

TOMOGRAFIE SISMICHE E INTERPRETAZIONE GEOLOGICA PROFONDA DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE - NORD OCCIDENTALE(***)

ABSTRACT

Deep structural reconstructions of the North-Appennines are synthetically shown in the geological sections across the whole orogenic chain from the Po Plain foredeep-foreland (in the NE) to the Tyrrhenian border (in the SW side). The structural accretion during the Padanian-Adriatic Phase (Messinian-Pliocene-Pleistocene) produced out of sequence reactivation of previous structures. Moreover this reactivation produced the tectonic propagation to the N and NE up to the border of the Po Plain of the Ligurian allochthonous units. The intense crustal shortening produced during the Po Plain - Adriatic phase is of the order of one hundred km or more thus indicating intense delamination of the upper crust and consequent similar descent of the delaminated lithosphere under the orogenic chain.

"Extensional" collapses of the inner sector of the Apennines (the Tuscan belt of "Graben" association) are considered genetically linked to the lithospheric subduction of the Adriatic plate. Deep seismic high velocity zones have been recently discovered between the Tuscan-Ligurian margin and the Apenninic crest. These anomalous zones have been interpreted as lithospheric roots connected to the subduction of the Adriatic plate coherent with the deep structural interpretation of the N-Appennines here proposed.

INTRODUZIONE

La presente nota è stata realizzata allo scopo di completare gli studi per la progettazione del Profilo CROP 1-1A, soprattutto agli effetti della interpretazione geologica profonda del tratto appenninico del profilo stesso. L'obiettivo di questo contributo è quello di tentare di definire, anche in profondità, l'assetto strutturale della catena appenninica e di delineare i suoi possibili rapporti sia con la litosfera padano-adriatica che con quella ligure tirrenica. Un problema ulteriore strettamente collegato alla strutturazione della catena appenninica riguarda la cronologia degli eventi deformativi che hanno portato all'edificio strutturale attuale. In particolare, soprattutto per i geologi specialisti del settore interno della catena, non è sempre facile riconoscere il contributo nelle deformazioni e nel raccorciamento derivato dagli eventi della Fase padano-adriatica del Messiniano-Pliocene-Pleistocene, ad opera della strutturazione fuori sequenza che è facilmente riconoscibile nei settori più esterni del fronte compressivo. Altro problema di grande risalto è rappresentato dai legami tra questa strutturazione compressiva fuori sequenza e la tettonica distensiva ampiamente rap-

presentata nei settori interni della catena, fra lo spartiacque appenninico e il margine tirrenico toscano-ligure.

Questa nota si affianca così a tutti gli altri contributi di questo volume che raccoglie le presentazioni svoltesi in occasione della riunione di Pietrasanta (4 giugno 1993) dedicata al tratto appenninico del Profilo CROP 1-1A.

IL FRONTE COMPRESSIVO DELL'APPENNINO SETTENTRIONALE

Gli elementi strutturali attraverso i quali sono state eseguite le tomografie sismiche e le interpretazioni geologiche profonde rappresentate nei profili di questo studio sono qui sintetizzati alla luce degli studi geologici e geofisici di questi ultimi anni (si rimanda alle ricerche di PIERI & GROPPi, 1981; PATACCA & SCANDONE, 1986; CASTELLARIN *et al.*, 1986; BALLY *et al.*, 1988; VAI, 1989; PATACCA *et al.*, 1992; BERNINI *et al.*, 1992; LAUBSCHER *et al.*, 1992; CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; BARTOLE *et al.*, 1992; CARMIGNANI *et al.*, 1993; VANOSI *et al.*, 1994; tutte *cum bibliografia*).

L'avanfossa padano-adriatica: comprende un settore settentrionale praticamente indeformato all'interno del quale appaiono incorporati gli elementi più esterni del fronte sudalpino sepolto, fino a quelli affioranti del margine pedemontano. La successione plio-pleistocenica si inspessisce progressivamente verso S come documentano le sezioni sismiche e i pozzi profondi dell'AGIP (PIERI & GROPPi, 1981; PIERI, 1983; CASSANO *et al.*, 1986). L'avanfossa interna è intensamente deformata e costituisce il prisma di accrescimento tettonico più esterno dell'Appennino che si è sviluppato essenzialmente tra il Messiniano superiore e il Pleistocene in condizioni di elevata subsidenza che richiama una intensissima sedimentazione clastica (DONDI *et al.*, 1982; DONDI & D'ANDREA, 1986; RICCI LUCCHI, 1986; CASTELLARIN *et al.*, 1986; VAI, 1988). Il sistema di embricazioni padane sepolte ha raggiunto la massima propagazione verso l'esterno (e cioè entro la Pianura Padana) durante le compressioni del Pliocene inferiore. Queste ultime hanno determinato la maggior parte del raccorciamento del sistema e assieme alle compressioni del Messiniano superiore (MARABINI & VAI, 1985; CASTELLARIN *et al.*, 1986; VAI, 1988) hanno causato quasi il 70% del raccorciamento compressivo della Fase padano-adriatica, il restante 30% è da attribuire alle deformazioni del Pliocene medio-superiore e Pleistocene.

IL FRONTE COMPRESSIVO APPENNINICO PEDECOLLINARE E COLLINARE

Il sistema di embricazione sepolto è separato dalla

(*) Dipart. Scienze Geologiche, Università di Bologna.

(**) Dipart. Scienze della Terra, Università di Genova.

(***) Lavoro eseguito con il contributo finanziario del MURST (1991, 1992) e del C.N.R. (1991, 1992).

