

OGGETTO:	
Supporto geologico tecnico alla variante al Piano Strutturale – Indagini sismiche in sito propedeutiche alla realizzazione della carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).	
TIPOLOGIA DI INDAGINE:	DATA INDAGINI:
SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P E SH HVS ESAC MASW	Dicembre 2012 Febbraio 2013
LOCALITA':	
COMUNE DI LASTRA A SIGNA (FI)	
COMMITTENTE:	
AMMINISTRAZIONE COMUNALE DI LASTRA A SIGNA	

codice documento:	j12.149_las.doc
versione /revisione:	01
stato documento:	definitivo
autore:	a.benvenuti
revisione:	v.carnicelli
approvazione:	v.carnicelli

SOMMARIO

1	PREMESSA	3
2	TIPO D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	3
2.1	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	3
2.2	INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	5
2.3	INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	5
2.4	INDAGINE ESAC: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	7
2.5	INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE	8
2.6	RISULTATI.....	9

1 PREMESSA

Su incarico dell'Amministrazione Comunale di Lastra a Signa sono state eseguite una serie di indagini geofisiche nel territorio comunale di Lastra a Signa (FI), propedeutiche alla realizzazione della carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (MOPS).

Le indagini, svolte nei mesi di Dicembre 2012 e Febbraio 2013, sono state condotte conformemente alla vigente normativa sismica e in particolare: ai contenuti dell'O.P.C.M. n. 3274/2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e s.m.i.; ai contenuti del Regolamento di attuazione dell'articolo 62 della legge regionale 3 gennaio 2005, n.1 (Norme per il governo del territorio) in materia di indagini geologiche, emanato con Decreto del Presidente della Giunta Regionale 25 ottobre 2011, n. 53/R; ai contenuti della Delibera di Giunta Regionale Toscana n. 741 del 06.08.2012 con cui sono state approvate le nuove specifiche tecniche per gli studi di Microzonazione Sismica; alle specifiche del Programma Regionale VEL dettate nelle "Istruzioni Tecniche Regionali relative alla realizzazione delle indagini geologico-tecniche, geofisiche, geotecniche finalizzate alla valutazione degli effetti locali nei comuni classificati sismici della Toscana"; agli "Indirizzi e Criteri Generali per la Microzonazione Sismica" approvati dalla Conferenza delle Regioni in data 13 novembre 2008.

2 TIPO D'INDAGINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La caratterizzazione geofisica del sottosuolo è stata effettuata mediante n.4 prospezioni sismiche a rifrazione in onde P e in onde Sh; i dati ottenuti dalle indagini in sismica a rifrazione sono stati restituiti con elaborazione tomografica e con elaborazione CMP (tempo di intercetta).

Per l'individuazione delle frequenze fondamentali di sito sono stati eseguiti n.26 sondaggi in sismica passiva a stazione singola elaborati attraverso la metodologia basata sulla tecnica di Nakamura e sul rapporto spettrale H/V (HVSR).

In località Malmantile è stata inoltre eseguita, per la ricostruzione del profilo verticale di velocità delle onde S e per il calcolo del parametro Vs30, n.1 prospezione mediante la tecnica ESAC integrata con una prospezione sismica superficiale MASW ("Multichannel Analysis of Surface Waves").

L'ubicazione delle prove è riportata nelle tavole allegate; le indagini sono state posizionate sulla base CTR integrando, dove necessario, la cartografia esistente con rilievi plano-altimetrici ad hoc; i rilievi sono stati effettuati in fase di realizzazione delle indagini con stazione totale laser modello Sokkia SET4130R3.

I risultati delle indagini sono riportati nei relativi allegati.

2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per le indagini a rifrazione è costituita da:

Sistema di energizzazione:

- Onde P - Sistema di energizzazione ad impatto verticale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 10 kg battente verticalmente su piastra quadrata in alluminio di

dimensioni di 20 x 20 x 5 cm posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde sismiche, in grado di produrre onde elastiche ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali.

- Onde Sh - Sistema di energizzazione ad impatto orizzontale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 10 kg battente orizzontalmente su traversina in legno posta direttamente sul piano di campagna.

La traversina, per garantirne il perfetto accoppiamento con il terreno durante le fasi di energizzazione, è stata immobilizzata utilizzando come carico pressante un mezzo fuoristrada.

Sistema di ricezione: geofoni verticali od orizzontali monocomponente con frequenza propria, ovvero dei trasduttori di velocità in grado di tradurre in segnale elettrico la velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali o trasversali prodotte dalla specifica sorgente.

- Onde P - Sistema costituito da 24 geofoni verticali con frequenza propria di 14 Hz;
- Onde Sh - Sistema costituito da 24 geofoni orizzontali con frequenza propria di 10 Hz;
- due cavi sismici telemetrici di 130 m ciascuno;

Sistema di acquisizione dati: sismografo AMBROGEO modello ECO 12-24/2002, composto da 12 dataloggers a 2 canali ciascuno per un totale di 24 canali; un notebook PC Windows XP con software di acquisizione AMBROGEO.

Sistema di trigger: circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati; in questo modo è possibile individuare e visualizzare l'esatto istante in cui la sorgente viene attivata e fissare l'inizio della registrazione.

La strumentazione utilizzata per le misure dei microtremiti ambientali, elaborati attraverso la tecnica HVSR, è costituita da un tromografo digitale (Tromino di Micromed S.p.A.) dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e UP-DOWN a frequenza propria di 4.5 Hz.

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per le indagini ESAC e MASW sono costituite da:

Sistema di energizzazione (indagine MASW) ad impatto verticale costituito da una mazza del peso di 10 kg battente verticalmente su piastra quadrata in alluminio di dimensioni di 20 x 20 x 5 cm posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde Rayleigh;

Sistema di ricezione costituito da 24 geofoni verticali monocomponente con frequenza propria di 4.5 Hz; un cavo sismico telemetrico di 50 m.

Sistema di acquisizione dati: costituito da un sismografo P.A.S.I. modello 16S24U; un notebook PC Windows XP con software di acquisizione P.A.S.I. a 24 canali.

Sistema di trigger (indagine MASW): consistente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui il grave colpisce la base di battuta, consentendo ad un

condensatore di scaricare la carica precedentemente immagazzinata e di produrre un impulso che viene inviato a un sensore collegato al sistema di acquisizione dati.

2.2 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo, giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde bi-rifratte (head wave): le onde analizzate sono quelle birifratte, cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza.

I contrasti di proprietà fisiche rilevabili con la sismica a rifrazione possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e sollecitazioni dinamiche orizzontali per la generazione delle onde Sh e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori solidali col terreno (geofoni).

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde sismiche è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

- Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
- Ricostruzione delle dromocrone in P e Sh e relativa interpretazione;
- Linearizzazione delle dromocrone, inversione dei dati e output classico e tomografico.

Per le analisi interpretative, è stato utilizzato il software Rayfract (Intelligent Resources Inc.).

Il metodo tomografico è particolarmente indicato per morfologie molto complesse con variazioni latero-verticali delle velocità sismiche e meglio definisce le strutture sepolte senza, però, dare indicazioni nette su eventuali superfici riflettenti

2.3 INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma un ruolo fondamentale nella produzione dei microtremori è rivestito dalle onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito 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" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio, qualora la misura venga effettuata all'interno dello stesso. In seguito sarà possibile confrontarla con quella caratteristica del sito e capire se in caso di sisma la struttura potrà essere o meno a rischio;
- la velocità equivalente delle onde di taglio V_s ;
- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri.

Per quanto concerne il fenomeno della "doppia risonanza" (cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico, così come trasmesso in superficie, e quelle dei manufatti ivi edificati) è noto che, dal punto di vista empirico, la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza.

La quantificazione della frequenza caratteristica di sito attraverso misure dirette di microtremore sismico può quindi essere di estremo aiuto nella fase di progettazione.

I risultati ottenuti dall'esecuzione delle singole indagini tomografiche, elaborate attraverso il software Grilla 6.2 (Micromed S.p.A.), sono state verificate secondo le linee guida Sesame; in particolare, nella tabella sottostante si riporta la legenda relativa ai parametri verificati e ai criteri utilizzati.

Legenda Criteri Sesame, 2005

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$, $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

2.4 INDAGINE ESAC: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

La tecnica su antenna sismica ESAC (o ReMi bidirezionale) è indicata per l'analisi di dati di sismica passiva raccolti secondo una geometria di acquisizione bidimensionale. I geofoni non sono cioè allineati in linea (come per le acquisizioni ReMi classiche), bensì secondo geometrie bidimensionali quali ad esempio configurazioni a L, a croce, a T ecc.

La possibilità di analizzare dati di sismica passiva acquisiti con array 2D consente di non aver problemi relativi alla direzionalità del segnale (punto che invece caratterizza l'analisi ReMi tradizionale e che impone di considerare le velocità di fase più basse).

La tecnica è finalizzata alla definizione della curva di dispersione effettiva della componente verticale delle vibrazioni ambientali (onde superficiali) da misure su sensori distribuiti sulla superficie del terreno.

Le informazioni relative alle caratteristiche del sottosuolo vengono ottenute a partire da una analisi di correlazione fra i segnali registrati dai diversi sensori alle diverse frequenze (funzione di coerenza).

La maggiore differenza rispetto ai metodi attivi è che in questo caso, il fronte di propagazione dell'onda misurata su due sensori viene da direzioni diverse (e incognite) quindi le velocità di fase misurate tramite l'analisi di coerenza sono velocità apparenti (sempre maggiori o uguali alle velocità di fase reali).

Si dimostra però che esaminando le differenze di fase (matrice cross-spettrale) osservate su una distribuzione di sensori non allineati è possibile identificare la direzione di provenienza dell'onda.

Le procedure ESAC sono basate sul risultato di Aki (1959) secondo il quale la funzione di correlazione media fra le registrazioni di un rumore isotropo effettuate su sensori verticali distribuiti nelle diverse direzioni a parità distanza r da un sensore centrale, ha una forma nota (Funzione di Bessel di ordine 0).

La forma di questa funzione di Bessel ad una data frequenza ed una data distanza r è controllata dal valore della velocità di fase. Si tratta di un metodo "robusto" grazie alla regolarizzazione imposta dalla applicazione delle funzione di Bessel, ma rischia di fornire risultati errati in presenza di una sorgente dominante e quando la misura è effettuata con stendimenti lineari. Proprio per questi motivi e poiché le analisi svolte assumono la presenza di onde piane, è bene eseguire contestualmente analisi di dati di sismica attiva tipo MASW, per verificare i risultati ottenuti.

Acquisizione dei dati:

- tempi di registrazione: non sono in genere necessari grandi numeri ma tutto dipende dal sito e dalla tipologia di "rumore sismico di sottofondo". E' consigliato acquisire un minimo di 5 minuti (ma per sicurezza sarebbe bene registrare almeno una decina di minuti).

- numero di canali: 12 canali possono risultare sufficienti, ma è sempre consigliabile non scendere sotto i 16 canali. L'importante è la loro buona disposizione. I geofoni devono essere disposti in maniera tale che alcuni siano vicini ma alcuni lontani (tra loro). I geofoni vicini consentiranno di analizzare le alte frequenze (parte superficiale), quelli lontani le basse (profondità).

Le elaborazioni sono state effettuate tramite il software winMASW Academy 5.2 (eliosoft.it)

2.5 INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio V_s , sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o, detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo; onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente allineata all'array geofonico) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in quattro fasi:

- acquisizione dei dati di campagna energizzando a più riprese e alternativamente ai due estremi dello stendimento geofonico;
- determinazione dello spettro di velocità sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento;
- calcolo della curva di dispersione attraverso il picking o la modellazione diretta;
- inversione della curva di dispersione per l'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs e il parametro Vs30.

Le elaborazioni sono state effettuate tramite il software winMASW Academy 5.2 (eliosoft.it)

2.6 RISULTATI

I risultati delle indagini effettuate sono riportati negli allegati seguenti, e precisamente:

- Allegato 1 – Indagini in sismica a rifrazione
- Allegato 2 – Indagini HVSR
- Allegato 3 – Indagine ESAC / MASW

P3 s.n.c.
P3 s.n.c.
Via delle Sette Volte, 21 - 56126 PISA
C.F./P.IVA 01923910507
Alberto Benvenuti