

COME ACQUISIRE DATI MASW E REMI

Nei mesi passati ho avuto modo di fare numerose conversazioni con professionisti che desideravano avere il mio parere sulla scelta di alcuni parametri da impostare in fase di acquisizione MASW-SASW o REMI. Essendo state le domande (e le risposte) abbastanza ripetitive ho deciso di produrre un sintetico documento per fissare quelli che sono i punti chiave. Quindi spero che le seguenti righe possano essere di aiuto per chiarire i più comuni dubbi sulle due metodologie di indagine.

UN PO' DI TEORIA

La necessità di investigare il sottosuolo ha finito per portare i ricercatori a studiare tecniche non invasive, e quindi più economiche, veloci e pratiche, per effettuare caratterizzazioni stratigrafiche del terreno.

Un modo per procedere è quello di andare ad energizzare il sistema ed, osservandone il comportamento, dedurre alcune sue caratteristiche.

L'osservazione viene eseguita mediante geofoni, mentre l'energizzazione viene eseguita lasciando cadere a terra una massa da una certa altezza.

Osservando il segnale che si propaga nel suolo a seguito di una energizzazione si può notare che la quasi totalità dell'energia si propaga tramite onde S.

A seguito della facile trattazione analitica delle onde P, in passato i ricercatori hanno preferito concentrarsi su questo tipo di onde, finendo per considerare le onde S come un disturbo.

Recenti studi hanno consentito di creare un modello matematico anche per trattare le onde S, cercando di godere del vantaggio della elevata energia associata a questo tipo di propagazione.

L'analisi delle onde S mediante tecnica MASW-SASW e REMI viene eseguita mediante la trattazione spettrale del sismogramma, cioè a seguito di una trasformata di Fourier, che restituisce lo spettro del segnale. In questo dominio, detto dominio trasformato, è semplice andare a separare il segnale relativo alle onde S da altri tipi di segnale, come onde P, propagazione in aria,...

L'osservazione dello spettro consente di notare che l'onda S si propaga a velocità variabile a seconda della frequenza dell'onda stessa, questo fenomeno è detto dispersione, ed è caratteristico di questo tipo di onde.

La teoria sviluppata suggerisce di caratterizzare tale fenomeno mediante una funzione detta curva di dispersione, che associa ad ogni frequenza la velocità di propagazione dell'onda. Tale curva è facilmente estraibile dallo spettro del segnale poiché essa approssimativamente posa sui massimi del valore assoluto dello spettro.

La curva di dispersione in realtà può non essere così facile da estrarre, questo perché dipende molto dalla pulizia dei dati e da quanto disturbano gli altri segnali presenti nel sismogramma. Ecco perché questa fase in realtà deve essere considerata una interpretazione, e per questo i migliori software di analisi di dati MASW-SASW e REMI consentono di modificare anche manualmente la curva di dispersione per soddisfare le esigenze dell'utente più esperto.

A questo punto la curva di dispersione sperimentale deve essere confrontata con quella relativa ad un modello sintetico che verrà successivamente alterato in base alle differenze riscontrate tra le due curve, fino ad ottenere un modello sintetico a cui è associata una curva di dispersione sperimentale approssimativamente coincidente con la curva sperimentale. Questa delicata seconda fase di interpretazione è comunemente detta fase di inversione, e dipendentemente dal software usato può anch'essa avvenire in maniera

automatica e/o manuale.

Entrambe le due fasi di interpretazione, per quanto debbano seguire le linee guida dettate dalla teoria, devono rigorosamente essere controllate accuratamente dall'utente poiché non è possibile affidarsi completamente ad un sistema automatico che lavora alla ricerca della soluzione matematicamente migliore, infatti quasi mai questa coincide con la soluzione realmente migliore. Personalmente consiglio di diffidare dai software che non dispongono di sufficiente interattività manuale nelle due fasi di interpretazione indicate.

L'ARRAY DEI GEOFONI

Data la necessità di analizzare con elevato dettaglio le basse frequenze (tipicamente anche al di sotto dei 20 Hz), risulta consigliabile procurarsi geofoni (ad asse verticale) con frequenza di taglio non superiore a 4.5Hz. Molti sismografi permettono di impostare, per ogni geofono, una diversa amplificazione. Questo tipicamente serve ad evidenziare il segnale relativo ai geofoni più lontani dalla sorgente che chiaramente è molto attenuato rispetto al segnale relativo agli altri geofoni. Questa pratica è assolutamente da evitare nel caso MASW-SASW e REMI in quanto l'analisi che viene eseguita in fase interpretativa, tiene automaticamente conto anche della naturale attenuazione del segnale a seguito della sua propagazione nel suolo, di conseguenza tale alterazione del segnale porta alla impossibilità di eseguire una corretta analisi dei dati di campagna.