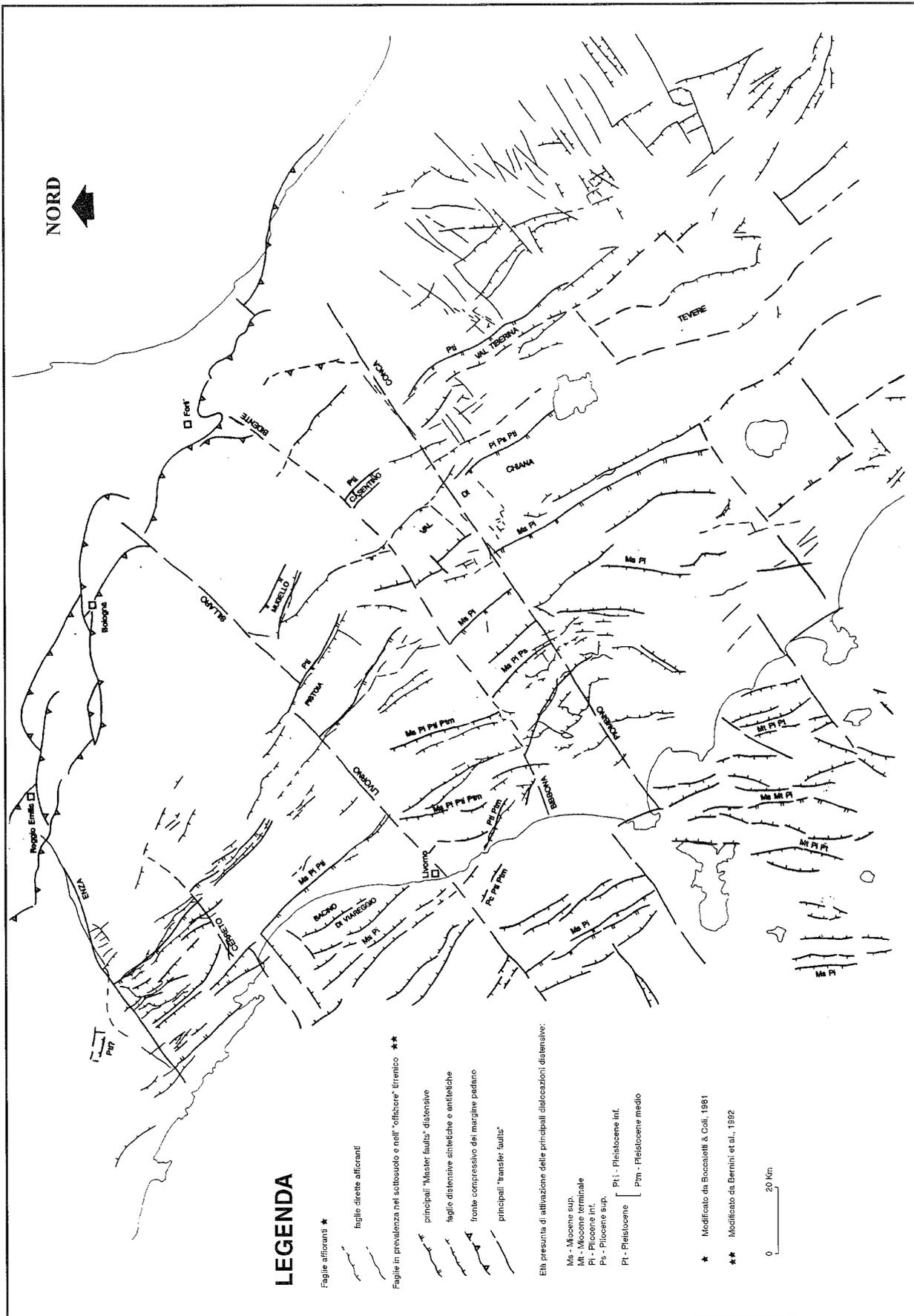


Fig. 1 - Carta strutturale sintetica dell'Appennino settentrionale con l'interpretazione del sistema distensivo toco-figure e dei suoi rapporti geometrici con il fascio strutturale compressivo dell'Appennino frontale padano-adriatico (da BERNINI *et al.*, 1992).

zona appenninica dei rilievi pedecollinari da una importante superficie di discontinuità che si sviluppa lungo il margine padano. Lungo questa superficie viene interrotta la connessione tra il sistema di embricazione sepolto e la catena retrostante. Si tratta del Lineamento Pedeappenninico degli Autori recenti (v. ad es. BOCCALETTI *et al.*, 1985 e CASTELLARIN *et al.*, 1986) che rappresenta il principale dispositivo nella disattivazione del fronte sepolto rispetto alla tettonica compressiva che nelle zone frontali più esterne si è andata progressivamente esaurendo durante l'evoluzione strutturale del Pliocene medio-sup. - Pleistocene. Fanno eccezione alcuni settori strutturalmente rialzati del sistema (Alto Strutturale Ferrarese) ove le deformazioni hanno potuto manifestarsi anche durante gli eventi più recenti (v. Fig. 5 sez. b, struttura di Cavone). Ciò vale anche per l'Arco del Monferrato come documentata la sua attività pleistocenica e recente (v. CASSANO *et al.*, 1986; CARRARO *et al.*, 1994). Il lineamento pedeappenninico costituisce il principale elemento strutturale "fuori sequenza" della zona frontale appenninica lungo il quale si è concentrata l'attività tettonica compressiva dalla fine del Pliocene in poi come documentano le intense deformazioni del Quaternario marino da tempo note (v. ad es. sezioni sismiche e pozzi profondi AGIP Monteveglio-Crespellano e Sasso Marconi-Bologna figurate in CASTELLARIN *et al.*, 1986). Le cause dell'evoluzione fuori sequenza del lineamento pedeappenninico sono state indicate nel sollevamento e nel progressivo scarico del settore appenninico retrostante il lineamento stesso, caratterizzato da sollevamento e intensa erosione anche gravitativa. Il progressivo rapido esaurimento nell'attività traslativa e deformativa nel settore padano adiacente è stato invece attribuito al graduale aumento del carico dei sedimenti e al conseguente proporzionale aumento della resistenza alla deformazione dei comparti strutturali interni alla pianura (CASTELLARIN *et al.*, 1986). La zona appenninica frontale (fascia dei rilievi collinari) è dominata dai ricoprimenti delle unità liguri, subliguri e dalle successioni epiliguri sovrastanti (C.N.R. 1991) che raggiungono spessori chilometrici nei rilievi retrostanti le zone collinari del margine padano (v. ad es. le perforazioni profonde dell'AGIP, in CASTELLARIN *et al.*, 1986).

ALTI RILIEVI DEL CRINALE

Le successioni toscane del M. Modino, Macigno, Cervarola costituiscono le unità che affiorano in corrispondenza degli alti rilievi del crinale appenninico e zone immediatamente adiacenti. Appare evidente in molte località che le successioni del Cervarola sono sollevate e sovrascorse alle unità liguri (v. ad es. ZANZUCCHI 1980; BETTELLI *et al.*, 1989) interrompendo verso occidente la continuità del grande corpo alloctono liguride che, a NE del crinale si propaga senza soluzione di continuità, fino al margine padano. Verso il Tirreno le unità liguri sono caratterizzate da corpi più discontinui e sporadici di spessore alquanto più limitato sempre tettonicamente sovrapposti alle successioni toscane e normalmente localizzati in corrispondenza delle depressioni strutturali causate dalla tettonica distensiva plio-pleistocenica. Il settore posto in questa parte della catena ha il suo massimo

risalto nella culminazione della grande antiformentale della finestra tettonica delle Apuane le cui complesse problematiche sono state oggetto di approfondite e moderne analisi sviluppate dal 1975 in poi che hanno portato alle interpretazioni attuali del nucleo apuano considerato come *metamorphic core complex* strutturatosi durante le drastiche manifestazioni distensive e il sollevamento del Neogene e Quaternario (CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990; CARMIGNANI *et al.*, 1993 *cum bibliogr.*; COLI *et al.*, 1993 *cum bibliogr.*; CARMIGNANI *et al.*, 1993 *cum bibliogr.*). Tali deformazioni neogeniche e quaternarie hanno profondamente disarticolato e riarrangiato l'originario assetto dei ricoprimenti toscani (Falda Toscana *Auct.*) raggiunto in seguito alle intense compressioni della Fase subligure (ELTER, 1972; DALLAN & NARDI, 1974) riferite a un intervallo compreso tra il Cattiano superiore e il Burdigaliano. Questo intervallo risulta confermato dalle datazioni radiometriche ottenute su metamorfiti sincinematische comprese tra circa 29 MA (nucleo apuano, KLIGFIELD *et al.*, 1986) e 19 MA (Isola d'Elba; DEINO *et al.*, 1993). Deformazioni compressive di età susseguente non possono essere escluse se le successioni del Burdigaliano superiore-Langhiano e forse anche del Serravalliano del Bacino Corso (GABIN, 1972; GENNESSEAU *et al.*, 1989) sono da interpretare come successioni connesse al *rifting* precoce medio miocenico dell'Alto Tirreno (ZITELLINI *et al.*, 1986; BARTOLE *et al.*, 1992). In questo quadro anche le età radiometriche intorno a 11 MA (Serravalliano superiore) riconosciute sulle associazioni metamorfiche delle Apuane (KLIGFIELD *et al.*, 1986) potrebbero essere in buon accordo con la continuazione della strutturazione compressiva toscana durante il Miocene medio.

