

IL SOLLEVAMENTO DELLA CROSTA NEL QUADRO
DELLA TETTONICA DISTENSIVA POST-COLLISIONALE DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE:
NUOVI DATI DALL'AREA GEOTERMICA DI LARDERELLO (TOSCANA MERIDIONALE)(***)

INDICE

RIASSUNTO	pag. 337
ABSTRACT	" 337
INTRODUZIONE	" 337
INQUADRAMENTO GEOLOGICO	" 338
LA TETTONICA DISTENSIVA	" 339
LA MIGRAZIONE DEL PASSAGGIO FRAGILE/DUTTILE	" 340
ETA' DI RAFFREDDAMENTO E SOLLEVAMENTO	" 344
CONCLUSIONI	" 344
BIBLIOGRAFIA	" 346

RIASSUNTO

Recenti studi sulla tettonica distensiva della zona di Larderello hanno portato al riconoscimento di tre diversi eventi deformativi avvenuti dopo la fine della fase collisionale dell'Appennino settentrionale: il primo, avvenuto durante il Burdigaliano-Langhiano; il secondo, avvenuto durante il Serravalliano-Messiniano superiore; il terzo, avvenuto durante il Pliocene-Attuale. Il primo evento distensivo è caratterizzato da faglie dirette che tendono ad orizzontalizzarsi nella zona di taglio localizzata nel livello delle evaporiti triassiche e che divideva una parte superiore caratterizzata da deformazione fragile da una inferiore caratterizzata da deformazione duttile. In questo evento si è sviluppata sia la "serie ridotta" nella Toscana meridionale sia l'esumazione della suddetta zona di taglio che ha dato origine, nella Toscana settentrionale, al *core complex* delle Alpi Apuane. Il secondo evento distensivo è caratterizzato da faglie dirette che tendono ad orizzontalizzarsi in corrispondenza del livello delle filadi paleozoiche. Il terzo evento distensivo è invece caratterizzato dalle faglie dirette che delimitano le fosse tettoniche plioceniche della Toscana meridionale e che si esauriscono in corrispondenza dell'attuale passaggio fra il dominio fragile e quello duttile, segnalato, all'interno della crosta superiore, dalla fascia di taglio delimitata al tetto da una importante riflessione sismica nota come orizzonte K. Il protrarsi della tettonica distensiva ha quindi favorito, nella zona di Larderello, il processo di sollevamento ed esumazione determinando, conseguentemente, la migrazione del passaggio fragile/duttile verso livelli crostali geometricamente sempre più profondi. Questa evoluzione strutturale è avvalorata sia dai dati geocronologici presenti in bibliografia sia dai risultati di nuove analisi geocronologiche ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) condotte su campioni provenienti da sondaggi profondi; l'insieme di questi dati mette infatti, in evidenza quattro diverse età di raffreddamento delle miche di cui la più antica è riferibile alla fine della fase collisionale (27-25 Ma) mentre la seconda (?-12 Ma), la terza (10-7 Ma) e la quarta (3,8-1,6 Ma) sono invece riferibili ad eventi di esumazione collegati alla tettonica distensiva post-collisionale.

(*)Department of Geology, Athens - University of Georgia.

(**)Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Siena.

(***)Lavoro eseguito con il contributo finanziario del C.N.R., contratto n° 93.01037 (A. LAZZAROTTO).

ABSTRACT

Three different extensional events are recorded in the Larderello geothermal field (southern Tuscany): the first occurred during early-middle Miocene (Burdigalian-Langhian) and was associated with development of normal faults which terminate downward in late Triassic evaporite levels. During this event the Alpi Apuane core complex and the "serie ridotta" phenomenon developed. From the Serravallian to late Messinian, a second extensional event occurred. This was also characterized by listric normal faults which terminated downward in Paleozoic phyllites. A third event (Pliocene-Present) was characterized by normal faulting and development of Pliocene tectonic depressions. The normal faults of this event tend to flatten in the present brittle/ductile boundary which is bounded, at the top, by an important seismic reflector referred as to K-horizon. These faults merge downward within a shear zone which is presently located along the brittle/ductile boundary. This multistage extensional tectonics, related to regional post-collisional evolution (Early Miocene - Present) was accompanied by crustal uplift and downward migration of the brittle/ductile boundary toward deeper crustal levels. This structural evolution is supported by the results on mica cooling ages obtained from borehole samples: four different cooling ages have been recorded, from this work and already published papers: the oldest exhumation age (27-25 Ma) is related to the end of the collisional stage, whilst the second (?-12 Ma), the third (10-7 Ma) and the fourth (3.8-1.6 Ma) are related to post-collisional extensional tectonics.

PAROLE CHIAVE: Tettonica distensiva, Sollevamento, Flusso di calore.

KEY WORDS: Extensional tectonics, Uplift, Heat flow.

INTRODUZIONE

L'assetto strutturale della parte interna dell'Appennino settentrionale è conseguente allo sviluppo di due eventi deformativi: il primo è collegato alla migrazione verso est della compressione avvenuta durante la convergenza e successiva collisione fra il margine Europeo e la microplacca adriatica (Cretaceo superiore-Oligocene superiore); il secondo evento deformativo è invece collegato alla distensione che ha interessato la parte interna dell'Appennino a partire dal Miocene inferiore e medio (JOLIVET *et alii*, 1990; CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; BERTINI *et alii*, 1991; BALDI *et alii*, 1994b; CARMIGNANI *et alii*, 1994).

Un lineamento tettonico (Linea Livorno-Sillaro, in BORTOLOTTI, 1966) ritenuto di importanza litosferica (ROYDEN *et alii*, 1987), segna la suddivisione della Toscana in due settori, rispettivamente la Toscana settentrionale e meridionale, caratterizzati da un diverso grado di estensione. L'aspetto più significativo della tettonica distensiva della Toscana meridionale è costi-

tuito dallo spessore della crosta che è di 22-24 km e da anomalie positive di Bouger (ELTER *et alii*, 1975; GIESE *et alii*, 1981; LOCARDI & NICOLICH, 1988); nonostante ciò, le quote della Toscana meridionale sono in media intorno ai 270 metri, con rilievi che raggiungono anche i 1000 metri.

Scopo di questo lavoro è quindi quello di descrivere le strutture della tettonica distensiva e di analizzare, tramite studi geocronologici, il processo di sollevamento delle rocce nella zona geotermica di Larderello, dove alla profondità di circa 3 km, sono state raggiunte le rocce strutturalmente più basse della Toscana meridionale.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nella zona geotermica di Larderello (Fig. 1) sono riconoscibili quattro diverse unità stratigrafico-strutturali (Fig. 2) che, a partire dall'alto sono:

Sedimenti neoautoctoni - Affiorano estesamente nelle depressioni tettoniche delimitate da faglie dirette, e sono discordanti sul substrato precedentemente deformatosi. Questi sedimenti sono costituiti: dai depositi lacustri e marino-lagunari del ciclo sedimentario Tortonian superiore-Messiniano (LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1978; BOSSIO *et alii*, 1978; BOSSIO *et alii*, 1981); dai sedimenti marini, argillosi e sabbiosi, appartenenti al Pliocene e discordanti sui depositi miocenici o sul substrato preneogenico (LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1978). I depositi del Pliocene sono a loro volta suddivisibili in due cicli sedimentari: uno appartenente al Pliocene inferiore ed uno al Pliocene medio. Il primo è caratterizzato in prevalenza da depositi marini di acque relativamente profonde; il secondo è caratterizzato da depositi di mare meno profondo ed è discordante sui sedimenti del Pliocene inferiore, del Messiniano e sul substrato preneogenico (BOSSIO *et alii*, 1991a; BOSSIO *et alii*, 1991b).

