

STUDIO DI GEOLOGIA

STUDI DI GEOLOGIA TECNICA E INDAGINI PENETROMETRICHE

Dott. geologo Girolamo Maria Culmone

COMUNE DI CALATAFIMI SEGESTA LIBERO CONSORZIO DI TRAPANI

PROGETTO DI REALIZZAZIONE DI DUE TETTOIE IN LEGNO
*in corrispondenza delle fermate bus navetta di collegamento con il
parcheggio e la zona sommitale del Parco archeologico di Segesta*

AL CATASTO F. n° 34 p.lla 925, 1353 e 1352

RELAZIONE GEOLOGICO-TECNICA

DITTA:

Ente Parco Archeologico di Segesta

IL GEOLOGO

DOTT. GIROLAMO M. CULMONE



GENERALITA'

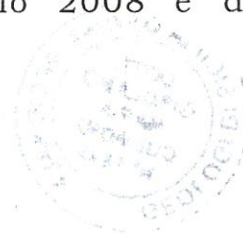
L'ing. Francesco Candela, nella qualità di progettista incaricato dall'Ente Parco archeologico di Segesta, ha affidato l'incarico allo scrivente, Girolamo Maria Culmone, Geologo, regolarmente iscritto all'Albo Regionale dei Geologi di Sicilia al n° 1825, circa la consulenza geologica, geognostica, geotecnica ed idrogeologica a supporto del progetto di realizzazione di due pensiline a servizio dei visitatori dell'area archeologica in corrispondenza delle fermate del bus navetta che collega le aree di parcheggio con la parte sommitale di Monte Barbaro. La prima posta nei pressi del Parcheggio all'ingresso e la seconda nei pressi del teatro.

In particolare lo studio verte alla conoscenza circa l'aspetto stratigrafico, geotecnico del terreno che andrà ad accogliere i nuovi sovraccarichi e le eventuali problematiche di tipo idrogeologico.

A tale scopo, preliminarmente, sono stati effettuati sopralluoghi estesi ad un areale più ampio di quello in studio unitamente a informazioni varie sui luoghi al fine di inquadrare il sito nell'ambito di un contesto geo-stratigrafico più ampio.

Le pensiline saranno realizzate in legno imbullonate su piccoli plinti in conglomerato cementaizio.

Per una più esatta ricostruzione della stratigrafia locale, inoltre, sono state eseguite n° 2 indagini sismiche di tipo HVSR, in corrispondenza dei due siti di imposta, nel rispetto del D.M. 14/09/2005 e del D. M. 14 gennaio 2008 e del D.M. 17 GENNAIO 2018.



L'incarico, pertanto, prevedeva l'esecuzione di tutti i rilievi ed indagini necessarie per:

- la ricostruzione stratigrafica dell'immediato sottosuolo;

- verifica della stabilità del sito;

- determinazione delle caratteristiche meccaniche e fisiche principali del terreno di fondazione.

A corredo del presente studio sono allegati:

- Corografia generale 1:25.000
- aerofotogrammetria 1:5.000
- Stralcio aerofotogrammetrico 1:10.000
- Carta geologica 1:5.000
- Sezioni geosismiche
- Relazioni HVSR

1. **INQUADRAMENTO E GEOMORFOLOGIA**

La zona cartograficamente è inserita nella tavoletta denominata **SEGESTA** del Foglio n. 257 I NE della carta d'Italia edita dall'I.G.M.I. e si sviluppa ad una quota prossima ai mt. 300,00 s.l.m.

La morfologia del sito in generale rientra nel contesto morfologico tipico delle aree corrispondenti al complesso dei "monti di Trapani" ed in particolare agli alti morfologici compresi tra Monte Inici, Monte Bonifato e Montagna Grande. Monte Barbaro ove è situato il parco Archeologico di Segesta si trova in posizione centrale tra questi monti raggiungendo una quota massima di mt 422

In relazione alle caratteristiche delle rocce ed alla loro giacitura, appena descritta, il reticolato idrografico nella zona risulta molto accentuato nei tratti a maggiore erodibilità, in cui si vengono ad incassare alvei a sviluppo meandriforme, di cui un esempio rappresentativo è lo stesso **Fiume Kaggera** distante dal nostro sito in studio ml 200 circa

Il territorio in generale ed in particolare i siti di imposta delle due pensiline si presentano in una condizione di discreta stabilità, con assenza di evidenti fenomenologie franose o di dissesto.

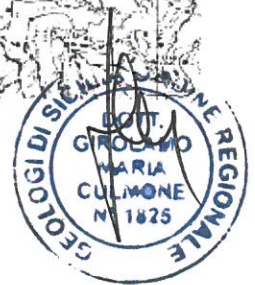
COROGRAFIA



SCALA 1:25.000



UBICAZIONE AREA DI STUDIO



AEROFOTO



SCALA 1:25.000



UBICAZIONE PENSILINA PARCHEGGIO



UBICAZIONE PENSILINA TEATRO

ubicazione dell'immobile da ristrutturare



Ubicazione di progetto pensilina Parcheggio



ubicazione dell'immobile da ristrutturare



Ubicazione di progetto pensilina Teatro



2. GEOLOGIA E LINEAMENTI TETTONICI

L'area di Monte Barbaro rientra nel complesso geologico noto in letteratura come "Piattaforma Carbonatico - Pelagico Trapanese" risultante dalla sovrapposizione tettonica di unità carbonatiche e terrigeno-carbonatiche di età mesozoico-terziaria. A partire dal Miocene inferiore tale dominio paleogeografico è stato deformato via via verso S dando origine a dei corpi geologici con omogeneità di facies e di comportamento meccanico. Tale unità tettonica-carbonatica durante l'intervallo di tempo Langhiano-Tortoniano si è sovrapposta su se stessa con vergenza verso S a formare l'edificio tettonico della zona San Vito Lo Capo - Monte Inici - Monte Barbaro. Nella zona tali terreni sono ricoperti dai depositi quaternari rappresentati da sabbie ed argille sabbiose e da potenti depositi continentali costituiti dai travertini della zona di Alcamo. La tettonica compressiva, determinando fenomeni di sovrascorrimento, embriciamento e piegamento di zolle carbonatiche intercalate da materiali flischoidi prevalentemente plastici è stata la causa prima della formazione del complesso carbonatico Monte Pispisa-Monte Barbaro, di Monte Inici (ca. km 6 a Nord) e dei massici carbonatici limitrofi.

In genere nei rilievi carbonatici la morfologia è caratterizzata da forme aspre e molto acclivi indicative di una resistenza molto forte ed uniforme agli agenti d'erosione data dalle serie prevalentemente calcaree che ivi sono rappresentate. Tipi litologici (dai termini litologici più antichi a quelli più recenti) presenti sul Monte Barbaro i Calcari massicci e calcari dolomitici. Sebbene affiorino solamente nella parte S del

vallone della Fusa tale litologia forma il corpo principale della dorsale di Monte Inici. Si tratta di dolomie e calcari dolomitici mal stratificati di colore bianco dall'aspetto massiccio con fratture riempite da calcite spatica, passanti verso l'alto a calcari regolarmente stratificati in strati di cm 20-30 di spessore, con resti algali, ooliti, frammenti di crinoidi e lamellibranchi. Calcari straterellati talora selciferi con livelli marnosi. Il colore varia dal grigio al rosato.

Età: Lias inf. - Titonico

Le *Calcilutiti e calcilutiti marnose* affiorano estesamente su tutto Monte Barbaro costituendo l'ossatura del rilievo stesso presentando nelle aree del monte varie facies litologiche. La roccia è costituita da calciluti e calcari marnosi disposti in strati di spessore variabile (da qualche dm a qualche cm) con noduli e liste di selce intensamente fratturate a forma ameboidale o ellisoidale, di colore generalmente rosso cupo. Calcilutiti di colore rosso o rosato disposte in strati lenticolari che si sovrappongono troncadoli con giunti nettissimi, ad altri strati lenticolari, estrema irregolarità dei giunti accompagnata però da un parallelismo d'insieme degli strati principali. Tali calcilutiti passano ad una frazione più francamente marnosa di colore rosso cupo, nel complesso la roccia assume un aspetto tipicamente scagliettato. Facies zona vallone della Fusa: le calcilutiti presentano un colore bianco sporco, si tratta di un accumulo potente (tra i m 50 e i m 100 di spessore) di strati caotici e disordinati, intercalati tra strati indisturbati, piano paralleli, continui, ritmici (turbiditici). L'impressionante continuità laterale e la notevole potenza lo fa apparire come un unico enorme strato. Età: Cretaceo sup. - Oligocene inf.

E' su quest'ultimo litotipo rappresentato da "Calcari, calcari marnosi e calcilutiti" che saranno realizzati i punti di ancoraggio (plinti prefabbricati in calcestruzzo) delle due pensiline.

5 - CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DEI TERRENI

Quanto precedentemente esposto ha consentito di ricostruire con sufficiente attendibilità l'assetto stratigrafico e geomeccanico dei terreni, in relazione alle opere previste in progetto.

Grazie anche alle prova HVSR effettuate in sito, allo studio della bibliografia e dalla visione diretta in situ si è potuto delineare un quadro chiaro dell'assetto geomeccanico dei terreni che risultano perfettamente idonei ad ospitare i piccoli plinti prefabbricati ed i punti di ancoraggio dei cavi in acciaio. In considerazione inoltre della esiguità delle opere previste.

I principali parametri meccanico-fisici secondo la normativa vigente in Italia (OPCM 3274; DM 14/09/2005, DM 14/01/2008 e DM 17/01/2018 Norme Tecniche per le Costruzioni) colloca i terreni in **categoria B**.

“Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s”

PARAMETRI GEOTECNICI DEL TERRENO DI FONDAZIONE

I principali parametri meccanico-fisici risultano:

Valori di riferimento Segesta

Parcheggio basso Segesta1 – Parcheggio

$V_{s\text{eq}} = 683\text{m/s}$ categoria suolo B

ANGOLO DI ATTRITO INTERNO	Φ'	= 30°
COESIONE INTERNA DRENATA	c'	= 0,1 Kg/cm ²
PESO PER UNITA' DI VOLUME	γ	= 2.00 t/mc

B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s.	≥360
		≤800

Parcheggio alto Segesta 2 - Teatro

$V_{s\text{eq}} = 553\text{m/s}$ categoria suolo B

ANGOLO DI ATTRITO INTERNO	Φ'	= 30°
COESIONE INTERNA DRENATA	c'	= 0,1 Kg/cm ²
PESO PER UNITA' DI VOLUME	γ	= 1.85 t/mc

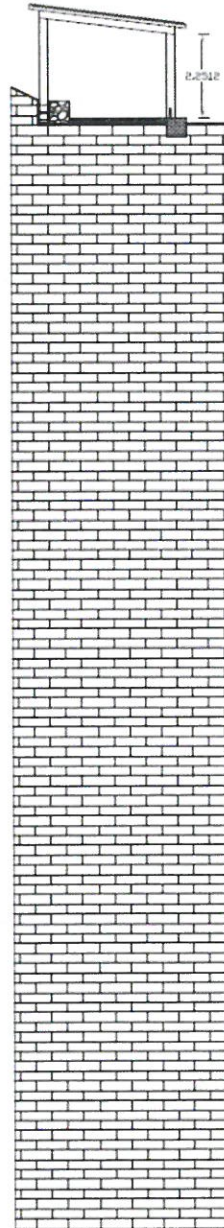
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s.	≥360
		≤800

SEZIONE GEOSISMICA

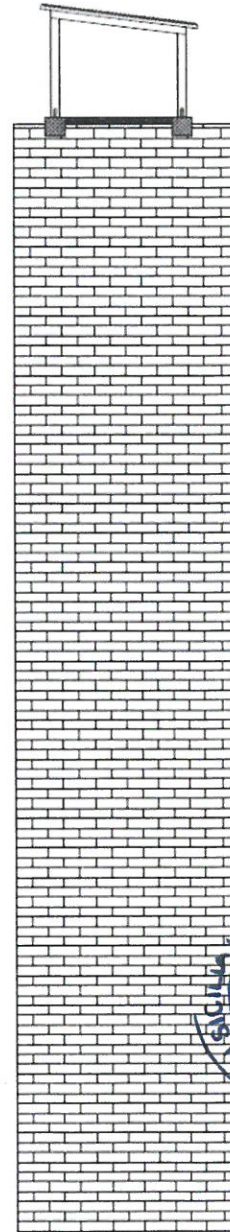
Tettoia fermata teatro

Tettoia ingresso al parco

Calcari, calcari marnosi e calcintiti



Calcari, calcari marnosi e calcintiti



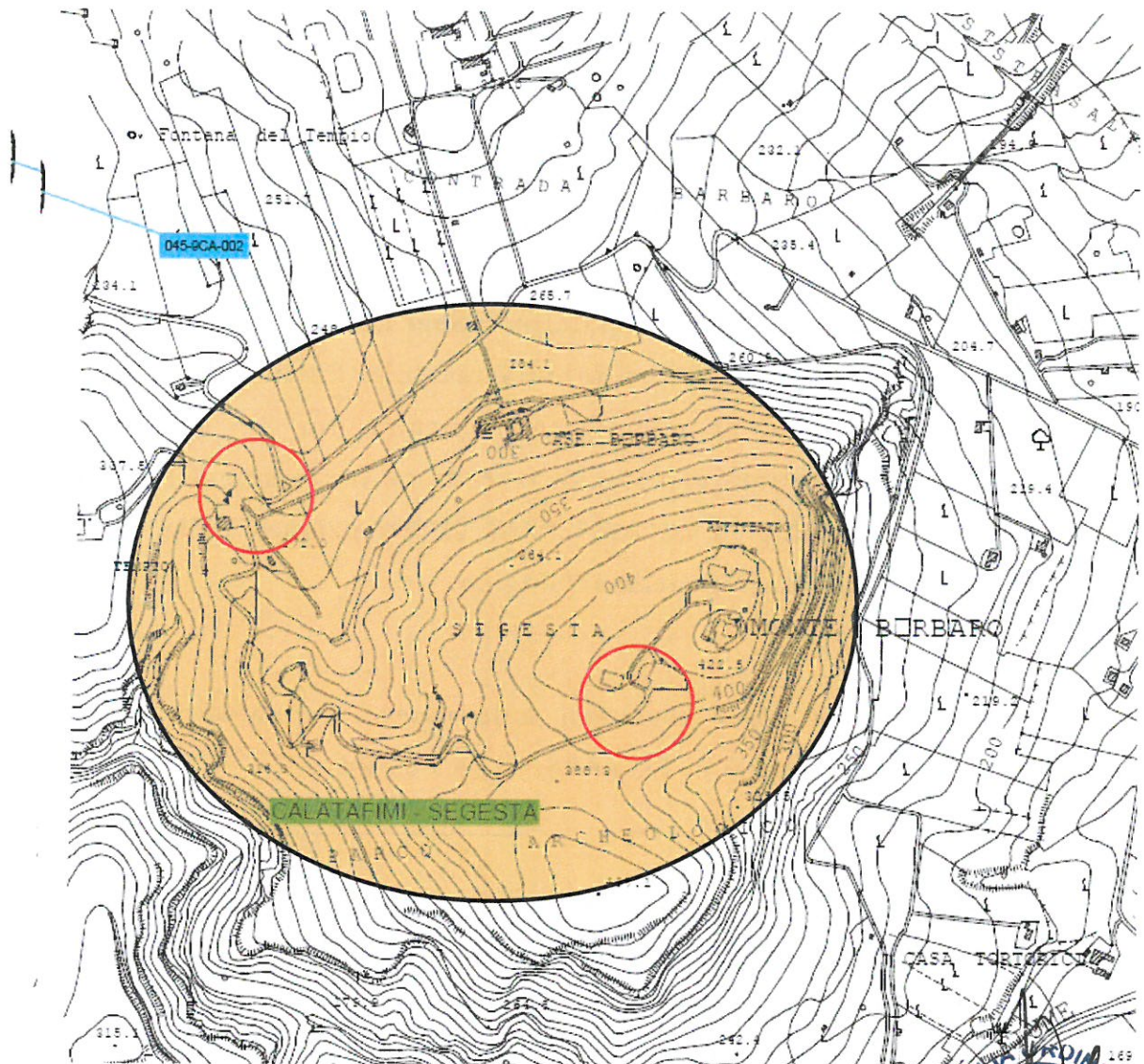
$V_{eq} = 553.00 \text{ m/s}$

$V_{eq} = 683.00 \text{ m/s}$

CATEGORIA SUOLO: B



CARTA GEOLOGICA



○ *ubicazione edificio*

● *Calcari, calcari marnoci e calcilutiti*



DICHIARAZIONE RISCHIO IDROGEOLOGICO

Il sottoscritto Dott. Geologo Girolamo Culmone iscritto all'Ordine Regionale dei Geologi di Sicilia al n. 1825 con la presente dichiara quanto segue: con Decreto Presidenziale 4 giugno 2007, pubblicato sulla GURS n. 36 del 10 agosto 2007 e successive modifiche ed aggiornamenti è stato approvato il piano stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico del bacino idrografico del fiume San Bartolomeo, che interessa i comuni di Alcamo, Castellammare del Golfo, Calatafimi Segesta, che l'area oggetto di intervento edilizio sita nel territorio comunale di Calatafimi all'interno del parco Archeologico di Segesta non rientra tra le aree a rischio idrogeologico in quanto non risulta inserita né tra le aree a Pericolosità e Rischio Geomorfologico né tra i "Siti di Attenzione" della Carta della Pericolosità e del Rischio Geomorfologico.

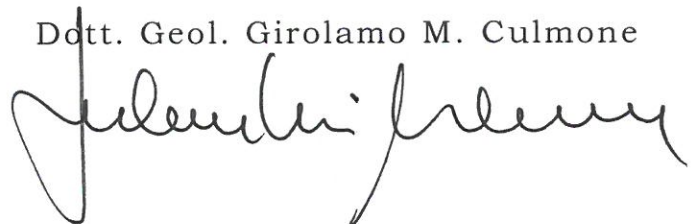
Inoltre l'area non ricade nemmeno nelle zone di pericolosità e di Rischio Idraulico per i fenomeni di Esondazione (R3 ed R4).

Si allega stralcio della Carta della Pericolosità e del Rischio Geomorfologico in scala 1:10.000 e relative legende.

Alcamo li Novembre 2020

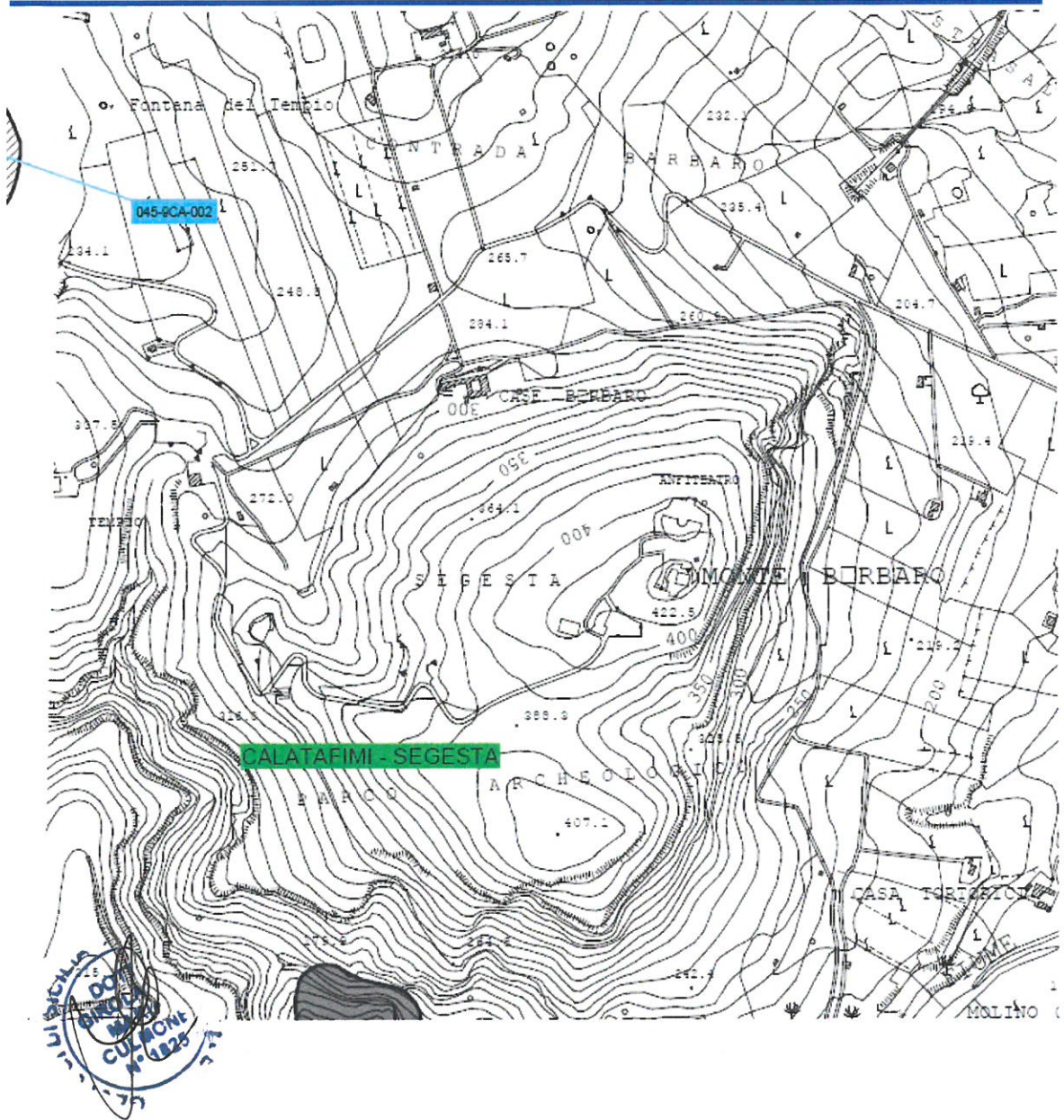
Firma

Dott. Geol. Girolamo M. Culmone






Progetto di realizzazione di due pensiline presso le fermate del bus navetta di collegamento tra
il parcheggio e la zona sommitale Teatro - Calatafimi Segesta (TP)
Ditta Parco Archeologico di Segesta




REPUBBLICA ITALIANA



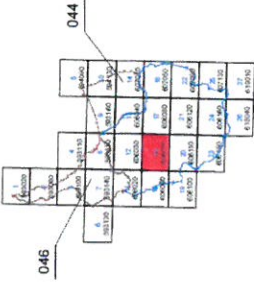
Regione Siciliana
Assessorato Territorio e Ambiente
DIPARTIMENTO TERRITORIO E AMBIENTE
Servizio 4 "ASSETTO DEL TERRITORIO E DIFESA DEL SUOLO"

Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.)
(ART. 1 D.L. 180/98 CONVERTITO CON MODIFICHE CON LA L. 267/99 E SS.MM.II.)

- Bacino Idrografico del F. San Bartolomeo (045)
- Area territoriale tra il bacino del F. Jato e il F. San Bartolomeo (044)
- Area territoriale tra il bacino del F. San Bartolomeo e Punta di Solanto (046)



CARTA DEI DISSESTI N° 16
COMUNE DI Calatafimi-Segesta
Scala 1:10.000



Anno 2006

LEGENDA

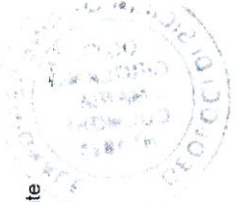
TIPOLOGIA

- Crollo e/o ribaltamento
- Colamento rapido
- Sprofondamento
- Scorrimento
- Frana complessa
- Espansione laterale o deformazione gravitativa (DGPV)
- Colamento lento
- Area a franosità diffusa
- Deformazione superficiale lenta
- Calanco
- Dissesti conseguenti ad erosione accelerata

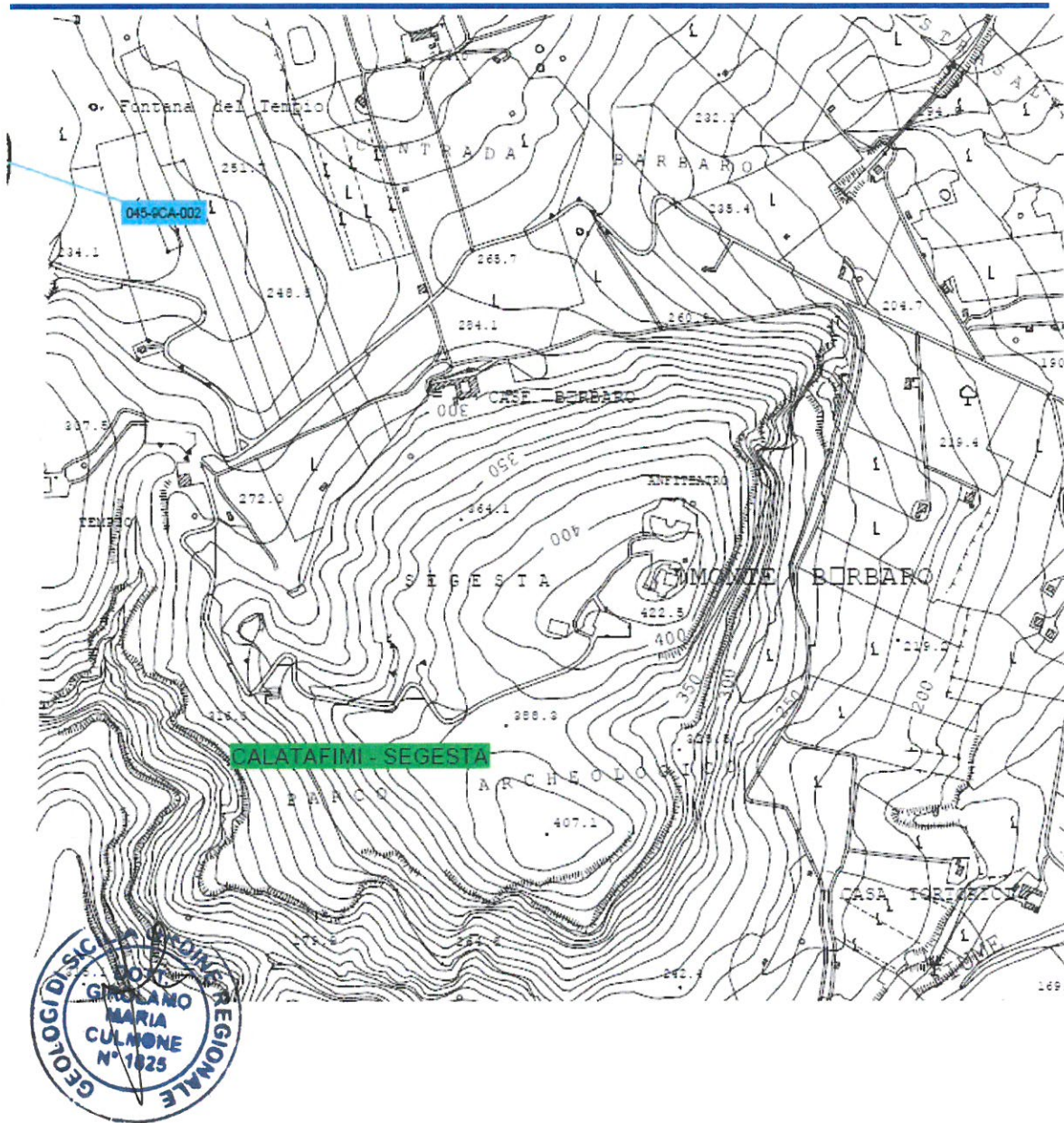
STATO DI ATTIVITA'

- Attivo
- Inattivo
- Quiescente
- Stabilizzato artificialmente o naturalmente

Limite bacino idrografico
Limite area territoriale
Limite comunale



Progetto di realizzazione di due pensiline presso le fermate del bus navetta di collegamento tra il parcheggio e la zona sommitale Teatro - Calatafimi Segesta (TP)
Ditta Parco Archeologico di Segesta



4. CONCLUSIONI

- Dallo studio eseguito è emerso quanto segue:
- Il litotipo interessato dallo sbancamento è composto da “ calcari , calcari marnosi e calcilutiti variamente stratificati e cementati”..
- Da quanto precedentemente esposto, considerato il limitato movimento terra si evince una soluzione ottimale in termini di mantenimento dello stato di equilibrio dei substrati in considerazione della limitatezza dei nuovi carichi.
- Gli scavi per la posa dei modesti plinti in calcestruzzo saranno di modesta entità
- I criteri che saranno utilizzati per la realizzazione delle pensiline ancorati con piccoli plinti in calcestruzzo sono di estrema accortezza e semplicità anche in considerazione del sito in questione.
- La circolazione idrica sotterranea, peraltro scarsa, non interferirà in alcun modo con l'opera in oggetto.
- Allo stato attuale dei luoghi, è da escludersi l'insorgenza di problematiche di carattere idrogeologico e statico.
- Tutte le operazioni necessarie per la posa delle nuove strutture dovranno svolgersi attuando la massima attenzione alle strutture esistenti. Allo stato attuale dei luoghi e permanendo lo stesso è da escludersi l'insorgenza di problematiche di carattere idrogeologico e statico.

Alcamo li Novembre 2020



IL GEOLOGO

**STUDIO DI GEOLOGIA
DOTT. GIROLAMO CULMONE**

- Ricerche idriche - Studi di Geologia Tecnica
- Indagini penetrometriche e sismiche

**COMUNE DI CALATAFIMI
PROVINCIA DI TRAPANI**

INDAGINE GEOFISICA

COMMITTENTE: Ente Parco Archeologico Segesta

Data: Maggio 2020



Indagini sismiche in situ eseguite all'interno del parco Archeologico di Segesta, nel territorio del Comune di Calatafimi Segesta

Elaborati:

- Elaborati indagine geofisica (HVSR)
- planimetria generale;
- elaborati grafici;
- documentazione fotografica

IL CONSULENTE INCARICATO:

Geol. Girolamo Culmone



1. NOTE INTRODUTTIVE

In relazione alla progettazione di due pensiline da realizzarsi a servizio dei visitatori del Parco Archeologico di Segesta, nel territorio comunale di Calatafimi Segesta (TP), di proprietà dell'Ente Parco Archeologico di Segesta, il sottoscritto Dott. Geol. Girolamo Culmone, ha ritenuto opportuno eseguire una indagine geofisica a mezzo di una prova sismica passiva di tipo HVSR a supporto della progettazione della pensilina posta nei pressi dell'area parcheggio del Parco.

La presente indagine geofisica, pertanto, è finalizzata alla caratterizzazione sismica e geotecnica del lotto di terreno interessato dal progetto (*Approccio Semplificato non per classi d'uso III e IV*), ai sensi della nuova normativa tecnica sulle costruzioni "*Norme Tecniche per le Costruzioni*", entrata in vigore il 1° luglio 2009, in applicazione della circolare n.617/2009, nonché in riferimento all'Ordinanza P.C.M. n° 3274/2003, D.M. 14.01.2008 ed ultimo aggiornamento delle "*Norme Tecniche per le costruzioni*" D.M. 17 gennaio 2018 (Suppl. Ord. n.8 G.U. n.42 del 20.02.2018; Ai sensi della suddetta normativa il terreno sismicamente significativo è stato diviso in 5 categorie di profilo stratigrafico del sottosuolo compreso tra il piano d'imposta delle fondazioni e la formazione di base rigida), basate sulla stima della velocità media delle onde sismiche di taglio (V_s equivalente) nei primi 30m di profondità e ricavata dalle indagini geofisiche eseguite all'interno del lotto, consistenti nella esecuzione di n. 1 prospezione sismica con metodo HVSR, al fine di fornire informazioni aggiuntive per la caratterizzazione del sito sulla base dell'analisi delle onde superficiali di *Rayleigh* e quindi sulla stima del valore di V_s equivalente.

In particolare, il rilievo dei microtremori è stato elaborato attraverso la tecnica HVSR o di *Nakamura*, e consente di determinare la "*frequenza di risonanza*" di uno strato caratteristico del sito per il quale assume il valore massimo il rapporto $RHV = HS/VS$ (Horizontal to Vertical Ratio) tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo, assumendo che la componente verticale (V) del *noise*, nel passare dal Bedrock alla superficie non subisca amplificazione. Con l'impiego dei programmi votati Geopsy, Easy HVSR e Easy MASW della Geostru (Codice cliente 8112) e ProgramGeo aggiornato ai sensi della nuova normativa, si è determinato il valore della frequenza di picco del sito e quindi la relativa profondità del contrasto di impedenza.

1.1 Inquadramento del sito

L'area ricade nella zona immediatamente a nord-ovest del centro urbano di Calatafimi presso il Parco Archeologico del Teatro di Segesta; Le indagini sono state eseguite il 26 maggio 2020:



Fig. 1.1.1.:

Ubicazione sito: (Lat. 37.939007° - Long. 12.841910°) m 399 s.l.m. - P = 12.5°

2. INDAGINE GEOFISICA ESEGUITA

Le indagini sono state condotte con un **GEObOX SR04** 24 bit 3CH, Microtremor Digitizer con GPS dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, senza cavi esterni per l'acquisizione del rumore sismico e notebook **TOSHIBA** per l'acquisizione dei dati di campagna. In applicazione alla metodologia di base studiata da Nakamura tutte le misure a stazione singola in campo aperto sono state orientate secondo il Nord. In particolare, il rilievo dei microtremori è stato elaborato attraverso la tecnica HVSR o di *Nakamura*, e consente di determinare la "frequenza di risonanza" di uno strato caratteristico del sito per il quale assume il valore massimo il rapporto $RHV = HS/VS$ (Horizontal to

Vertical Ratio) tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo, assumendo che la componente verticale (V) del *noise*, nel passare dal Bedrock alla superficie non subisca amplificazione.

2.1 Cenni storici e stratigrafia sismica da indagine a stazione singola

Il rilievo dei microtremori si basa sull'assunzione che il valore massimo del rapporto tra gli spettri di ampiezza di Fourier, delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo, risulti condizionato dallo spessore sotteso da una soluzione di continuit  ad elevato gradiente di impedenza sismica nel sottosuolo e dalla velocit  equivalente dei terreni sottesi al tetto ("*sedimento*"), assumendo che la componente verticale (V) del *noise*, nel passare dal substrato alla superficie, non subisca amplificazione. Disponendo della lettura del valore di frequenza per la quale risulta massimo il rapporto H/V delle componenti spettrali del moto, valore che corrisponde alla frequenza di sito (f_0), la determinazione delle incognite relative alla geometria del sottosuolo (V_s e H) necessita di informazioni ulteriori che devono essere acquisite attraverso differenti prospezioni o dati stratigrafici altrimenti noti nell'area (stratigrafie di pozzi/sondaggi e conoscenza geologica approfondita)

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre le informazioni relative al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi la tecnica che si   maggiormente consolidata nell'uso   quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o abbreviando H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). Il metodo HVSR consiste nello studio del rapporto spettrale tra la componente orizzontale del rumore e quella verticale (H/V spectrum). Il valore di tale rapporto   direttamente correlato con la frequenza di risonanza determinata dal passaggio tra due strati con una differenza significativa del contrasto di impedenza (velocit  delle onde e densit  del materiale). Considerando due strati con differente impedenza acustica, la frequenza di risonanza (f_r)   legata allo spessore (h) dello primo strato ed alla velocit  delle onde di taglio V_{s1} che lo attraversano dalla seguente relazione: $f_r = V_{s1} / 4 H$ (o ugualmente $T = 4H/V_{s1}$) [1], essendo la frequenza l'inverso del periodo, nota come legge del "*quarto di lunghezza d'onda*".

L' HVSR   in grado di fornire stime affidabili delle principali frequenze di risonanza del sito da edificare e, inoltre, la caratterizzazione strutturale dinamica di un edificio gi  realizzato. Riconosciuta questa capacit  di misura della frequenza di risonanza dello strato di copertura e dato che, se   disponibile una stima delle velocit  delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR pu  essere in linea di principio usato come strumento stratigrafico. I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di corpo e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh oltre che di Love.

Tuttavia ci si pu  ricondurre a risonanza delle onde di corpo, poich  le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poich  la velocit  dell'onda di Rayleigh   molto prossima a quella

delle onde S. Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1; ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi allo spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando l'equazione [1]. L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La situazione, nel caso di un suolo reale, è spesso più complessa. Innanzitutto il modello di strato piano al di sopra del bedrock si applica molto raramente. Poi, la velocità aumenta con la profondità, possono esserci eterogeneità laterali importanti ed infine la topografia può non essere piana. L'inversione delle misure di microtremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta quindi la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli 'sintetici', cioè con quelli calcolati relativamente al campo d'onde completo di un modello 3D. L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini. In questo lavoro i segnali sono stati analizzati non solo attraverso i rapporti spettrali H/V ma anche attraverso gli spettri delle singole componenti, e nei casi più significativi, le curve HVSR sono state invertite secondo la procedura descritta da Arai e Tokimatsu (2004).

2.2 Procedura di analisi:

La sismica passiva si basa sulla misura dei microtremori che sono sempre presenti sulla superficie terrestre e sono generati da fenomeni naturali (vento, onde marine) e artificiali (attività antropiche). I dati raccolti sono stati elaborati, per ogni punto di misura e per ognuna delle tre componenti del moto, eseguendo l'analisi spettrale del segnale per evidenziare la distribuzione in frequenza del *noise*.

I dati spettrali risultanti dalle elaborazioni numeriche effettuate sono tarate sino a circa 150 Hz (*la frequenza di campionamento è di 300 Hz*), anche se entro il limite di 20 Hz rientrano le frequenze maggiormente significative dal punto di vista geologico – tecnico. Di seguito vengono riportate le relative curve H/V, ove l'area grigia rappresenta la frequenza di picco media e la sua deviazione standard. Il valore di frequenza è al limite tra il grigio scuro e grigio chiaro le aree:

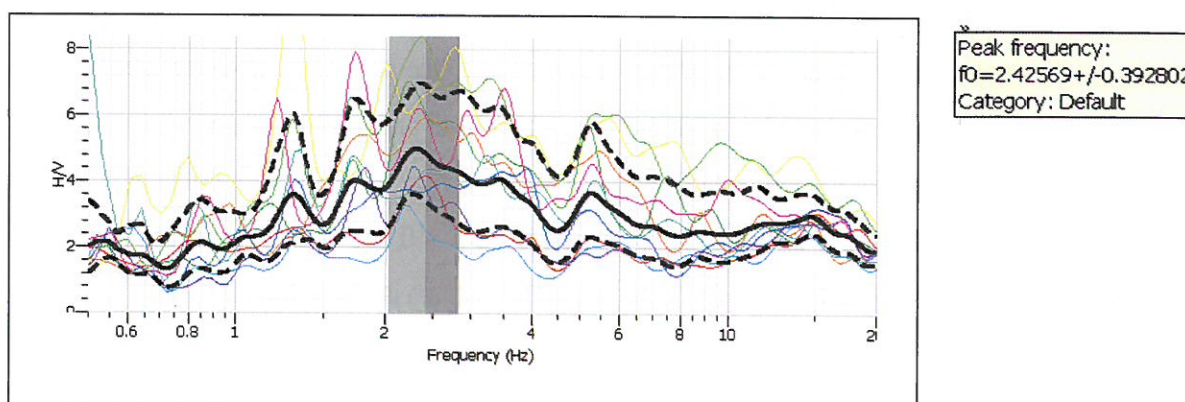


Figura 2.2.1: Curva H/V con frequenza di picco fino a 20 Hz – L'area grigia rappresenta la frequenza di picco media

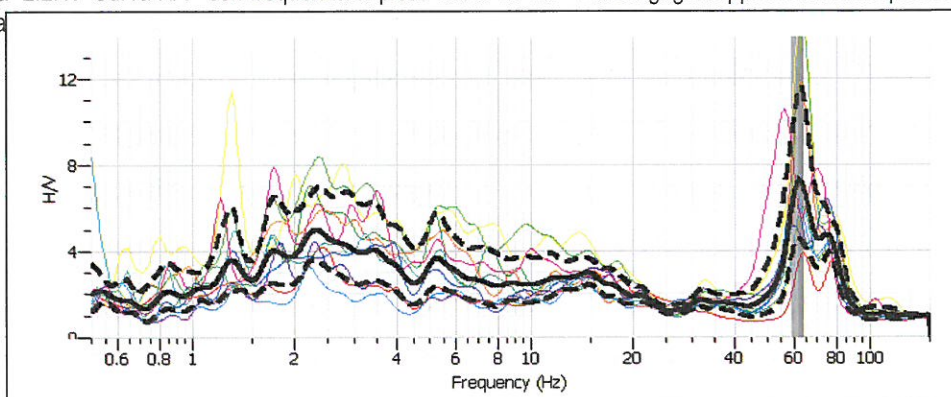


Figura 2.2.2: Curva H/V con frequenza di picco fino a 150 Hz.

La lunghezza di registrazione dei sondaggi in oggetto HV corrisponde ad un tempo di 20 minuti, con analisi dell'intera traccia pari all'90% circa, in quanto il segnale è stato filtrato da rumore antropico. Sulla base dell'elaborazione e analisi dei grafici ottenuti, si osserva un picco H/V pari alla frequenza di risonanza del terreno $f_0 = 2,42 \pm 0,39$. Il dato importante che abbiamo ottenuto è la frequenza caratteristica di risonanza del sito (*Peak Frequency*) che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di **doppia risonanza**, pericoloso per gli stessi fabbricati. La frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, che può essere misurata eseguendo le misurazioni all'interno dello stesso, in seguito sarà possibile confrontarla con quella del terreno su cui sorge per comprendere al meglio il rischio sismico a cui è sottoposto l'edificio in caso di sisma. Il periodo fondamentale, di una struttura (esistente o di progetto) se non direttamente misurato, può essere preliminarmente stimato dalla relazione: $T_{ed} \approx Ch^{3/4} \approx n/10$ dove: T_{ed} è il periodo dell'edificio, h è la sua altezza ed n è il numero di piani; mentre il parametro $C = 0,050$ vale per edifici in muratura, $C = 0,075$ per edifici in muratura e calcestruzzo e $C = 0,085$ per edifici a telaio in calcestruzzo.

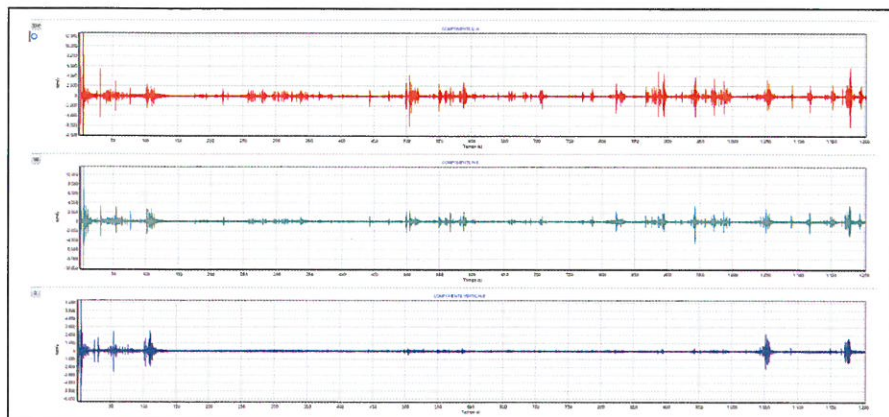


Fig 2.2.3:
Registrazione delle
tracce (durata
1200sec.)

Negli ultimi anni un progetto europeo denominato SESAME (Site EffectS Assessment using Ambient Excitations) si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola e array. Esso ha anche fornito dei criteri per valutare la bontà delle curve HVSR e la significatività dei picchi HN eventualmente trovati. Ad ogni picco in frequenza corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto d'impedenza. Nel nostro lotto è presente un contrasto d'impedenza corrispondente alla frequenza di picco di terreno $f_0 = 2,39 \text{ Hz}$, posto alla profondità di circa oltre 30m circa dal piano di calpestio attuale.

f_0 (Hz)	h (m)	
< 1	> 100	Centinaia di metri
1 - 2	50 - 100	Decine di metri
2 - 3	30 - 50	
3 - 5	20 - 30	
5 - 8	10 - 20	
8 - 20	5 - 10	Qualche metro
> 20	< 5	
H/V > 3 Alto contrasto		
2 < H/V < 3 Basso contrasto		

Tabella 2.2.4: Stima della profondità del contrasto di impedenza sulla base della frequenza di risonanza.

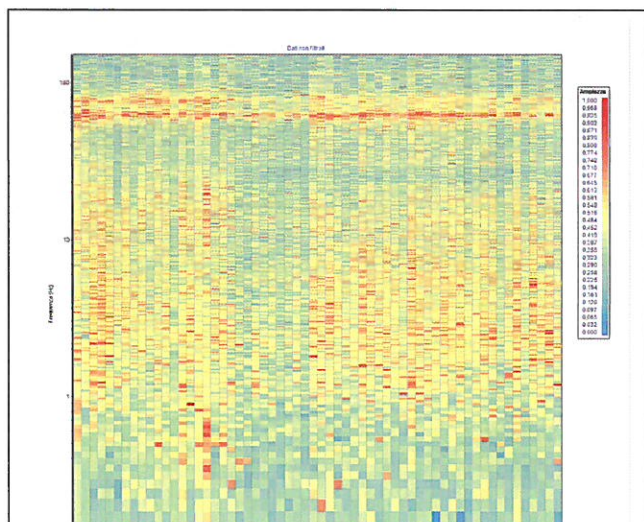


Fig. 2.2.5: Mappa della stazionarietà degli spettri e prova sismica HVSR



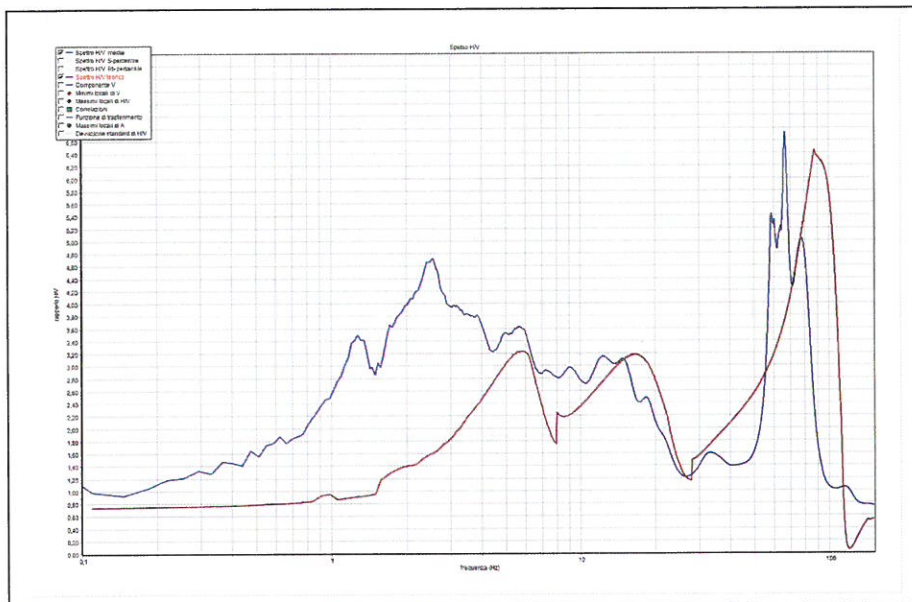


Fig. 2.2.6: Spettro H/V

Fig. 2.2.7: Profilo delle Vs eq. e stima della classe del sito.

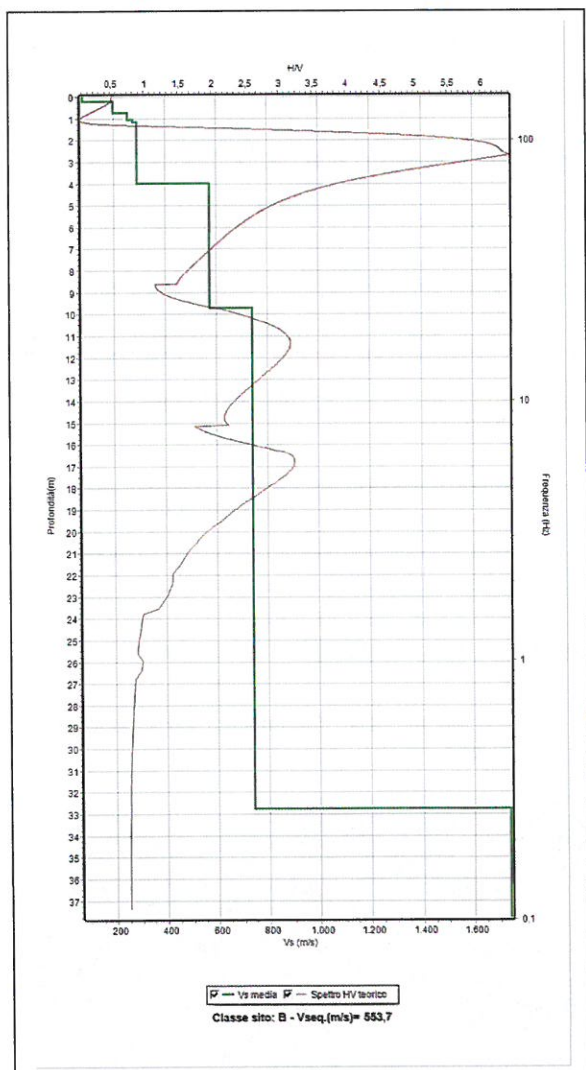


Tabella parametri picchi stratigrafici da spettro H/V delle onde di Rayleigh e Love V1

Criteri SESAME (2005) per una curva H/V valida da S1 a S3: L=10Le, S2: L=10Lr e S3: S=2 per 0.5g-R2g
 LEGENDA: L=lunghezza delle finestre (s); N=numero finestre; f=1/Hz=frequenza dei picchi stratigrafici; s=classificazione standard

N.	f(Hz)	H/V	Kg	H1(m)	H2(m)	H3(m)	S1	S2	S3
1	77.82	5.03	0.32	0.18	0.1	0.08	S1	S1	S1
2	68.72	6.73	0.68	0.2	0.12	0.1	S1	S1	S1
3	64.31	6.23	0.43	0.21	0.12	0.1	S1	S1	S1
4	60.5	6.33	0.47	0.23	0.13	0.11	S1	S1	S1
5	58.89	6.42	0.5	0.24	0.14	0.12	S1	S1	S1
6	18.31	2.48	0.54	1.12	0.66	0.55	S1	S1	S1
7	14.79	3.11	0.65	1.49	0.87	0.74	S1	S1	S1
8	5.64	3.63	2.33	6.41	3.15	2.05	S1	S1	S1

Sopra la frequenza dei picchi H/V stratigrafici individuati, le relative ampiezza spettrali H/V e gli indici di vulnerabilità (Kg) di Nakamura per il terreno. Valori di Kg superiori indicativamente a 10 segnalano la probabilità che si possano manifestare elevate deformazioni nel terreno durante il sisma, con l'insorgere di fenomeni quali la liquefazione dei livelli sabbiosi saturi.

Nella tabella sono indicate anche le altezze degli edifici con frequenza di risonanza paragonabile a quella del terreno, per valutare la possibilità che si manifestino fenomeni di doppia risonanza. Le altezze H1, H2 e H3 sono calcolate rispettivamente per edifici in acciaio, in cls e di altro tipo; sono infine visualizzati i tre criteri di SESAME (2005) per valutare l'attendibilità dei picchi H/V stratigrafici individuati.

Tabella parametri geotecnici per basse deformazioni da HVSR V1

N.	Da (m)	a (m)	ds (m)	Vic(m/s)	Gamma(kV)	Smorzament	Vs(m/s)	GD(Mpa)	Ed(Mpa)	Kv(Mpa)	Ey(Mpa)
1	0.0	0.22	0.22	78	17.28	0.05	142	10.72	46.45	32.18	28.84
2	0.22	0.74	0.52	168	19.82	0.05	402	78.41	323.48	218.91	210.16
3	0.74	0.98	0.24	253	20.1	0.05	452	131.15	489.44	320.58	346.23
4	0.98	1.05	0.07	265	20.01	0.05	486	132.65	501.12	324.25	350.19
5	1.05	1.16	0.11	275	20.23	0.05	524	155.82	560.23	358.34	425.5
6	1.16	3.97	2.81	291	19.84	0.05	544	179.27	599.44	371.95	443.3
7	3.97	5.7	5.73	274	21.61	0.05	637	725.76	1538.45	987.73	1741.91
8	5.7	32.75	23.05	739	21.73	0.05	1207	1206.76	3229.01	1613.01	2925.41
9			0.0	1741	24.52	0.05	2843	7577.39	20206.35	10103.17	18185.71

Legenda: Vs=Velocità onde S; Gamma=peso di volume; sigmaV= pressione verticale efficace; RQD=Rock Quality Designation, E= modulo di Young; Phi=angolo di resistenza al taglio di picco; Cu=coesione non drenata.

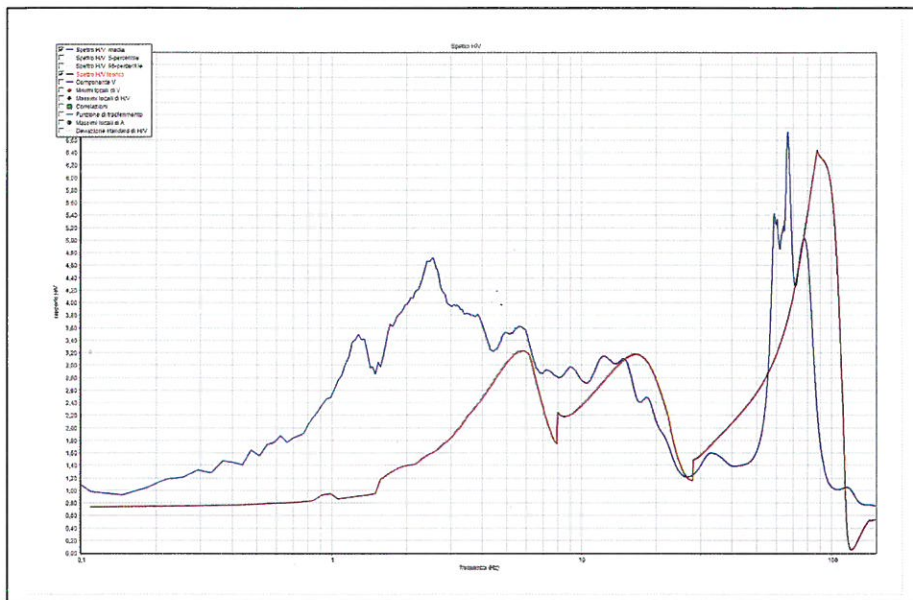


Fig. 2.2.6: Spettro H/V

Fig. 2.2.7: Profilo delle Vs eq. e stima della classe del sito.

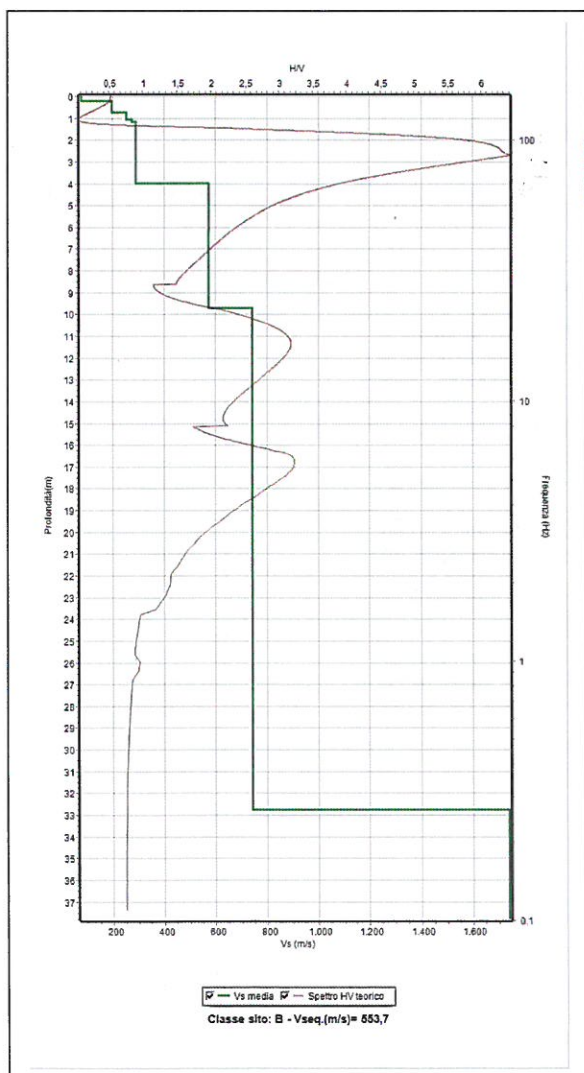


Tabella parametri picchi stratigrafici da spettro H/V delle onde di Rayleigh e Love V1

Classe SESAME (2005) per una curva H/V alle frequenze S1: f1=1/3Lw - S2: Lw/4h e f3=200 - S3: s e c per 0,1p-RQD

LEGENDA: L=lunghezza della finestra g1 - h=av. spessore - f0=frequenza del picco stratigrafico - s=deviazione standard

N	h1(Hz)	H/V	Kg	H1(m)	H2(m)	H3(m)	S1	S2	S3
1	77.82	5.03	0.32	0.16	0.1	0.08	SI	SI	SI
2	96.72	8.73	0.65	0.2	0.12	0.1	SI	SI	SI
3	54.31	5.23	0.43	0.21	0.12	0.1	SI	SI	SI
4	82.5	5.33	0.47	0.23	0.13	0.11	SI	SI	SI
5	58.88	5.42	0.5	0.24	0.14	0.12	SI	SI	SI
6	18.31	2.48	0.34	1.12	0.66	0.65	SI	SI	SI
7	14.78	3.11	0.65	1.49	0.87	0.74	SI	SI	SI
8	5.64	3.63	2.33	5.41	3.15	2.65	SI	SI	SI

Sopra la frequenza dei picchi H/V stratigrafici individuati, le relative ampiezza spettrali H/V e gli indici di vulnerabilità (Kg) di Nakamura per il terreno. Valori di Kg superiori indicativamente a 10 segnalano la probabilità che si possano manifestare elevate deformazioni nel terreno durante il sisma, con l'innesco di fenomeni quali la liquefazione dei livelli sabbiosi saturi.

Nella tabella sono indicate anche le altezze degli edifici con frequenza di risonanza paragonabile a quella del terreno, per valutare la possibilità che si manifestino fenomeni di doppia risonanza. Le altezze H1, H2 e H3 sono calcolate rispettivamente per edifici in acciaio, in cls e di altro tipo; sono infine visualizzati i tre criteri d SESAME (2005) per valutare l'attendibilità dei picchi H/V stratigrafici individuati.

Tabella parametri geotecnici per basse deformazioni da HVSR V1

N	Ca (m)	h (m)	hE (m)	Vs(m/s)	Gamma(VN)	Smorzamenti	Vp(m/s)	GGI(Upa)	Ecu(Upa)	Ku(Mpa)	Ey(Upa)
1	0.0	0.22	0.22	78	17.29	0.05	162	10.72	46.45	32.19	28.84
2	0.22	0.74	0.92	168	19.62	0.05	402	78.41	323.46	219.91	210.15
3	0.74	0.98	0.24	253	20.1	0.05	492	131.18	495.44	325.58	345.23
4	0.68	1.05	0.07	255	20.01	0.05	496	132.65	501.12	326.25	350.19
5	1.05	1.16	0.11	275	20.23	0.05	524	155.62	566.23	358.34	408.5
6	1.16	3.97	2.81	291	19.84	0.05	544	171.27	559.44	371.06	445.3
7	3.97	9.7	5.73	574	21.61	0.05	937	725.79	1905.45	967.73	1741.91
8	9.7	32.75	23.05	739	21.73	0.05	1207	1205.76	3228.01	1613.01	2808.41
9			0.0	1741	24.52	0.05	2843	7577.38	20226.36	10109.17	18185.71

Legenda: Vs=Velocità onde S; Gamma=peso di volume; sigmaV= pressione verticale efficace; RQD=Rock Quality Designation, E = modulo di Young; Phi=angolo di resistenza al taglio di picco; Cu=coesione non drenata.

2.3 Categorie di suolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

Dall'insieme delle risultanze è possibile stimare il parametro V_s equivalente:

$$V_{s,eq} = 553 \text{ m/s}^1$$

tale parametro secondo la normativa vigente in Italia (Norme Tecniche per le Costruzioni 2018) colloca i terreni in **categoria B**. Questa categoria è stata ricavata, come da normativa, dalla relazione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i : spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$: velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N : numero di strati;

H : profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Si è cercato pertanto di fornire indicazioni circa il grado di pericolosità sismica del sito in termini di eventuali amplificazioni locali e di classificazione dei terreni di fondazione rispetto alle modifiche attese nello spettro di risposta sismica. A tal scopo, si elencano le categorie del terreno di fondazione sismostratigrafiche, ai fini della definizione della azione sismica di progetto (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

Categoria sottosuolo	Caratteristiche della superficie topografica	Spessore (m)	V_s (m/s)
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni caratteristiche meccaniche con spessore massimo pari a 3 m.	Qualsiasi	≥ 800
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s.		≥ 360 ≤ 800
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi fra 180 e 360 m/s.	> 30 m	≥ 180 ≤ 360
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.	> 30 m	≥ 100 ≤ 180
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.	> 30 m	$\approx C$ e D

Alcamo, Maggio 2020



IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Girolamo M. Culmone

Albo Regionale dei Geologi di Sicilia, n. 1825

¹ L'indeterminazione delle stime si attesta a circa il 10% delle misure indicate

**STUDIO DI GEOLOGIA
DOTT. GIROLAMO CULMONE**

- Ricerche idriche - Studi di Geologia Tecnica
- Indagini penetrometriche e sismiche

**COMUNE DI CALATAFIMI
PROVINCIA DI TRAPANI**

INDAGINE GEOFISICA HVSR

COMMITTENTE: Ente Parco Archeologico Segesta

Data: Maggio 2020



Indagini sismiche in situ eseguite all'interno del parco Archeologico di Segesta, nel territorio del Comune di Calatafimi Segesta

Elaborati:

- Elaborati indagine geofisica (HVSR)
- planimetria generale;
- elaborati grafici;
- documentazione fotografica

IL CONSULENTE INCARICATO:

Geol. Girolamo Culmone



1. NOTE INTRODUTTIVE

In relazione alla progettazione di due pensiline da realizzarsi a servizio dei visitatori del Parco Archeologico di Segesta, nel territorio comunale di Calatafimi Segesta (TP), di proprietà dell'Ente Parco Archeologico di Segesta, il sottoscritto Dott. Geol. Girolamo Culmone, ha ritenuto opportuno eseguire una indagine geofisica a mezzo di una prova sismica passiva di tipo HVSR a supporto della progettazione della pensilina posta nei pressi dell'area parcheggio del Parco.

La presente indagine geofisica, pertanto, è finalizzata alla caratterizzazione sismica e geotecnica del lotto di terreno interessato dal progetto (*Approccio Semplificato non per classi d'uso III e IV*), ai sensi della nuova normativa tecnica sulle costruzioni "Norme Tecniche per le Costruzioni", entrata in vigore il 1° luglio 2009, in applicazione della circolare n.617/2009, nonché in riferimento all'Ordinanza P.C.M. n° 3274/2003, D.M. 14.01.2008 ed ultimo aggiornamento delle "Norme Tecniche per le costruzioni" D.M. 17 gennaio 2018 (Suppl. Ord. n.8 G.U. n.42 del 20.02.2018; Ai sensi della suddetta normativa il terreno sismicamente significativo è stato diviso in 5 categorie di profilo stratigrafico del sottosuolo compreso tra il piano d'imposta delle fondazioni e la formazione di base rigida), basate sulla stima della velocità media delle onde sismiche di taglio (V_s equivalente) nei primi 30m di profondità e ricavata dalle indagini geofisiche eseguite all'interno del lotto, consistenti nella esecuzione di n. 1 prospezione sismica con metodo HVSR, al fine di fornire informazioni aggiuntive per la caratterizzazione del sito sulla base dell'analisi delle onde superficiali di *Rayleigh* e quindi sulla stima del valore di V_s equivalente.

In particolare, il rilievo dei microtremori è stato elaborato attraverso la tecnica HVSR o di *Nakamura*, e consente di determinare la "frequenza di risonanza" di uno strato caratteristico del sito per il quale assume il valore massimo il rapporto $RHV = HS/VS$ (Horizontal to Vertical Ratio) tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo, assumendo che la componente verticale (V) del *noise*, nel passare dal Bedrock alla superficie non subisca amplificazione. Con l'impiego dei programmi votati Geopsy, Easy HVSR e Easy MASW della Geostru (Codice cliente 8112) e ProgramGeo aggiornato ai sensi della nuova normativa, si è determinato il valore della frequenza di picco del sito e quindi la relativa profondità del contrasto di impedenza.



1.1 Inquadramento del sito

L'area ricade nella zona immediatamente a nord-ovest del centro urbano di Calatafimi presso il Parco Archeologico del Teatro di Segesta; Le indagini sono state eseguite il 26 maggio 2020:



Fig. 1.1.1.:

Ubicazione sito: (Lat. 37.941609° - Long. 12.835614°) m 273 s.l.m. - P = 5.0°

2. INDAGINE GEOFISICA ESEGUITA

Le indagini sono state condotte con un **GEObOX SR04** 24 bit 3CH, Microtremor Digitizer con GPS dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente, senza cavi esterni per l'acquisizione del rumore sismico e notebook **TOSHIBA** per l'acquisizione dei dati di campagna. In applicazione alla metodologia di base studiata da Nakamura tutte le misure a stazione singola in campo aperto sono state orientate secondo il Nord. In particolare, il rilievo dei microtremori è stato elaborato attraverso la tecnica HVSR o di *Nakamura*, e consente di determinare la "frequenza di risonanza" di uno strato caratteristico del sito per il quale assume il valore massimo il rapporto $RHV = HS/VS$ (Horizontal to

Vertical Ratio) tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo, assumendo che la componente verticale (V) del *noise*, nel passare dal Bedrock alla superficie non subisca amplificazione.

2.1 Cenni storici e stratigrafia sismica da indagine a stazione singola

Il rilievo dei microtremori si basa sull'assunzione che il valore massimo del rapporto tra gli spettri di ampiezza di Fourier, delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo, risulti condizionato dallo spessore sotteso da una soluzione di continuit  ad elevato gradiente di impedenza sismica nel sottosuolo e dalla velocit  equivalente dei terreni sottesi al tetto ("*sedimento*"), assumendo che la componente verticale (V) del *noise*, nel passare dal substrato alla superficie, non subisca amplificazione. Disponendo della lettura del valore di frequenza per la quale risulta massimo il rapporto H/V delle componenti spettrali del moto, valore che corrisponde alla frequenza di sito (f_0), la determinazione delle incognite relative alla geometria del sottosuolo (V_s e H) necessita di informazioni ulteriori che devono essere acquisite attraverso differenti prospezioni o dati stratigrafici altrimenti noti nell'area (stratigrafie di pozzi/sondaggi e conoscenza geologica approfondita)

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre le informazioni relative al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi la tecnica che si   maggiormente consolidata nell'uso   quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o abbreviando H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). Il metodo HVSR consiste nello studio del rapporto spettrale tra la componente orizzontale del rumore e quella verticale (H/V spectrum). Il valore di tale rapporto   direttamente correlato con la frequenza di risonanza determinata dal passaggio tra due strati con una differenza significativa del contrasto di impedenza (velocit  delle onde e densit  del materiale). Considerando due strati con differente impedenza acustica, la frequenza di risonanza (f_r)   legata allo spessore (h) dello primo strato ed alla velocit  delle onde di taglio V_{s1} che lo attraversano dalla seguente relazione: $f_r = V_{s1} / 4 H$ (o ugualmente $T = 4H/V_{s1}$) [1], essendo la frequenza l'inverso del periodo, nota come legge del "*quarto di lunghezza d'onda*".

L' HVSR   in grado di fornire stime affidabili delle principali frequenze di risonanza del sito da edificare e, inoltre, la caratterizzazione strutturale dinamica di un edificio gi  realizzato. Riconosciuta questa capacit  di misura della frequenza di risonanza dello strato di copertura e dato che, se   disponibile una stima delle velocit  delle onde elastiche, le frequenze di risonanza possono essere convertite in stratigrafia, ne risulta che il metodo HVSR pu  essere in linea di principio usato come strumento stratigrafico. I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di corpo e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh oltre che di Love.

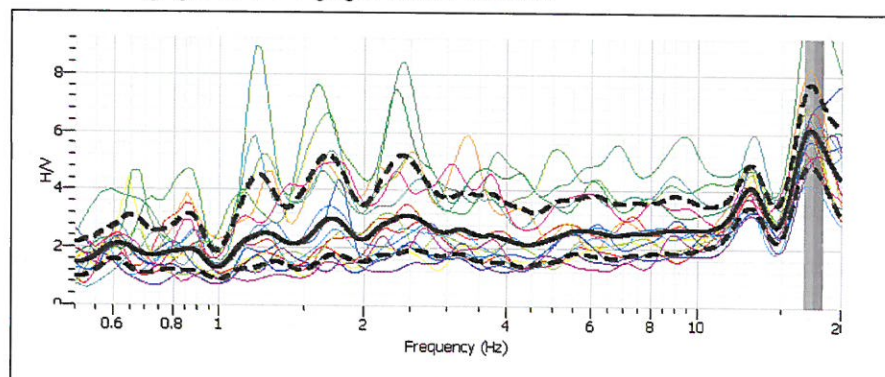
Tuttavia ci si pu  ricondurre a risonanza delle onde di corpo, poich  le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poich  la velocit  dell'onda di Rayleigh   molto prossima a quella

delle onde S. Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare e senza una corrispondenza 1:1; ciò significa che la curva H/V relativa ad un sistema a più strati contiene l'informazione relativa alle frequenze di risonanza (e quindi allo spessore) di ciascuno di essi, ma non è interpretabile semplicemente applicando l'equazione [1]. L'inversione richiede l'analisi delle singole componenti e del rapporto H/V, che fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto. La situazione, nel caso di un suolo reale, è spesso più complessa. Innanzitutto il modello di strato piano al di sopra del bedrock si applica molto raramente. Poi, la velocità aumenta con la profondità, possono esserci eterogeneità laterali importanti ed infine la topografia può non essere piana. L'inversione delle misure di microtremore a fini stratigrafici, nei casi reali, sfrutta quindi la tecnica del confronto degli spettri singoli e dei rapporti H/V misurati con quelli 'sintetici', cioè con quelli calcolati relativamente al campo d'onde completo di un modello 3D. L'interpretazione è tanto più soddisfacente, e il modello tanto più vicino alla realtà, quanto più i dati misurati e quelli sintetici sono vicini. In questo lavoro i segnali sono stati analizzati non solo attraverso i rapporti spettrali H/V ma anche attraverso gli spettri delle singole componenti, e nei casi più significativi, le curve HVSR sono state invertite secondo la procedura descritta da Arai e Tokimatsu (2004).

2.2 Procedura di analisi:

La sismica passiva si basa sulla misura dei microtremori che sono sempre presenti sulla superficie terrestre e sono generati da fenomeni naturali (vento, onde marine) e artificiali (attività antropiche). I dati raccolti sono stati elaborati, per ogni punto di misura e per ognuna delle tre componenti del moto, eseguendo l'analisi spettrale del segnale per evidenziare la distribuzione in frequenza del *noise*.

I dati spettrali risultanti dalle elaborazioni numeriche effettuate sono tarate sino a circa 150 Hz (*la frequenza di campionamento è di 300 Hz*), anche se entro il limite di 20 Hz rientrano le frequenze maggiormente significative dal punto di vista geologico – tecnico. Di seguito vengono riportate le relative curve H/V, ove l'area grigia rappresenta la frequenza di picco media e la sua deviazione standard. Il valore di frequenza è al limite tra il grigio scuro e grigio chiaro le aree:



Peak frequency:
 $f_0=17.515\pm 0.827632$
 Category: Default

Figura 2.2.1: Curva H/V con frequenza di picco fino a 20 Hz – L'area grigia rappresenta la frequenza di picco media

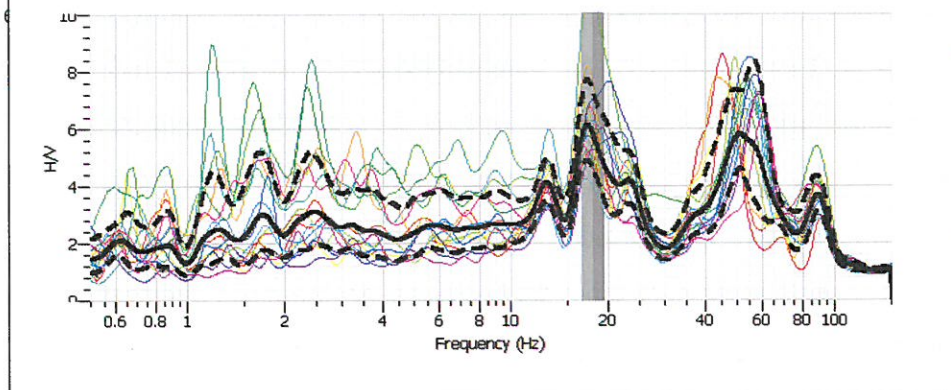


Figura 2.2.2: Curva H/V con frequenza di picco fino a 150 Hz.

La lunghezza di registrazione dei sondaggi in oggetto HV corrisponde ad un tempo di 20 minuti, con analisi dell'intera traccia pari all'90% circa, in quanto il segnale è stato filtrato da rumore antropico. Sulla base dell'elaborazione e analisi dei grafici ottenuti, si osserva un picco H/V pari alla frequenza di risonanza del terreno $f_0 = 17,51 \pm 0,087$. Il dato importante che abbiamo ottenuto è la frequenza caratteristica di risonanza del sito (*Peak Frequency*) che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di **doppia risonanza**, pericoloso per gli stessi fabbricati. La frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, che può essere misurata eseguendo le misurazioni all'interno dello stesso, in seguito sarà possibile confrontarla con quella del terreno su cui sorge per comprendere al meglio il rischio sismico a cui è sottoposto l'edificio in caso di sisma. Il periodo fondamentale, di una struttura (esistente o di progetto) se non direttamente misurato, può essere preliminarmente stimato dalla relazione: $T_{ed} \approx Ch^{3/4} \approx n/10$ dove: T_{ed} è il periodo dell'edificio, h è la sua altezza ed n è il numero di piani; mentre il parametro $C = 0,050$ vale per edifici in muratura, $C = 0,075$ per edifici in muratura e calcestruzzo e $C = 0,085$ per edifici a telaio in calcestruzzo.

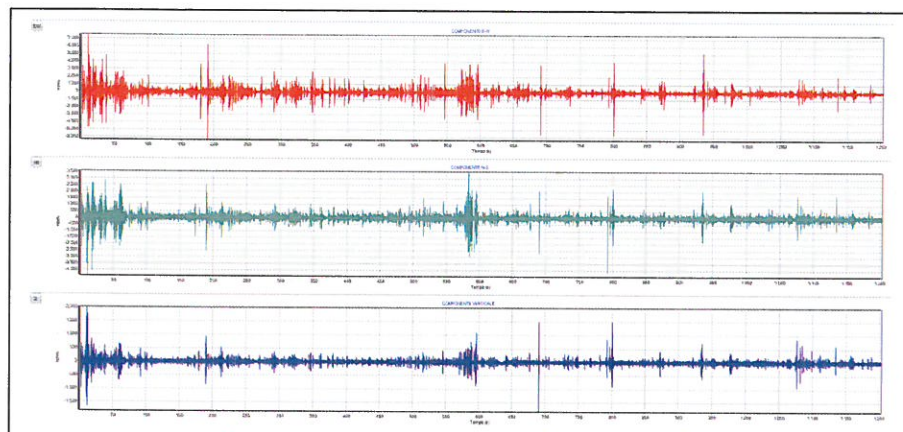


Fig 2.2.3:
Registrazione delle
tracce (durata
1200sec.)