IL FRONTE DISTENSIVO DELLA TOSCANA E DEL CRINALE TOSCO EMILIANO

La struttura distensiva della zona toscana fino al margine tirrenico è da lungo tempo nota (TREVISAN, 1952; GIGLIA, 1974; BARTOLINI *et al.*, 1983). Essa è stata recentemente rianalizzata sia in termini di assetti e geometrie del sistema strutturale distensivo (BERNINI *et al.*, 1992) che come revisione storica e messa a punto stratigrafica delle successioni sintettoniche (BOSSIO *et al.*, 1993). La sintesi degli elementi strutturali descritta qui di seguito è basata principalmente sui dati e interpretazioni strutturali proposte da BERNINI *et al.* (1992) e relativa carta strutturale allegata da cui è stata ricavata quella, lievemente modificata, di questa nota (Fig. 1). Inoltre i rapporti tra distensioni tirreniche e compressioni frontali adriatiche sono stati anche recentemente approfonditi (PATACCA *et al.*, 1992).

Le aree di distensione del *rifting* toscano formano un ventaglio di dislocazioni ad orientamento appenninico che si interrompe verso NW in corrispondenza di un ipotetico polo di rotazione. Il fascio strutturale si apre nettamente verso SE ove si realizzano gli effetti morfotettonici più estesi ed intensi. Nella zona tosco-ligure, a causa del restringimento, si realizza un sensibile addensamento delle disgiunzioni all'interno di una fascia piuttosto limitata.

La linea dell'Enza-Val di Taro, costituisce il princi-

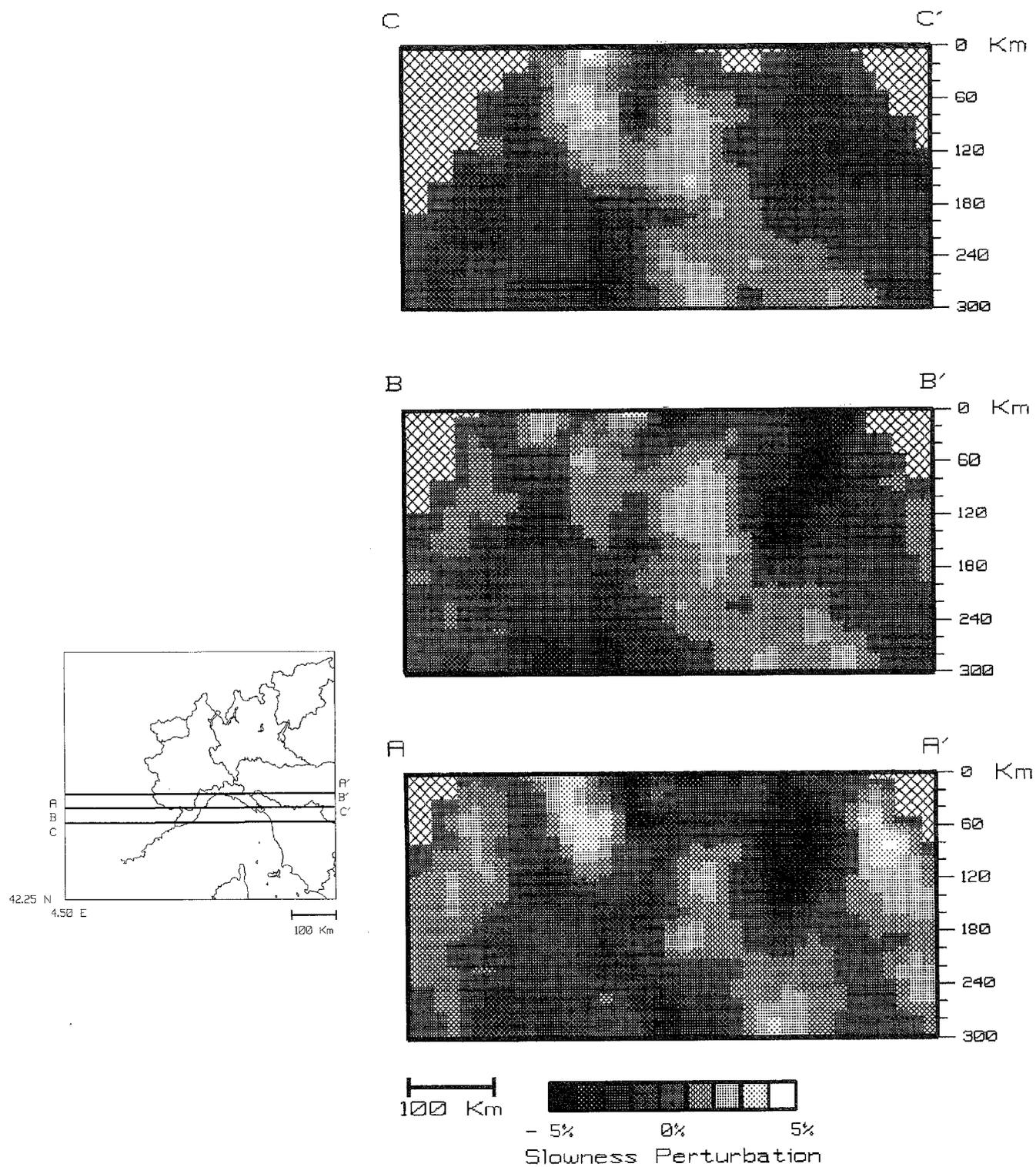


Fig. 2 - Tomografia sismica attraverso il settore tosco-ligure: l'ubicazione delle sezioni A, B e C è rappresentata nel riquadro (spiegazioni nel testo).

pale sbarramento della tettonica distensiva. Infatti sul suo bordo NW i lineamenti distensivi si interrompono, fatta eccezione per il piccolo bacino di Compiano che costituisce l'estrema propagazione verso N del sistema di *rifting*.

La grande fascia triangolare in distensione si propaga verso sud utilizzando anche svincoli trasversali e trasferimenti di ampiezza regionale. I principali sono la linea Livorno-Sillaro, la linea Bibbona-Bidente e la Piombino-Pesaro. Altri lineamenti di notevole risalto, ma minore continuità in direzione NE, sono quelli dell'Argentario e del Perugino. Tutti questi elementi vanno considerati del massimo interesse in quanto debbono giocare un ruolo essenziale nella cinematica del *rifting* poiché le fasce in distensione localizzate a SE degli stessi risultano sensibilmente più ampie di quelle equivalenti poste a NW. In tal modo queste superfici di svincolo consentono un accomodamento fra i settori più stirati e quelli meno deformati immediatamente adiacenti. Cinematicamente questi svincoli devono avere anche un notevole risalto in termini di propagazione in profondità. Infatti tali strutture devono spingersi fino alla base degli scollamenti più profondi dell'Appennino settentrionale interno, verosimilmente in corrispondenza della crosta inferiore duttile. Ciò in accordo con il sistema di *ramp* e *flat* ipotizzato attraverso la crosta media e superiore che si attenua all'interno della zona duttile sottostante (LAVECCHIA *et al.*, 1984, Tav. 1).

Il sistema di bacini distensivi si propaga dalla fascia tirrenica verso la catena fino ai dintorni dello spartiacque appenninico. Questa strutturazione si svolge durante il Messiniano-Pliocene inferiore (bacini di Viareggio, della Fine, di Siena ecc.), durante il Pliocene (bacino di Pistoia, Val di Chiana ecc.) e durante il Pleistocene e recente (Bacini di Compiano, del Mugello, Casentino, Val Tiberina ecc.).

Fanno eccezione le grandi depressioni del vulcanismo toscano-laziale che sono attive nell'affossamento in tempi molto recenti pur trovandosi sul retro delle depressioni tettoniche più esterne (Val di Chiana - Tevere).

Nella zona di La Spezia e alto Taro e della Lunigiana il sistema è ristretto a una fascia di ampiezza molto limitata e di notevole complessità. Solo in parte può essere corrispondente alla fascia più occidentale del bacino di Viareggio. Infatti il settore immediatamente adiacente, sbarrato a SE dallo svincolo del Cerreto potrebbe rappresentare l'estrema appendice N-occidentale del sistema di *rifting* propagatosi in questo settore in tempi recenti.

I DATI GEOFISICI

Sono piuttosto approfonditi i risultati delle prospezioni geofisiche che comprendono principalmente le revisioni dei risultati di sismica a rifrazione (DSS) realizzati come contributi alla progettazione del profilo CROP-1 (SCARASCIA & CASSINIS, 1993; CASSINIS & SCARASCIA, in stampa), gli studi integrativi della Geotraversa Europea (BUNESS & GIESE, 1990; GIESE, 1990) e le ricerche geologiche e geofisiche (con sismica a riflessione) del settore al bordo appenninico NW e Mar Ligure (TOMASELLI *et al.*, 1993). In base a questi dati geofisici è stata riconosciuta una crosta sensibilmente ispessita con spessori fino a oltre 40 km in corrispondenza del crinale appenninico e verso

il fronte esterno e un rapido assottigliamento in corrispondenza della zona appenninica e toscano-ligure con spessori intorno a 25 km, ancora più ridotti in corrispondenza del margine ligure e tirrenico (di poco superiori a 20 km).

Per quanto riguarda i dati di tomografia sismica essi si riferiscono ad alcune sezioni (A, B e C di Fig. 2) ricavate attraverso il settore toscano-ligure del quale erano state fornite le acquisizioni rappresentate in pianta in un precedente lavoro a cui si rimanda (CATTANEO *et al.*, 1993). I risultati delle sezioni sono qui di seguito riportati.

1 - Una zona di anomalia nelle velocità sismiche (sensibilmente più elevate) all'interno del mantello fino ad oltre 150 km di profondità in una fascia appenninica interna, tra la costa e i rilievi del crinale ben evidenziata dai dintorni di Genova fino al bordo N della Versilia. L'andamento dell'anomalia, secondo direzioni WNW-ESE è parallelo agli andamenti della catena di questo settore.

Altri elementi documentati nelle sezioni attraverso l'area coperta dalla tomografia sismica sono:

2 - una zona di anomalia localizzata nel mantello al di sotto del Bacino Terziario Piemontese (margine E del Bacino), dalle Alpi Marittime fino alla costa ligure con andamenti più irregolari di quella precedente (1) ben evidenziata fino a circa 70 km di profondità e di ampiezza variabile;

3 - una zona di anomalia in un ampio settore alquanto disomogeneo che si spinge fino a circa 300 km di profondità presente al di sotto del Mar Ligure e che, malgrado le irregolarità, sembra trovarsi in continuità tra il settore alpino del nizzardo e il Mar Ligure.

4 - Tutte queste zone di anomalia positiva nelle velocità sismiche sono separate tra loro da ampie cellule di anomalia negativa delle velocità sismiche, particolarmente evidenti in corrispondenza del settore Mar Ligure - bordo tirrenico N, tra profondità di 60 e 300 km, in più nuclei di ampiezza variabile tra 70 e 150 km.

Gli andamenti delle anomalie relative alla velocità sismica possono essere così interpretati:

per quanto riguarda la fascia 1 essa sembra essere la più evidente e risulta collegata alle strutture riferibili all'Appennino settentrionale. Essa può essere interpretata come la radice litosferica mantellica derivata dai processi di delaminazione della crosta umbro-padana ed adriatica discesa in profondità per subduzione. Le successioni della crosta media e superiore scollate dalla litosfera continentale sarebbero rappresentate dagli accumuli tettonici del "prisma di accrezione" tettonico soprattutto del sistema appenninico frontale originatosi tra il Burdigaliano finale e il Pleistocene ma principalmente derivato dalle compressioni della Fase padano-adriatica (Messiniano-Pleistocene). Una simile ipotesi non sembra in contrasto con la funzione di crosta superiore rigida, sostanzialmente bloccata, attribuita ai settori localizzati alle confluenze degli archi appenninici sepolti (CASTELLARINI *et al.*, 1986; CASTELLARINI & VAI, 1986). Infatti tali settori corrispondono a nuclei superficiali di crosta padana, localizzati nelle zone più esterne del sistema frontale che non sono stati incorporati all'interno del "prisma di accrezione" plio-pleistocenico.

Va ricordato a questo punto che, in base alla sismicità, una interpretazione geologica profonda nella quale la litosfera adriatica discende sotto la catena appenninica

del settore toscano-ligure per circa 70 km e oltre era già stata proposta in un precedente studio (TOMMASSELLI *et al.*, 1993).

Di più difficile interpretazione la anomalia 2 presente tra il bordo delle Alpi occidentali e il Monferrato fino al Mar Ligure che potrebbe corrispondere agli elementi crostali e litosferici del prolungamento verso S dell'Ivrea Verbano e fascia strutturale alpina adiacente. In altri termini questa zona di anomalia potrebbe corrispondere alla zona di subduzione più recente, neoalpina delle Alpi cioè alla "indentazione" della litosfera padana sotto i ricoprimenti alpini (v. ad es. POLINO *et al.*, 1990; BERNOULLI *et al.*, 1990; LAUBSCHER *et al.*, 1990). Una soluzione alternativa potrebbe consistere nella presenza di un nucleo litosferico derivato dalla eventuale strutturazione appenninica, collegata all'apertura precoce del Tirreno occidentale (Bacino Corso) (?Burdigaliano medio - ?Serravalliano) antecedente al Messiniano-Pliocene.

La struttura relativa alla anomalia 3 può forse corrispondere agli elementi relitti della subduzione alpina e cioè alle residue testimonianze della litosfera subdotta durante le fasi precollisionali e collisionali dell'orogeno alpino.

Quanto alle cellule di bassa velocità sismica (anomalia del punto 4) presenti al di sotto del Mar Ligure e al confine M. Ligure - bordo tirrenico settentrionale esse possono corrispondere alle zone più calde e mobili del mantello e rappresentare in prevalenza zone di mantello astenosferico.

LE SEZIONI GEOLOGICHE DAL TIRRENO AI FRONTI PADANI SEPOLTI

Le sezioni geologiche **a** e **b** (Figg. 3, 4 e 5) del presente studio utilizzano i tracciati e i dati geologici di superficie rispettivamente della Sezione 1 di Tav. 2 e della Sezione 8 di Tav. 3 eseguite attraverso l'Appennino settentrionale realizzate per il Progetto Finalizzato Geodinamica (Boccaletti & Coli, 1982). Tali sezioni sono state utilizzate per l'interpretazione strutturale profonda dell'Appennino e risultano talora notevolmente modificate rispetto alle versioni originali. Per le ricostruzioni del settore padano sepolto ci si è avvalsi delle ricostruzioni dell'AGIP (Pieri & Groppi, 1981; Cassano *et al.*, 1986) che sono state interpretate e collegate in profondità con le strutture della catena retrostante.

Per la sezione **a** (Genova-Cremona) ci si è avvalsi

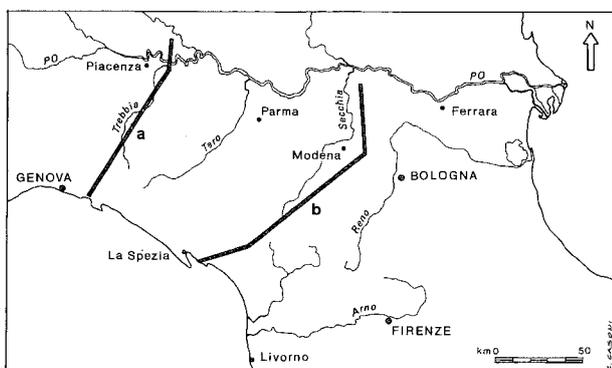


Fig. 3 - Ubicazione delle sezioni geologiche **a** e **b** rappresentate nelle Figg. 4 e 5.

anche delle nuove sezioni sismiche a rifrazione e delle loro interpretazioni ottenute per il settore appenninico compreso tra l'Appennino piacentino e la zona ligure adiacente (LAUBSCHER *et al.*, 1992) e di altri risultati recenti di sismica a rifrazione (BIELLA *et al.*, 1987)

STILI DEFORMATIVI DEL FRONTE COMPRESSIVO

Il "fronte" compressivo è costituito dalla "Avanfossa padana" deformata e dalla "Catena" retrostante. L'Avanfossa padana è caratterizzata da un tipico sistema di embricazione (vedi descrizioni del paragrafo precedente). La Catena è dominata dai ricoprimenti liguridi che occupano la parte più elevata del sistema strutturale e sono tettonicamente sovrapposti alle successioni toscane, umbre e padane. Queste ultime risultano intensamente deformate anche da una strutturazione fuori sequenza di notevole risalto.

Le sezioni geologiche (**a**, **b**) (Figg. 4 e 5) evidenziano l'intensa tettonizzazione degli elementi del margine pedemontano che è stata determinata dalla propagazione del ricoprimento ligure nella zona frontale ed inoltre dall'intensa attivazione fuori sequenza degli accavallamenti presso il margine pedeappenninico ove si è concentrata

LEGENDA DELLE SEZIONI **a**, **b** (Figg. 4, 5)

- RICOPRIMENTI LIGURI (PERTINENZA ALPINA) E SUBLIGURI
- ARGILLE SCAGLIOSE, GAOTICO, COMPLESSI DI BASE, MELANGE CON GRANDI INCLUSI DI OFIOLITI
- FLYSCH CRETACEO-PALEOGENICI E SEQUENZE SUBLIGURI ED EPI-LIGURI (COMPRESA LA SUCCESIONE DELLA VAL D'AVETO)
- SERPENTINITI-GABBRI E LORO COPERTURE
- UNITA' DELLA "FALDA TOSCANA" (UNITA' INTERNE)
- ARENARIE DEL CERVAROLA E SUOI EQUIVALENTI
- ARENARIE DEL MACIGNO E M. MODINO E LORO EQUIVALENTI
- COPERTURE EVAPORITICHE, CARBONATICHE, CARBONATICO SILICEE E MARNOSE MESO-CENOZOICHE NON METAMORFICHE O CON METAMORFISMO DI BASSO GRADO (LA SPEZIA, P. BIANCA)
- BASAMENTO CRISTALLINO METAMORFICO TOSCANO (PRE CARBONIFERO SUP.)
- UNITA' TOSCANE METAMORFICHE (UNITA' ESTERNE)
- SUCCESSIONI MESO-CENOZOICHE METAMORFICHE (OVE DISTINTE: APUANE)
- METAMORFITI INDISTINTE: BASAMENTO CRISTALLINO METAMORFICO TOSCANO (PRE CARBONIFERO SUP.) E SUE COPERTURE MESO-CENOZOICHE METAMORFOSATE
- UNITA' UMBRO-PADANE E PADANO-ADRIATICHE
- ARENARIE DI CASTEL GUERRINO E DELLA MARNOSO-ARENACEA
- COPERTURE CARBONATICHE MESO-CENOZOICHE
- BASAMENTO CRISTALLINO-METAMORFICO (PRE CARBONIFERO SUP.)
- SUCCESSIONI DELLA AVANFOSSA APPENNINICA (SOTTOSUOLO PADANO)
- Q
- QUATERNARIO IN PREVALENZA MARINO; E ALLUVIONI
- PLIOCENE MEDIO E SUPERIORE E PLEISTOCENE INFERIORE (P. P.)
- PLIOCENE INFERIORE
- MESSINIANO (FORMAZIONE A COLOMBACCI, FORMAZIONE DI FUSIGNANO E GESSOSO SOLFIFERA)
- MA
- MIOCENE MEDIO E SUPERIORE (P. P.)
- MIOCENE INFERIORE
- PALEOGENE E MIOCENE INFERIORE

I DATI DEL SOTTOSUOLO PADANO SONO STATI TRATTI DALL'AGIP (PIERI & GROPPi, 1981; DONDI & D'ANDREA, 1986; CASSANO ET AL., 1986)

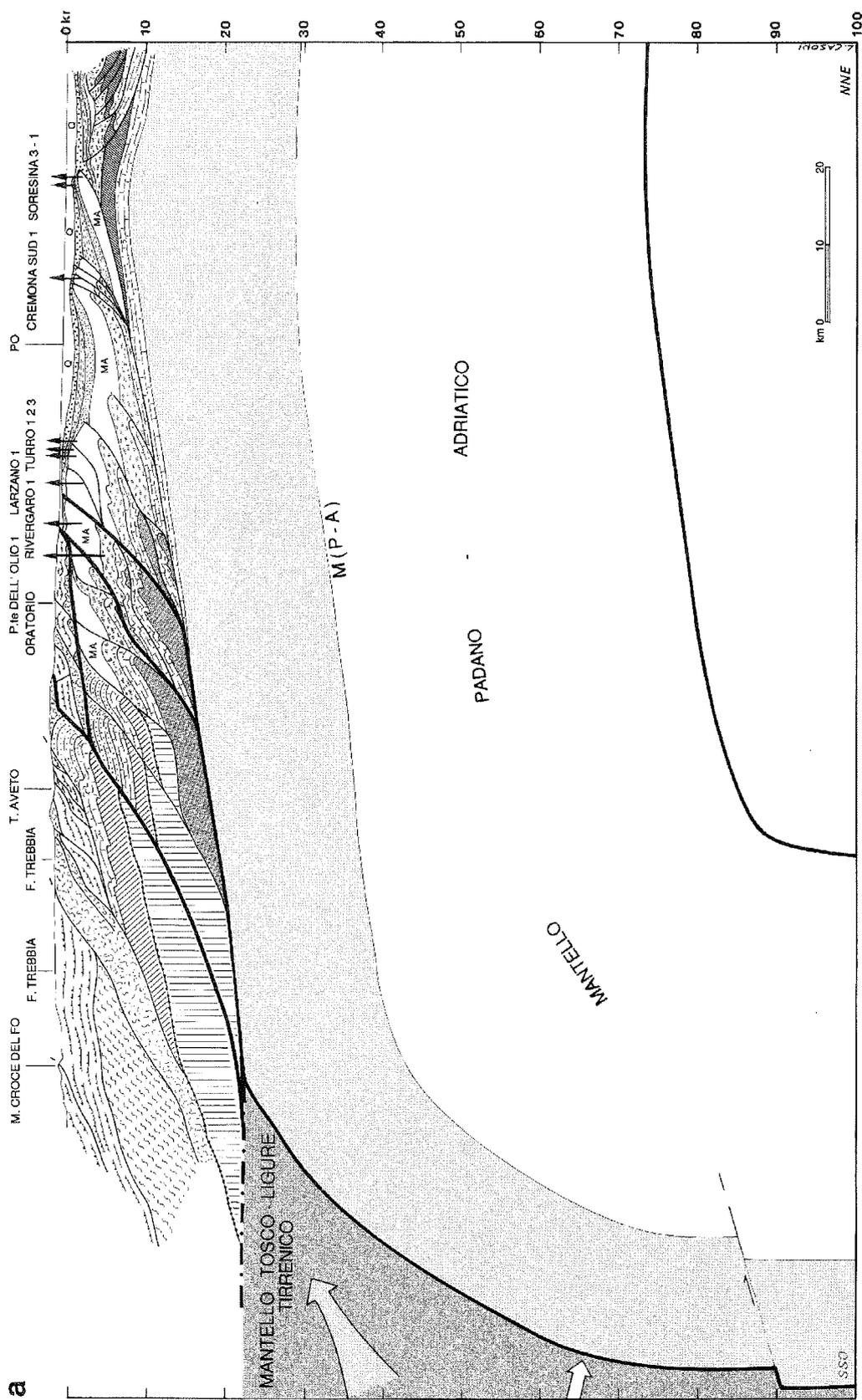


Fig. 4 - Sezione geologica attraverso la Catena Appenninica tra il bordo ligure e la Pianura Padana. Sezionea: tra Camogli e Cremona sud. Le linee grosse indicano la strutturazione fuori sequenza all'interno del fronte compressivo. N.B. nel sottosuolo padano in grigio scuro è indicato l'intervallo Paleogene-Miocene inferiore.

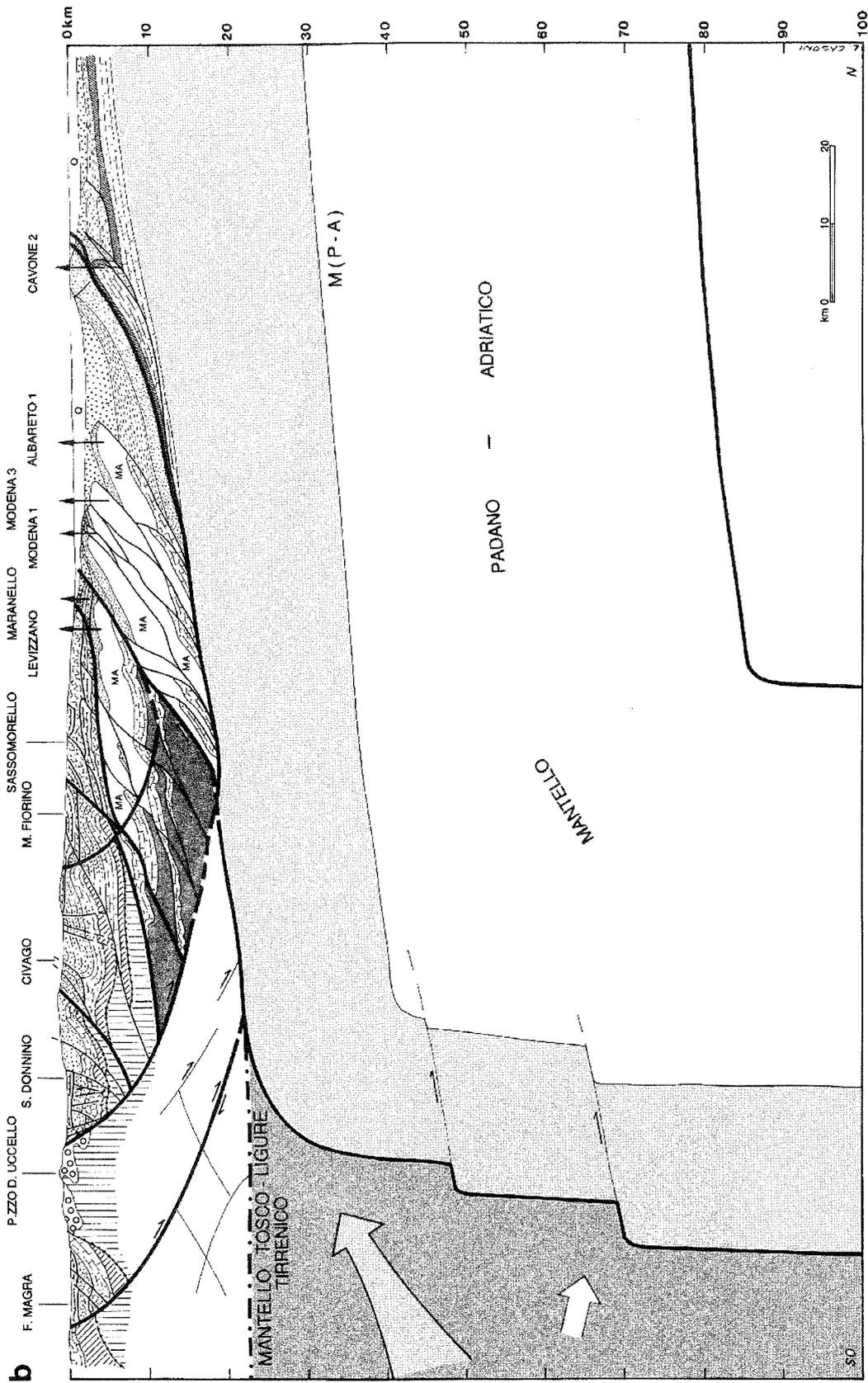


Fig. 5 - Sezione geologica attraverso la Catena Appenninica tra il bordo ligure e la Pianura Padana. Sezione b: fra Punta Ala (Sp) e Maranello (Mo). Nella sezione le linee grosse indicano la strutturazione distensiva e compressiva più recente, in fuori sequenza all'interno del fronte compressivo. N.B. nel sottosuolo padano in grigio scuro è indicato l'intervallo Paleogene-Miocene inferiore.

l'attività tettonica connessa agli accavallamenti più profondi, legati agli scollamenti e distacchi alla base delle coperture mesozoiche ed entro il basamento cristallino. La zona esterna padana è stata gradualmente disattivata a causa delle sconessioni meccaniche progressive fra i "thrusts" fuori sequenza e profondi della zona pedemontana e quelli più esterni entro la Pianura. Ciò anche a causa del confinamento determinato dall'ingente carico di sedimenti entro la zona padana.

La propagazione del ricoprimento liguride fino al margine padano e all'interno della stessa area padana (CASTELLARIN & PINI, 1989; CASTELLARIN *et al.*, 1986) è la più significativa conseguenza della strutturazione compressiva fuori sequenza del settore frontale dell'Appennino settentrionale. Infatti l'avanzamento delle unità liguridi e loro associazioni caotiche nelle zone esterne è da ricercare nella geometria e nella cinematica dei fronti di sovrascorrimento delle unità toscane e umbre. In particolare i fronti sollevati e sovrascorsi delle unità toscane (nel caso delle sezioni **a** e **b** il fronte di sovrascorrimento del Cervarola) costituiscono pronunciate anticlinali di rampa lungo il bordo SW della coltre liguride (Fig. 4 e 5). Tali fronti si sono in prevalenza propagati verso NE come sovrascorimenti ciechi trasmettendo il movimento all'intero corpo della coltre liguride che è stata così sospinta verso i settori più esterni della catena. La superficie basale della coltre liguride costituisce per lo più una estesa rampa a basso angolo che risale fino al bordo della pianura. Tale rampa può trovarsi anche in contropendenza soprattutto nei settori interni della catena ove in sismica, sono

state riconosciute (PALTRINIERI, comunicazione verbale) deboli inclinazioni verso N del contatto basale della coltre. In tal caso i movimenti possono essere innescati anche dalla gravità che può intensificare sensibilmente le componenti attive del ricoprimento.

L'attività e la mobilità del margine padano è stata significativa anche durante il Pleistocene con deformazioni talora intense soprattutto delle successioni pleistoceniche marine. Tale attività è persistita fino ai nostri giorni come può testimoniare la risalita di fluidi impregnati di fango e spesso contenenti idrocarburi da tempo nota (v. ad es. BORGIA *et al.*, 1986). Tali risalite sono spesso localizzate in corrispondenza delle uscite in superficie dei sovrascorimenti principali lungo il margine padano talora con emissioni parossistiche e grandi colate (con blocchi metrici di unità liguri) ad opera di vulcani di fango la cui attivazione può essere concomitante alle manifestazioni sismiche (terremoto di Maranello del 1501) (CAPOZZI *et al.*, 1994). Manifestazioni di questo tipo con vulcani di fango e *cold seeps* (emissione di fluidi "freddi") sono segnalate nelle zone tettonicamente attive e nei prismi di accrezione attuali (Barbados, v. ad es. MOORE & VROLIJK, 1992; VROLIJK *et al.*, 1991, *Fide* MOORE & VROLIJK, 1992).

LE INVERSIONI STRUTTURALI DISTENSIVE DEL RIFTING TOSCANO

Sono rappresentate con risalto morfostrutturale molto intenso nel settore posto a SE della linea Enza - Val di

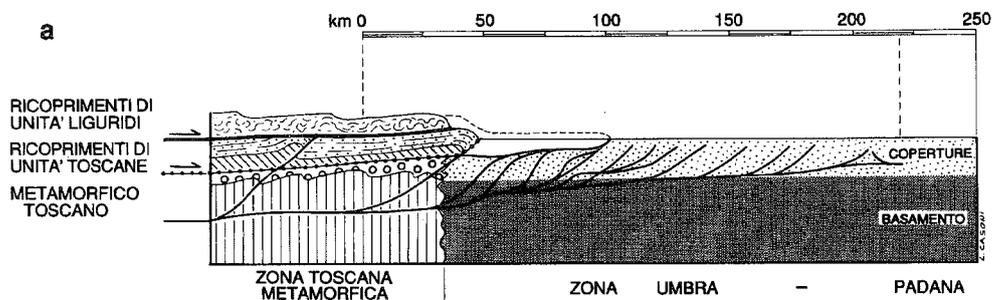


Fig. 6 - Tentativo di ricostruzione dell'ampiezza originaria della sezione **a** (Camogli-Cremona sud) (Fig. 4), antecedente alle compressioni della Fase padano-adriatica (spiegazioni nel testo).

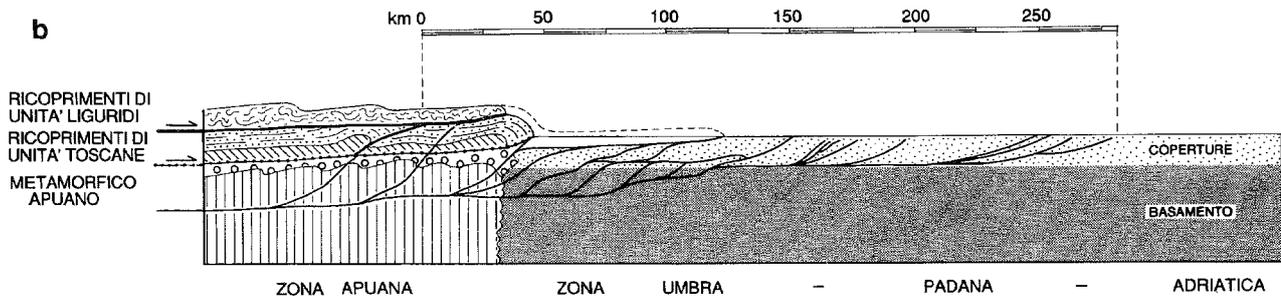


Fig. 7 - Tentativo di ricostruzione dell'ampiezza originaria della sezione **b** (Punta Ala-Maranello) (Fig. 5), antecedente alle compressioni della Fase padano-adriatica (spiegazione nel testo).

Taro ove la strutturazione compressiva degli elementi toscani risulta ampiamente riarrangiata dai movimenti distensivi che hanno più o meno estesamente invertito buona parte degli accavallamenti e sovrascorrimenti antecedenti. Nella sezione **b** la tettonica distensiva risulta caratterizzata da faglie listriche sintetiche che si approfondiscono nella crosta con andamenti a basso angolo, secondo gli schemi delle faglie di distacco, con meccanismi di taglio semplice anche in regime duttile analogamente a quanto proposto per la zona toscana e umbra da LAVECCHIA *et al.* (1984) e per la zona apuana più recentemente da CARMIGNANI & KLIGFIELD (1990) (v. anche CARMIGNANI *et al.*, 1993). La principale differenza rispetto alle precedenti interpretazioni è rappresentata dalla inclinazione preponderante verso NE (anziché verso SW) delle faglie sintetiche, inclinazione che è suggerita anche da ARTONI *et al.* (in questo volume), per la faglia listrica principale della sezione attraverso il Parmense. Questa geometria malgrado "l'apertura" verso l'Adriatico apparentemente sfavorevole può consentire un efficace assottigliamento crostale equivalente in ogni modo a quanto realizzabile con "aperture" in senso opposto, come provato nelle zone di *rifting* continentali assai più classiche della Toscana (v. ad es. il *Basin and Range* e la modellistica di WERNICKE, 1981, 1985). Inoltre simili andamenti delle superfici principali di scollamento e distacco distensivo, convergendo verso E alla base del prisma di accrezione hanno l'indubbio vantaggio di congiungere gli elementi tettonici scollati con il sistema di embricazione frontale. Verrebbe così stabilito un collegamento cinematico efficace tra l'area tettonica sorgente del Tirreno e della Toscana (a SW) con quella di accumulo tettonico (a NE). In tal modo verrebbe stabilito un collegamento meccanico e cinematico tra i differenti comparti strutturali della catena, collegamento che rappresenta uno dei problemi messi in campo negli studi più recenti di tettonica appenninica (v. ad es., LAVECCHIA & STOPPA, 1990; LOCARDI & NICOLICH, 1988; BERNINI *et al.*, 1992; BOCCALETTI *et al.*, 1992; ecc.).