Le acquisizioni devono essere eseguite con array lineari, ovvero array i cui geofoni sono rigorosamente collocati su una linea retta.

I geofoni devono essere posizionati in modo che la distanza che separa geofoni adiacenti sia costante. Tale distanza talvolta è detta distanza intergeofonica. È sconsigliato avere variazioni di quota tra i vari geofoni, a meno che non sia una variazione regolare tra geofoni adiacenti, come ad esempio il caso di array posizionati su strade in discesa o salita.

La teoria da cui nasce la metodologia MASW-SASW e REMI impone che il sito investigato non abbia variazione stratigrafica lungo l'array, infatti, durante la fase di inversione, il modello del terreno è a strati piani e paralleli (di estensione infinita). Questo tipicamente segna un limite pratico alla lunghezza dell'array (e quindi anche alla profondità di indagine). È infatti assolutamente controproducente imporre l'uso di array esageratamente lunghi se per far questo, a causa della eventuale stratigrafia variabile, i ricevitori collocati nella prima parte dell'array danno informazioni discordanti con quelle ottenute dall'ultima parte dell'array, che sono quindi da considerarsi inutili ed inoltre fonte di un cospicuo segnale di disturbo.

LA SORGENTE E LE RIPETIZIONI

Data la necessità di dover raccogliere un segnale relativamente pulito da rumori ambientali, le energizzazioni dovrebbero essere eseguite usando potenze elevate rispetto al rumore di fondo. Questo tipicamente non è così semplice da realizzare, ma fortunatamente esistono delle soluzioni alternative. Una buona sorgente per array non troppo lunghi è la banale ed economica mazza, oppure, se sono richieste potenze maggiori, il fucile sismico. Una buona strategia, nell'eseguire le singole energizzazioni, è quella di attendere un momento di relativo silenzio: ad esempio, in ambiente urbano, basta aspettare che l'eventuale automobile che sta transitando vicino all'array

si allontanano di un centinaio di metri.

Un utile accorgimento è quello di ripetere l'energizzazione più volte, sommando successivamente i segnali ottenuti in modo aritmetico, ottenendo così un aumento del rapporto segnale-rumore. Chiaramente, più l'ambiente è rumoroso, più elevato sarà il numero delle ripetizioni consigliabili.

Se si usa la mazza come sorgente, si può procedere con 5 o 10 ripetizioni, mentre se si usa il fucile bastano dalle 2 alle 5 ripetizioni.

LA POSIZIONE DELLA SORGENTE

La sorgente deve essere sempre posizionata esternamente all'array, e sempre in asse con esso.

Si collocherà prima del primo geofono ad una distanza che deve essere un buon compromesso tra alcune problematiche.

Si deve inizialmente tener presente che il fronte dell'onda prodotta dalla sorgente sarà circolare, con centro chiaramente coincidente con il punto di energizzazione. La teoria MASW-SASW è sviluppata analizzando il

comportamento del sistema sintetico in presenza di propagazione di onde piane. Ne consegue che se la sorgente è troppo vicina all'array

l'approssimazione di onda piana non può essere usata, specialmente per i primi geofoni dell'array (che sono molto vicini alla sorgente), quindi la fase di elaborazione dei dati non potrà restituire risultati molto corretti.

La soluzione al problema precedente sarebbe teoricamente risolta portando la sorgente molto lontano (almeno 10 volte la lunghezza dell'array), ma sfortunatamente sarebbe richiesta una potenza (da associare all'energizzatore) troppo elevata.

Un valido compromesso può essere trovato allontanando la sorgente dal primo geofono di circa metà della lunghezza dell'array. Ovvero, se si ha un array lungo 50 metri, la sorgente potrà essere messa a 25-30 metri dal primo geofono.

È chiaramente possibile allontanarsi ulteriormente, ad aiutare a compensare la maggiore energia richiesta è ancora la possibilità di aumentare il numero delle ripetizioni delle energizzazioni.

LA SORGENTE NEL CASO REMI

La tecnica MASW-SASW è usualmente definita attiva, in quanto occorre che l'operatore sia munito di una sorgente per energizzare il sistema.

La tecnica REMI invece viene definita passiva a sottolineare che l'energizzazione non dipende dall'operatore. Chiaramente anche nel caso REMI è necessario che una sorgente sia presente, ma questa sarà spontaneamente presente nell'ambiente: cioè durante la registrazione del segnale l'obiettivo sarà quello di rilevare i vari microtremori che raggiungono l'array.

Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale.

Esiste infine la necessità di soddisfare la condizione di omnidirezionalità delle sorgenti. Ovvero è necessario che l'array possa rilevare microtremori che giungono da ogni direzione intorno ad esso. Il motivo è legato alla non conoscenza della posizione delle singole sorgenti generatrici dei microtremori, tale problema viene in fase di elaborazione risolto utilizzando tale assunto di

omnidirezionalità.

