

BATINI F., LISI S., PINNA E.

**CONTRIBUTO DEI PROFILI SISMICI IN POZZO PER
L'INDIVIDUAZIONE DI POTENZIALI SERBATOI GEOTERMICI
ALL'INTERNO DEL BASAMENTO METAMORFICO DEL CAMPO
DI BRUCIANO (AREA DI LARDERELLO)**

*

Estratto da:
**ATTI DEL 14° CONVEGNO ANNUALE
DEL GRUPPO NAZIONALE DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA**
Roma 23-25 ottobre 1995

Fausto Batini¹, Simone Lisi², Eros Pinna³

¹ ENEL S.p.A., DPT/VDT-AG, Unità Laboratorio, Larderello (Pisa) - Italia

² Libero professionista, Castelnuovo V.C. (Pisa) - Italia

³ Università degli Studi di Pisa - Italia

CONTRIBUTO DEI PROFILI SISMICI IN POZZO PER L'INDIVIDUAZIONE DI POTENZIALI SERBATOI GEOTERMICI ALL'INTERNO DEL BASAMENTO METAMORFICO DEL CAMPO DI BRUCIANO (AREA DI LARDERELLO).

Riassunto

Attraverso l'elaborazione e l'interpretazione di misure geofisiche e profili sismici di pozzo acquisiti dall'ENEL e la revisione delle linee sismiche di superficie, sono stati raggiunti alcuni risultati che possono essere utilizzati ai fini di una migliore comprensione della struttura profonda del campo geotermico e per l'individuazione di potenziali serbatoi.

E' stato osservato che le variazioni della velocità delle onde sismiche nel basamento non sono correlabili ai passaggi tra litotipi metamorfici, mentre vi sono livelli ad alta velocità interpretati come scaglie anidritiche profonde, che rappresentano possibili serbatoi.

E' stato possibile osservare una buona corrispondenza tra gli eventi sismici del *WSP log* e il panorama di fratture delineato sulla base delle misure geofisiche in pozzo. E' stata inoltre tentata una caratterizzazione della "risposta sismica" delle zone fratturate. Si ipotizza che queste zone siano fasce a bassa impedenza acustica in base all'osservazione di impulsi a polarità invertita e di multiple. Tali eventi hanno, nell'intorno del pozzo, andamento suborizzontale interrotto da sistemi di faglie subverticali che determinano la circolazione convettiva di fluidi nel basamento.

CONTRIBUTION OF WELL SEISMIC PROFILES FOR DELINEATION OF POTENTIAL RESERVOIRS INTO METAMORPHIC BASEMENT IN THE BRUCIANO GEOTHERMAL FIELD (LARDERELLO AREA).

Abstract

Well Seismic Profiles (WSPs) and well logs carried out in the Bruciano geothermal wells, were used in conjunction with surface seismic data and geological informations to delineate deep (2 to 4 km) reservoirs within metamorphic basement.

The seismic velocity structure was determined to the bottom (2500 m) of the WSP survey. Velocity changes observed inside the polymetamorphic complex were not correlated with the boundaries between different metamorphic lithologies.

Seismic reflections were detected in correspondence of the main stratigraphic interfaces in the sedimentary complexes. Many important reflectors inside the basement were correlated to fractured and/or permeable zones well outlined by well logs. These zones showed a sub-horizontal distribution, were crossed by subvertical faults and were characterized by inverted polarity wavelets.

INTRODUZIONE

Poiché l'esplorazione e lo sfruttamento dei serbatoi geotermici richiedono grandi investimenti economici, l'ENEL applica le più avanzate metodologie di indagine geofisica e adotta le tecniche di perforazione più innovative, al fine di ridurre al minimo il rischio minerario.

La sismica a riflessione e i profili sismici in pozzo (*Well Seismic Profiles* o *WSP*), oltre a fornire elementi per una migliore comprensione delle strutture e delle dinamiche crostali dell'area geotermica di Larderello, hanno permesso di individuare potenziali serbatoi geotermici profondi (3-4 km) all'interno del basamento metamorfico, laddove altre metodologie geofisiche risultavano inadeguate (Batini e Nicolich, 1984; Batini et alii, 1991; Cameli et alii, 1995).

Dal 1979 l'ENEL ha quindi avviato un intenso programma di perforazione che ha permesso di reperire e sfruttare per la produzione di energia elettrica fluidi geotermici ad alta entalpia all'interno delle formazioni polimetamorfiche. L'accorgimento tecnico più comunemente utilizzato dall'ENEL è quello di perforare, da una singola postazione, un pozzo verticale e due o tre pozzi deviati, per raggiungere obiettivi minerari individuati con la sismica di superficie e con i profili sismici in pozzo.

Nel campo geotermico di Bruciano, ubicato sul limite orientale dell'area di Larderello (Fig. 1), sono stati perforati dall'ENEL alla fine degli anni '80 alcuni pozzi profondi circa 3500 m, tra i quali il pozzo Bruciano 1, che sono risultati produttivi avendo raggiunto serbatoi all'interno del

basamento metamorfico.

In questa nota vengono presentati i risultati ottenuti dalla elaborazione e dalla interpretazione di alcuni profili sismici in pozzo acquisiti dall'ENEL nel pozzo Bruciano 1, con l'obiettivo di individuare zone fratturate potenzialmente produttive all'interno delle formazioni metamorfiche del basamento e di caratterizzare la "risposta sismica" ad esse associata.

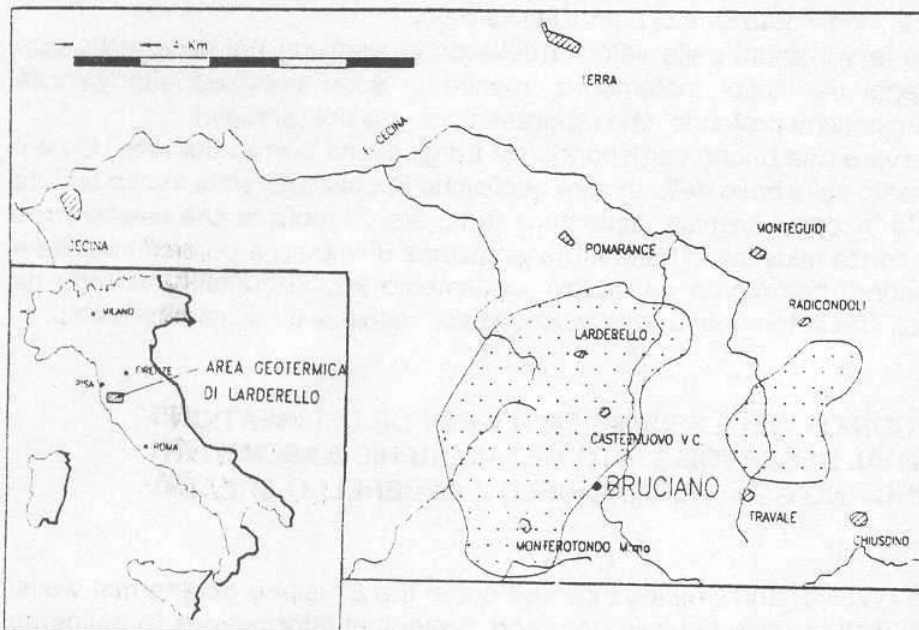


Fig. 1 - Ubicazione delle aree geotermiche di Larderello-Travale e del campo di Bruciano.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE.

