 100 s, per metà sovrapposte e finestrate con una Hanning per ridurre gli effetti del troncamento; abbiamo inoltre utilizzato la FFT per determinare lo spettro medio di ampiezza di ognuna delle componenti (Verticale, Nord-Sud ed Est-Ovest). Il rapporto H/V è stato determinato sommando vettorialmente gli spettri medi delle componenti orizzontali e dividendo il risultato per lo spettro medio della componente verticale.

I rapporti spettrali così determinati sono mostrati nelle Fig. 16. I rapporti spettrali sono stati determinati sia per i segnali registrati dal sensore LE-3D/20s che da quelli registrati and LE-3D-LITE/1s. La Fig. 16 mostra sovrapposti in uno stesso grafico, i rapporti spettrali H/V determinati dai segnali registrati con in due diversi sensori. Nell'intervallo di frequenze comune (1-40 Hz) le sei coppie di rapporti spettrali H/V risultano perfettamente sovrapponibili. La Fig. 17 mostra, in scala di colori, il rapporto spettrale H/V determinato su una finestra temporale di 2 ore relativa al sito 1. La stessa figura mostra inoltre, sempre per lo stesso set di dati, la deviazione standard del rapporto H/V al variare della frequenza.

È possibile notare la buona stabilità temporale, sull'intero periodo analizzato, di tutti i picchi presenti nei rapporti spettrali H/V del sito 1. Il grafico della deviazione standard mostra valori perlopiù contenuti nell'intervallo 0.1-0.3, a riprova della stabilità del parametro analizzato. Variabilità e deviazioni standard molto simili sono state determinate anche per i restanti siti indagati.

Per confronto, in Fig. 18 sono riportati in un unico grafico i rapporti spettrali determinati per i segnali acquisiti con il sensore LE-3D/20s nei 6 diversi siti indagati. Il rapporti spettrali H/V dei due siti posti al di fuori dal Museo Archeologico di Aidone (siti 5 e 6), mostrano diversi picchi energetici. Tra questi spiccano il picco a 1.25 Hz e il picco a 40 Hz.

Mentre il picco a 40 Hz può essere facilmente interpretato come una frequenza di risonanza innescata dallo strato lento superficiale già individuato nelle indagini MASW, il picco a 1.25 Hz risulta di difficile interpretazione. Qual'ora questo picco fosse interpretato come una frequenza di risonanza, dovrebbe essere interpretato con strati profondi parecchie decine di metri, che chiaramente dovrebbe far risentire il loro effetto anche negli altri siti di indagine posti a pochi metri o decine di metri.

L'ipotesi più verosimile, essendo questo picco presente solo sulle stazioni che hanno acquisito in prossimità di una scarpata (parzialmente visibile a sinistra di Fig. 9), è che questa discontinuità nel mezzo indagato non renda più valida l'approssimazione a mezzo 1D, in particolare per grandi lunghezze d'onda e quindi alle basse frequenze. Tale picco non è probabilmente interpretabile con le ipotesi di Nakamura, [1989].

L'unico picco significativo, ma di ampiezza limitata (circa 2.5), presente nel rapporto spettrale H/V del sito 1 (sito di installazione dell'Afrodite di Morgantina), risulta essere quello presente a 4.2 Hz, di probabile origine strutturale.

Un supporto a questa ipotesi viene fornito dai rapporti spettrali H/V determinati per i 4 siti interni al museo archeologico di Aidone (siti 1, 2, 3 e 4). È infatti possibile notare come tali rapporti spettrali H/V non mostrino picchi in corrispondenza né della frequenza 1.25 Hz né della frequenza a 40 Hz.

È quindi ragionevole ipotizzare che la rimozione del terreno agrario più superficiale, durante la costruzione delle fondamenta del museo archeologico di Aidone, abbia portato ad una riduzione dei fenomeni di risonanza.

4. Conclusioni

Il presente rapporto tecnico descrive alcune indagini geofisiche preventive all'installazione dell'Afrodite di Morgantina, eseguite allo scopo di valutare l'idoneità del sito prescelto e di fornire, ai tecnici del Paul Getty Museum di Los Angeles, i dati sismologici necessari a settare opportunamente i parametri di smorzamento del piedistallo antisismico che oggi sostiene la statua.

In una prima fase è stata ricostruita la sismicità storica che ha interessato la Sicilia e che in particolare è stata risentita ad Aidone, Comune che ospiterà, nell'omonimo Museo Archeologico, la statua dell'Afrodite. I risultati di tale ricostruzione hanno permesso di individuare nel terremoto della Val di Noto, dell'11 gennaio 1693, di intensità macrosismica epicentrale pari al XI grado della scala MCS, l'evento sismico maggiormente risentito ad Aidone. Questo disastroso evento sismico, ebbe in Aidone una intensità macrosismica (come ancora oggi testimoniano i resti di alcuni castelli, chiese e conventi) pari al IX grado della scala MCS.