Dal punto di vista pratico questa necessità, che non sempre è soddisfatta, vieta l'utilizzo della tecnica REMI in alcuni siti: in altre parole in quegli ambienti in cui è chiaro che gran parte dei tremori giungerà da una certa direzione sulla quale è presente una vicina fabbrica, cantiere, strada o altro.

ENERGIZZAZIONE DELL'ALTRA ESTREMITA' DELL'ARRAY

Se si desidera avere informazioni aggiuntive sul sito, si può ricorrere ad una seconda fase d'acquisizione, eseguita energizzando all'altro estremo dell'array, cioè vicino all'ultimo geofono.

La teoria dice che per un sistema perfetto a strati piani e paralleli questa metodologia non avrebbe nessun'utilità aggiuntiva in fase di analisi, in quanto il sistema sarebbe esattamente simmetrico al caso dell'energizzazione standard (cioè fatta in corrispondenza del primo geofono). La teoria infatti afferma che i nuovi dati, a parte il rumore, contengono esattamente lo stesso segnale utile presente negli altri dati.

Sfortunatamente, sarà quasi impossibile trovare un sistema perfetto, cioè sarà sempre presente una minima variazione stratigrafica lungo l'array. Ecco che la teoria di base deve essere riadattata al caso reale.

Tipicamente sono gli strati superficiali a avere le variazioni stratigrafiche più marcate, mentre nella parte più profonda del suolo non si hanno grandi fluttuazioni. Questo risulta essere un fatto incoraggiante, infatti mentre le alte frequenze portano informazione sugli strati superficiali (variabili lungo l'array), le basse frequenze portano informazione sugli strati più profondi (presumibilmente stazionari lungo l'array). Ne segue che eseguendo una duplice raccolta dati mediante la doppia posizione della sorgente, possono essere eseguite analisi che restituiranno stratigrafie probabilmente diverse nei primi metri, ma simili in profondità.

IL CAMPIONAMENTO TEMPORALE

L'intervallo di campionamento può tranquillamente oscillare tra 0.5 ms e 2 ms. Si ottiene così un elevato livello di dettaglio del segnale.

Essendo la parte interessante del segnale acquisito, tipicamente contenuta sotto i 100Hz, è fortemente sconsigliato (vedi teorema di Nyquist) abbassare la frequenza di campionamento sotto 200Hz. Ovvero è bene usare sempre un intervallo di campionamento non superiore a 5ms.

La durata (lunghezza temporale) del segnale registrato deve essere sufficiente per consentire all'impulso emesso dalla sorgente, di propagarsi da un estremo all'altro dell'array, ed inoltre per consentire la naturale attenuazione del segnale su tutti i ricevitori; questo tipicamente richiede 1 o 2 secondi. Ma possono essere richiesti tempi maggiori utilizzando array di lunghezza elevata o nel caso di siti caratterizzati da velocità di propagazione medie particolarmente basse.

Nel caso REMI la frequenza di campionamento può essere scelta di valore più basso, questo è dovuto al fatto che questa metodologia viene tipicamente usata per migliorare la trattazione delle basse frequenze (solitamente sotto i 20Hz). Quindi non è in questo caso un problema acquisire campioni ogni 5ms. L'altra differenza tra il metodo MASW-SASW e quello REMI è che sono necessari tempi di acquisizione molto lunghi, infatti, nel secondo caso lo scopo è acquisire molti segnali relativi a microtremori spontaneamente presenti

nell'ambiente. Tipicamente ogni acquisizione prevede almeno 30 secondi di registrazione, per ogni ripetizione.

IL CAMPIONAMENTO SPAZIALE

Sperimentalmente è stato osservato che, per avere una sufficiente accuratezza dei risultati, il numero dei canali/geofoni usati dovrebbe essere come valore minimo 24.

La lunghezza dell'array deve essere scelta tenendo presente che essa è direttamente legata alla massima profondità che si riesce a raggiungere in fase di interpretazione stratigrafica. In tale legame entra in gioco un fattore che, a seguito di prove sperimentali, oscilla empiricamente tra 2 e 3.

Ad esempio, se si desidera avere un'indicazione stratigrafica accurata fino ai 20 metri, è consigliabile usare un array lungo almeno 40 o 60 metri. In questo caso, usando 24 ricevitori, la distanza intergeofonica sarà scelta tra 2 e 3 metri.

L'ARRAY VIRTUALE

Se non si potesse disporre di un sufficiente numero di geofoni in fase di acquisizione, nel caso della metodologia MASW-SASW, è comunque possibile procedere sfruttando una proprietà della metodologia stessa.

Ad aiutare è la stazionarietà del sistema, che comporta la possibilità di effettuare acquisizioni multiple, cioè eseguite in momenti diversi, ottenendo sempre un segnale utile che si ripete in maniera coerente.