L'assetto geologico-strutturale dell'area geotermica di Larderello (Fig. 2), è così schematizzabile:

- la copertura impermeabile dei serbatoi geotermici è rappresentata dai complessi sedimentari lacustri-marini prevalentemente argillosi del Neogene e dalle Unità Liguri (ofioliti, argille e calcari, arenarie in facies di flysch);
- un serbatoio a profondità inferiore a 1500 m, intensamente fratturato e molto permeabile, è rappresentato dalle formazioni della Serie Toscana ridotta (in prevalenza calcari dolomitici e anidriti) e dal Complesso a Scaglie Tettoniche, che include i livelli di base delle serie evaporitiche Triassiche (anidriti con alternanze di brecce dolomitiche) e le formazioni clastico-evaporitiche del Trias medio-superiore (Verrucano s.l.). Questo serbatoio, in sfruttamento intensivo da oltre 50 anni, mostra un rapido declino della produzione di fluido e della pressione di strato;

- una serie di serbatoi profondi (2500-4500 m) permeabili per fratturazione è presente all'interno delle Unità paleozoiche del basamento rappresentato da tre gruppi di rocce polimetamorfiche prealpine (Filladi e Quarziti, Micascisti, Gneiss) (Batini et alii, 1983b). La distribuzione spaziale e le dimensioni di tali serbatoi sono molto irregolari, pertanto la loro individuazione in una situazione geologica così complessa richiede l'applicazione di tecniche di esplorazione ad alta risoluzione, quali appunto i metodi sismici a riflessione e in particolare i profili sismici in pozzo. Le numerose linee sismiche a riflessione acquisite dall'ENEL hanno permesso di individuare anche all'interno delle Unità paleozoiche del basamento metamorfico gruppi di riflettori tra i quali il "marker K". Questo marker sismico, che è presente in tutta l'area di Larderello ad una profondità compresa tra 3 e 8 km, è caratterizzato da riflessioni di notevole ampiezza (spesso con caratteristiche di *bright spots*) probabilmente causate dalla presenza di fluidi intrappolati in intervalli fratturati (Batini et alii, 1983a; 1985).

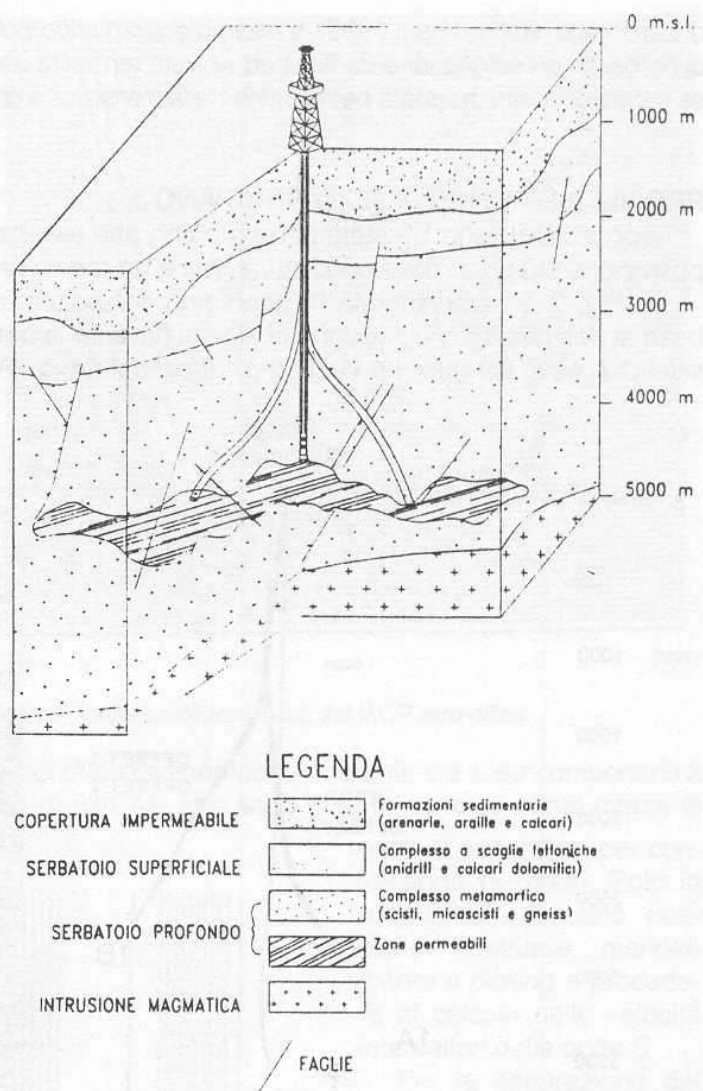


Fig. 2 - Schema geologico dell'area di Larderello: serbatoi geotermici e pozzi devianti.

Più recentemente Cameli et alii (1993) hanno ipotizzato che il marker "K" potrebbe essere costituito da una fascia milonitica che rappresenterebbe il confine reologico tra una crosta superiore (fragile) e una crosta inferiore (duttile).

La profondità della maggior parte degli ipocentri degli eventi sismici locali, rilevati con la rete sismica ENEL, è compresa tra 1 e 5 km, e la loro distribuzione spaziale segue l'andamento del marker "K" (Batini et alii, 1995). L'assenza di sismicità al di sotto di 8 km rivelerebbe quindi il comportamento duttile di quella porzione di crosta.

I risultati delle inversioni tomografiche di telesismi e di eventi locali hanno permesso di individuare una zona a bassa velocità delle onde P (-20%) posta al centro dell'area geotermica, dove si osservano il flusso di calore e il gradiente geotermico maggiori, il minimo dell'anomalia negativa di Bouguer e la zona di massimo sollevamento del "K". L'interpretazione integrata di tutti questi dati permette di ipotizzare la presenza di una intrusione granitica ancora parzialmente fusa alla profondità di 8-10 km, che potrebbe quindi rappresentare la sorgente di calore dell'area

di Larderello (Batini et alii, 1995). Il minimo gravimetrico potrebbe anche venire associato a variazioni di porosità con saturazione da fluidi ad elevata termalità associati ai processi causativi delle complesse variazioni delle proprietà petrofisiche nella transizione crosta-mantello (Nicolich e Marson, 1994).