Unità delle Liguridi - E' costituita: da ofioliti del Dogger-Malm; dalla successione sedimentaria dei depositi pelagici del Malm (Radiolariti) e del Cretaceo inferiore (*Calcare a Calpionelle* e *Argille a Palombini*); dai depositi dei flysch cretaceo-paleogenici (Gruppo

delle argille e calcari, Gruppo di S. Fiora, Gruppo di Monteverdi-Lanciaia). Le Liguridi, in seguito alla tettonogenesi appenninica, sovrascorsero verso Est sul Dominio toscano durante l'Oligocene superiore.

Unità della Falda toscana - Deriva dal Dominio toscano ed è costituita da formazioni di età triassico-oligoceniche (o del Miocene inferiore). La sequenza sedimentaria riflette una evoluzione legata ad ambienti prima evaporitici (formazione delle *Anidriti di Burano* del Trias superiore), poi di piattaforma carbonatica (*Calcare a Rhaetavicula del Retico*, *Calcare massiccio* del Lias inferiore) e di bacino pelagico (*Calcare selcifero* del Lias medio-superiore, *Marne a Posidonomia* del Dogger, *Diaspri* del Malm, *Scaglia Toscana* del Cretaceo inferiore-Oligocene) ed infine di avanssa subsidente (*Macigno* dell'Oligocene superiore).

La "Falda toscana", sfruttando il livello plastico delle evaporiti triassiche, è sovrascorsa alla Zona di Massa (futura Unità di Monticiano-Roccastrada) nell'Oligocene superiore e sulle formazioni del Dominio umbro-marchigiano nel Langhiano-Serravalliano (DAMIANTI *et alii*, 1991).

Unità di Monticiano-Roccastrada - E' suddivisibile in tre gruppi formazionali:

— Gruppo del *Verrucano triassico* e delle formazioni paleozoiche. Questo gruppo si presenta strutturato in scaglie sovrapposte, frequentemente separate da livelli anidritico-dolomitici del Trias superiore.

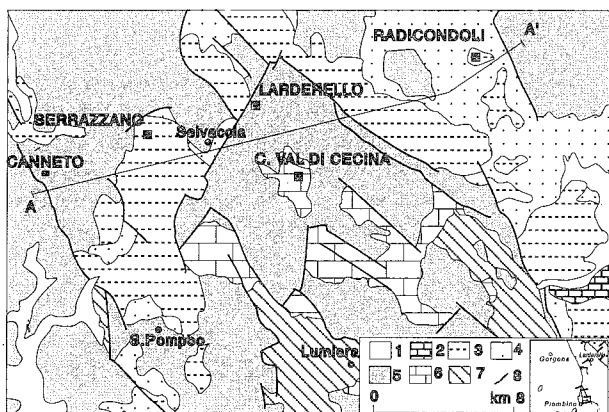


Fig. 1 - Schema geologico dell'area di Larderello con le traccia della sezione geologica. Spiegazione dei simboli: 1 - alluvioni e depositi quaternari fluvio-lacustri; 2 - travertino; 3 - sedimenti pliocenici; 4 - sedimenti miocenici; 5 - Liguridi; 6 - sedimenti appartenenti alla successione giurassico-aquitana della Falda toscana; 7 - evaporiti triassiche; 8 - faglie dirette del Miocene superiore-Pleistocene.

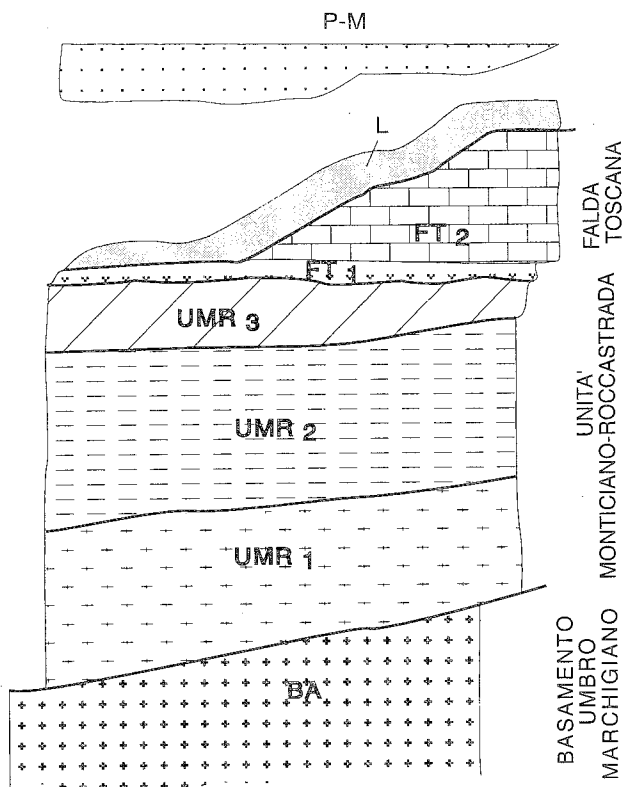


Fig. 2 - Schema dei rapporti esistenti fra i litotipi riconosciuti nella zona di Larderello. Spiegazione dei simboli: PM - complesso dei sedimenti neoautoctoni; L - Liguridi; Falda toscana: FT2 - successione triassico-oligocenica; FT1 - anidriti triassiche; Unità di Monticiano-Roccastrada: UMR3 - gruppo del Verrucano triassico e delle formazioni paleozoiche; UMR2 - gruppo filladico-quartzitico; UMR1 - gruppo dei Micascisti; BA: complesso degli Gneiss.

- Gruppo filladico-quarzitico. Comprende formazioni paleozoiche caratterizzate da una strutturazione alpina e da relitti di scistosità pre-alpina; questo gruppo è stato riferito ad una età "pre-sudetica" da COSTANTINI *et alii* (1988) e da ELTER & PANDELI (1990).
- Gruppo dei micascisti che, similmente al gruppo precedente, è rappresentato da rocce con strutturazione alpina ed ercinica.

"Complesso degli gneiss" - In questo complesso (ELTER & PANDELI, 1990), che è separato dall'Unità di Monticiano-Roccastrada da una fascia milonitica, non sono stati riconosciuti eventi metamorfici alpini; esso pertanto è stato interpretato come parte del basamento dell'avampaese umbro-marchigiano (BERTINI *et alii*, 1991).

Nel Complesso degli gneiss, nel Gruppo dei micascisti ed in quello filladico-quarzitico è stata riconosciuta una associazione mineralogica (Fig. 3) di alta temperatura e bassa pressione (d'ora in avanti indicata con: AT/BP) che si sovrappone alle precedenti associazioni mineralogiche (DEL MORO *et alii*, 1982; PUXEDDU, 1984; FRANCESCHINI, 1994). Le condizioni di AT/BP sono state riconosciute per circa 2000 metri di perforazione (DEL MORO *et alii*, 1982; VILLA & PUXEDDU, 1994).

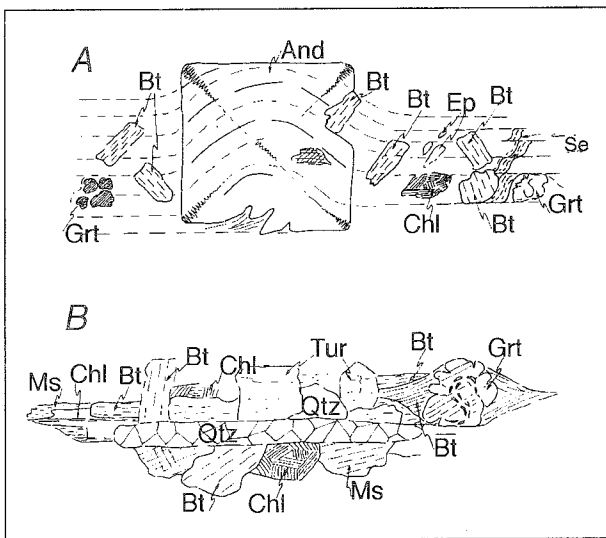


Fig. 3 - Le condizioni di AT/BP sono rappresentate da una diffusa neocristallizzazione statica di biotite; condizioni di alto grado sono state talvolta riconosciute nell'associazione andalusite + corindone + K feldspato.

A) Unità di Monticiano Roccastrada: cristallizzazione statica rappresentata da andalusite + biotite + clorite ± cordierite ± epidoto ± granato. Questa associazione mineralogica è sovrapposta alla scistosità S2.

B) Complesso degli Gneiss. La neoblastesi di biotite ± clorite ± cordierite si sovrappone alla scistosità ercinica (Se) sviluppatasi in facies anfibolitica. And - Andalusite; Bt - Biotite; Ep - Epidoto; Grt - Granato; Chl - Clorite; Tur - Tormentina. Qtz - Quarzo; Ms - Muscovite. Ingrandimento 25x.

LA TETTONICA DISTENSIVA

Dopo la messa in posto dell'Unità Monticiano-Roccastrada, verosimilmente avvenuta durante l'Oligocene superiore (BERTINI *et alii*, 1991), si sono sviluppati nell'area di Larderello tre diversi eventi distensivi

(BALDI *et alii*, 1994b): il primo durante il Burdigaliano-Langhiano, il secondo durante il Serravalliano-Messiniano superiore, il terzo durante il Pliocene-Attuale (Fig. 4).

Durante il primo evento distensivo, le Unità Liguri si sono sovrapposte alle evaporiti triassiche (od addirittura al Gruppo del *Verrucano*) per mezzo di faglie dirette che hanno prodotto importanti omissioni nella serie stratigrafica (LAVECCHIA *et alii*, 1984); queste faglie tendono ad orizzontalizzarsi in una zona di taglio localizzata nel livello delle evaporiti triassiche.

Il confronto fra la struttura della Toscana meridionale e quella delle Alpi Apuane ha inoltre suggerito che, durante questo evento distensivo, la zona di taglio collocata nel livello delle evaporiti triassiche, divideva una parte superiore, caratterizzata da deformazione fragile, da una inferiore, caratterizzata da deformazione duttile e/o semi-duttile (CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; BERTINI *et alii*, 1991; CARMIGNANI *et alii*, 1994).

Questo primo evento distensivo è stato attribuito da CARMIGNANI *et alii*, (1995) al Burdigaliano-Langhiano sulla base dell'età dei sedimenti burdigaliani e langhiani affioranti nella Toscana meridionale e correlabili con quelli coevi affioranti nella Corsica orientale ed in Sardegna e sulla base dell'età di esumazione del *core complex* delle Alpi Apuane (KLIGFIELD *et alii*, 1986; CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; CARMIGNANI *et alii*, 1994).

Le strutture riferite al primo evento distensivo sono dislocate da altre faglie dirette, riferite al secondo evento distensivo e che tendono ad orizzontalizzarsi nel livello corrispondente al Gruppo filladico-quarzitico dell'Unità di Monticiano-Roccastrada, un livello strutturale più profondo di quello corrispondente alle evaporiti triassiche (Fig. 4/A e 4/B). La estensione determinatasi per l'attività di queste faglie dirette è nell'ordine del 36% su 32 km, lungo la sezione di Fig. 4/A. L'età di questo secondo evento distensivo deve essere collocata nell'intervallo di tempo compreso fra il Serravalliano ed il Messiniano superiore, cioè dopo il primo evento distensivo e prima dello sviluppo delle faglie dirette plioceniche che delimitano le fosse tettoniche del Bacino di Serrazzano e quello di Radicondoli.

Il terzo evento distensivo (Pliocene-Attuale) è caratterizzato da faglie dirette che dislocano tutte le strutture precedentemente sviluppatesi (Fig. 4/A); la geometria di queste faglie risulta listrica sulla base di indicazioni provenienti da indagini di campagna (LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1965; MAZZANTI, 1966; LAZZAROTTO & MAZZANTI, 1978) e dallo studio di sezioni sismiche a riflessione. L'attività di queste faglie dirette è da riferire anche a periodi successivi al Pliocene medio, età dei sedimenti più recenti deformati (Bossio *et alii*, 1991a; 1991b).

Le faglie dirette del terzo evento distensivo tendono ad orizzontalizzarsi in corrispondenza di importanti riflessioni sismiche che mostrano una geometria a losanghe e che sono delimitate al tetto da una riflessione di importanza regionale, nota come orizzonte K (BATINI *et alii*, 1978; NICOLICH & MARCHETTI, 1982; GIANELLI *et alii*, 1988; CAMELI *et alii*, 1993). La profondità dell'orizzonte K varia, nella zona di Larderello da 3 a 6 km (BATINI *et alii*, 1983; BATINI *et alii*, 1985). In corrispondenza delle riflessioni sismiche delimitate al tetto dall'orizzonte K, si concentrano gli ipocentri degli eventi sismici locali (CAMELI *et alii*, 1993). Questi

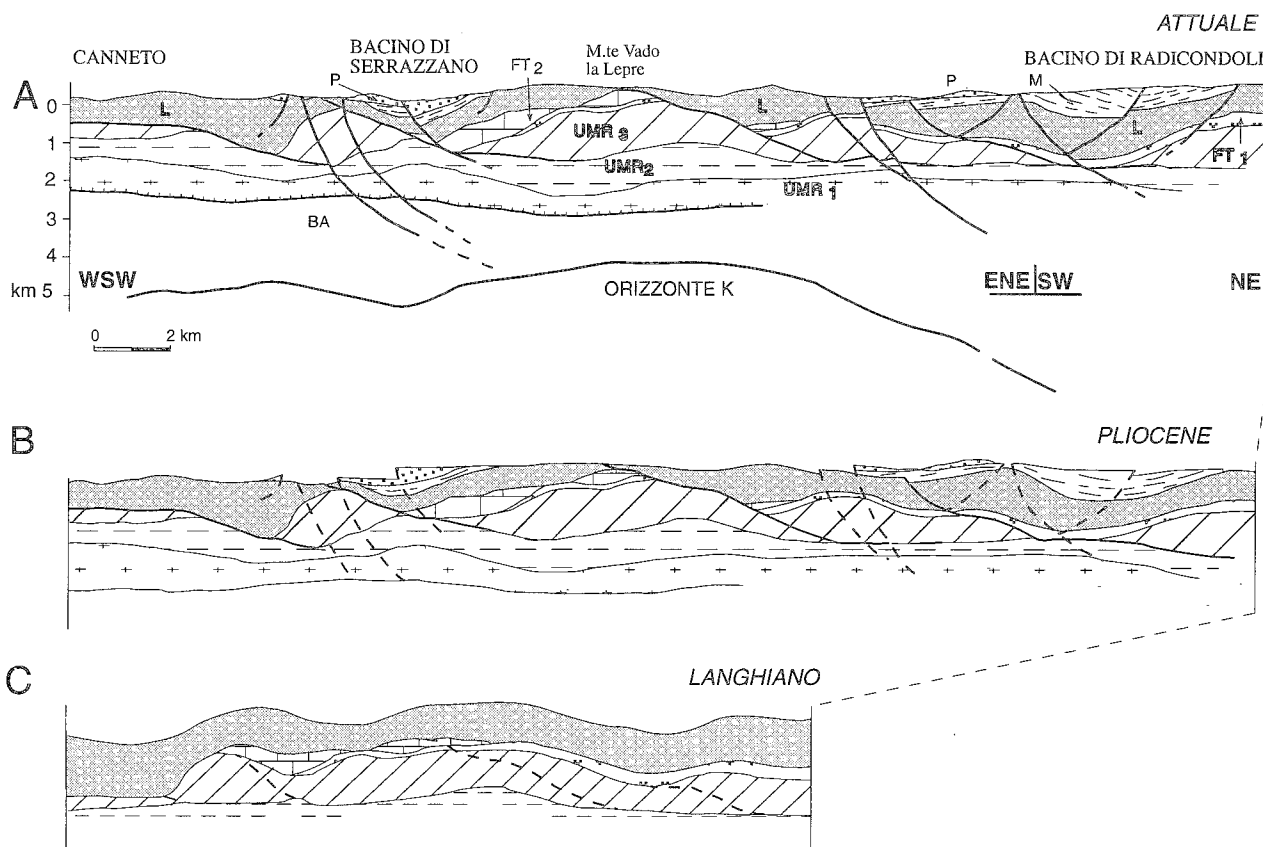


Fig. 4 - A) Sezione geologica attraverso il campo geotermico di Larderello; la traccia della sezione è indicata in fig. 1. I sedimenti del Pliocene sono deformati da faglie dirette listriche. Queste faglie dislocano tutte le strutture precedentemente formate. Spiegazione dei simboli: P - sedimenti pliocenici; M - sedimenti del Miocene superiore; L - Liguridi; Falda toscana; FT₂ - successione triassico-oligocenica; FT₁ - anidriti triassiche; Unità di Monticiano-Roccastrada: UMR₃ - gruppo del Verrucano triassico e delle formazioni paleozoiche; UMR₂ - gruppo filladico-quarzitico; UMR₁ - gruppo dei Micascisti. BA: complesso degli Gneiss. B) Sezione geologica riferita al Pliocene; la trasgressione pliocenica avviene sui sedimenti messiniani già deformati, i quali si sono depositati nelle depressioni tettoniche determinatesi per l'attività sin-sedimentaria delle faglie dirette riferite al secondo evento distensivo. C) Sezione geologica riferita al Langhiano, dopo lo sviluppo del primo evento distensivo (da BALDI *et alii*, 1994, con modifiche).

dati, insieme agli elevati valori di temperatura (circa 400°C) registrati dai pozzi profondi che si sono arrestati in prossimità dell'orizzonte K, suggeriscono che detto orizzonte sismico e le riflessioni a forma di losanga, corrispondano ad una zona di taglio, cinematicamente attiva e che si colloca al passaggio fra il dominio fragile ed il dominio duttile (CAMELI *et alii*, 1993).

LA MIGRAZIONE DEL PASSAGGIO FRAGILE/DUTTILE

Tre principali orizzonti di scollamento sono riconoscibili nella regione di Larderello: il primo è costituito dalle evaporiti triassiche e questo era attivo durante il Burdigaliano-Langhiano; il secondo è costituito dalle filladi paleozoiche ed era attivo nell'intervallo di tempo compreso fra il Serravalliano ed il Messiniano superiore; il terzo corrisponde alla zona di taglio delimitata al tetto dall'orizzonte K e che è localizzata all'attuale passaggio fra il dominio fragile e quello duttile. Poiché le faglie dirette del secondo evento distensivo tendono ad orizzontalizzarsi nelle filladi paleozoiche e poiché questo livello di scollamento si colloca fra il più antico e l'attuale passaggio fragile/duttile, viene suggerito che anche il livello delle filladi paleozoiche

corrispondesse con il passaggio fragile/duttile nel Serravalliano-Messiniano superiore.

La posizione del passaggio reologico dipende da più fattori quali la litologia o la presenza di fluidi ma, a parità di altre condizioni, dipende principalmente dalla temperatura; il fatto che la posizione dell'attuale passaggio fragile/duttile risulti, nell'area di Larderello, relativamente vicino alla superficie, può essere considerato una conseguenza dell'elevato flusso termico che interessa la Toscana meridionale (120 mW/m², come valore medio: MONGELLI *et alii*, 1989) e che, nella zona di Larderello raggiunge valori estremamente elevati (superiori a 1000 mW/m²: BALDI *et alii*, 1994a). Questo flusso termico che attualmente interessa il versante occidentale dell'Appennino settentrionale, potrebbe inoltre giustificare il sollevamento che caratterizza la fascia centrale della Toscana meridionale.

A partire dal Miocene medio fino al Quaternario, contemporaneamente allo sviluppo della tettonica distensiva, la Corsica orientale e la Toscana meridionale vengono interessate da magmatismo la cui età tende ad essere sempre più recente da oriente verso occidente (FERRARA & TONARINI, 1985; SERRI *et alii*, 1991). Questo magmatismo è il risultato di un processo di mescolamento tra magmi acidi di provenienza crostale e magmi basici di provenienza mantellica (SERRI *et alii*, 1991).

Poiché sia il mantello che la crosta sono coinvolti in processi di fusione parziale, può essere ipotizzato che l'intera litosfera sia coinvolta nella deformazione distensiva e che quindi almeno a partire dal Messiniano (età delle rocce magmatiche affioranti all'Isola d'Elba), un elevato flusso di calore possa aver accompagnato la tettonica distensiva della Toscana meridionale. Fenomeni di sollevamento, infatti, hanno anche

caratterizzato l'evoluzione sedimentaria mio-pliocenica dei principali bacini toscani: episodi lacustri o superfici di erosione testimoniano sollevamenti fino all'emersione di intere zone della Toscana meridionale, come documentato da studi micro-paleontologici e paleo-ambientali (Bossio *et alii*, 1993). I principali episodi di emersione hanno dato origine alle discordanze angolari riconoscibili fra i sedimenti del Messiniano supe-

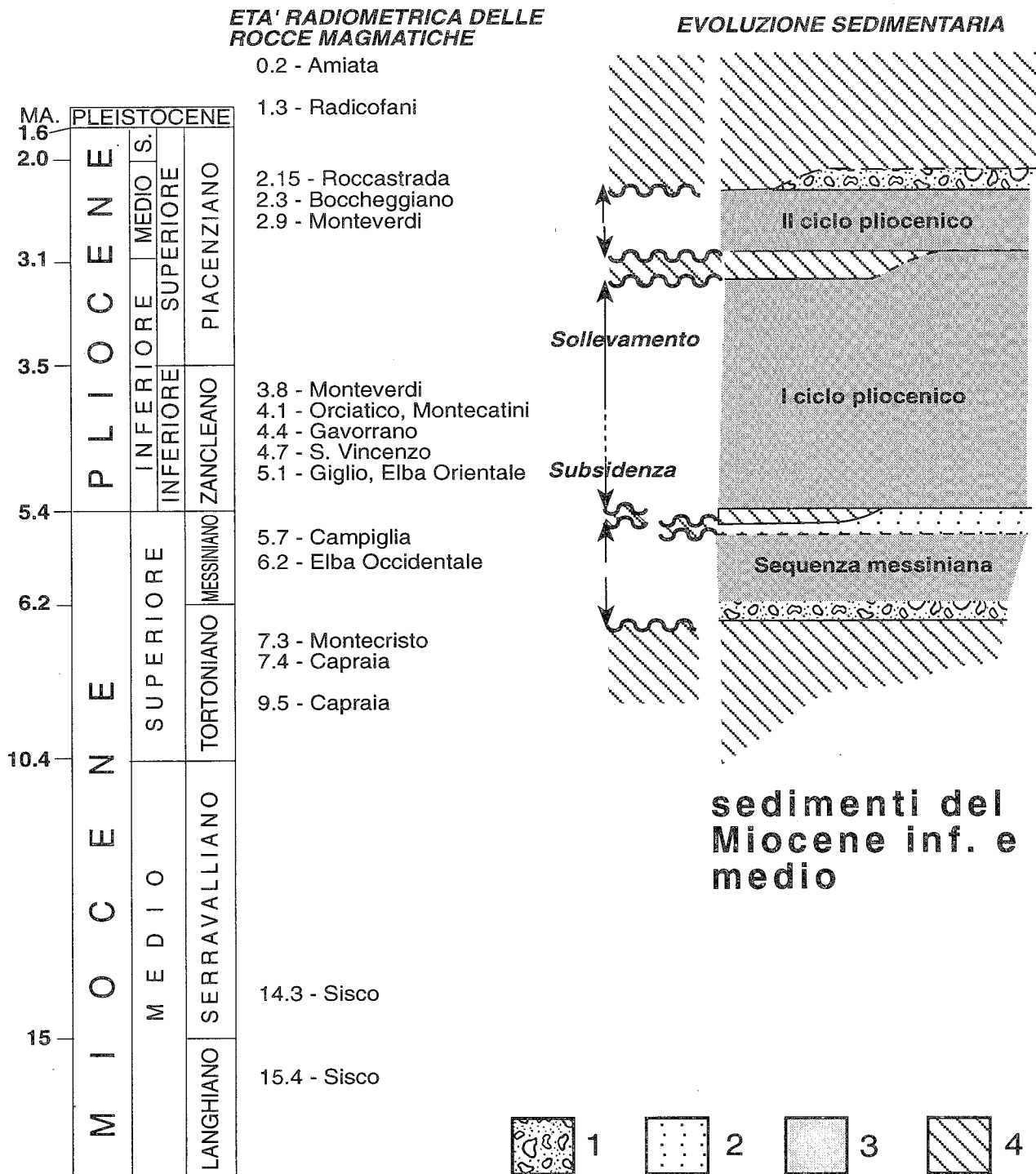


Fig. 5 - L'attività magmatica del Neogene è confrontata con gli episodi di sollevamento e subsidenza che caratterizzano l'evoluzione sedimentaria mio-pliocenica della Toscana marittima (da BALDI *et alii*, 1994b, con modifiche). Le età radiometriche delle rocce magmatiche sono quelle pubblicate da FERRARA & TONARINI (1985) e SERRI *et alii* (1991); le indicazioni paleobatimetriche e paleo-ambientali sono tratte da BOSSIO *et alii* (1993, *cum bibl.*). Spiegazione dei simboli: 1 - ambiente fluvio-lacustre; 2 - ambiente di transizione ("lago-mare"); 3 - ambiente marino; 4 - emersione.

Tab. 1 - Rapporti $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ottenuti per riscaldamento progressivo dei concentrati di minerale e della roccia totale di campioni provenienti dai pozzi di Larderello.

Release temp. (°C)	$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})^*$	$(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})^*$	$(^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})^c$	^{39}Ar % of total	^{40}Ar % non-atmos:+	$^{36}\text{ArC}_s$ %	Apparent Age (Ma)**
--------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	-----------------------	---------------------

Pozzo S. Pompeo

Campione 1 (1899 m), roccia totale, fillade: $J = 0.009672$

380	100.00	0.32854	0.094	0.39	2.92	0.01	50.26±0.93
420	8.74	0.02053	0.180	1.17	30.69	0.24	46.18±0.14
455	3.12	0.00798	0.126	3.23	24.64	0.43	13.42±0.09
490	2.09	0.00569	0.049	3.34	19.45	0.24	7.11±0.08
525	1.46	0.00359	0.048	3.56	27.47	0.36	6.97±0.09
560	1.99	0.00533	0.019	8.87	20.78	0.10	7.22±0.07
595	1.03	0.00213	0.044	6.17	38.80	0.56	6.98±0.06
630	0.80	0.00126	0.026	21.94	52.71	0.56	7.26±0.04
665	0.83	0.00137	0.013	8.38	50.81	0.26	7.36±0.06
700	0.88	0.00154	0.030	8.12	47.78	0.53	7.28±0.07
740	1.06	0.00214	0.034	8.98	39.78	0.43	7.29±0.04
780	0.91	0.00163	0.026	10.07	46.35	0.44	7.32±0.05
820	1.03	0.00199	0.041	9.60	42.66	0.57	7.61±0.06
Fusion	1.70	0.00260	0.101	6.19	54.81	1.05	16.11±0.29
Total	1.66	0.00392	0.039	100.00	42.46	0.47	8.71±0.08
Total without 380-455°C, and fusion				89.03			7.32±0.11

Campione 2 (2718 m), muscovite: $J = 0.009677$

510	5.22	0.01694	0.052	4.33	4.13	0.08	3.76±0.09
550	0.79	0.00185	0.026	6.79	30.75	0.38	4.32±0.08
590	0.42	0.00099	0.005	10.9	29.05	0.15	0.09±0.04
620	0.41	0.00084	0.007	12.70	37.36	0.21	2.57±0.03
650	0.39	0.00081	0.007	15.14	37.52	0.22	2.61±0.04
680	0.43	0.00089	0.010	11.62	37.28	0.31	2.76±0.05
710	0.49	0.00122	0.007	10.29	24.83	0.15	2.06±0.04
740	0.54	0.00137	0.006	11.06	24.22	0.12	2.31±0.03
770	0.57	0.00140	0.006	8.30	26.24	0.12	2.58±0.03
800	0.53	0.00121	0.013	5.57	31.73	0.29	2.88±0.04
Fusion	0.42	0.00002	0.034	3.20	98.16	60.79	7.11±0.07
Total	0.69	0.00176	0.011	100.00	32.54	2.14	2.81±0.06
Total without 510-550°C, and fusion				85.68			2.53±0.04

Pozzo Selvaccia

Campione 3 (3100 m), muscovite: $J = 0.009655$

510	4.99	0.01566	0.053	3.59	7.32	0.09	6.44±0.09
550	1.31	0.00329	0.013	7.39	25.32	0.11	5.77±0.04
590	0.82	0.00177	0.024	7.57	35.44	0.37	4.96±0.06
620	0.76	0.00103	0.006	10.85	59.21	0.17	7.81±0.04
650	0.73	0.00108	0.008	11.78	55.64	0.21	7.06±0.03
680	0.77	0.0110	0.007	18.61	56.79	0.18	7.58±0.04
710	0.95	0.00170	0.007	9.06	46.46	0.12	7.61±0.03
740	1.11	0.00234	0.008	7.80	37.19	0.10	7.21±0.04
770	0.82	0.00127	0.007	7.31	53.81	0.15	7.68±0.05
800	0.83	0.00137	0.008	4.54	50.79	0.17	7.36±0.03
840	0.73	0.00095	0.005	4.88	60.85	0.16	7.72±0.06
Fusion	0.71	0.00114	0.005	6.63	52.01	0.12	6.46±0.04
Total	1.00	0.00200	0.011	100.00	48.13	0.17	7.08±0.04
Total without 510-590°C, and fusion				74.82			7.52±0.04

Continua Tab. 1

Campione 4 (3506 m), biotite: J = 0.009653

480	5.22	0.01694	0.053	6.76	4.08	0.09	3.72±0.08
530	0.57	0.00133	0.007	9.24	29.78	0.14	2.86±0.04
570	0.30	0.00049	0.012	11.81	50.07	0.65	2.56±0.03
600	0.28	0.00020	0.028	18.94	76.96	3.71	3.69±0.04
610	0.54	0.00116	0.023	18.86	35.83	0.54	3.41±0.05
660	0.39	0.00067	0.044	6.80	48.96	1.77	3.36±0.06
690	0.56	0.00122	0.030	4.47	35.57	0.67	3.51±0.06
720	0.62	0.00138	0.042	3.83	34.19	0.83	3.68±0.06
760	0.35	0.00043	0.047	10.63	62.48	2.95	3.78±0.12
Fusion	0.56	0.00138	0.014	8.67	26.06	0.27	2.49±0.06
Total	0.76	0.00190	0.027	100.00	45.40	1.42	3.26±0.07
Total without 480-570°C, and fusion				63.52			3.63±0.08

Pozzo Lumiera

Campione 5 (2237 m), muscovite: J = 0.009625

510	2.21	0.00463	0.022	4.16	37.81	0.13	14.36±0.04
550	0.92	0.0200	0.011	6.46	35.44	0.15	5.66±0.03
590	0.56	0.00131	0.006	8.99	29.29	0.12	2.81±0.04
620	0.52	0.00117	0.005	11.63	32.65	0.12	2.87±0.03
650	0.46	0.00085	0.005	12.39	44.50	0.17	3.56±0.04
680	0.45	0.00090	0.006	13.44	39.16	0.18	2.98±0.03
710	0.49	0.00100	0.006	11.20	38.91	0.16	3.28±0.03
740	0.49	0.00088	0.005	8.50	45.95	0.15	3.86±0.04
770	0.45	0.00079	0.007	5.87	47.16	0.25	3.71±0.06
800	0.56	0.00138	0.021	5.27	26.16	0.41	2.49±0.06
840	0.54	0.00146	0.013	5.25	20.13	0.24	1.87±0.06
Fusion	0.65	0.00180	0.012	6.85	17.15	0.18	1.92±0.04
Total	0.61	0.00131	0.008	100.00	35.71	0.18	3.68±0.05
Total without 510-550°C and 800°C - fusion				72.00			3.33±0.04

* valore misurato

^c valore corretto a causa de decadimento dell' ³⁷Ar dopo l'irradiazione (tempo di dimezzamento: 35,1 giorni)

**valore calcolato usando i fattori di correzione di Dlyrimple et al.(1981)

Tab. 2 - Età di raffreddamento ottenute con il metodo ⁴⁰Ar/³⁹Ar su campioni provenienti da pozzi profondi nella zona di Larderello. Riferimenti bibliografici: 1) VILLA *et alii* (1987); 2) VILLA & PUXEDDU (1984); 3) questo lavoro.

POZZO	PROF.	ROCCIA	MINER. (m)	ETA'	SPIEGAZIONE	RIF.
S.Pompeo	1899	fillade	roccia tot.	7.3 ± 0,1	II evento dist.	3
	2718	m.scisti	muscovite	2.53 ± 0.07	soll.pliocenico	3
	2963	m.scisti	biotite	1.61 ± 0.12	soll.recente	2
Selvaccia	3100	gneiss	muscovite	7.52 ± 0.04	II evento dist.	3
	3506	gneiss	biotite	3.68 ± 0.05	soll.pliocenico	3
Lumiera	2237	gneiss	muscovite	3.33 ± 0.04	soll.pliocenico	3
VC 11	2946	m.scisti	biotite	2.89± 0.5	soll.pliocenico	2
Sasso 22	4028	gneiss	biotite	2.88 ± 0.05	soll.pliocenico	2
MV 7	3483	granito	biotite	3.8 ± 0.1	cristallizzazione	1

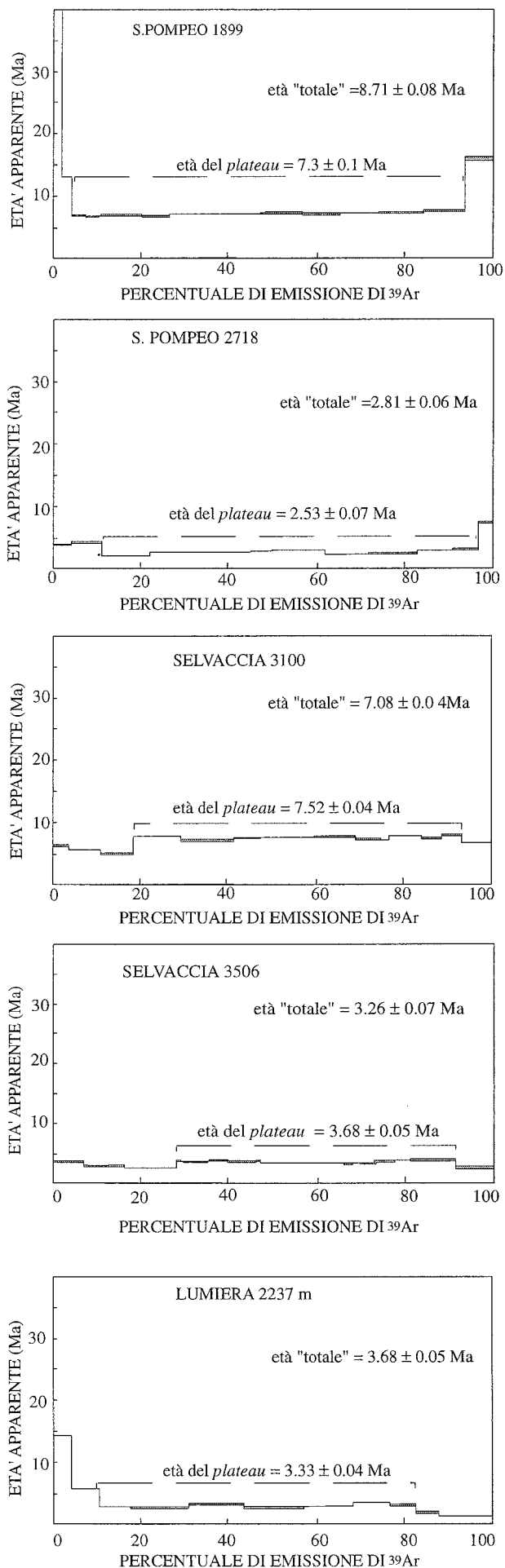


Fig. 6 - Diagrammi sull'età apparente ottenuti su concentrazioni di minerali e su roccia totale (fillade di del pozzo S. Pompeo, 1899 m). La larghezza delle barre (in grisé) indica l'incertezza nella determinazione dell'età apparente. Le tecniche adottate per l'analisi geocronologica sono descritte in DALLMAYER & GIL-IBARGUCHI (1990) ed in DALLMAYER & TAKASU (1992).

riore e del Pliocene inferiore e fra i sedimenti del Pliocene inferiore e medio. In figura 5 gli episodi di approfondimento, sollevamento ed emersione dei Bacini della Toscana meridionale sono confrontati con l'età dei corpi magmatici della Toscana meridionale e del Tirreno settentrionale: da questo confronto appare con buona evidenza che la messa in posto dei corpi magmatici, verosimilmente indicativa di un riscaldamento litosferico, è contemporanea agli episodi di sollevamento ed emersione.

ETA' DI RAFFREDDAMENTO E SOLLEVAMENTO

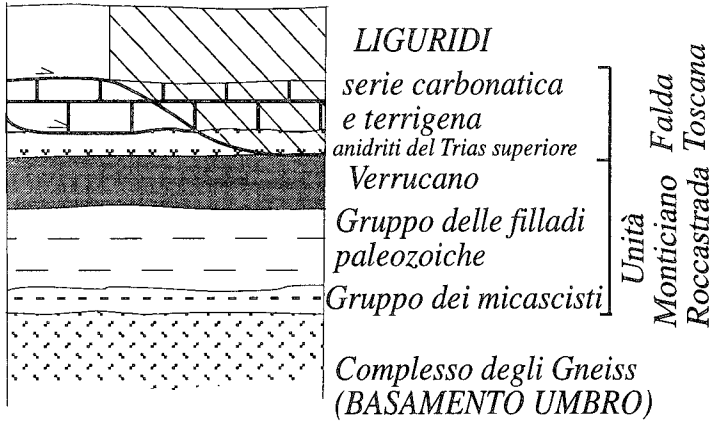
Allo scopo di meglio definire il sollevamento delle rocce e la migrazione verso i livelli più profondi del passaggio fragile/duttile, sono state effettuate una serie di datazioni assolute (⁴⁰Ar/³⁹Ar) su cinque campioni provenienti da diverse profondità, da tre diversi sondaggi profondi della zona di Larderello (Tab. 1 e Fig. 6).

Sono state individuate due età di raffreddamento principali (Tab. 2): una riferibile al Messiniano (circa 7 Ma) ed una al Pliocene (circa 3 Ma). Queste età di raffreddamento suggeriscono che: a) la biotite e la muscovite del Complesso degli Gneiss e dell'Unità di Monticiano-Roccastrada si è riequilibrata durante gli eventi termici neogenici; b) la più recente associazione mineralogica statica di AT/BP potrebbe essersi sviluppata durante questi eventi termici, come già suggerito da DEL MORO *et alii* (1982). Le condizioni di AT/BP sono state spiegate da Villa & Puxeddu (1994) come la conseguenza del raffreddamento di un grande batolite pliocenico (VILLA *et alii*, 1987). Viene qui proposta una diversa interpretazione: lo sviluppo delle nuove condizioni termobariche possono infatti essere spiegate anche come conseguenza della tettonica distensiva la quale avrebbe causato il movimento dell'astenosfera verso la superficie terrestre e quindi un aumento del flusso di calore; i principali effetti di questi fenomeni sono stati la fusione parziale della litosfera ed il sollevamento delle rocce durante il Messiniano ed il Pliocene. Da notare che lungo lo stesso sondaggio le età di raffreddamento sono più recenti spostandosi verso i livelli più profondi, suggerendo così una velocità media di sollevamento pari a circa 0,2 mm/anno.

CONCLUSIONI

Lo studio strutturale e l'analisi geocronologica permette di distinguere differenti stadi nell'evoluzione post-collisionale della Toscana occidentale (Fig. 7) e di sottolineare due punti principali: il primo riguarda la migrazione verso i livelli più profondi della superficie di scollamento che corrisponde al limite reologico; il secondo riguarda l'importanza della variazione del flus-

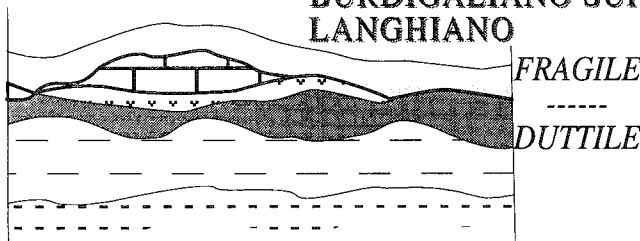
AQUITANIANO
(fine della fase collisionale)



27-25 Ma
(Kligfield et al., 1986)

19.6 Ma
 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
(Deino et al., 1992)

**BURDIGALIANO SUP.
LANGHIANO**



12-14 Ma
 K/Ar & $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
(Giglia e Radicati di Brozolo, 1970;
Kligfield et al., 1986)

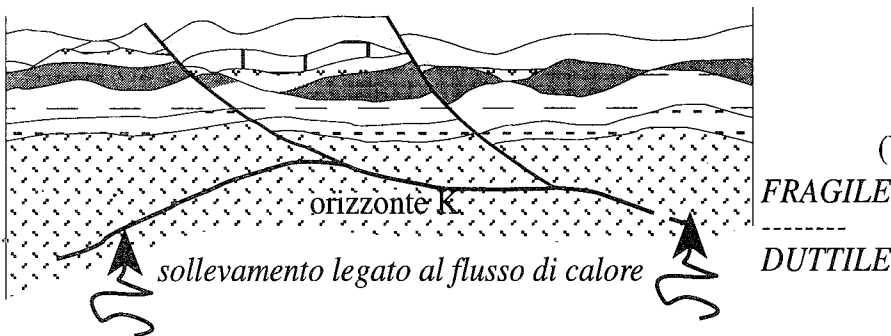
**SERRAVALLIANO
MESSINIANO SUP.**



10 - 8 Ma
 K/Ar & $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
(Kligfield et al., 1986)

7,3 - 7,1 Ma
 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
(questo lavoro)

PLIOCENE-ATTUALE



3.6 - 2.5 Ma
 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
(questo lavoro)

3.8 - 1.61 Ma
 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
(Villa & Puxeddu, 1994)

ESUMAZIONE LEGATA A
TETTONICA DISTENSIVA

Fig. 7 - Lo sviluppo della tettonica distensiva post-collisionale ha determinato la dissipazione della radice sialica e la esumazione delle zone di taglio più profonde. Almeno a partire dal Messiniano questo processo è stato accompagnato da riscaldamento litosferico. Nella colonna di destra sono indicate le età di raffreddamento note in letteratura e che possono trovare una loro spiegazione nel modello di esumazione e sollevamento che qui viene proposto.

so di calore. Questi due punti trovano una comune spiegazione nella evoluzione della tettonica distensiva che ha coinvolto la litosfera già ispessitasi durante l'orogenesi: il processo di dissipazione della radice litosferica, inizialmente, e l'assottigliamento della litosfera, successivamente, hanno causato: l'avvicinamento dell'astenosfera alla superficie, l'aumento del flusso di calore, lo sviluppo di condizioni di AT/BP e la fusione parziale della litosfera. L'aumento del flusso di calore ha favorito inoltre, il sollevamento delle rocce più profonde e la migrazione del passaggio fragile/duttile.

RINGRAZIAMENTI

Cogliamo qui l'occasione per ringraziare l'ENEL S.p.A. / V.D.T. / G. che ci ha permesso di analizzare i campioni provenienti dai sondaggi effettuati a scopo geotermico nell'area di Larderello.

