

Applicazione della sismica passiva in stratigrafia: l'esempio della Pianura Padana

Enrico Pieri

Laureato in Scienze Geologiche, Università degli Studi di Bologna

INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi dieci anni si è registrato un interesse crescente dei geologi nei confronti dello studio delle pianure alluvionali.

Solo recentemente inoltre sta maturando la consapevolezza dell'importanza che il "bene acqua" riveste e di come esso debba essere meglio gestito. Sta quindi crescendo l'interesse in questo settore, volto soprattutto ad individuare e stimare le riserve passando attraverso il riconoscimento dei potenziali acquiferi e delle loro geometrie.

Il lavoro di ricerca nel sottosuolo delle pianure tuttavia è fortemente condizionato dalla difficoltà di reperire fondi per realizzare le indagini.

Analisi sismica e studio di carote, basandosi su due approcci completamente diversi (osservazioni dirette ed indirette), sono tecniche di indagine di sottosuolo complementari. Tuttavia, esse hanno un difetto in comune: gli alti costi di realizzazione. Nell'ottica di acquisire nuovi dati stratigrafici a basso costo, questo lavoro ha utilizzato una nuova metodologia di indagine, che si differenzia dalle altre per i più bassi costi di realizzazione e che può quindi essere associata facilmente alle due tecniche convenzionali di indagine. Si tratta di un'indagine di tipo geofisico basata sulla misurazione del rumore sismico, tramite uno strumento di ultima generazione estremamente portatile, che necessita di una minima manutenzione e che fa sì che i costi vengano ridotti al solo lavoro di terreno. Questa tecnica viene definita "Sismica Passiva", in quanto non necessita di una sorgente di energia appositamente creata. Sebbene il dato acquisito sia puntiforme, le caratteristiche dello strumento permettono di eseguire una grande quantità di misure.

Questo studio è mirato ad incrementare e validare le conoscenze e le possibilità di utilizzo, a fini stratigrafici, della sismica passiva, in particolare della tecnica dei rapporti spettrali o HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) (Nogoshi & Igarashi, 1970), misurati con un tromografo digitale, evidenziandone i pregi ed i limiti. Questa metodologia è stata utilizzata con ottimi risultati in vari campi (soprattutto in ambito ingegneristico). Inizialmente sviluppata come metodo per calcolare l'amplificazione sismica locale (Nakamura, 1989), oggi sembra offrire buone prospettive di utilizzo anche a fini stratigrafici particolareggiati (Gallipoli et al., 2000; Castellaro et al., 2005), avendo già dimostrato di risolvere situazioni alla scala di bacino (Ibs Von Seth & Wohlenberg, 1999; Mulargia & Castellaro, in stampa). Studi recenti hanno evidenziato come attraverso la sismica passiva sia possibile identificare importanti discontinuità stratigrafiche, quali l'interfaccia sedimento/bedrock, a profondità fino anche a 2 km (Mulargia & Castellaro, in stampa). Questa ricerca si sviluppa a una scala di maggiore dettaglio, al fine di verificare le capacità del metodo di risolvere contrasti litologici all'interno di alternanze tra

corpi sedimentari grossolani (sabbioso-ghiaiosi), che rappresentano potenziali acquiferi, e pacchi di materiale fine, silto-argilloso.

Come primo passo è stata effettuata una calibrazione di alcune misure eseguite con Tromino™ in corrispondenza di sondaggi a carotaggio continuo o pozzi per acqua mediante il confronto con le stratigrafie note al fine di identificare ed evidenziare alcune chiavi di lettura che permettano di ridurre al minimo la soggettività nella fase di interpretazione dei grafici ottenuti a seguito del rilievo mediante la tecnica di sismica passiva.

Una volta identificate e verificate le corrispondenze tra la stratigrafia nota e le misure effettuate, sono state costruite delle sezioni stratigrafiche utilizzando i criteri di correlazione estesi a decine di misure, al fine di ottenere una ricostruzione dell'assetto dei depositi tardo-quaternari di un settore della Pianura Padana (Fig. 1).

Al fine di validare ulteriormente il metodo, le sezioni ottenute mediante interpretazione di sismica passiva sono state poi confrontate singolarmente con altre sezioni a stratigrafia nota passanti per la stessa traccia o, in alcuni casi, nelle immediate vicinanze.

IL QUATERNARIO DEL BACINO PADANO: STRATIGRAFIA E IDROSTRATIGRAFIA

Fino ad una ventina di anni fa non si disponeva di conoscenze dettagliate della stratigrafia tardoquaternaria della Pianura Padana poiché, visti gli elevati costi di indagine del sottosuolo, gli studi si erano incentrati su livelli più profondi che ospitavano importanti giacimenti di idrocarburi. A partire dagli anni '90, con lo sviluppo della cartografia geologica in scala 1:50.000 (progetto CARG), sono stati eseguiti dalla regione Emilia-Romagna vari tipi di indagine e con la collaborazione dell'Università di Bologna, è stata investigata la geologia di superficie e delle prime decine di metri, spingendosi in alcuni punti fino a maggiori profondità. È stata così eseguita una



Figura 1 -Inquadramento dell'area di studio (in rosso).

Questo effetto è sommabile, anche se non in modo lineare; 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.

I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume, P o S; in essi giocano un ruolo fondamentale le onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S (vedi ad es. Lachet e Bard, 1994), il che spiega la dipendenza di tutta la formulazione della velocità di quest'ultime.

La risoluzione del problema diretto relativo alle onde superficiali in un mezzo elastico stratificato richiede che, per ciascuno strato, siano specificati quattro parametri: spessore, velocità delle onde P, velocità delle onde S e densità di massa. Arai e Tokimatsu (2004) hanno condotto analisi di sensibilità riferite alla curva HVSR; da questo studio si evince come la curva dei rapporti spettrali sia particolarmente sensibile alle variazioni dei parametri spessore e velocità delle onde S e come la velocità delle onde P e la densità di massa, pur non essendo del tutto trascurabili, influiscano in misura secondaria.

L'inversione delle misure di tremore mediante l'utilizzo dei rapporti H/V "sintetici", cioè quelli calcolati relativamente al campo d'onde completo di un modello 3-D (per le basi teoriche si veda ad es. Ben-Menahem e Singh, 1981; Arai e Tokimatsu, 2004) presenta più inconvenienti: innanzitutto la matematica che sta dietro queste modellazioni è molto complessa e non sempre risolvibile; in secondo luogo, la soluzione del problema non è di per sé univoca e infine la costruzione del modello necessita l'utilizzo di parametri che nei casi reali non sono costanti.

La risoluzione del problema richiede l'analisi delle singole componenti spettrali e del rapporto H/V: l'informazione è infatti contenuta per lo più nella componente verticale, ma il rapporto fra le componenti fornisce un'importante normalizzazione del segnale per:

- il contenuto in frequenza
- la risposta strumentale
- l'ampiezza del segnale

quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

Dall'osservazione e analisi dei grafici è possibile quindi identificare le varie discontinuità stratigrafiche e se è disponibile una stima delle velocità delle onde S, le frequenze di risonanza possono essere convertite in profondità stratigrafiche o, viceversa, disponendo della stratigrafia del sottosuolo, è possibile ricavare una stima della V_s da un grafico HVSR.

STRUMENTAZIONE

Lo strumento utilizzato per le registrazioni è un tomografo digitale progettato specificatamente per l'acquisizione del rumore sismico, esso dispone di tre canali analogici connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione disposti secondo tre direzioni ortogonali, che trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale a basso rumore, più un canale per il segnale GPS, quando presente. Il moto del terreno è amplificato, convertito in forma digitale, organizzato e salvato su una memoria di tipo flash. Da questa il segnale può essere trasferito ad un PC mediante un semplice cavo USB dove il codice di calcolo "Grilla" appositamente sviluppato archivia, analizza e permette la revisione del segnale. Per questo studio le misure sono state effettuate con una frequenza di campionamento di 128 Hz ed una durata di 20 minuti.

UBICAZIONE DELLE MISURE

La tecnica d'indagine utilizzata in questo studio appartiene alle metodologie geofisiche di prospezione del sottosuolo; si tratta quindi di una indagine indiretta che, come tale, necessita dunque di essere calibrata con stratigrafie desunte dallo studio di carote (metodologia di indagine diretta) derivanti da sondaggi a carotaggio continuo.

Inoltre, la sismica passiva è una metodologia relativamente recente e ancora più recenti sono gli studi mirati a comprendere le sue potenzialità a fini stratigrafici cosicché esse non sono ancora ben note e consolidate, come pure le sue capacità risolutive ed i relativi limiti.

Per questi motivi, nel pianificare l'ubicazione delle prove è stato fatto in modo che alcune prove venissero eseguite in coincidenza di sondaggi a carotaggio continuo realizzati, sia dalla Regione Emilia-Romagna che dalla regione Lombardia; altre misure invece seguono la traccia di sezioni stratigrafiche disponibili in letteratura, o rese disponibili da studi in corso; infine, altre prove formano tratti di sezione non coperti da dati stratigrafici. Per questo studio sono state costruite 4 sezioni stratigrafiche, che per lunghi tratti si sovrappongono o corrono parallele a sezioni di confronto. In Figura 3 è riportata l'ubicazione di tutte le prove eseguite, la traccia delle quattro sezioni costruite e la traccia delle sezioni stratigrafiche che verranno utilizzate come termine di confronto.

La sezione che da Bologna si estende fino a Ferrara è stata realizzata applicando le conoscenze fino a qui acquisite ad un contesto stratigrafico in cui esistono alcune incertezze. Infatti, non esiste nessuna sezione coincidente con questa traccia; è stato possibile però usare come termine di confronto due tratti delle sezioni idrostratigrafiche realizzate da Regione Emilia-Romagna & ENI-AGIP (1998).

ELABORAZIONE DATI

L'analisi spettrale, effettuata tramite il software "Grilla", relativa a ciascuna registrazione, restituisce all'operatore tre finestre. Riferendoci a Figura 4, nella finestra in alto a sinistra è riportata la curva HVSR in funzione della frequenza, in quella in basso sono presenti invece i singoli spettri di ampiezza, in velocità, delle tre componenti del moto, mentre nella piccola finestra in alto a destra viene visualizzata in toni di colore la curva HVSR nelle diverse finestre di analisi per tutta la durata della misura. Laddove la deviazione standard relativa all'HVSR sia troppo elevata, occorre migliorare la misura intervenendo sulla terza finestra, dopodiché si analizzano nuovamente i dati e si ottiene così una curva HVSR "pulita" sulla quale sarà possibile effettuare l'interpretazione.

In un primo tempo sono state costruite delle sezioni affiancando le singole curve HVSR. Il risultato delle analisi ottenute dal software Grilla è stato salvato in formato ASCII e ridisegnato tramite il software MatLab™ fino ad ottenere una sezione costituita dall'insieme delle singole tracce. In questa rappresentazione, se da un lato sono possibili alcune facili ed evidenti correlazioni, dall'altro, alcune interpretazioni appaiono dubbie e soggettive. Una buona interpretazione, infatti, non può essere basata solo sull'analisi delle curve H/V, ma necessita dell'analisi congiunta degli spettri delle singole componenti e dei profili HVSR.

Le misure sono state quindi analizzate e studiate singolarmente ed è stata costruita una banca dati su un foglio elettronico (Excel™) nella quale sono state riportate, per ogni

misura, le frequenze di risonanza relative ad ogni contrasto di impedenza tra i diversi corpi sedimentari. Queste sono poi state convertite in profondità (vedi paragrafo successivo) e sono quindi state costruite le quattro sezioni.

CALIBRAZIONE DELLE MISURE

I dati disponibili come termine di confronto sono delle colonne stratigrafiche descritte nella loro interezza con diverso grado di precisione e dettaglio a seconda dei casi.

La prima parte di questo studio è mirata a verificare ed evidenziare la compatibilità tra la stratigrafia nota e quanto è osservabile dai grafici HVSR ottenuti dopo aver processato il dato acquisito. Fine ultimo di questa parte è di ricavare delle chiavi di lettura che permettano di interpretare il meno soggettivamente possibile i grafici restituiti mediante la tecnica di analisi dei rapporti spettrali.

Sono diversi gli esempi nella letteratura scientifica in cui le curve HVSR sono impiegate a fini stratigrafici identificando le discontinuità sismografiche nel sottosuolo in corrispondenza dei picchi HVSR. Questo metodo ha il pregio di fornire una lettura facile in un contesto del tipo sedimento-bedrock dove i contrasti litologici (e di conseguenza tra le proprietà dei due mezzi) sono molto marcati e i picchi altrettanto facilmente distinguibili.

Se però l'obiettivo diventa discriminare elementi ad una scala di maggior dettaglio con discontinuità meno marcate e per lo più in un contesto eterogeneo come quello dei depositi alluvionali, la sola analisi della curva H/V mostra dei limiti. Da qui la necessità di analizzare non solo il grafico HVSR, ma anche quello delle singole componenti spettrali dal quale si possono ottenere numerose informazioni.

Un aspetto da considerare e che porta ad un cambiamento significativo dell'ampiezza dei picchi sono le inversioni di velocità (Castellaro & Mulargia, 2008). Queste si hanno quando lungo la verticale man mano che si va in profondità la velocità delle onde S, diminuisce anziché aumentare, dando come risultato dei picchi H/V di ampiezza inferiore a 1.

Per poter effettuare un confronto tra i dati dei sondaggi e le discontinuità osservabili dai vari grafici occorre trasformare il dato restituito da questi ultimi, che è in frequenza, in profondità. Nei casi multistrato si deve ricorrere ad un modello del campo d'onde superficiali alquanto complesso, convenientemente, quindi, ci si basa su una stratigrafia nota alla quale ancorarsi ed eseguendo il problema inverso si ottengono dei valori di Vs ragionevoli e verosimili da utilizzare.

Questo metodo non elimina il problema in modo definitivo; infatti, ogni qualvolta si utilizzano i dati di velocità per interpretare altre prove, si introducono altre incertezze, tuttavia, il metodo ha il pregio di permettere di effettuare ricostruzioni stratigrafiche verosimili.

I dati di velocità utilizzati in questo studio derivano dall'inversione delle misure effettuate in corrispondenza dei sondaggi e sono in accordo con la bibliografia esistente e con la pratica di quotidiana.

CALIBRAZIONE DEL SONDAGGIO MN1

Il sondaggio a carotaggio continuo MN1, spinto ad una profondità di 114 m, è stato eseguito dall'Università di Bologna e descritto in dettaglio da Amorosi et al. (in stampa).

Le Figure 5a e 5b mostrano, invece i grafici risultanti dal rilievo mediante sismica passiva: la curva H/V in funzione della frequenza e le curve degli spettri di ampiezza in velocità per le tre componenti ortogonali del moto.

Nel dettaglio, in Figura 5b è possibile distinguere forme spettrali che identificano una discontinuità stratigrafica da quelle che sono dovute semplicemente a disturbi della misura. L'andamento delle tre componenti spettrali all'interno di un pacco di strati omogenei in linea teorica dovrebbe essere parallelo, mentre la presenza di una discontinuità per le cause già menzionate (fenomeni di intrappolamento, guida d'onda ecc..) genera un distacco tra le due componenti orizzontali e quella verticale: quest'ultima registra infatti un minimo assoluto o relativo, mentre le componenti orizzontali possono presentare un massimo relativo o assoluto.

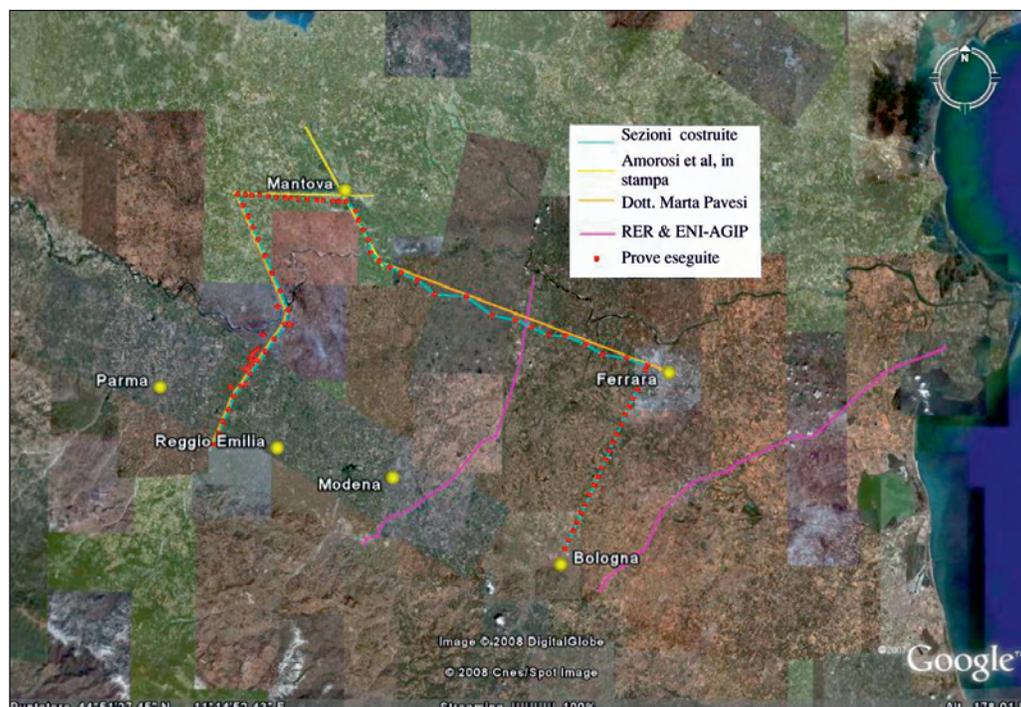


Figura 3 - Ubicazione delle prove, traccia delle sezioni costruite e traccia delle sezioni di confronto.

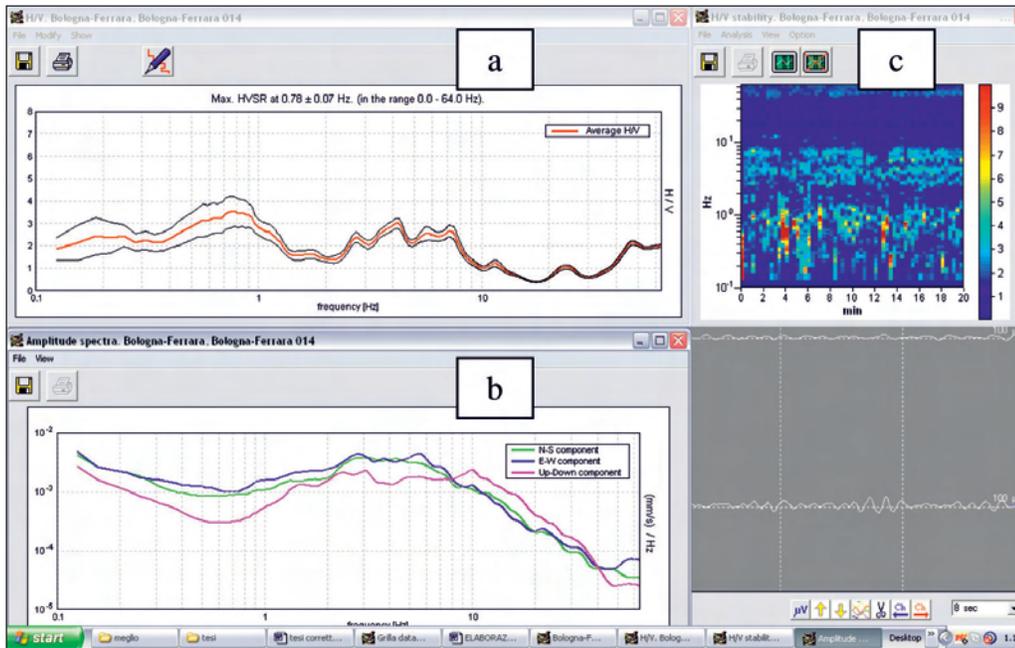


Figura 4 - I tre grafici restituiti dall'analisi delle tracce registrate; a) grafico H/V; b) grafico delle componenti spettrali; c) grafico della stabilità nel tempo del rapporto H/V.

Questa divergenza tra le componenti del moto fa sì che nel grafico delle singole componenti (Fig. 5b) sia possibile identificare, alla frequenza di risonanza dei vari livelli stratigrafici, delle forme caratteristiche, che definiamo qui in modo del tutto informale, “ogivali” vista appunto la loro somiglianza ad una ogiva, che possono essere più o meno sviluppate, a seconda dei casi (vedi Figura 5). L'ampiezza del picco dipende quindi dall'entità del divario tra le componenti, inoltre può succedere che gli effetti provocati da due discontinuità vicine si sommino e interagiscano tra loro.

Può anche accadere che siano presenti dei picchi nel grafico HVSR, senza che questi siano però associati ad un minimo della componente verticale. Questa condizione implica che i picchi non corrispondano ad alcuna discontinuità stratigrafica, ma è verosimilmente di natura artificiale.

Nella prova eseguita in corrispondenza del sondaggio MN1 (Fig. 5) si può notare come sia presente e ben visibile in superficie una forma ad “ogiva” negli spettri che presenta un picco H/V corrispondente a circa 20 Hz. Al di sotto di questa frequenza si riconosce il pattern caratteristico dell'inversione di velocità (ossia uno strato caratterizzato da Vs inferiori rispetto allo strato sovrastante). L'inversione di velocità si manifesta con un $H/V < 1$ legato alla discesa della componente spettrale orizzontale sotto la verticale (Castellaro & Mulargia, 2008).

È il caso, questo, del picco H/V a 7 Hz: molto meno sviluppato, a causa della discesa delle componenti spettrali orizzontali sotto la verticale. In questo sito si nota anche, tra 7 e 1 Hz, una differenza tra le componenti orizzontali stesse che può essere legata ad effetti direzionali.

Inferiormente, poco al di sopra dei 4 Hz, è osservabile un altro picco relativamente largo e di modesta ampiezza. Analizzando l'andamento delle singole componenti in questo caso si può ben osservare come, contrariamente alle componenti orizzontali che vanno aumentando, la componente verticale, in netto minimo locale, identifica una discontinuità. Immediatamente al di sotto dei 2 Hz è presente un altro picco H/V, poco riconoscibile in questo grafico, ma la cui presenza è confermata, suggerita da altre registrazioni effettuate nei dintorni.

La curva della componente verticale riprende poi a scendere, formando un'altra inflessione poco al di sopra del valore di 1 Hz, in corrispondenza della quale le altre componenti registrano un diverso andamento, con lieve tendenza ad aumentare. Più in basso, la componente verticale riprende a scendere, divergendo ancora di più dalle altre due componenti ed identificando un'altra superficie di discontinuità intorno a 0,85 Hz. Infine, si registra un'ultima discontinuità intorno a 0,6 Hz. Utilizzando un valore medio di velocità delle onde S di 370 m/s si osserva una buona corrispondenza tra i principali cambiamenti di facies e le discontinuità osservabili nei grafici. In particolare, la discontinuità registrata a 0,85 Hz corrisponderebbe al corpo grossolano presente nel sondaggio intorno ai

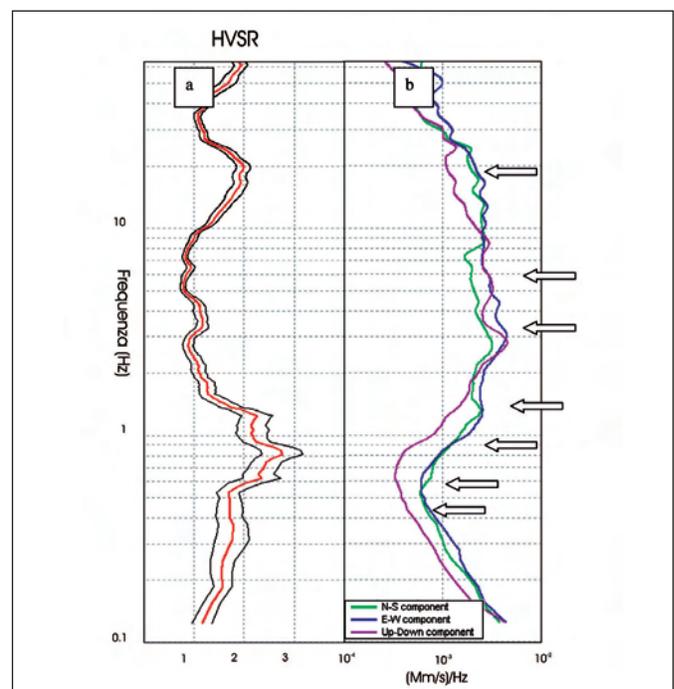


Figura 5 - a) Curva del rapporto H/V; b) Andamento delle singole componenti spettrali del sondaggio MN1.

110 m, quella poco al di sopra di 1 Hz rappresenterebbe invece il corpo grossolano con tetto intorno a 80 m, mentre la discontinuità immediatamente al di sotto dei 2 Hz corrisponderebbe ai depositi di canale fluviale amalgamati, con tetto a 50 m di profondità. Superiamente, la discontinuità registrata a 4 Hz corrisponderebbe al corpo di canale presente tra 20 e 25 m di profondità, mentre quella a 7 Hz individuerrebbe una discontinuità, poco al di sotto dei 5 m, che potrebbe indicare il tetto delle ghiaie all'interno del corpo di canale più superficiale. Non risulta invece visibile il corpo di canale presente nel sondaggio tra le profondità di 32 e 36 m, probabilmente a causa del fatto che esso è sovrastato da depositi di rotta fluviale con una marcata tendenza *fining-upward*, il che rende graduale il passaggio tra le due unità, non permettendone così la distinzione. È infine visibile un'ultima discontinuità intorno ai 20 Hz, che corrisponde ad una discontinuità litologica estremamente superficiale, probabilmente coincidente con il passaggio dal terreno di riporto ai sottostanti depositi di canale fluviale.

Da questo confronto, qui riportato a titolo esemplificativo, e da altri (non riportati) che hanno condotto a risultati analoghi, si evince la potenzialità di questo metodo nel discriminare superfici di discontinuità stratigrafica. Dalla calibrazione con i dati di sondaggio si ricava inoltre una stima del valore delle Vs pari a 370 m/s, che verrà successivamente utilizzata in tutte le rimanenti misure per convertire il dato da frequenza a profondità. Deve comunque essere sottolineato, ancora una volta, che l'uso di una velocità costante lungo tutta la colonna introduce un errore più elevato per le discontinuità più superficiali, che possono essere sovrastimate, e per quelle molto profonde, che possono essere invece sottostimate.

DISCUSSIONE DELLE SEZIONI

In questo paragrafo, per motivi di spazio, viene presentata la discussione di una singola sezione, per la trattazione delle restanti sezioni si rimanda al testo completo.

Sezione 1: Montecchio Emilia-Pagadelli. La sezione complessivamente si basa su un totale di 23 prove di sismica passiva, distribuite su di una lunghezza complessiva di 56 km; parallelamente, in quest'area, sono state eseguite ulteriori 8 prove in corrispondenza di sondaggi a carotaggio continuo e di pozzi per acqua che hanno permesso la calibrazione del dato (vedi Figura 3).

Base stratigrafica di partenza

La traccia di questa sezione ricalca quella di una sezione stratigrafica, non ancora pubblicata, costruita dalla dottoressa Marta Pavesi nell'ambito del suo dottorato di ricerca, mediante correlazione di dati di sondaggio e stratigrafie di pozzi per acqua integrati con dati di sismica a riflessione. Convenientemente, per la sua trattazione, la suddividiamo nei due tratti con differente orientazione.

Nel primo tratto (Fig. 6a), ad orientamento SSW-NNE, partendo dal margine appenninico, è possibile osservare un primo tratto costituito da depositi prevalentemente grossolani, in parte amalgamati, attribuibili alla associazione di facies di conoide alluvionale, intervallati solo sporadicamente da depositi fini. Procedendo verso la pianura, si può notare come i depositi alluvionali siano organizzati secondo alternanze di materiale grossolano e fine, che definiscono tre cicli. Questa organizzazione ciclica termina dopo il tratto iniziale; infatti, è

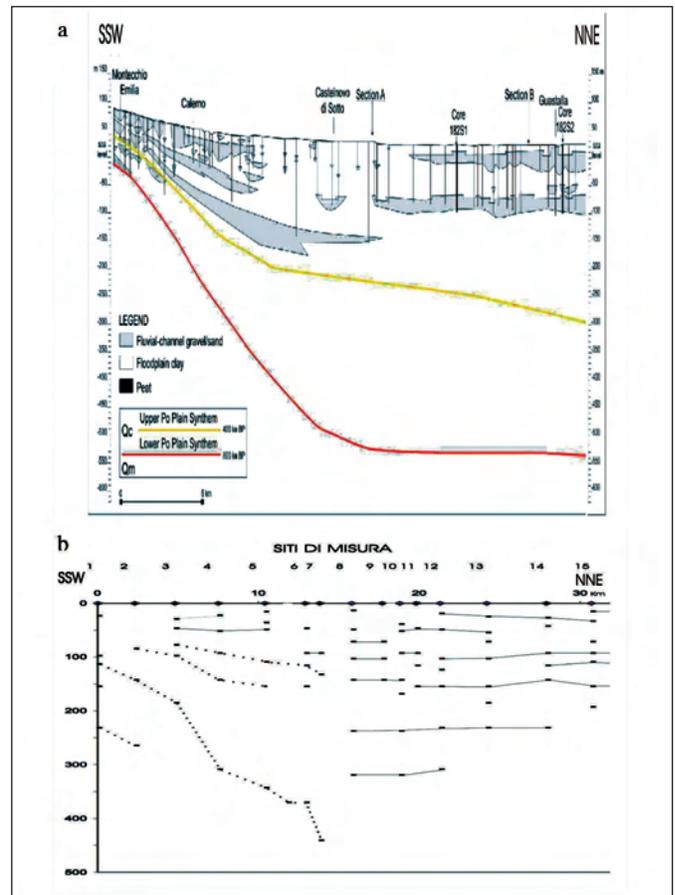


Figura 6 -a) Sezione stratigrafica realizzata mediante correlazione di dati provenienti da sondaggi e pozzi per acqua (dott.ssa Marta Pavesi); b) sezione stratigrafica costruita mediante sismica passiva.

osservabile un tratto costituito quasi interamente da depositi fini di piana inondabile, con al loro interno alcune lenti di depositi grossolani di canale fluviale. Procedendo ancora verso la pianura, e avvicinandosi quindi all'asse del Fiume Po, si nota chiaramente la ricomparsa di un'organizzazione ciclica di questi depositi.

Nella seconda parte della sezione (Fig. 7a), ad orientamento SSE-NNW, sono riconoscibili gli stessi corpi osservati nella prima parte, anche se questi però presentano una tendenza a divenire sempre più superficiali man mano che si procede verso N. Questo fatto, unito alla presenza di dati disponibili a profondità maggiori, ha permesso di tracciare anche il terzo corpo lungo tutta la sua estensione.

Al di sotto di quest'ultimo corpo di canale fluviale sono riportate altre due importanti superfici derivanti dall'integrazione con dati provenienti dalla sismica a riflessione. La superficie situata ad una profondità di 350 m dal piano campagna (linea gialla) rappresenta la discontinuità che separa i depositi appartenenti al Sintema Padano Superiore da quelli del Sintema Padano Inferiore, datata tra 0,45 e 0,35 Ma. La superficie più profonda (linea rossa), invece, rappresenta il limite che divide i depositi del Supersintema Padano da quelli del Supersintema del Quaternario Marino.

Stratigrafia mediante sismica passiva

Dall'osservazione del tratto meridionale della Sezione 1 (Fig. 6b), corrispondente a depositi amalgamati di conoide alluvio-

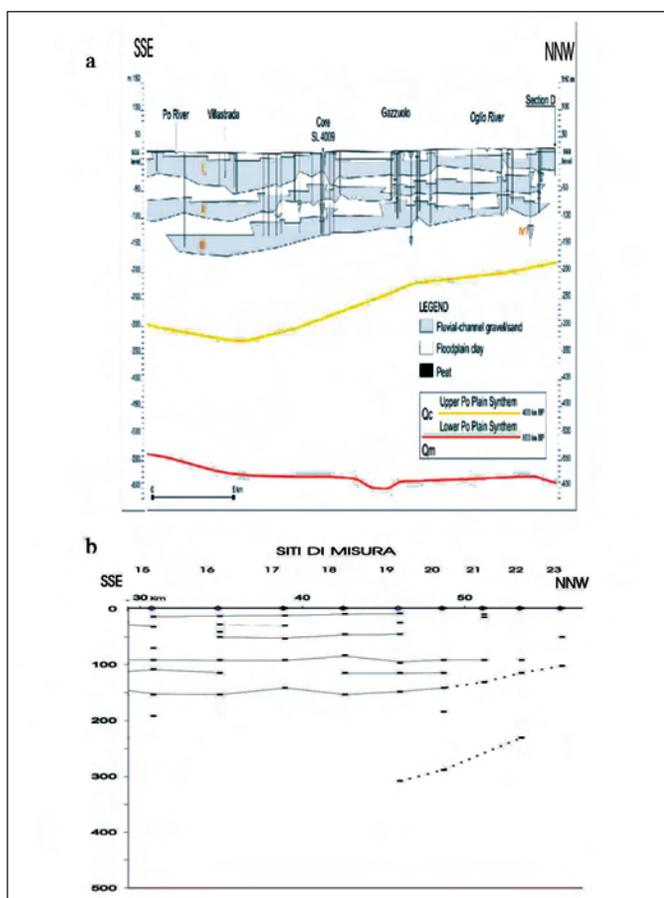


Figura 7 a) Sezione stratigrafica realizzata mediante correlazione di dati provenienti da sondaggi e pozzi per acqua (dott.ssa Marta Pavesi); b) sezione stratigrafica costruita mediante sismica passiva.

nale, il metodo della sismica passiva non individua alcuna superficie di discontinuità; proseguendo verso nord invece a partire dalla terza prova sono osservabili superfici di discontinuità corrispondenti al tetto di corpi grossolani di canale fluviale, che proseguono anche nella seconda parte di questa sezione (Fig. 7b). In particolare, fino alla misura 5 si registra la presenza di una prima discontinuità superficiale, che corrisponde al tetto di depositi di canale fluviale, alla profondità di circa 20 m dal piano campagna. Al di sotto, si osserva un altro corpo, tracciabile fino alla prova 6 ad una profondità stimata intorno a 50 m dal piano campagna.

In questa prima parte di sezione sono state inoltre tracciate altre tre superfici, la cui interpretazione però è stata resa possibile solo attraverso la conoscenza preesistente dell'area in esame; per questo motivo sono state tracciate con un tratto discontinuo (vedi Figura 7b). Di queste, la prima dall'alto verso il basso rappresenta il terzo corpo grossolano, che da una profondità di circa 70 m scende fino a circa 150 m dal piano campagna; la seconda corrisponderebbe ad un quarto corpo grossolano di canale fluviale, situato all'interno del Sintema Padano Inferiore; la superficie più profonda infine, visto il buon accordo con i dati stratigrafici a disposizione corrisponderebbe alla maggiore discontinuità che divide il Super-sintema del Quaternario Marino, dai sovrastanti depositi del Super-sintema del Padano.

Per quanto riguarda le discontinuità più superficiali, che individuano il tetto di depositi grossolani di canale fluviale, è da rimarcare come queste siano ben correlabili, collocandosi

pressoché alla medesima profondità in prove adiacenti. Nel tratto più settentrionale, le discontinuità più superficiali si trovano a cavallo dei 20 m di profondità dal piano campagna, e sono presenti dalla prova 12 fino alla 15. Una seconda superficie di discontinuità, presente dalla prova 8 fino alla prova 22 (vedi Figura 9b), si trova ad una profondità di circa 100 m dal piano campagna. Al di sotto di questo corpo se ne individua un altro con estensione laterale ancora maggiore, presente in tutta la sezione, il cui tetto, in questo tratto, è situato ad una profondità stimata superiore a 150 m. Questa discontinuità corrisponderebbe al tetto del terzo acquifero che, in questa sezione a differenza di quella di confronto, risulta essere continuo per tutta la lunghezza della traccia. Sono inoltre presenti due discontinuità più profonde: la prima intorno a 230 m, riscontrata in 5 misure consecutive per una lunghezza di circa 10 km, ed una seconda ad una profondità approssimativa di 330 m. Infine, sono presenti altre discontinuità di estensione laterale molto più limitata, corrispondenti, verosimilmente a depositi lenticolari di canale fluviale.

In Figura 9b è riportata la seconda parte di questa prima sezione: sono qui osservabili tre corpi (= discontinuità) lateralmente continui: il più superficiale ha tetto intorno a 10 m di profondità, mentre i due sottostanti sono la prosecuzione dei due corpi di canale fluviale osservati nella prima parte della sezione. In particolare, osservando il più profondo dei due si nota la sua tendenza a salire verso N; rifacendosi alla sezione stratigrafica pregressa è possibile tracciare questo corpo anche nelle ultime tre prove, fino ai 100 m di profondità dal piano campagna. Anche in questo tratto di sezione sono presenti corpi di minori dimensioni, che corrisponderebbero a depositi lenticolari isolati, appartenenti all'associazione di facies di canale fluviale.

Analogamente anche nelle sezioni qui non riportate, si è potuta osservare una buona corrispondenza tra i dati disponibili in bibliografia e le informazioni ottenute mediante la sismica passiva.

APPLICAZIONI DELLA SISMICA PASSIVA A FINI STRATIGRAFICI: CONSIDERAZIONI FINALI E CONCLUSIONI

Attraverso la calibrazione con dati stratigrafici provenienti da sondaggi a carotaggio continuo e la costruzione di sezioni stratigrafiche, a loro volta confrontate con le stratigrafie note dagli studi precedenti, è stato possibile testare e validare le potenziali capacità, nonché i limiti, della tecnica nota come sismica passiva a stazione singola, al fine di effettuare ricostruzioni stratigrafiche.

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni di tipo puntuale, evidenziando la presenza di discontinuità stratigrafiche dovute a contrasti di velocità tra i vari tipi di deposito. Allo stato attuale non sono ancora state definite normalizzazioni (o formulazioni) che permettano di correlare direttamente l'ampiezza di questi contrasti con i litotipi presenti. In un contesto come quello di questo studio, caratterizzato dalla presenza di depositi alluvionali di varia granulometria, il metodo si presta tuttavia con successo alla distinzione tra corpi sedimentari grossolani (sabbie e ghiaie di canale fluviale) e pacchi di materiali fini (silt e argille) di piana inondabile.

L'assenza di un controllo sulla geometria dei corpi sedimentari consente una buona correlazione di superfici di discontinuità a basso angolo rilevate in singole prove adiacenti a

profondità comparabili. Solo infittendo di molto le misurazioni sarà invece possibile seguire un orizzonte inclinato, con una quantità di misure che sarà funzione della maggiore inclinazione della discontinuità.

Questo studio ha confermato che la profondità di investigazione del metodo è dettata dalle condizioni meteorologiche; qualora si voglia indagare a profondità > 200-300 m in questo tipo di depositi, è preferibile effettuare le misurazioni in condizioni perturbate.

La tecnica di sismica passiva è in grado di discriminare meglio superfici di discontinuità stratigrafica quanto più marcato è il contrasto di velocità a crescere dall'alto verso il basso. Questo implica una buona probabilità di riconoscimento dei passaggi verso il basso da sedimento fine a sedimento più grossolano, che nel contesto in esame corrispondono al tetto di depositi di canale fluviale. Al contrario, non sono distinguibili le basi di questi corpi sedimentari. Inoltre, il passaggio dall'alto verso il basso da sedimenti più veloci a sedimenti più lenti genera delle inversioni di velocità che complicano ulteriormente l'analisi del dato. Questo problema interessa generalmente i depositi più superficiali ed è attualmente oggetto di ulteriori studi da parte dei ricercatori del Dipartimento di Geofisica dell'Università di Bologna.

Un ulteriore limite del metodo per una sua applicazione a fini stratigrafici deriva dalla difficoltà nel discriminare due orizzonti stratigrafici, qualora essi siano troppo vicini. La distanza necessaria affinché due discontinuità stratigrafiche siano distinte dipende in primo luogo dalla profondità alla quale si trovano (più sono profonde, più devono essere distanti per essere identificate) e, in secondo luogo, dai relativi contrasti di velocità. Questo studio ha dimostrato che corpi sedimentari di alcune decine di metri di spessore (20-40 m), con spaziature dei tetti dell'ordine dei 50 m, possono essere facilmente identificati.

Come già ripetuto più volte trattandosi di una metodologia di indagine di tipo indiretto essa non può prescindere dall'integrazione con dati provenienti da sondaggi a carotaggio continuo (osservazioni dirette), dai quali si ottengono le informazioni necessarie per poter tarare la misura.

Nel corso di questo studio le informazioni derivanti dai sondaggi a carotaggio continuo hanno permesso la stima di un valore medio di velocità delle onde S intorno a 370 m/s, che bene approssima la realtà stratigrafica dei primi 150-200 m (con qualche sovrastima nella parte più superficiale), che ha poi permesso di convertire il dato proveniente dalla sismica passiva (fornito sotto forma di frequenze di risonanza) in profondità. Questo procedimento, qualora lo si applichi ad un ampio intervallo di profondità (maggiore di 200 m), introduce necessariamente un margine di errore nel calcolo delle profondità. Questo errore è dovuto all'utilizzo di un valore di velocità V_s medio, vista l'impossibilità di disporre dei dati di velocità lungo tutta la profondità, che quindi in alcune situazioni può discostarsi dalla realtà. Qualora si volesse ottenere una stima più affidabile della profondità delle discontinuità più profonde (> 200 m), bisognerebbe estrapolare mediante calibrazione un altro valore di V_s medio più congruo con quelle profondità, ed eventualmente suddividere il sottosuolo in più orizzonti a diversa V_s media.

L'impiego di questo metodo su di una vasta porzione della Pianura Padana ha consentito di ottenere un quadro stratigrafico coerente, definito dall'alternanza di depositi grossolani di canale fluviale e pacchi di sedimenti fini di piana inonda-

bile. I tetti dei corpi amalgamati di canale fluviale hanno significato stratigrafico-sequenziale, correlandosi nelle aree a mare con la superficie di trasgressione. All'interno delle quattro sezioni realizzate nel corso di questo studio, sono riconoscibili tre superfici di discontinuità, interpretate come il tetto di corpi lateralmente estesi di canale fluviale, che corrisponderebbero ai principali acquiferi dell'area padana. Al di sotto di 200 m di profondità dal piano campagna, il numero di discontinuità rilevate diminuisce notevolmente; di conseguenza non è più possibile a queste profondità tracciare superfici di interesse stratigrafico, fatta eccezione per alcuni brevi tratti di correlazione nelle sezioni 2 e 4.

Inoltre, in molti casi non è stato possibile identificare mediante sismica passiva le due più importanti superfici di discontinuità all'interno del Quaternario riconosciute, invece, mediante la sismica a riflessione; per quel che riguarda la discontinuità più superficiale, che separa i depositi del Sintema Padano Superiore da quelli del Sintema Padano Inferiore, si può concludere che essa sia in molti casi non risolvibile mediante questa tecnica di indagine a causa delle scarse variazioni litologiche tra i depositi sovrastanti e quelli sottostanti. Per quel che invece riguarda la discontinuità che divide i depositi del Supersintema Padano da quelli sottostanti del Supersintema del Quaternario Marino, non risulta chiaro se essa non sia identificata per problemi legati al metodo oppure per motivi legati alla sua elevata profondità. Nel primo tratto della Sezione 1, con l'ausilio della sezione stratigrafica nota è stato possibile tracciare una superficie di discontinuità che ben si accorda con i valori di profondità che definiscono la discontinuità tra i due supersintemi. Ciò implica che discontinuità profonde siano possono essere in alcuni casi identificabili e tracciabili fisicamente, a suggerire un'importante margine di miglioramento futuro di questa tecnica.

Per spingere l'indagine fino a basse frequenze, sono da preferirsi situazioni di maltempo, preferibilmente nelle aree adiacenti alla zona di misura, che creano un alto e diffuso rumore sismico, piuttosto che sul punto stesso dove potrebbero complicare l'analisi dei dati o in alcuni casi rendere impossibile effettuare la misura; al contrario la mancanza delle suddette condizioni meteo si traduce in una minor capacità di discriminare e risolvere i segnali a bassa frequenza (< 1 Hz).

In conclusione, è possibile asserire che la sismica passiva a stazione singola può rappresentare un importante metodo di esplorazione del sottosuolo. Nonostante la sua scarsa risoluzione, si tratta di una tecnica a costo quasi zero, rapida, comoda e non invasiva, che può essere affiancata alle metodologie classiche di indagine che presentano costi incomparabilmente maggiori. Una volta effettuata la calibrazione delle misure con dati derivanti da sondaggi a carotaggio continuo questa tecnica può consentire di realizzare ricostruzioni stratigrafiche in zone carenti di dati o coperte da dati di bassa qualità.

Nell'area in esame la sismica passiva è in grado di discriminare con buoni risultati le principali discontinuità stratigrafiche nei primi 150-200 m di profondità dal piano campagna permettendo così, in questo intervallo di profondità, la redazione di sezioni stratigrafiche attendibili utilizzabili per una caratterizzazione a livello generale della geometria degli acquiferi.

RINGRAZIAMENTI

L'autore desidera ringraziare i Professori A. Amorosi, F. Mulargia, S. Castellaro (Università di Bologna).