PROFILI SISMICI NEL POZZO BRUCIANO 1

Il pozzo Bruciano 1 è stato perforato con una tecnica che prevede di eseguire da una stessa postazione più pozzi direzionali in vari rami: un ramo verticale e due rami deviati.

In Fig. 3 è rappresentata la geometria del pozzo, con lo schema stratigrafico ricostruito in base ai dati geologici e petrografici rilevati durante la perforazione (*cuttings* e carote), e dei profili sismici in esso eseguiti: un *WSP zero-offset* nel ramo 1A e due *WSP con offset* nel ramo 1B.

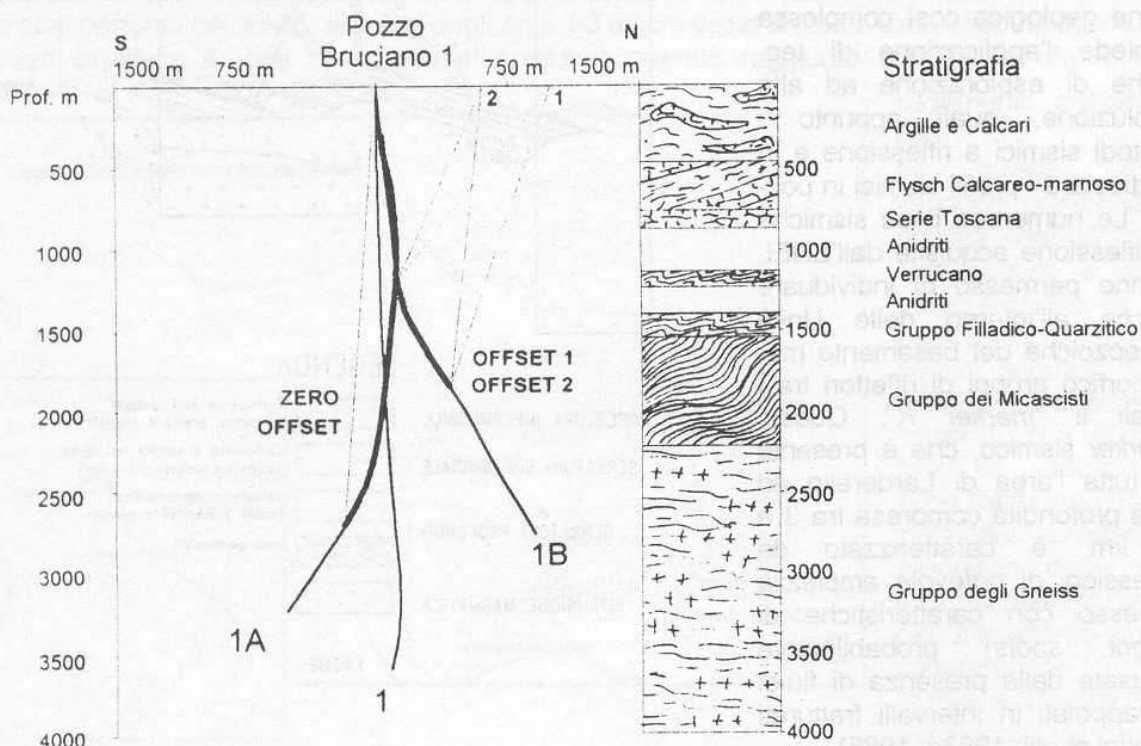


Fig. 3 - Pozzo Bruciano 1: *WSP* acquisiti e stratigrafia.

In Tab. 1 sono riportati i parametri utilizzati per l'acquisizione dei profili sismici.

Altre misure geofisiche in pozzo (in particolare i *logs* di temperatura e pressione e i *logs* sonici) sono state analizzate per individuare le zone permeabili e produttive (Lisi, 1994).

POZZO/RAMO	Bruciano 1A	Bruciano 1B	Bruciano 1B
OFFSET SORGENTE	Zero	1000 m - 10°30' E	1170 m - 61°20' W
INTERVALLO INDAGATO	315-2700 m dal p.c.	1215-1860 m dal p.c.	1215-1860 m dal p.c.
SORGENTE ENERGIA	n. 4 Vibratori	n. 2 vibratori	n. 2 vibratori
FREQUENZA SWEEP	Lineare 16-64 Hz	Lineare 16-64 Hz	Lineare 16-64 Hz
DURATA SWEEP	16 "	12 "	12 "
N° LIVELLI	88 + 4 check shots	43	43
DISTANZA TRA LIVELLI	25 m	15 m	15 m
GEOFONO	a 3 componenti	a 3 componenti	a 3 componenti

Tab. 1 - Parametri di acquisizione dei *WSP*.

I dati acquisiti sono stati elaborati con il programma *Quickvsp*, sviluppato dall'ENEL su PC con sistema operativo MS-Dos.

Sui *row data* (Fig 4), dopo i controlli di qualità, la ricomposizione dello *stack*, l'introduzione dei dati di deviazione del pozzo per il calcolo delle profondità verticali "vere" da attribuire ad ogni traccia acquisita, il *picking* di ciascuna traccia per la successiva esecuzione del filtraggio di velocità e per ricavare direttamente il tempo di volo delle onde, sono state calcolate le velocità medie ed intervallari per le onde P.

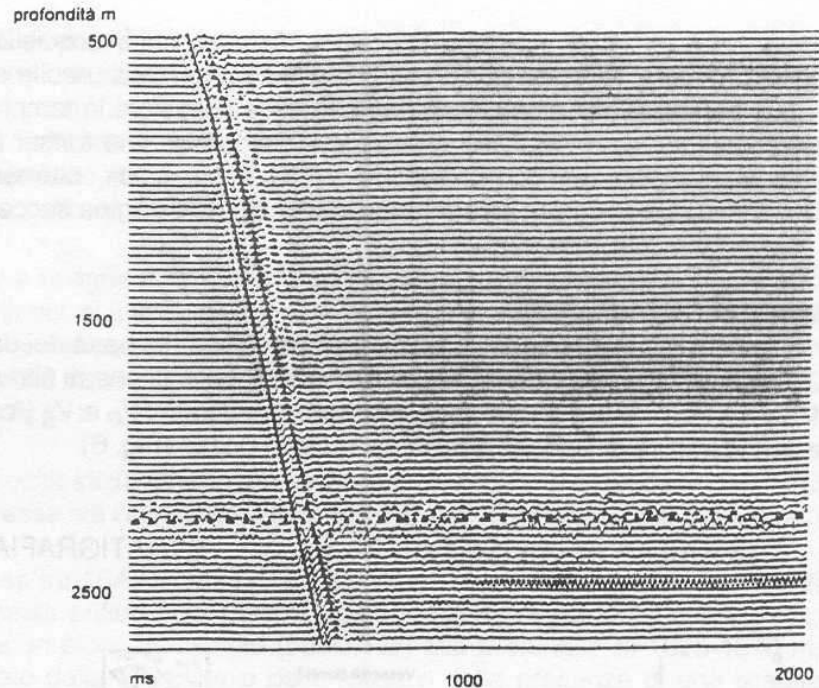


Fig. 4 - Campo d'onda totale (*row data*) del WSP zero-offset.

Sui sismogrammi dei *row data* sono stati identificati allineamenti coerenti, sia sulle componenti x e y, sia sulla componente z con l'impiego di filtri *f-k*, che sono stati interpretati come campi di

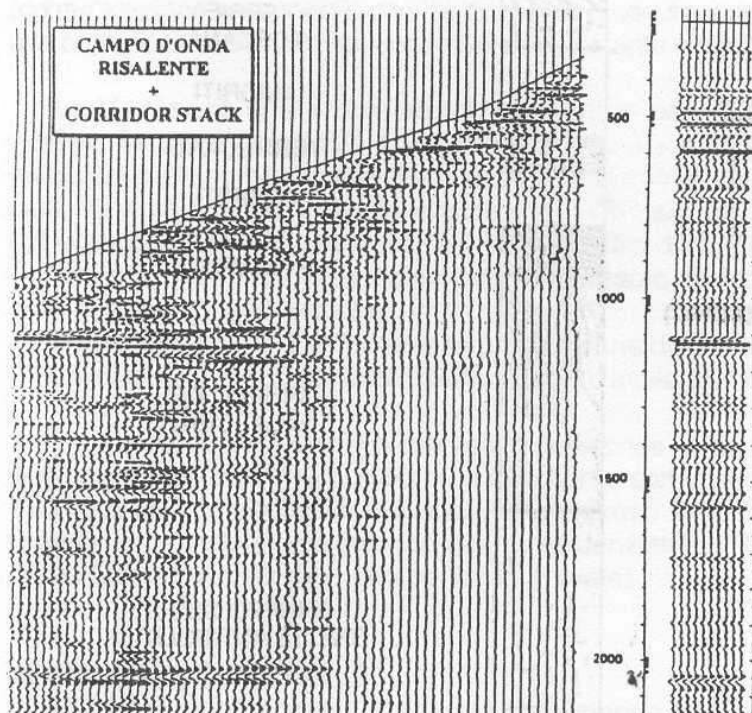


Fig. 5 - Campo d'onda risalente del WSP zero-offset. I tempi sono riferiti al piano di campagna (515 m s.l.m.).

onde S generatesi per conversione di modo. Solo in alcuni tratti è stato possibile effettuare manualmente il *picking* e procedere al calcolo delle velocità intervallari delle onde S.

Per la separazione dei campi d'onda *upgoing* e *downgoing* è stato applicato il filtraggio mediano con *stack* su 5 livelli. La funzione di autocorrelazione, eseguita sul campo *downgoing* dopo il miglioramento della coerenza spaziale con filtro mediano, ha mostrato a 52 ms dal primo arrivo un multiplo da rimuovere. E' stata quindi eseguita la deconvoluzione predittiva. In Fig. 5 è presentato il campo d'onda risalente.

Sebbene il WSP sul ramo Bruciano 1A fosse stato acquisito con geometria del tipo zero-offset, in realtà, tenendo conto della deviazione non trascurabile del pozzo, il profilo sismico non risulta verticale, pertanto gli allineamenti delle riflessioni in tempi doppi non sono perfettamente orizzontali. Questo WSP, nonché i due WSP "offset 1" e "offset 2" del ramo Bruciano 1B, sono stati quindi elaborati con correzione NMO e bin stack, ottenendo come risultato finale una sezione sismica migrata presentata e discussa nelle pagine successive..

MODELLO DI VELOCITÀ

Sulle velocità intervallari preliminari, calcolate sulla base dei dati registrati (distanza tra i livelli 25 m), è stata condotta una analisi che, con l'applicazione di filtri mediani e medie passanti (Lisi, 1994), ha permesso di correlare il modello di velocità (V_P e V_S) così ricostruito con la stratigrafia e con le misure di velocità sonica eseguite in pozzo (Fig. 6).

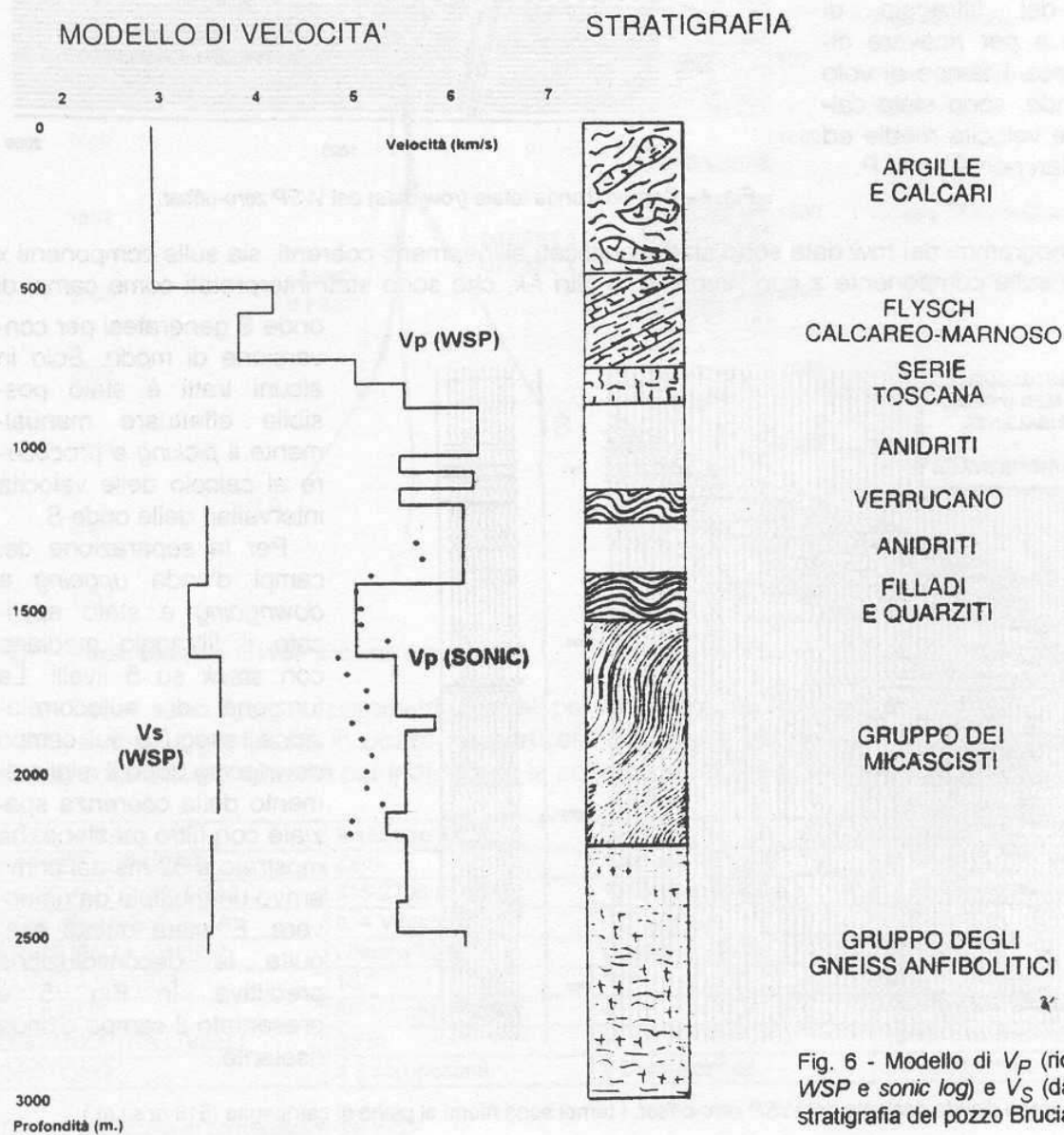


Fig. 6 - Modello di V_P (ricavato da WSP e sonic log) e V_S (da WSP) e stratigrafia del pozzo Bruciano 1A.

La formazione del **Flysch Calcareo-Marnoso** non si presenta omogenea dal punto di vista sismico, in quanto al suo interno si osservano un intervallo con $V_P = 4100$ m/s (a matrice prevalentemente calcarea) e uno con $V_P = 3800$ m/s (a matrice prevalentemente marnosa).

Nelle formazioni della **Serie Toscana** si osservano variazioni di velocità che corrispondono a due intervalli: uno superiore, costituito da Macigno, Maiolica e Diaspri con $V_P = 5000$ m/s; uno inferiore, con $V_P = 5500$ m/s, costituito da Calcare Selcifero, Calcare Massiccio e Calcare a *Rhaetavicula Contorta*.

Nel sottostante **Complesso a scaglie tettoniche**, tre intervalli ad elevata velocità ($V_P > 6100$ m/s), corrispondenti a livelli anidritici, si alternano a due strati più lenti ($V_P < 5500$ m/s), attribuibili alla presenza di intercalazioni di Verrucano s.l.. E' da notare come gli strati anidritici mostrino una leggera diminuzione di velocità verso il basso, passando da 6250 m/s a 6100 m/s.

Nel **Basamento metamorfico** la distribuzione della velocità sismica può essere così schematizzata:

- una prima zona a bassa velocità inizia al tetto delle Filladi e Quarziti e si estende fino a 1640 m di profondità. Tale zona interessa sia l'intervallo Filladi-Quarziti sia la parte più alta del Gruppo dei Micascisti;
- una seconda zona, compresa tra 1640 m e 2490 m (sia all'interno del Gruppo dei Micascisti sia in corrispondenza degli Gneiss anfibolitici), mostra una V_P oscillante tra 5300 e 5500 m/s; all'interno dei micascisti si nota un picco di velocità (5800 m/s) alla profondità di 1825-1870 m, che potrebbe essere determinato dalla anisotropia delle rocce o dalla presenza di una scaglia anidritica non rilevabile dall'analisi dei cuttings per l'esiguità dello spessore;
- una terza zona, oltre 2490 m di profondità, mostra un picco di velocità di 6100 m/s all'interno degli Gneiss. Anche in questo caso la zona ad alta velocità può essere attribuita alla presenza di una scaglia di anidriti che non è stata rilevata per la mancanza di dati stratigrafici dovuti alla perforazione in perdita di circolazione dai 2270 m.

L'ipotesi di scaglie anidritiche profonde nel basamento è sostenuta da Franceschini (comunicazione personale), che ha rinvenuto il corrispondente termometamorfico di una anidrite alla profondità di 3340 m nel pozzo Selva 4, distante circa 2 km dal pozzo Bruciano.

Le V_P rilevate con misure soniche sembrano generalmente inferiori del 6-8% a quelle del modello ricavato dal WSP. L'andamento delle V_P soniche, disponibili sul ramo 1, segue le variazioni delle velocità intervallari misurate con il WSP nel ramo 1A. Si può notare che il valore della V_P sonica risulta inferiore a quello del WSP, sia per le anidriti sia per i litotipi metamorfici. Ciò è spiegabile sulla base della diversa profondità d'indagine dei due metodi:

- l'onda sonica attraversa solamente lo spessore di roccia disturbato dall'effetto meccanico dello scalpello di perforazione;
- l'onda sismica del WSP interessa una porzione di roccia indisturbata.

La velocità sismica del WSP risulta pertanto molto più attendibile rispetto a quella del *sonic*.

L'andamento delle velocità intervallari delle onde S, determinate con qualche lacuna solo nel tratto compreso tra 1180 e 2550 m, è in accordo con quello ricostruito per le onde P. Il rapporto V_P/V_S è di 1.76 per le anidriti e risulta compreso tra 1.50 e 1.57 per le rocce metamorfiche. Questo dato risulta in accordo con quanto evidenziato da Batini e Nicolich (1985) nello studio del pozzo Chiusdino 3 (campo geotermico di Travale).

MODELLO STRUTTURALE

Sulla base del modello di velocità, assumendo per la densità valori misurati in altri pozzi geotermici dell'area di Larderello, sono stati calcolati i coefficienti di riflessione per le varie interfacce stratigrafiche (Fig. 7).

Nei complessi sedimentari i vari passaggi stratigrafici possono dar luogo a riflessioni abbastanza nette, anche se non sempre ben individuabili, poichè lo spessore ridotto di alcuni litotipi può determinare fenomeni di interferenza che non sono eliminati neppure con la deconvoluzione predittiva, essendo legati alla lunghezza d'onda.

Nel basamento metamorfico i valori dei coefficienti di riflessione calcolati al passaggio tra formazioni a differente grado metamorfico risultano molto piccoli e quindi lasciano ipotizzare che le proprietà meccaniche intrinseche dei litotipi metamorfici varino in modo molto graduale, senza dar luogo a riflessioni sismiche.

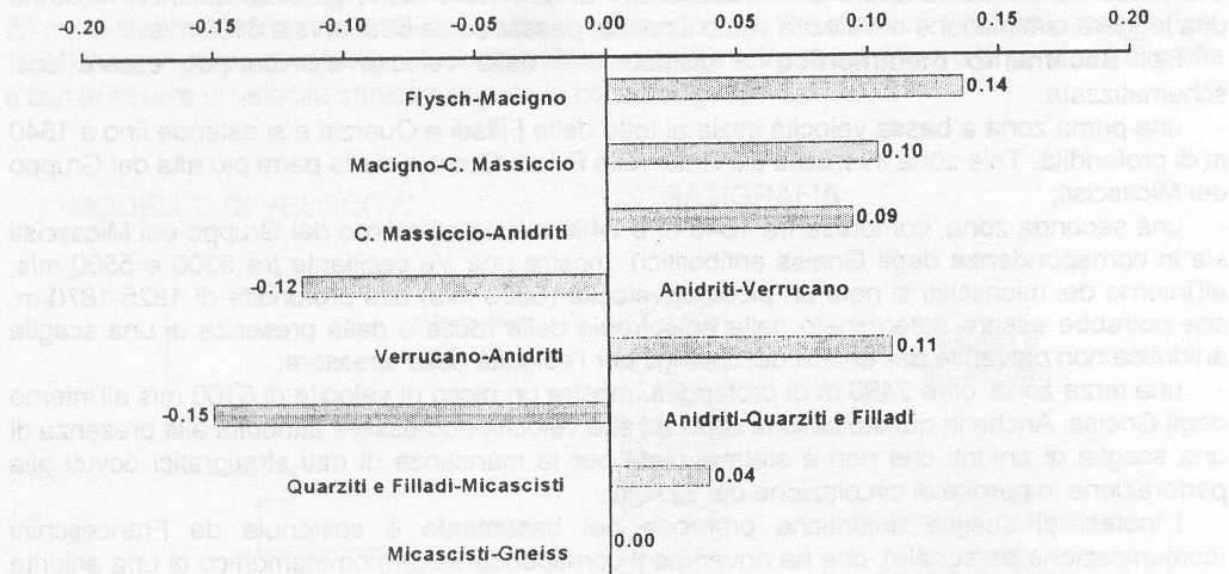


Fig. 7 - Coefficienti riflessione calcolati per le varie interfacce stratigrafiche.

Tuttavia, osservando il campo d'onda risalente e migrato, ottenuto dal *WSP zero-offset* (Fig. 8) del pozzo Bruciano 1A, messo a confronto con la stratigrafia trasformata in tempi per mezzo del modello di velocità precedentemente descritto, si possono facilmente individuare numerose riflessioni all'interno del basamento metamorfico.

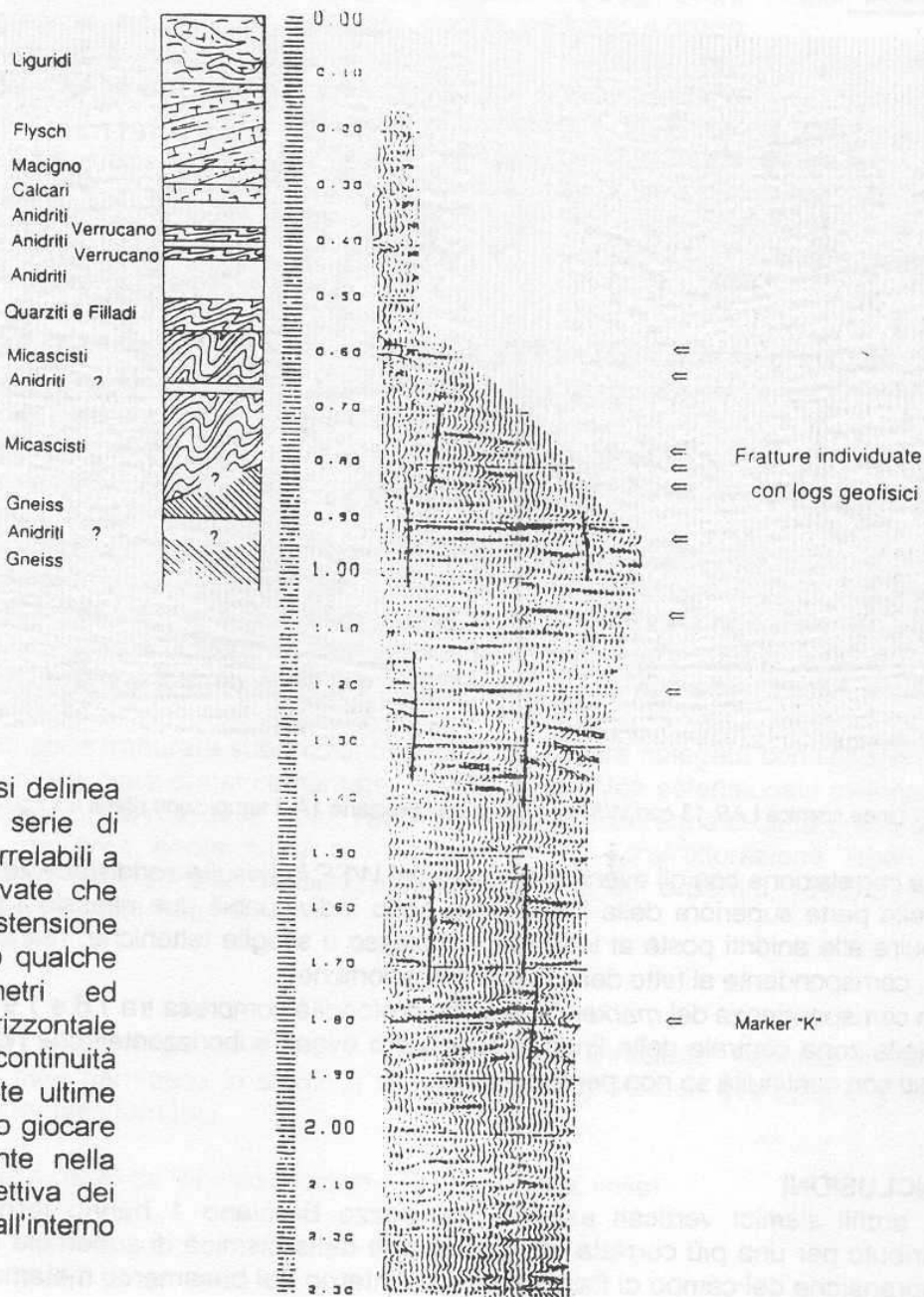
La maggior parte di questi eventi riflessi ha una forma d'onda caratterizzata da polarità invertita, che indica un coefficiente di riflessione negativo, e alcuni multipli che potrebbero essere imputabili a riverberazioni all'interno di intervalli a impedenza acustica minore rispetto al mezzo circostante. Dal punto di vista geologico l'ipotesi formulata è che questi eventi sismici siano generati da intervalli brecciati, di spessore variabile, all'interno del basamento.

Correlando tali eventi con il campo di fratture incontrato nel pozzo Bruciano, delineato per mezzo di altri *logs* geofisici, si osserva quanto segue:

- tra 600 e 850 ms sono visibili eventi che sembrano corrispondere alle fratture individuate in pozzo per mezzo dei *logs*;
- a 900-930 ms, corrispondente alla profondità di ~ 2500 m, si ha un ben marcato evento sismico in corrispondenza di un livello produttivo ($G = 6$ t/h di portata di fluido geotermico) e della ipotizzata scaglia anidritica profonda;
- da ~1050 ms si osserva un segnale multiplo concordante con la zona fratturata di 2930-50 m;
- a oltre 1200 ms, il gruppo di riflessioni sul *WSP* sembra coincidere con il principale livello produttivo incontrato nel pozzo Bruciano 1 alla profondità di 3370-3400 m ($G = 67$ t/h), ma non dal pozzo Bruciano 1A che non ha superato la profondità di 3340 m verticali;

- altri eventi riflessi sono individuabili fino a ~1800 ms, dove appare il *marker* sismico "K", rappresentato da un evento di notevole ampiezza al tetto di un intervallo molto riflettivo.

Stratigrafia reinterpretata



Il quadro che si delinea è dato da una serie di eventi profondi correlabili a fratture sia osservate che presunte, con estensione laterale di almeno qualche centinaio di metri ed andamento suborizzontale interrotto da discontinuità subverticali. Queste ultime potrebbero peraltro giocare un ruolo importante nella circolazione convettiva dei fluidi geotermici all'interno del basamento.

Fig. 8 - WSP Bruciano 1A: elaborato con correzione *NMO* e *Bin Stack*. I tempi sono riferiti a *s.r.d.* = 200 m s.l.m.

L'elaborato *WSP log* (*corridor stack*) del profilo *zero-offset* è stato messo a confronto il profilo sismico LAR 13, acquisito in copertura 600% mediante esplosivi, passante in prossimità del pozzo Bruciano 1A con direzione circa N-S (Fig. 9).

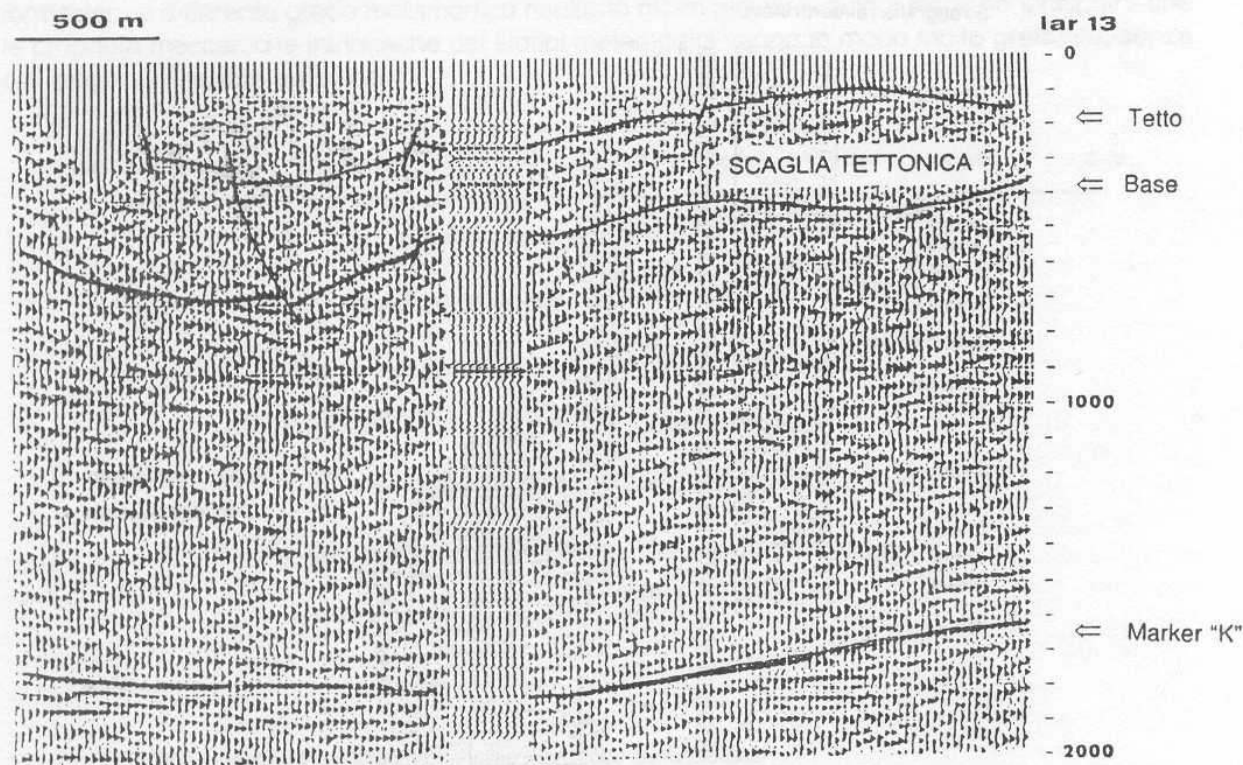


Fig. 9 - Linea sismica LAR 13 con *WSP log* del pozzo Bruciano 1A. I tempi sono riferiti a *s.r.d.* = 200 m s.l.m.

- La correlazione con gli eventi individuati dal *WSP log* risulta soddisfacente in due casi:
- nella parte superiore della linea, dove sono individuabili due riflessioni (una superiore, da attribuire alle anidriti poste al tetto del complesso a scaglie tettoniche; l'altra, intorno a 500 ms *t.w.t.*, corrispondente al tetto delle Filladi metamorfiche);
 - in corrispondenza del *marker* "K" ad una profondità compresa tra 1.6 e 1.9 s.