Dai dati digitali della mappa della pericolosità sismica del territorio nazionale, sono stati estratti i valori di PGA per differenti livelli di probabilità in 50 anni, o differenti periodi di ritorno, e percentile.

Le indagini sismiche MASW, condotte nell'area retrostante il Museo Archeologico di Aidone, hanno permesso di determinare diversi modelli di velocità delle onde S e valori di V_{s30} . Il modello medio di velocità, mostra valori di V_s compresi tra 310 e 640 m/s con una inversione di velocità tra gli 11.5 e 24.5 m di profondità. I valori del parametro V_{s30} oscillano nello stretto intervallo 415-506 m/s. Per tale ragione, sulla base della classificazione dei terreni prevista dal Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14.01.2008 e successive modifiche del 04.02.2008, il tipo di suolo è stato classificato come categoria B.

L'acquisizione di rumore sismico e la successiva analisi ed interpretazione con il metodo H/V, ha permesso di valutare la risposta di sito di alcuni punti interni ed esterni al Museo Archeologico di Aidone.

Sul rapporto spettrale H/V del sito 1 (sito di installazione dell'Afrodite di Morgantina), nell'intervallo di frequenze di interesse sismologico, è stato individuato un unico picco significativo di ampiezza limitata (circa 2.5) a circa 4.2 Hz. Tale frequenza di risonanza risulta, verosimilmente di origine strutturale, in quanto non rilevata nell'area esterna retrostante il Museo, e potrebbe coincidere con la frequenza fondamentale della statua, creando pericolosi fenomeni di doppia risonanza. Per tale ragione, a conclusione dell'installazione dell'Afrodite sul piedistallo smorzato potrebbe essere opportuno determinare, tramite opportuni sensori sismici, le eventuali frequenze di risonanza del sistema base più statua.

Ringraziamenti

Si ringrazia l'architetto Enrico Caruso, direttore del Parco Archeologico e il geometra Francesco Piccillo per la fattiva collaborazione prestata durante l'esecuzione delle misure e per il supporto logistico.

Si ringrazia l'editore responsabile Gaetano Zonno per la precisa revisione che ha permesso di migliorare la qualità editoriale del presente lavoro.

Bibliografia

- Basili R., G., Valensise, P., Vannoli, P., Burrato, U., Fracassi, S., Mariano, M.M., Tiberti, E., Boschi (2008), The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, Tectonophysics, doi: 10.1016/j.tecto.2007.04.014
- Bender B., and Perkins, D.M.,(1987). SEISRISK III: a computer program for seismic hazard estimation. U.S. Geological Survey Bulletin, 1772, 48 pp.
- Boschi, E., G. Ferrari, P. Gasperini, E. Guidoboni, G. Smriglio e G. Valensise (eds) (1995). Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 a.C. al 1980 (ING, Roma - SGA, Bologna), pp. 973, con database su CD-ROM.
- Boschi, E., E. Guidoboni, G. Ferrari, G. Valensise e P. Gasperini (eds) (1997). Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal 461 A.C. al 1990 (ING, Roma – SGA, Bologna), pp. 644, con database su CD-ROM.
- Boschi, E., E. Guidoboni, G. Ferrari, D. Mariotti, G. Valensise e P. Gasperini (eds) (2000). Catalogue of Strong Italian Earthquakes, Ann. Geofis., 43 (4), pp. 268, con database su CD-ROM.
- Cornell, C. A., (1968). Engineering seismic risk analysis. Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606.
- Dal Moro G., Pipan M. & Gabrielli P., 2007, Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Posterior Probability Density Evaluation, J. Appl. Geophysics, 61, 39-55.
- Dal Moro G., Forte E., Pipan M. & Sukan M., 2006, Velocity Spectra and Seismic Signal Identification for Surface Wave Analysis, Near-Surface Geophysics, 4, 243-251.
- Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>.
- Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.
- Mitchell, M., (1996), An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press, Cambridge, MA.
- Molin, D., Stucchi, M. and Valensise, G., (1996). Massime intensità macrosismiche osservate nei comuni italiani, Servizio Sismico Nazionale.
- Nakamura, Y., 1989. A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface. Quarterly Report of RTRI, vol. 30, No. 1, Page No. 25 to 33.
- Park, C.B., Miller, R.D., and Xia, J., 1999, Multichannel analysis of surface waves (MASW); Geophysics, 64, 800-808.
- Peterson J., (1993). Observation and Modelling of Background Seismic Noise: U.S. Geol. Surv. Open-File Rept., Albuquerque, pp. 93-322.
- Progetto INGV-DPC S1 (2006). Proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 e progettazione di ulteriori sviluppi. <http://esse1.mi.ingv.it>.
- Stucchi et alii. (2007). DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04, Quaderni di Geofisica, Vol 49, pp.38, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>.
- WinMASW 4.6 beta User manual (2011), http://www.winmasw.com/english/manual_winMASW_eng.pdf.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2011 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia