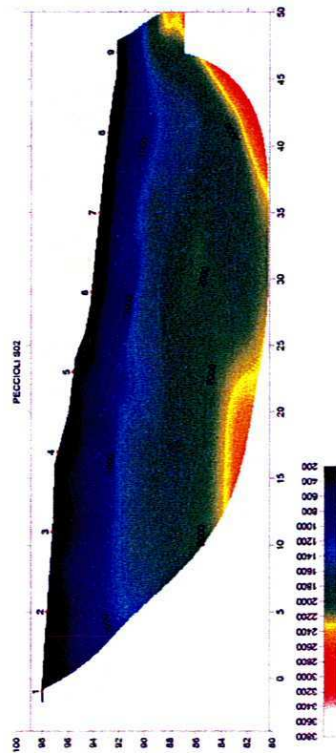


INDAGINE GEOFISICA



Comune di PECCIOLI
Fabbrica di Peccioli

Provincia di Pisa



INDAGINI GEOFISICHE SISMICHE DI SUPPORTO ALLA CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA E SISMICA DI SOTTOSUOLO DEI TERRENI SITI IN FABBRICA DI PECCIOLI

LUGLIO 2009



Enki s.r.l.
Via Giambattista Lulli 62
50144 Firenze
Tel 055 3247209 - Fax 055 3289276
P.IVA 05008670480 - REA C.C.I.A.A. Firenze n. 510082
Reg.Impr. Firenze n. 9079/2000



Enki s.r.l.
Via Lulli, 62
50144 Firenze
Tel 055 3247209 - Fax 055 3289276
P.IVA 05008670480 - REA C.C.I.A.A. Firenze n. 510082
Reg.Impr. Firenze n. 9079/2000

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo di terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PI)

1. Introduzione

- 1.1. Descrizione dei contenuti della relazione
- 1.2. Programmazione delle indagini geofisiche

2. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

- 2.1. Tomografia sismica
- 2.2. La tecnica MASW
- 2.3. La tecnica ReMi
- 2.4. Elaborazione dati sismici
- 2.5. D.M. 14/01/2008 N.T.C. Categorie di profilo sismico-stratigrafico
- 2.6. D.M. 14/01/2008 N.T.C. Pericolosità Sismica locale
- 2.7. Conclusioni

A. Allegato planimetrico ed interpretativo

- Tav. A01 - A02 - A03 - A04 - A05 - A06 - A07 INDAGINI GEOFISICHE SISMICHE, INQUADRAMENTO PLANIMETRICO E SEZIONI GEOTECNICHE INTERPRETATIVE

B. Allegato B ELABORATI GEOFISICI

- PROFILI SISMICI VELOCITA' Vs MASW
- TOMOGRAFIE SISMICHE 2D VELOCITA' ONDE P
- TOMOGRAFIE GEOELETTICHE 2D

C. Allegato C FOTOGRAFICO

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

1. Introduzione

La corretta esecuzione di opere di ingegneria civile nel sottosuolo richiede un'attenta caratterizzazione degli orizzonti geotecnici interessati dalle suddette opere.

Tramite opportune indagini si possono infatti evidenziare i profili stratigrafici, le caratteristiche idrauliche e meccaniche del terreno e le condizioni della falda, rilevando inoltre eventuali strutture e corpi sepolti e/o sottoservizi non mappati.

Le indagini da effettuare in situ sono di due tipologie:

- **Geognostiche** (ad esempio sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo e prove penetrometriche)

- **Geofisiche.**

Le tecniche di indagini **geognostiche**, sono di tipo puntuale e restituiscono la grandezza della variabile misurata solamente nell'intorno del punto di campionamento.

Le tecniche **geofisiche**, sono invece di tipo volumetrico e non invasivo, restituiscono cioè la grandezza della variabile misurata mediata su elevati volumi di terreno.

E' evidente che ricorrendo in forma **complementare e correlata** alle diverse tecniche di indagine si ottengono notevoli vantaggi nella qualità delle informazioni ottenute sul sito investigato e nell'impiego ottimizzato di risorse economiche ed umane.

Infatti le tecniche di indagine integrate citate sono in grado di fornire al tecnico progettista delle informazioni sulla modalità e sulla tecnica di realizzazione di opere di ingegneria civile rispetto al contesto geologico e geotecnico in cui sono inserite, permettendo a priori una valutazione della qualità dell'esecuzione dei lavori.

Le tecniche di indagine geofisiche si prefigurano quindi come un supporto informativo utilizzabile nella redazione di progetti di opere di ingegneria civile complesse nel sottosuolo.

Ai fini della **caratterizzazione litostratigrafica** di un'area la realizzazione di:

- **Prospezioni geofisiche con metodo Goelettrico Multielettrodo (ERT)**, permettono di ottenere delle pseudosezioni verticali di **resistività** dell'area (tomografie goelettriche di resistività);
- **Prospezioni geofisiche con metodo sismico**, con tecnica ReMi e MASW, permettono di ottenere la classificazione del sottosuolo ai sensi dalla vigente normativa NCT 2008 Norme Tecniche per le Costruzioni DM 14/01/2008;

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

- **Prove penetrometriche**, permettono la determinazione di parametri geomeccanica del terreno di dettaglio.

La campagna di prospezione geofisica può essere propedeutica all'eventuale campagna di prospezione geognostica, in modo che l'elaborazione **congiunta ed integrata** dei dati ottenuti:

- dalla serie dei profili **goelettrici multielettrodi di resistività**;
- dalla serie di stendi mentisismici MASW e ReMi;
- dalle **indagini dirette geognostiche** quali prove penetrometriche;

permetta così la:

- Ricostruzione del **profilo litostratigrafico** con individuazione del **bedrock** e/o di **trovanti**;
- **Parametrizzazione** del comportamento meccanico dei terreni;
- **Caratterizzazione geotecnica** dei terreni e delle rocce lungo la giacitura dell'opera in microtunnelling;
- **Stima del livello della falda idrica**;
- Individuazione di eventuali **oggetti sepolti** quali ad esempio corpi metallici, strutture sepolte non conosciute e/o cavità sotterranee.

L'utilizzo correlato delle tecniche di prospezione geofisiche, indagini geognostiche e prove penetrometriche sopra indicate permette di superare le problematiche che normalmente sorgono operando in ambienti in cui sono molto forti i disturbi e le problematiche per l'acquisizione di parametri descrittivi del sottosuolo; normalmente infatti per ottenere indicazioni attendibili che permettano la caratterizzazione del sottosuolo è necessario acquisire i dati in maniera multiparametrica e multistrumentale, ricorrendo a diverse tecniche di prospezione e di indagine.

2. CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Ai fini di una completa caratterizzazione sismica dell'area indagata, per ogni profilo sismico i dati sono stati acquisiti secondo modalità che hanno permesso di invertire ed interpretare sequenzialmente secondo diverse tecniche di cui:

- Tomografia sismica con restituzione di profilo tomografico 2D delle onde di compressione Vp;
- Tecnica ReMi e MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) che sono una derivazione delle tecniche SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) che si basano sull'elaborazione delle proprietà spettrali delle onde di superficie per la costruzione di un modello monodimensionale verticale di velocità di propagazione delle onde di taglio Vs.

2.1. Tomografia sismica

La tomografia sismica, per raggi diretti, è una tecnica d'indagine che permette l'individuazione di anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche con un potere risolutivo nettamente superiore ad altri metodi, offrendo la possibilità della ricostruzione, con elevato grado di qualità, di anomalie stratigrafiche, anche particolarmente complesse non risolvibili con differenti tecniche d'indagine.

Per le procedure di realizzazione di immagini tomografiche è necessario utilizzare un maggior numero di sorgenti di energizzazione e di punti di ricezione delle onde sismiche, che permettano una distribuzione dei raggi sismici omogenea e con una densità che viene predefinita in funzione del "target" da raggiungere.

Le tecniche operative possono essere molto diverse, si può infatti operare:

- a livello del piano di campagna disponendo i ricevitori (geofoni e idrofoni) ed i trasmettitori (punti di scoppio) su linee parallele;
- utilizzando due fori, residui di sondaggi geognostici, (tomografia cross-hole), dove previo opportuno condizionamento si alloggiavano i ricevitori ed i trasmettitori;
- utilizzando un solo foro (sondaggio sismico tomografico), in cui sono alloggiati i ricevitori, eseguendo una serie di tiri a distanze crescenti dall'imboccatura del foro stesso.

Per il trattamento dei dati per la ricostruzione tomografica dell'immagine si utilizza una

1.1. Descrizione dei contenuti della relazione

La presente relazione illustrerà la metodologia, la strumentazione utilizzata ed i risultati ottenuti con la campagna di prospezione geofisica integrata, geoelettrica e sismica, a supporto della caratterizzazione geomeccanica e sismica del sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli nel Comune di Peccioli (PT).

In particolare l'indagine ha riguardato il sottosuolo interessato da diversi tipi di intervento, e ha permesso:

- Caratterizzare le aree dal punto di vista geomeccanico;
- Classificare il sottosuolo dal punto di vista sismico.

Nel capitolo 2 "Indagini sismiche" verranno riportati i risultati della campagna di prospezione sismica, in particolare con riferimento alle tecniche MASW e ReMi e sarà formulata un'ipotesi di caratterizzazione geomeccanica del sottosuolo in base ai risultati di tali indagini.

1.2. Programmazione delle indagini geofisiche

In base alle indicazioni ricevute e al sopralluogo effettuato è stato deciso di realizzare la seguente campagna di prospezione geofisica integrata:

- Campagna di indagini di prospezione geofisica sismica, presso l'area oggetto di interesse consistente in prospezione geofisica sismica, con esecuzione di stese sismiche a 24 elettrodi con passo interelettrico di 3m/2m e offset di 12/10 m da inizio e fine, con tecnica Tomografica e frequenziale ReMi e MASW, in numero totale di **4, con giacitura come da tav. A02 e segg.**

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

suddivisione dell'area di studio in celle elementari, calcolando per ciascuna di queste un valore di velocità congruente con il tempo di tragitto medio relativo ai percorsi dei raggi sismici che le attraversano; la presentazione delle elaborazioni eseguite dà come risultato una mappa della distribuzione delle velocità sismiche in una sezione piana contenente le sorgenti ed i geofoni.

Le classiche prospezioni sismiche si basano sul concetto che le onde acustiche si propagano nei diversi mezzi con velocità differenti. Generando tali onde in un punto (detto di scoppio) e osservando i loro tempi di arrivo in altri punti predeterminati (detti di registrazione), è possibile ricostruire la distribuzione di velocità e con questa definire dal punto di vista elastico le aree oggetto di studio e individuare anomalie o corpi anomali. L'applicazione della tecnica tomografica alle misure sismiche permette poi di ricostruire l'andamento di tale caratteristica fisica all'interno di una porzione di spazio non accessibile direttamente e di ottenere come risultati, immagini che visualizzano le non omogeneità incontrate nel mezzo.

Il risultato finale sarà la rappresentazione delle velocità (in m/s) per piani o sezioni indagate, poi ricostruite in 3D, secondo una scala cromatica prefissata, che in genere va dal blu (basse velocità) al magenta (alte velocità). Quanto più il mezzo attraversato dal suono è rigido e incompressibile, tanto maggiore sarà la sua velocità caratteristica. Valori bassi della velocità mettono in evidenza la variazione negativa delle caratteristiche elastiche e meccaniche, indicando la presenza di un possibile deterioramento della struttura interna

Per l'inversione dei dati sismici acquisiti è stato utilizzato il software Rayfract ver. 3.12 che è un software di tomografia sismica che impiega le soluzioni Eikonali per il calcolo dei tempi di percorso e per la modellazione della diffrazione, la rifrazione e la trasmissione delle onde sismiche. Questo metodo fornisce un buon fit iniziale tra i primi arrivi di campagna e quelli sintetici. Il modello iniziale viene quindi ottimizzato automaticamente mediante l'inversione tomografica 2D WET (Wavepath Eikonal Traveltime).

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

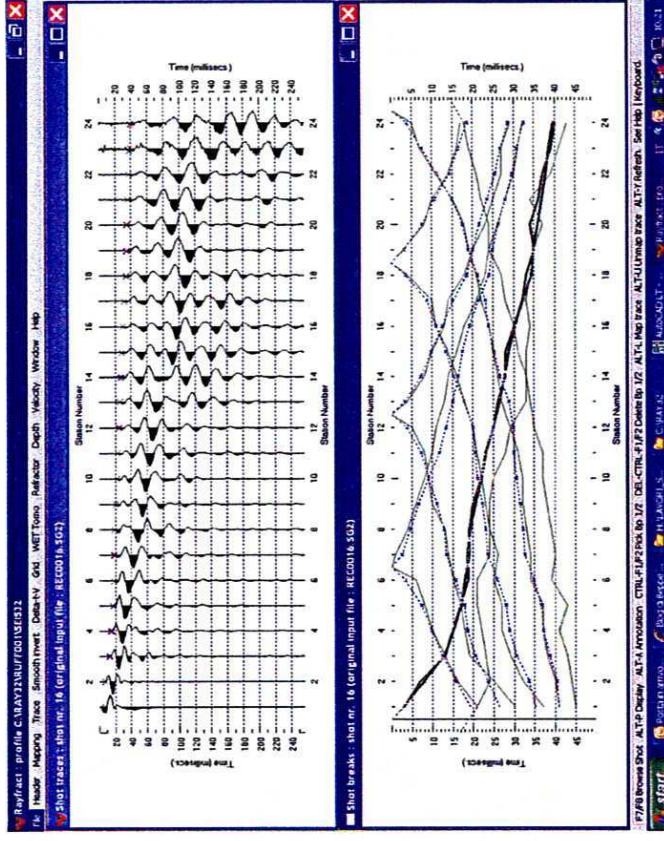


FIG. 3.1. – CONFRONTO SHOT BREAK PRIMI ARRIVI E DROMOCRONE

La tomografia WET modella i percorsi multipli della propagazione del segnale che contribuiscono ad un primo arrivo. Il procedimento Eikonale, usato per il calcolo dei tempi di percorso, modella la diffrazione, la rifrazione e la trasmissione delle onde sismiche.

Come conseguenza di ciò la capacità di fornire l' imaging di un'anomalia di velocità aumenta rispetto alla tomografia convenzionale del percorso di un raggio sismico.

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

2.2. La tecnica MASW

Il principio ispiratore della tecnica ReMI e MASW è il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato.

La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze, con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga.

Questa proprietà si chiama dispersione.

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi: L'acquisizione delle onde superficiali (ground roll), la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s .

Per ottenere un profilo V_s bisogna produrre un treno d'onde superficiali a banda

7

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

larga e registrarlo minimizzando il rumore.

Una molteplicità di tecniche diverse sono state utilizzate nel tempo per ricavare la curva di dispersione, ciascuna con i suoi vantaggi e svantaggi.

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando la curva di dispersione misurata come riferimento sia per la modellizzazione diretta che per la procedura ai minimi quadrati.

Dei valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità sono necessari per ottenere il profilo verticale V_s dalla curva di dispersione e vengono solitamente stimati utilizzando misure prese in loco o valutando le tipologie dei materiali.

Le onde superficiali riverberate (back scattered) possono essere prevalenti in un sismogramma multicanale se in prossimità delle misure sono presenti discontinuità orizzontali quali fondazioni e muri di contenimento. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno.

La scomposizione di un campo di onde registrate in un formato a frequenza variabile consente l'identificazione della maggior parte del rumore, analizzando la fase e la frequenza dipendentemente dalla distanza dalla sorgente.

La scomposizione può essere quindi utilizzata in associazione con la registrazione multicanale per minimizzare il rumore durante l'acquisizione.

La scelta dei parametri di elaborazione così come del miglior intervallo di frequenza per il calcolo della velocità di fase, può essere fatto con maggior accuratezza utilizzando dei sismogrammi multicanale.

Una volta scomposto il sismogramma, una opportuna misura di coerenza applicata nel tempo e nel dominio della frequenza può essere utilizzata per calcolare la velocità di fase rispetto alla frequenza.

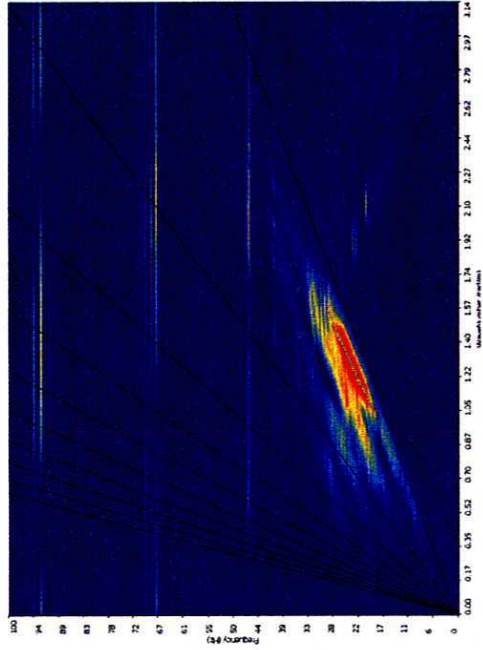


FIG. 3.2. – SPETTRO F-K tecnica MASW

La velocità di fase e la frequenza sono le due variabili (x; y), il cui legame costituisce la curva di dispersione.

E' anche possibile determinare l'accuratezza del calcolo della curva di dispersione analizzando la pendenza lineare di ciascuna componente di frequenza delle onde superficiali in un singolo sismogramma.

In questo caso MASW permette la miglior registrazione e separazione ad ampia banda ed elevati rapporti S/N.

Un buon rapporto S/N assicura accuratezza nel calcolo della curva di dispersione, mentre l'ampiezza di banda migliora la risoluzione e la possibile profondità di indagine del profilo Vs di inversione.

Le onde di superficie sono facilmente generate da una sorgente sismica quale, ad esempio, una mazza battente.

2.3. La tecnica REMI

La tecnica di analisi del sottosuolo mediante l'uso dei microtremori (Veronese e Garbari, 2004) prende origine dagli studi e dalle sperimentazioni condotte da J. Louie presso la Nevada University.

Il metodo combina la semplicità operativa del SASW con l'elevata risoluzione nei terreni più superficiali propria del MASW.

I microtremori vengono registrati mediante uno stendimento lineare da 24 geofoni a bassa frequenza senza la necessità di dover operare con un sorgente attiva.

I dati vengono acquisiti mediante la classica strumentazione impiegata per i rilievi a rifrazione.

Generalmente si impiegano geofoni con frequenza variabile da 4 a 14 Hz e tempi di registrazione di 15-30 s. L'impiego di campionatori di elevata dinamica (cioè superiori a 144 dB) consente poi di dimezzare la frequenza utile campionabile rispetto a quella nominale dei geofoni.

È quindi teoricamente possibile registrare onde di superficie il cui contenuto in frequenza è compreso nell'intervallo tra 2 Hz e 25-30 Hz.

Questo intervallo, in condizioni ottimali, può consentire di stimare, con buon dettaglio, il profilo della Vs nei primi cento metri di profondità.

Il rumore registrato viene convertito dal dominio x-t al dominio p-f (slowness-frequenza) nel quale viene rappresentato lo spettro di potenza delle onde di superficie (un esempio in tal senso è visibile in Figura 2.3).

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

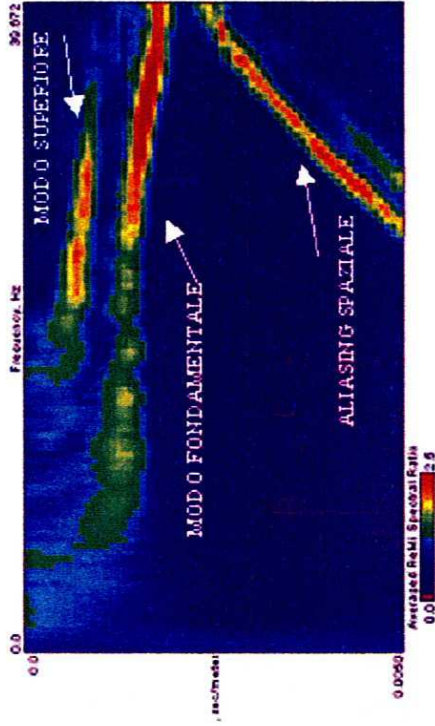


FIG. 3.3 – SPETTRO p-f tecnica ReMi

2.4. Elaborazione dati sismici

Sono stati acquisiti un totale di **4 profili sismici** con tecnica tomografica, MASW e ReMi con giacitura come da tav. A02 e successive, particolarmente significativa delle aree da investigare.

Per l'acquisizione dei dati sismici è stato impiegato un amplificatore sismico DMT COMPACT a 24 canali con 24 bit di precisione nella conversione A/D equipaggiato con geofoni a frequenza naturale di 8 Hz.

I parametri delle stese sismiche sono i seguenti, relativamente alla tecnica della **TOMOGRAFIA SISMICA e del MASW/ReMi**

- Energizzazione TOMOGRAFIA e MASW con mazza triggerata da 8 kg;
- Punto di battuta OFFSET TOMOGRAFIA e MASW, diretto e reciproco, posizionato a 10/12 metri di distanza dal 1° e dal 24° geofono;
- Punti di battuta INSET TOMOGRAFIA, presso geofoni 1-1, 3+1, 6+1, 9+1, 12+1, 15+1, 18+1, 21+1 e 24+1; pari a 11 battute per ogni profilo sismico comprese battute OFFSET;
- Distanza intergeofonica pari a 3/2 m e lunghezza totale stesa sismica di 69/46 m

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

- + 24/20 m di offset;
- Tempo di campionamento pari a 1 ms;
- Periodo di acquisizione TOMOGRAFIA di 1024 campioni, pari a 1s;
- Periodo di acquisizione MASW di 4096 campioni, pari a 4 s;

In corrispondenza di ciascun profilo sono state quindi acquisite numerose sessioni di registrazione, con controllo in tempo reale dei dati. Le registrazioni di scarsa qualità oppure quelle caratterizzate dalla presenza di rumore polarizzato sono state scartate.

Le sessioni di registrazione, in formato originario SEG2, vengono visualizzate in tempo reale in cantiere per una loro preliminare valutazione.

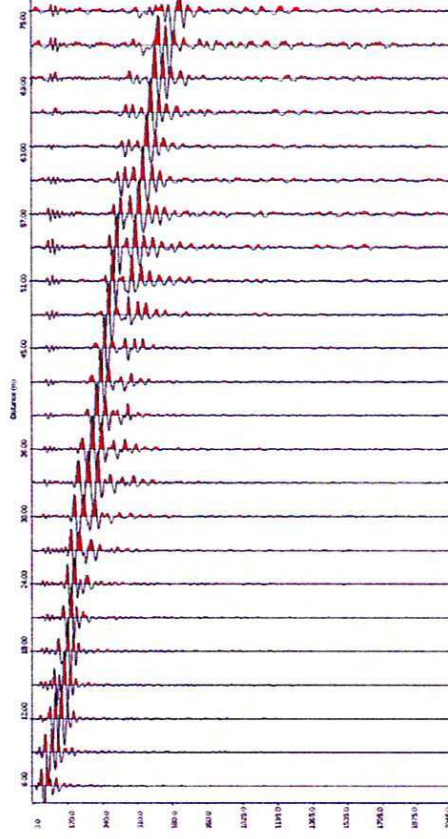


FIG. 3.4. – Sismogramma medio acquisizione MASW

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

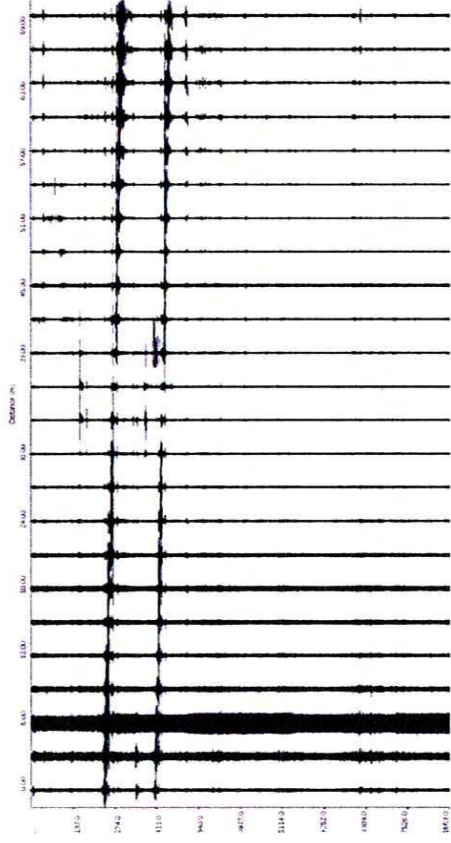


FIG. 3.5. - Sismogramma medio acquisizione ReMI

In fase di acquisizione dei dati ciascuna sessione di registrazione è stata elaborata per valutare contestualmente la qualità del dato registrato.

Nel caso in cui il modo fondamentale delle onde di superficie non venga campionato correttamente risulta impossibile stimare la curva di dispersione e costruire il modello verticale di velocità delle Vs.

Altre cause di disturbo, abbastanza frequenti nelle registrazioni passive, possono essere determinate dalla presenza di rumore polarizzato. In questo caso potrebbe essere consigliabile ruotare lo stendimento di novanta gradi e ripetere alcune sessioni di registrazione.

La presenza di una sorgente polarizzata può infatti determinare la sottostima della velocità di fase durante l'operazione di determinazione della curva di dispersione nel dominio p-f.

I dati sono stati elaborati mediante il software commerciale "SWAN ver. 1.4" prodotto dalla GeoStudi Astier di Livorno.

Nella prima fase di elaborazione dei dati si inseriscono i parametri geometrici e si determina la frequenza massima da indagare, la velocità di fase minima di partenza ed il numero di vettori, al fine di ottenere lo spettro F-K.

La fase successiva consiste nella stima della curva di dispersione, e durante questa fase di elaborazione è opportuno selezionare esclusivamente le terne (frequenza,

Indagini geofisiche sismiche di supporto alla caratterizzazione geomeccanica e sismica di sottosuolo dei terreni siti in Fabbrica di Peccioli, Peccioli (PT)

slowness, rapporto spettrale) con una buona coerenza ed intensità di segnale dello spettro di potenza. A parità di frequenza la velocità scelta è diversa a seconda della metodica di analisi MASW e ReMI, in quanto per il MASW deve essere quella coincidente con il picco massimo di intensità del segnale, mentre per il ReMI quella più bassa prossima al confine tra incoerenza propria del rumore e segnale.

Questo è determinato dal fatto che i microtremori non provengono da un'unica sorgente e che l'energia del rumore che attraversa obliquamente lo stendimento appare nell'immagine p-f con una velocità apparente (Va) più elevata di quella reale (Vr) osservabile in linea.

I dati selezionati dall'immagine F-K vengono plottati su un diagramma nel quale compare anche una curva di dispersione calcolata a partire da un modello di Vs che è modificabile dall'interprete.

Variando numero di strati, spessore e velocità di ciascuno strato del modello è possibile adattare la curva calcolata a quella sperimentale ottenuta mediante l'analisi spettrale.

Si tratta di un processo di modellazione diretta monodimensionale (simile alle tecniche impiegate per l'inversione dei SEV - Sondaggi Elettrici Verticali) la cui affidabilità dipende dalle capacità e dall'esperienza dell'analista e dalla possibilità di avere dei parametri di controllo e di taratura (i.e. altre informazioni di tipo geofisico e stratigrafico).

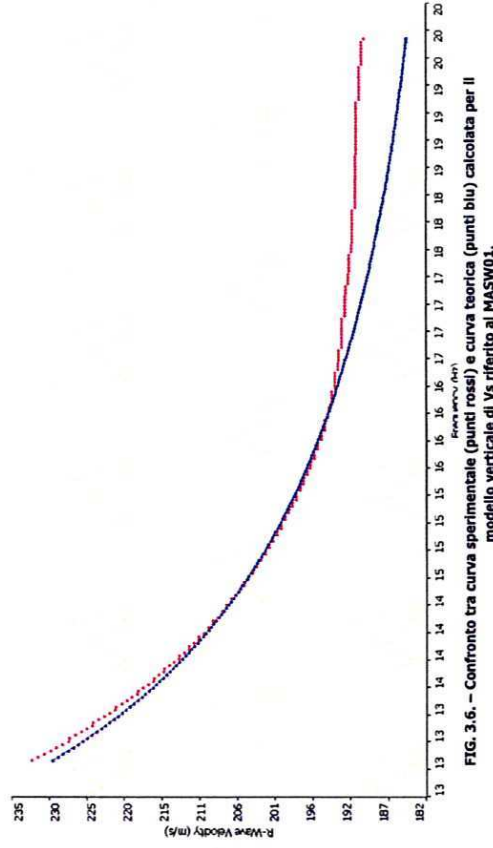


FIG. 3.6. - Confronto tra curva sperimentale (punti rossi) e curva teorica (punti blu) calcolata per il modello verticale di Vs riferito al MASW01.

In questo tipo di approccio (modellazione diretta) sono insite delle ambiguità interpretative circa spessore e velocità dello strato nel senso che lo stesso risultato può essere ottenuto con diversi modelli valendo un principio di equivalenza. Il parametro determinabile univocamente è infatti rappresentato dal valore del prodotto di spessore e velocità. Ai fini della determinazione del parametro Vs30 questo non rappresenta una limitazione infatti tale parametro rappresenta proprio la media della velocità delle onde di taglio sui primi 30 m di profondità ed è dato dalla (1):

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n h_i} / V_i$$

dove h_i e V_i indicano rispettivamente lo spessore e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-5}$) dello strato i-esimo per un totale di n strati presenti nei primi 30 metri di profondità.

I risultati dei processi di inversione ed interpretazione, dei dati sismici acquisiti sia con la tecnica MASW che ReMI hanno prodotto delle curve di velocità, come riportate in allegato B e simili a quelle delle figure seguenti.

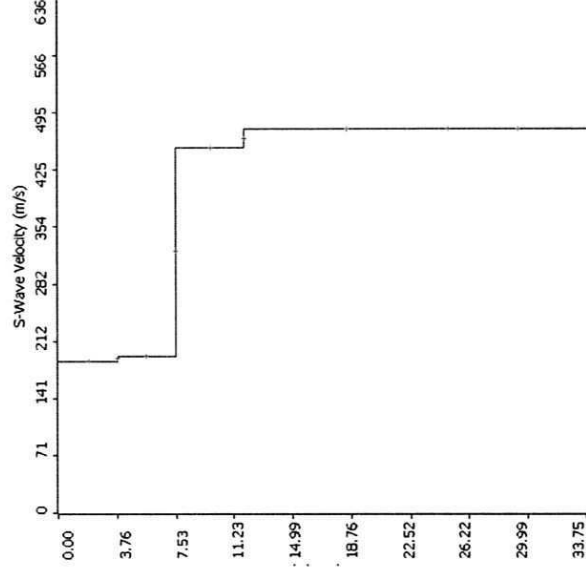


FIG. 3.7. Profilo di velocità monodimensionale onde S stesa MASW01.

Per ogni stendimento MASW, sono stati analizzati i profili sismici ottenuti dalle battute dirette e reciproche e dal loro stacking, e ai fini di modellazione viene utilizzato il profilo delle velocità che risulta avere il fit migliore.

In questo caso si evidenzia che, per ogni stesa sismica sono stati interpretati 3 sismogrammi, diretto reciproco e stacking per un totale di **12 sismogrammi**, e che l'inversione con il fit migliore è stata riportata in allegato B e nella tav. A02 e successive.

2.5. D.M. 14/01/2008 N.C.T. - CATEGORIE di PROFILO SISMICO-STRATIGRAFICO

I valori del parametro Vs calcolati permettono la definizione delle categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione, come previsto dalla vigente normativa (DM 14/01/08 NTC) ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto.

Ai fini della definizione delle "categorie di sottosuolo" si definiscono le seguenti tipologie stratigrafiche (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

- A) Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
- 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 $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $C_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
- C) Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < C_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
- D) Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $C_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
- E) Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

In aggiunta a queste categorie se ne definiscono altre due:

- S1) Depositati di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero

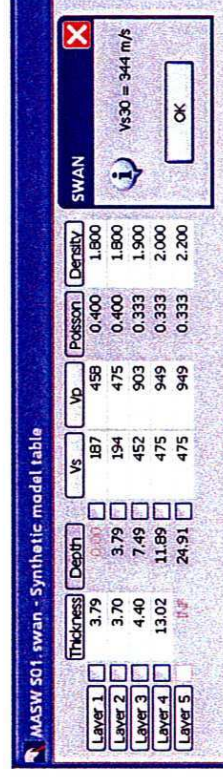
$10 < C_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.

S2) Depositati di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

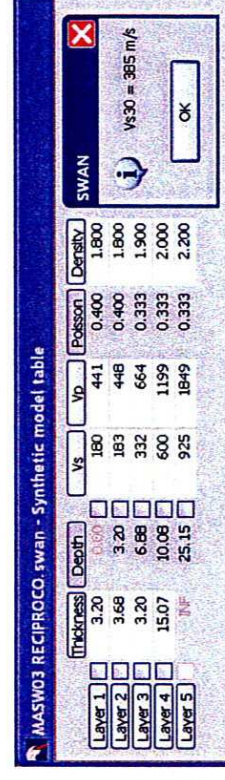
In base ai risultati ottenuti dall'interpretazione dei profili di velocità con tecnica MASW e ReMI, si evidenzia il valore numerico delle V_{s30} relativo alla diverse stese sismiche con il fit migliore di cui:

STESA SISMICA	AREA INDAGINE	V_{s30} [m/s]	CATEGORIA SOTTOSUOLO
MASW01	A	344	C
MASW03	C	385	B/C
MASW04	D	395	B/C

TABELLA RIEPILOGO CALCOLO V_{s30}



STIMA VELOCITA' V_{s30} - MASW S01



STIMA VELOCITA' V_{s30} - MASW S02

MASW04.swan - Synthetic model table

Layer	Thickness	Depth	Vs	Vp	Poisson	Density
Layer 1	3.94	0.00	186	456	0.400	1.800
Layer 2	3.58	3.94	210	514	0.400	1.800
Layer 3	3.37	7.52	366	731	0.333	1.900
Layer 4	14.07	10.89	600	1199	0.333	2.000
Layer 5	24.96	24.96	1001	2001	0.333	2.200

SWAN
Vs30 = 395 m/s
OK

STIMA VELOCITA' Vs30 - MASW S04

Per i sismogrammi analizzati, è stato generalmente possibile evidenziare un miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche, caratterizzato da velocità Vs crescenti con la profondità.

I singoli spessori definiti sono risultati inferiori a 20 m, e non è stato evidenziato in nessun caso la presenza di un substrato con Vs > 800 m/s.

Come indicato dalla normativa vigente, ed in un'ottica di massima cautela, il sottosuolo perforazione oggetto di indagine è classificabile come:

- **Sottosuolo di categoria C)** Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{sp,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < C_{v,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).

2.6. D.M. 14/01/2008 - PERICOLOSITA' SISMICA LOCALE

Ai fini di una completa caratterizzazione sismica dell'area oggetto di studio, e in considerazione di quanto indicato al punto 3.2 delle NCT2008, si riporta la "VALUTAZIONE DELL'AZIONE SISMICA" in termini di "Spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali".

Gli spettri di risposta sono stati ottenuti con il software "Azioni sismiche - Spettri di risposta ver. 1.03" messo on line sul sito del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Tale software fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale.

Con riferimento all'area oggetto di studio si evidenzia, che le determinazioni dei parametri sismici, e le COORDINATE GEOGRAFICHE sono riferite all'area del Poggio al Moro, per cui le coordinate di analisi sono:

LAT ≅ 43.5077 N

LONG ≅ 10.76 E

Il software individua nella fase IA, la posizione del punto di coordinate inserite rispetto al reticolo dei punti di accelerazione calcolati, come indicato nella figura seguente:

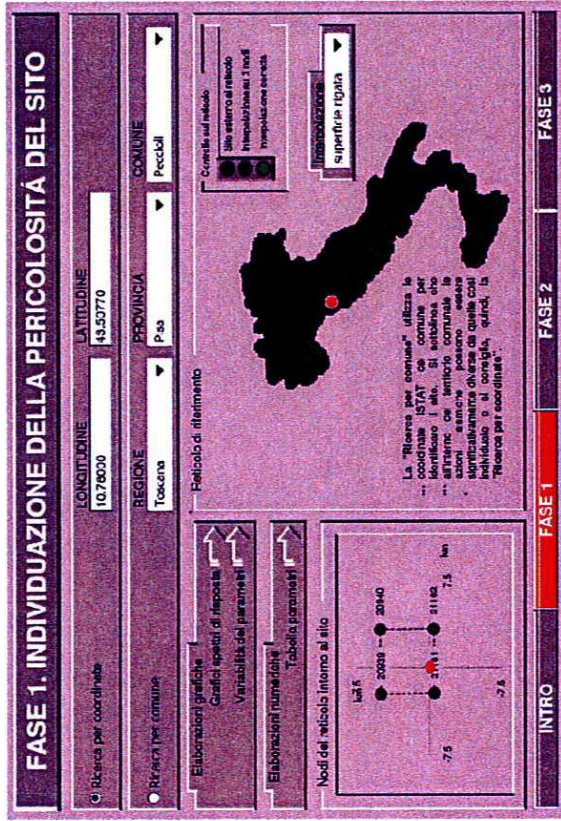
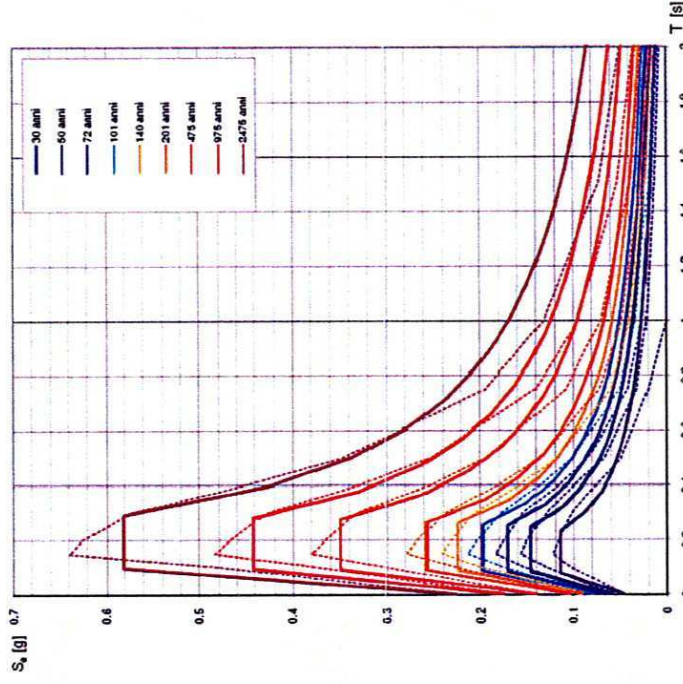


FIG. 3.8. Individuazione punto di coordinate note rispetto reticolo di calcolo.

In seguito all'individuazione del punto oggetto di analisi, si ottengono una serie di elaborazioni grafiche, di seguito riportate di cui:

- spettri di risposta elastici in accelerazione delle componenti orizzontali;
- grafici di variabilità sito specifica dei parametri a_y , F_0 e T^*c rispetto al periodo di ritorno considerato;
- Valori dei parametri a_y , F_0 e T^*c rispetto al periodo di ritorno considerato.

Spettri di risposta elastici per i periodi di ritorno T_p di riferimento

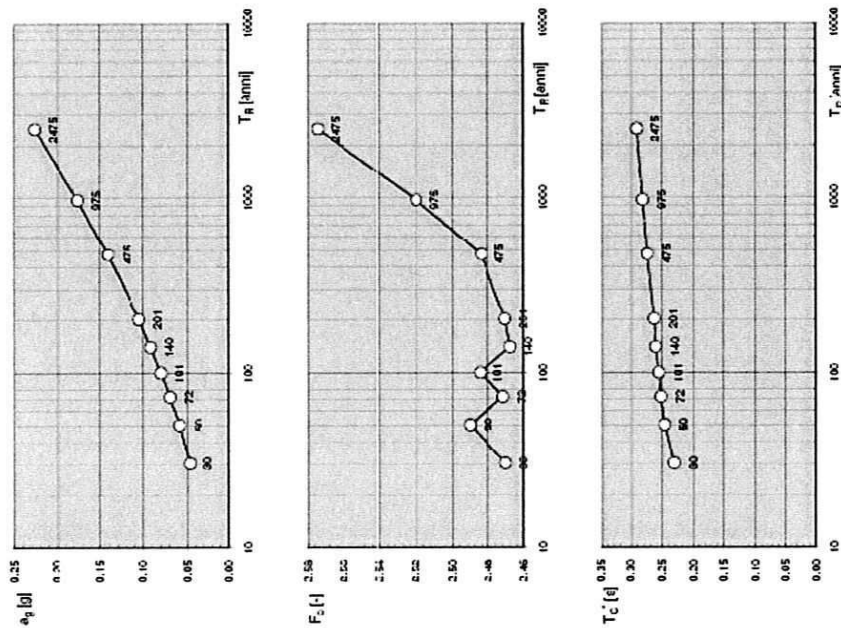


NOTA:
Con linea continua si rappresentano gli spettri di Normativa, con linea tratteggiata gli spettri del progetto SI-INGV da cui sono derivati.

La verifica dell'idoneità del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

FIG. 3.9. Spettri di risposta elastici in accelerazione delle componenti orizzontali

Valori dei parametri a_p , F_0 , T_c : variabilità col periodo di ritorno T_R



La verifica dell'adeguatezza del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

FIG. 3.10. Grafici di variabilità sito specifica dei parametri a_p , F_0 e T_c rispetto al periodo di ritorno considerato

Valori dei parametri a_p , F_0 , T_c per i periodi di ritorno T_R di riferimento

T_R [anni]	a_p [g]	F_0 [-]	T_c [s]
30	0.046	2.470	0.231
50	0.059	2.490	0.246
72	0.069	2.472	0.252
101	0.079	2.485	0.256
140	0.091	2.460	0.261
201	0.104	2.471	0.263
475	0.141	2.484	0.274
975	0.176	2.520	0.281
2475	0.226	2.574	0.291

La verifica dell'adeguatezza del programma, l'utilizzo dei risultati da esso ottenuti sono onere e responsabilità esclusiva dell'utente. Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici non potrà essere ritenuto responsabile dei danni risultanti dall'utilizzo dello stesso.

FIG. 3.11. Valori dei parametri a_p , F_0 e T_c rispetto al periodo di ritorno considerato

2.7. CONCLUSIONI

Le misure effettuate con tecnica sismica attiva MASW e passiva ReMI hanno consentito di ottenere delle informazioni sulla stratificazione acustico-elastica del sottosuolo ed in particolare hanno permesso di stimare il profilo verticale delle onde di taglio (V_s) nei primi 30 m di profondità.

Le aree oggetto di indagine, ubicate nel comune di Peccioli, rientrano nella zona sismica 3S ai sensi della vigente normativa regionale, OPCM 3519/06 e DGRT 431/06.

I valori del parametro $V_{s,30}$, determinati con l'elaborazione dei dati sismici MASW e ReMI sono risultati compresi fra 344 e 395 m/s.

In base all'analisi dei profili della velocità delle onde di taglio, ed in un'ottica di massima cautela, i terreni oggetto di studio possono essere definito principalmente come:

- **sottosuolo di categoria C)** Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SP,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < C_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).