Nella zona centrale della linea si osservano eventi suborizzontali che non possono essere seguiti con continuità se non per brevi tratti.

CONCLUSIONI

I profili sismici verticali eseguiti nel pozzo Bruciano 1 hanno fornito un importante contributo per una più corretta interpretazione della sismica di superficie e per una migliore comprensione del campo di fratturazione all'interno del basamento metamorfico.

I. E' stato possibile ricostruire un accurato modello di velocità per le onde P, dal quale si può evidenziare che:

- le formazioni della copertura e quelle del serbatoio superficiale sono caratterizzate da brusche variazioni di velocità, attribuibili alla notevole eterogeneità tra i vari litotipi;

- nel basamento, in corrispondenza del passaggio tra i vari litotipi metamorfici, le variazioni della velocità sismica sono di modesta entità ed avvengono con gradualità,
- sono stati individuati all'interno del basamento metamorfico due livelli ad alta velocità (il primo tra 1820 e 1870 m con $V_p = 5.8$ km/s; il secondo, con $V_p = 6.1$ km/s, oltre 2490 m) che possono essere determinati dalla presenza di due scaglie anidritiche.

II. E' stato possibile individuare una buona corrispondenza degli eventi sismici sia con le interfacce stratigrafiche, sia con zone fratturate identificate lungo il pozzo.

L'inversione di polarità nel segnale sismico, che, per le tecniche impiegate in acquisizione, può senz'altro considerarsi a fase minima, e che si osserva in corrispondenza delle zone di frattura, può essere interpretata come una diminuzione dell'impedenza acustica, determinata dalla presenza di intervalli brecciati con spessore di alcuni metri.

Per analogia, gli eventi sismici con polarità invertita individuati a profondità maggiore di quella raggiunta dal pozzo possono essere attribuiti a zone di frattura presenti anche nella parte più profonda del basamento fino al *marker* "K", e quindi rappresentare potenziali obiettivi da raggiungere con la perforazione.

III. La migrazione sui dati *WSP* permette di delineare eventi suborizzontali che si estendono a distanza di qualche centinaio di metri dalla verticale del pozzo, intersecati da discontinuità subverticali presumibilmente collegate in sistemi di faglie.

La correlazione tra il *WSP log* e le linee sismiche di superficie è buona per le riflessioni associate ai due principali livelli anidritici posti al di sotto della Serie Toscana e per quelle che caratterizzano il *marker* "K".

Si può altresì notare come alcune riflessioni, molto ben individuabili su *WSP*, non siano facilmente riconoscibili sulla linea sismica, mentre altre non possono essere seguite con continuità sulla sezione stessa. Ciò conferma che le zone fratturate che determinano tali riflessioni hanno estensione limitata ed irregolare e che, dato il loro spessore ridotto, sono rilevabili solo con tecniche sismiche ad alta risoluzione quali appunto i profili sismici in pozzo.

La presenza di zone fratturate suborizzontali potrebbe essere spiegata con l'esistenza di fasce milonitiche o brecciate ormai cementate, dovute a tettonica estensionale sviluppatasi in strutture di taglio, all'interno delle quali l'attività tettonica (confermata dalla presenza di sismicità diffusa nell'area geotermica) e i meccanismi di idrofratturazione legati alla circolazione dei fluidi nelle zone di debolezza strutturale (Gianelli e Bertini, 1993) possono aver mantenuto aperti questi sistemi.

RINGRAZIAMENTI - Si ringrazia l'ENEL - DPT - Vice Direzione Termica e Attività Geotermiche per aver permesso lo studio e la pubblicazione dei dati geologici e geofisici e per l'assistenza tecnica fornitaci.

Testo controllato il 14.06.96 da Rinaldo Nicolich (O.G.S., Trieste, Italia)

BIBLIOGRAFIA

- Batini F., Bertini G., Bottai A., Burgassi P.D., Cappetti G., Gianelli G., Puxeddu M. (1983a) - *S. Pompeo 2 deep well: a high-temperature and high pressure geothermal system*. 3rd Int. Sem., Geoth. Update, Eur. Comm., Munich, EUR 8853 EN, 341-353
- Batini F., Bertini G., Gianelli G., Pandeli E., Puxeddu M. (1983b) - *Deep structure of the Larderello field: contribution from recent geophysical and geological data*. - Mem. Soc. Geol. It., 25, 219-235
- Batini F., Duprat A., Nicolich R. (1985) - *Contribution of seismic reflection to the study of geothermal reservoirs in Tuscany (Italy)*. Geoth. Res. Council Trans., 9/1
- Batini F., Fiordelisi A., Graziano F., Toksoz M.N. (1995) - *Earthquake tomography in the Larderello geothermal area*. Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy 18 - 31 May 1995
- Batini F., Nicolich R. (1984) - *The application of seismic reflection methods to geothermal exploration*. Sem. on the utilization of geothermal energy for electric power and space heat. Florence. Abstr., 1-7
- Batini F., Nicolich R. (1985) - *P and S reflection seismic profiling and well logging in the Travale geothermal field*. Geothermics, Vol 14, No. 5/6, 731-747
- Batini F., Omnes G., Renoux P. (1991) - *3D surface seismic and well seismic applied to the delineation of geothermal reservoirs in metamorphic formations in the Larderello area*. EAEG, 53rd Meeting and Technical Exhibition Florence, Italy, May 26 - 30, 1991
- Cameli G.M., Batini F., Dini I., Lee J.M., Gibson R.L., Toksoz M.N. (1995) - *Seismic images of a geothermal reservoir in the Monteverdi area from VSP data*. Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, 18 - 31 May 1995
- Cameli G.M., Dini I., Liotta D. (1993) - *Upper crustal structure of the Larderello geothermal field as a feature of post-collisional extensional tectonics (Southern Tuscany, Italy)*. - Tectonophysics, 224, 413-423
- Gianelli G., Bertini G. (1993) - *Natural hydraulic fracturing in the Larderello geothermal field: evidence from well MV5A*. Boll. Soc. Geol. It., 112, 507-512
- Lisi S. (1994) - *Contributo dei profili sismici in pozzo per l'individuazione di potenziali serbatoi geotermici all'interno del basamento metamorfico del campo di Bruciano (Area di Larderello)*. Università degli Studi Di Pisa, Tesi di Laurea in Scienze Geologiche, 155-157; 172-187
- Nicolich R., Marson I. (1994) - *Caratteri geofisici delle strutture crostali nella provincia geotermica toscana*. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. 1994/1, 163-168