Negli ultimi anni un progetto europeo denominato SESAME (Site EffectS Assessment using Ambient Excitations) si è occupato di stabilire delle linee guida per la corretta esecuzione delle misure di microtremore ambientale in stazione singola e array. Esso ha anche fornito dei criteri per valutare la bontà delle curve HVSR e la significatività dei picchi HN eventualmente trovati. Ad ogni picco in frequenza corrisponde una profondità [m] dell'orizzonte che genera il contrasto d'impedenza. Nel nostro lotto è presente un contrasto d'impedenza corrispondente alla frequenza di picco di terreno $f_0 = 17,5 \text{ Hz}$, posto alla profondità di circa 3m circa dal piano di calpestio attuale.

f_0 (Hz)	h (m)	
< 1	> 100	Centinaia di metri
1 - 2	50 - 100	Decine di metri
2 - 3	30 - 50	
3 - 5	20 - 30	
5 - 8	10 - 20	
8 - 20	5 - 10	Qualche metro
> 20	< 5	
H/V > 3 Alto contrasto		
2 < H/V < 3 Basso contrasto		

Tabella 2.2.4: Stima della profondità del contrasto di impedenza sulla base della frequenza di risonanza.

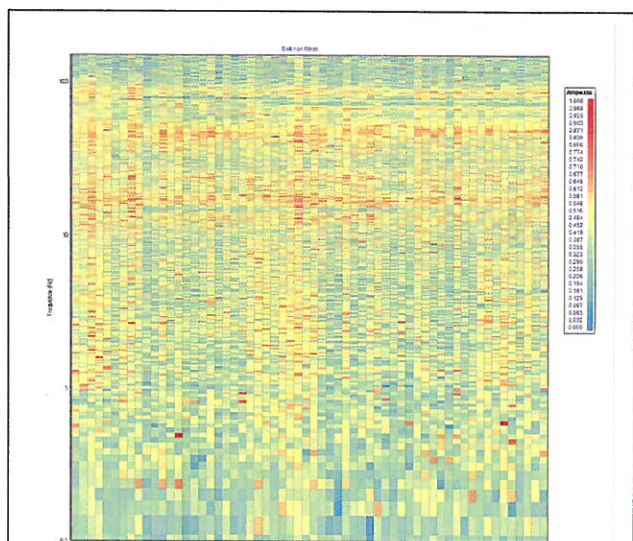


Fig. 2.2.5: Mappa della stazionarietà degli spettri e prova sismica HVSR



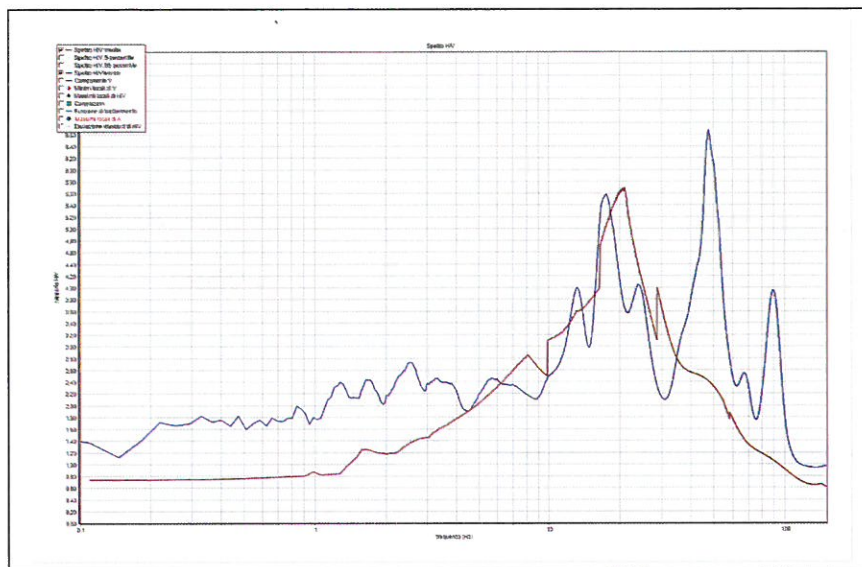


Fig. 2.2.6: Spettro H/V

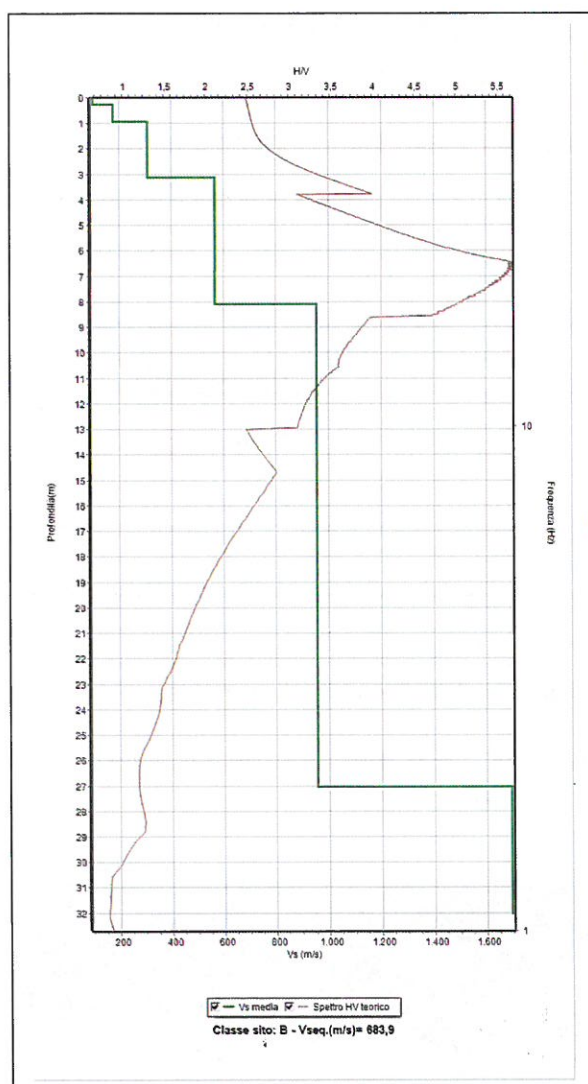


Fig. 2.2.7: Profilo delle Vs eq. e stima della classe del sito.

Tabella parametri picchi stratigrafici da spettro H/V delle onde di Rayleigh e Love V1

Criteri SESAME (2005) per una curva H/V adimensionale S1, b=10.L/w, S2, L w x H w x b=200, S3, s=42 per 0.5b-HzDb
 LEGENDA: L=lunghezza della finestra (s); -fmax, fmin= frequenze del picco stratigrafico; s=deviazione standard

N.	fz(Hz)	H/V	Kg	H1(m)	H2(m)	H3(m)	S1	S2	S3
1	67.6	2.54	0.1	0.2	0.11	0.1	SI	SI	SI
2	47.75	6.66	0.93	0.31	0.18	0.15	SI	SI	SI
3	24.1	4.05	0.68	0.78	0.45	0.38	SI	SI	SI
4	17.5	5.58	1.78	1.19	0.7	0.59	SI	SI	SI
5	6.99	2.35	0.79	4.06	2.36	2.0	SI	SI	SI

Sopra la frequenza dei picchi H/V stratigrafici individuati, le relative ampiezza spettrali H/V e gli indici di vulnerabilità (Kg) di Nakamura per il terreno. Valori di Kg superiori indicativamente a 10 segnalano la probabilità che si possano manifestare elevate deformazioni nel terreno durante il sisma, con l'innescio di fenomeni quali la liquefazione dei livelli sabbiosi saturi.

Nella tabella sono indicate anche le altezze degli edifici con frequenza di risonanza paragonabile a quella del terreno, per valutare la possibilità che si manifestino fenomeni di doppia risonanza. Le altezze H1, H2 e H3 sono calcolate rispettivamente per edifici in acciaio, in cls e di altro tipo; sono infine visualizzati i tre criteri d SESAME (2005) per valutare l'attendibilità dei picchi H/V stratigrafici individuati.

Tabella parametri geotecnici per basse deformazioni da HVSR V1

N.	Da (m)	a (m)	cb (m)	Vs(m/s)	Gamma(NV)	Smorzament	Vp(m/s)	GQ(Mpa)	Ed(Mpa)	Kv(Mpa)	Ey(Mpa)
1	0.0	0.26	0.26	100	18.07	0.05	203	18.42	75.97	51.41	49.36
2	0.26	0.82	0.85	176	19.05	0.05	368	60.16	260.68	180.47	182.42
3	0.82	3.13	2.21	308	20.21	0.05	566	195.45	660.9	400.2	504.25
4	3.13	8.1	4.87	567	21.7	0.05	929	711.25	1896.67	949.34	1707.01
5	8.1	27.03	18.93	955	22.79	0.05	1580	2118.74	5649.97	2824.98	5084.97
B			0.0	1694	24.56	0.05	2766	7184.12	18167.66	9579.83	17241.89

Legenda: Vs=Velocità onde S; Gamma=peso di volume; sigmaV= pressione verticale efficace; RQD=Rock Quality Designation, E= modulo di Young; Phi=angolo di resistenza al taglio di picco; Cu=coesione non drenata.

2.3 Categorie di suolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

Dall'insieme delle risultanze è possibile stimare il parametro V_s equivalente:

$$V_{s,eq} = 683 \text{ m/s}^1$$

tale parametro secondo la normativa vigente in Italia (Norme Tecniche per le Costruzioni 2018) colloca i terreni in **categoria B**. Questa categoria è stata ricavata, come da normativa, dalla relazione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

h_i : spessore dell' i -esimo strato;

$V_{s,i}$: velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;

N : numero di strati;

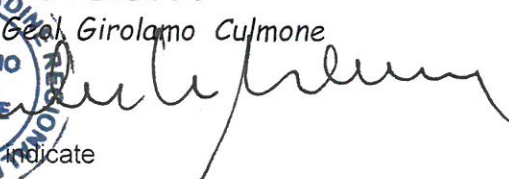
H : profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Si è cercato pertanto di fornire indicazioni circa il grado di pericolosità sismica del sito in termini di eventuali amplificazioni locali e di classificazione dei terreni di fondazione rispetto alle modifiche attese nello spettro di risposta sismica. A tal scopo, si elencano le categorie del terreno di fondazione sismostratigrafiche, ai fini della definizione della azione sismica di progetto (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

Categoria sottosuolo	Caratteristiche della superficie topografica	Spessore (m)	V_s (m/s)
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni caratteristiche meccaniche con spessore massimo pari a 3 m.	Qualsiasi	≥ 800
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente, compresi fra 360 m/s e 800 m/s.		≥ 360 ≤ 800
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi fra 180 e 360 m/s.	> 30 m	≥ 180 ≤ 360
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 metri, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.	> 30 m	≥ 100 ≤ 180
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.	> 30 m	$\approx C$ e D

Alcamo Maggio 2020

IL GEOLOGO:
Dott. Geol. *Girolamo Culmone*
GIROLAMO
MARIA
CULMONE
N° 1825



¹ L'indeterminazione delle stime si attesta a circa il 10% delle misure indicate