BIBLIOGRAFIA

- BALDI P., BELLANI S., CECCARELLI A., FIORDELISI A., SQUARCI P. & TAFFI L. (1994a) - *Correlazioni tra le anomalie termiche ed altri elementi geofisici e strutturali della Toscana meridionale*. Studi Geol. Camerti, 1, 139-149.
- BALDI P., BERTINI G., CAMELI G.M., DECANDIA F.A., DINI I., LAZZAROTTO A. & LIOTTA D. (1994b) - *La tettonica distensiva post-collisionale nell'area geotermica di Larderello (Toscana meridionale)*. Studi Geol. Camerti, 1, 183-193.
- BATINI F., BURGASSI P.D., CAMELI G.M., NICOLICH R. & SQUARCI P. (1978) - *Contribution to the study of the deep lithospheric profiles: Deep reflecting horizons in Larderello-Travale Geothermal field*. Mem. Soc. Geol. It., 19, 477-484.
- BATINI F., BERTINI G., GIANNELLI G., PANDELI E. & PUXEDDU M. (1983) - *Deep structure of the Larderello geothermal field: contribution from recent geophysical and geological data*. Mem. Soc. Geol. It., 5, 219-235.
- BATINI F., BERTINI G., GIANNELLI G., PANDELI E., PUXEDDU M. & VILLA I. (1985) - *Deep structure, age and evolution of the Larderello-Travale geothermal field*. Geothermal Res., Comm. Trans., 9, 1-7.
- BERTINI G., CAMELI G.M., COSTANTINI A., DECANDIA F.A., DI FILIPPO M., DINI I., ELTER F.M., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., PANDELI E., SANDRELLI F., & TORO B. (1991) - *Struttura geologica fra i monti di Campiglia e Rapolano Terme (Toscana meridionale): stato attuale delle conoscenze e problematiche*. Studi Geol. Camerti, 1, 155-178.
- BORTOLOTTI V. (1966) - *La tettonica trasversale dell'Appennino I - La linea Livorno-Sillaro*. Boll. Soc. Geol. It., 85, 529-540.
- BOSSIO A., COSTANTINI A., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., MAZZANTI R., MAZZEI R., SALVATORINI G. & SANDRELLI F. (1993) - *Rassegna delle conoscenze sulla stratigrafia del neoaotocotono toscano*. Mem. Soc. Geol. It., 49, 17-98.
- BOSSIO A., ESTEBAN M., GIANNELLI L., LONGINELLI A., MAZZANTI R., MAZZEI R., RICCI LUCCHI F. & SALVATORINI G. (1978) - *General outline of the upper Miocene in Tuscany*. In: "Messinian Seminar n° 4", Roma, 1978, 3-12.
- BOSSIO A., GIANNELLI L., MAZZANTI R. & SALVATORINI G. (1981) - *Gli strati alti del Messiniano, il passaggio Miocene-Pliocene e la sezione Plio-Pleistocenica di Nugola nelle colline a NE dei Monti Livornesi*. In: "IX convegno Soc. Paleont. It.", Pisa, 1981, 55-90.
- BOSSIO A., MAZZANTI R., MAZZEI R., SALVATORINI G. & SANDRELLI F. (1991a) - *Il Pliocene di S. Dalmazio-Anqua e Radicondoli-Belforte (Siena)*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem. Serie A, 98, 99-191.
- BOSSIO A., MAZZANTI R., MAZZEI R., SALVATORINI G. & SANDRELLI F. (1991b) - *Il Pliocene dell'area di Pomarance (Pisa)*. Atti Soc. Tosc. Nat. Mem., Serie A, 98, 1-98.
- 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.
- CARMIGNANI L., DECANDIA F.A., DISPERATI L., FANTOZZI P.L., LAZZAROTTO A., LIOTTA D. & OGGIANO G. (1995) - *Relationships between the Sardinia-Corsica-Provençal Domain and the Northern Apennines*. Tectonophysics, 238, 295-315.
- CARMIGNANI L., DECANDIA F.A., FANTOZZI P.L., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., & MECCHERI M. (1994) - *Tertiary extensional tectonics in Tuscany (Northern Apennines, Italy)*. Tectonophysics, 238, 295-315.
- CARMIGNANI L. & KLIGFIELD R. (1990) - *Crustal extension in the northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex*. Tectonics, 9/6, 1275-1303.
- COSTANTINI A., DECANDIA F.A., LAZZAROTTO A. & SANDRELLI F. (1988) - *L'Unità di Monticiano-Roccastrada fra la Montagna senese ed il Monte Leoni (Toscana meridionale)*. Atti Ticinesi Sc. Terra, 31, 382-340.
- DALLMEYER R.D. & GIL-IBARGUCHI J.I. (1990) - *Age of amphibolitic metamorphism in the ophiolitic unit of the Morais allochthon (Portugal): implications for early Hercynian orogenesis in the Iberian Massif*. J. Geol. Soc. London, 147, 873-878.
- DALLMEYER R.D., & TAKASU A. (1992) - *⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of detrital muscovite and whole-rock slate/phyllite, Narragansett Basin, RI-MA, USA: implication for rejuvenation during very low grade metamorphism*. Contr. Miner. Petrol., 110, 515-527.
- DAMIANI A.V., MINELLI G. & PIALLI G. (1991) - *L'Unità Falterona-Trasimeno nell'area compresa fra la Val di Chiana e la Val Tiberina: sezione Terontola-Abbazia di Cassiano*. Studi Geol. Camerti, 1, 235-241.
- DEINO A., KELLER J.V.A., MINELLI G., & PIALLI G. (1992) - *Datazioni ⁴⁰Ar/³⁹Ar del metamorfismo dell'Unità di Ortano-Rio Marina (Isola d'Elba): risultati preliminari*. Studi Geol. Camerti, 2, 187-192.
- DEL MORO A., PUXEDDU M., RADICATI DI BROZOLO F., VILLA I.M. (1982) - *Rb-Sr and K-Ar Ages on Minerals at Temperatures of 300°-400°C from Deep Wells in the Larderello Geothermal Field (Italy)*. Contrib. Mineral. Petrol., 81, 340-349.
- ELTER F.M. & PANDELI E. (1990) - *Alpine and Hercynian orogenic phases in the basement rocks of the Northern Apennines (Larderello geothermal field, Southern Tuscany, Italy)*. Eclogae Geol. Helvetiae, 83 (2), 241-264.
- ELTER P., GIGLIA G., TONGIORGI M., & TREVISAN L. (1975) - *Tensional and compressional areas in the recent (Tortonian to Present) evolution of the Northern Apennines*. Boll. Geof. Teor. Appl., 17 (65), 3-18.
- FERRARA G. & TONARINI S. (1985) - *Radiometric geochronology in Tuscany: results and problems*. Rend. Soc. Mineral. e Petrol., 40, 111-124.
- FRANCESCHINI F. (1994) - *"Larderello plutono-metamorphic core complex": metamorfismo regionale ercinico di bassa pressione o metamorfismo di contatto plio-quaternario?* Studi Geol. Camerti, Vol. speciale 1994/1, 113-128.
- GIANNELLI G., PUXEDDU M., BATINI F., BERTINI G., DINI I., PANDELI E. & NICOLICH R. (1988) - *Geological model of a young volcano-plutonic system: the geothermal region of Monte Amiata (Tuscany, Italy)*. Geothermics, 17/5-6, 719-734.
- GIESE P., WIGGER P., MORELLI C. & NICOLICH R. (1981) - *Seismische studien zur bestimmung der krustenstruktur-anomalien der Toskana*. Comm. Europ. Communities, EUR, p. 75-78.
- GIGLIA G. & RADICATI DI BROZOLO R. (1970) - *K-Ar age of metamorphism in the Apuane Alps (northern Tuscany)*. Boll. Soc. Geol. It., 89, 485-497.
- JOLIVET L., DUBOIS R., FOURNIER R., GOFFÈ B., MICHARD A., & JOURDAN C. (1990) - *Ductile extension in Alpine Corsica*. Geology, 18, 1007-1010.
- KLIGFIELD R., HUNZIKER J., DALLMEYER R.D. & SCHAMEL S. (1986) - *Dating of deformation phases using K/Ar and ⁴⁰Ar/³⁹Ar techniques: results from the Northern Apennines*. J. Struct. Geol., 8, 781-798.
- LAVECCHIA G., MINELLI G. & PIALLI G. (1984) - *L'appennino umbromarchigiano: tettonica distensiva ed ipotesi di sismogenesi*. Boll. Soc. Geol. It., 103, 467-476.
- LAZZAROTTO A. & MAZZANTI R. (1965) - *Sulle caratteristiche di alcune strutture tettoniche frequenti nelle formazioni neoaotocotone delle alti valli del fiume Cecina, Cornia, Millia*. Boll. Soc. Geol. It., 84 (5), 177-196.
- LAZZAROTTO A. & MAZZANTI R. (1978) - *Geologia dell'alta Val di Cecina*. Boll. Soc. Geol. It., 95, 1365-1487.
- LOCARDI E. & NICOLICH R. (1988) - *Geodinamica del Tirreno e dell'Appennino centro-meridionale: la nuova carta della Moho*. Mem. Soc. Geol. It., 41, 121-140.

- MAZZANTI R. (1966) - *Geologia della zona di Pomarance-Larderello (Prov. di Pisa)*. Mem. Soc. Geol. It., 5 (2), 105-138.
- MONGELLI F., ZITO G., CIARANFI N. & PIERI P. (1989) - *Interpretation of heat flow density of the Apennine chain, Italy*. Tectonophysics, 164, 267-280.
- NICOLICH R. & MARCHETTI A. (1982) - *Profili sismici*. In: "Il Graben di Siena" - CNR-PFE-RF 9, Pisa, 137-149.
- PUXEDDU M. (1984) - *Structure and late cenozoic evolution of the upper lithosphere in southwest Tuscany (Italy)*. Tectonophysics, 101, 357-382.
- ROYDEN L., PATACCA E. & SCANDONE P. (1987) - *Segmentation and configuration of subducted lithosphere in Italy: an important control on thrust belt and foredeep basin evolution*. Geology, 15, 714-717.
- SERRI G., INNOCENTI F., MANETTI P., TONARINI S. & FERRARA G. (1991) - *Il magmatismo neogenico-quadernario dell'area toscano-laziale-umbra: implicazioni sui modelli di evoluzione geodinamica dell'Appennino settentrionale*. Studi Geologici Camerti, 1, 429-463.
- VILLA I., GIANELLI G., PUXEDDU M., BERTINI G. & PANDELI E. (1987) - *Granitic dikes of 3,8 Ma. age from a 3,5 km deep geothermal well at Larderello (Italy)*. Soc. It. Min. Petr., 42, 364.
- VILLA I. & PUXEDDU M. (1994) - *Geochronology of the Larderello geothermal field: new data and the "closure temperature" issue*. Contrib. Mineral. Petrol., 115, 415-426.