La procedura è estremamente semplice, il metodo sfrutta la possibilità di sintetizzare l'array effettuando un banale assemblaggio dei mini-sismogrammi ottenuti con i mini-array che si possono implementare con i pochi geofoni disponibili.

Tale tecnica permette tranquillamente di usare un solo geofono per sintetizzare un array (virtuale) composto anche da 48 o 96 geofoni.

Ammettiamo di avere soltanto 4 geofoni ma di voler acquisire come se ne avessimo a disposizione 24:

- acquisire posizionando i 4 geofoni nelle posizioni 1-4
- acquisire, dopo aver traslato il mini-array, in modo che i geofoni siano nelle posizioni 5-8
- acquisire, dopo aver traslato il mini-array, in modo che i geofoni siano nelle posizioni 9-12
- procedere fino a raggiungere la posizione 24 (realizzando un totale di 6 mini array)
- eseguire l'assemblaggio dei mini-sismogrammi in un unico sismogramma

Il solo svantaggio di questa procedura è il dover ripetere l'acquisizione più volte.

Inoltre l'acquisizione relativa ai singoli mini-array, per ovvie ragioni legate alla necessità di maggiore pulizia del segnale, per consentire un buon assemblaggio, richiede un numero di ripetizioni maggiore al caso di array non virtuale: raddoppiare il numero delle ripetizioni dovrebbe essere più che sufficiente.

ARRAY CON SPAZIATURA IRREGOLARE

Come già puntualizzato, l'elaborazione di dati MASW-SASW o REMI richiede geofoni regolarmente spazati.

Esiste comunque una utile possibilità pratica di effettuare misure con spaziatura irregolare, fermo restando che in una fase pre-elaborazione sarà necessario ricostruire degli array a spaziatura regolare.

Questo non è altro che un artificio pratico per ottenere contemporaneamente dati come se fossero stati acquisiti mediante più array a spaziatura regolare, al fine di ottenere stratigrafie dettagliate in superficie e in profondità andando allo stesso tempo a risparmiare un po' di tempo in fase di acquisizione.

Spiego l'intelligente metodologia semplicemente descrivendo il seguente esempio, dove si suggerisce di collocare i geofoni nelle seguenti posizioni (espresse in metri):

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 15 18 20 24 28 32 36 40 44 48 52

si tratta di un array composto da 24 ricevitori, a spaziatura irregolare

Acquisendo si ottengono automaticamente 3 array a spaziatura regolare:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

si tratta di un array composto da 11 ricevitori, realizzato con spaziatura regolare di 1m e di lunghezza 10m

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20

si tratta di un array composto da 11 ricevitori, realizzato con spaziatura regolare di 2m e di lunghezza 20m

0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48

si tratta di un array composto da 13 ricevitori, realizzato con spaziatura regolare di 4m e di lunghezza 52m.

Con il sub-array a spaziatura 1m sarà possibile ricostruire una stratigrafia abbastanza dettagliata per i primi 3/5 metri (essendo l'array lungo solo 10m), poi sfruttando il sub-array a spaziatura 2m sarà possibile scendere intorno ai 10m di stratigrafia (chiaramente sacrificando un po' la definizione), infine con l'ultimo sub-array si potrà provare a portare l'analisi a circa 20m di profondità(essendo l'array lungo più di 50).

Sfortunatamente i sub-array ottenuti non hanno mai un numero di ricevitori molto elevato per garantire una buona qualità dell'analisi, quindi potendo disporre di 48 geofoni in fase di acquisizione è possibile sfruttare la seguente sequenza:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 22 24 25 26 28 30 32
34 36 38 40 44 48 52 56 60 64 68 72 76 80 84 88 92 96 100 102

si tratta di un array composto da 48 ricevitori, a spaziatura irregolare

Acquisendo si ottengono automaticamente 3 array a spaziatura regolare:

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

si tratta di un array composto da 21 ricevitori, realizzato con spaziatura regolare di 1m e di lunghezza 20m

0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34 36 38 40

si tratta di un array composto da 21 ricevitori, realizzato con spaziatura regolare di 2m e di lunghezza 40m

0 4 8 12 16 20 24 28 32 36 40 44 48 52 56 60 64 68 72 76 80 84 88 92 96
100 102

si tratta di un array composto da 27 ricevitori, realizzato con spaziatura regolare di 4m e di lunghezza 102m.

A differenza del caso precedente i sub array sono composti da un sufficiente numero di geofoni e inoltre le profondità di investigazione sono superiori.

Non credo sia necessario sottolineare che in questo caso l'energizzazione dovrà

essere fatta solo in prossimità del primo geofono, e che data la lunghezza dell'array è consigliabile qualche ripetizione dell'energizzazione aggiuntiva rispetto al caso precedente.