I RACCORCIAMENTI CROSTALI

Nelle ricostruzioni che sono state tentate vengono presi in considerazione i raccorciamenti principalmente legati all'evoluzione compresa tra la fine del Tortonianiano e il Pleistocene connessa alle deformazioni della fase compressiva padano-adriatica. Poiché in base alle ricostruzioni tettoniche eseguite nel Tirreno settentrionale è stata riconosciuta una fase di *rifting* precoce attribuita al Burdigaliano superiore e al Miocene medio (BARTOLE *et al.*, 1992) ne deriva che il sistema strutturale accresciutosi durante gli eventi padano-adriatici deve incorporare anche questi accumuli precoci che dovrebbero essere inseriti nella porzione più interna della catena e dovrebbero interessare la strutturazione toscana ed eventualmente tosco-umbra.

Sezione **a**. Per questa ricostruzione si è utilizzata la classica sezione di PIERI & GROPPI (1981) Ponte dell'Olio - Cremona Sud - Soresina (n. 6) e i dati geofisici di CASSANO *et al.* (1986) nonché le aggiornate messe a punto integrate, geologiche e geofisiche, di LAUBSCHER *et al.*

(1992). In questa sezione (Fig. 6) i raccorciamenti nell'area padana sono stati valutati in circa 45 km. Ad un centinaio di km ammontano quelli all'interno della catena che si sono realizzati ad opera di una strutturazione in prevalenza fuori sequenza. Di questi ultimi una trentina sono stati ricostruiti all'interno delle successioni toscane (porzione interna della catena). Poiché la sezione attuale è di 92 km ne deriva che i raccorciamenti complessivi post fase subligure (che incorporano eventuali duplicazioni di enucleazione miocenica media, Fase toscana?) sono intorno al 58%.

Sezione **b**. I raccorciamenti connessi alla Fase padano-adriatica sono stati ricostruiti utilizzando le informazioni geologiche e geofisiche del sottosuolo pubblicate dall'AGIP e riguardano la classica sezione Cavone-Maranello-Levizzano. Per questa parte della sezione sono stati ottenuti raccorciamenti di circa una settantina di km. I raccorciamenti che caratterizzano la sezione della catena fino al margine pedemontano sono stati raggiunti in seguito ad una prevalente strutturazione fuori sequenza e sono stati valutati intorno a 110 km, di cui una trentina riguardano le duplicazioni fuori sequenza delle coperture e basamenti delle successioni toscane. All'interno di queste duplicazioni tettoniche vanno considerati anche i raccorciamenti realizzatisi durante le fasi precoci del *rifting* tirrenico (Bacino Corso) (Fase toscana?) che al momento non sono separabili né dalle strutture tettoniche antecedenti (Fase subligure) né da quelle susseguenti (Fase padano-adriatica). Poiché la sezione attuale all'interno della quale sono state eseguite le retro deformazioni è di circa 100 km ne deriva che il raccorciamento percentuale complessivo post fase subligure è del 64% circa (vedi Fig. 7).

INTERPRETAZIONI E CONCLUSIONI

L'interpretazione geologica profonda dell'Appennino settentrionale - nord occidentale qui presentata è basata sull'attività di un cuneo di mantello attivo (in risalita e propagazione verso NE) interposto tra la crosta orogenica delaminata e assottigliata e la litosfera adriatica subdotta. Tale proposta non rappresenta una novità: basterà ricordare le sintesi realizzate su questo argomento dai geologi appenninici da quelle più precoci e pionieristiche (BOCCALETTI *et al.*, 1971; BOCCALETTI & GUAZZONE, 1974; REUTER *et al.*, 1980; PANZA *et al.*, 1980) a quelle più moderne espresse in tempi più recenti (ROYDEN *et al.*, 1987; BECCALUVA *et al.*, 1989; DOGLIONI, 1991; SERRI *et al.*, 1991; MANTOVANI *et al.*, 1992; LAUBSCHER *et al.*, 1992; PATACCA *et al.*, 1993).

Tra i problemi maggiori che riguardano l'interpretazione va ricordata la differenza nella strutturazione tettonica a N e S della linea Enza-Taro. La linea Enza-Taro (BERNINI & PAPANI, 1988; BERNINI *et al.*, 1992) corrisponde ad uno sbarramento cinematico nella strutturazione del sistema Alpi liguri - Appennino settentrionale di rilevante importanza strutturale. A S di tale linea si apre il "ventaglio" distensivo che si propaga verso la Toscana e il Lazio. A N cessano le depressioni tettoniche (Graben e semi-Graben) del settore tosco-ligure e della Toscana. Queste differenze di stile tettonico sono particolarmente evidenti nelle sezioni geologiche: quella settentrionale

(sezione a, tra Camogli e Cremona) è del tutto priva di depressioni morfostrutturali in stridente contrasto con le condizioni della sezione localizzata poco più a S (sezione b, tra Punta Ala e Cavone).

Sulla base dei dati geologici e geofisici disponibili (CATTANEO *et al.*, 1986; FANUCCI & NICOLICH, 1986; FANUCCI *et al.*, 1989), non sembra inoltre possibile trasferire la strutturazione tettonica distensiva plio-pleistocenica della Toscana nella fascia marina del Mar Ligure: innanzitutto per questioni di spazio che si restringono progressivamente verso N; inoltre, come indicherebbero le ricostruzioni gravimetriche (CATTANEO *et al.*, 1986), all'interno di questo settore ci si può attendere l'eventuale prosecuzione verso N del Bacino di Viareggio che è stato riconosciuto con sicurezza al largo della costa spezzina, bacino che in base alle ricostruzioni sismostratigrafiche più recenti risulta essenzialmente riferibile al *rifting* del Messiniano terminale - Pliocene inferiore (BARTOLE *et al.*, 1992).

Le condizioni strutturali sintetizzate nella carta tettonica e nelle sezioni geologiche risultano dunque molto diverse a N e S della linea Enza-Taro. Esse sembrano determinate dai processi compressivi plio-pleistocenici a N di questa linea ove, dopo il Messiniano superiore, la strutturazione tettonica è dominata da compressioni N-S che si sono propagate fino al sistema frontale appenninico con ricoprimenti (unità liguri) e sovrascorrimenti ad andamento quasi E-W (PIERI & GROPPI, 1981, CASSANO *et al.*, 1986; LAUBSCHER *et al.*, 1992). Come conseguenza delle compressioni, gli elementi crostali superficiali, dopo il Messiniano superiore, hanno subito delaminazioni e intense duplicazioni tettoniche che hanno coinvolto l'intero sistema strutturale appenninico affiorante. Nelle fasi precoci dell'evoluzione (Messiniano superiore) depressioni tettoniche di tipo distensivo ("Graben") potevano essersi sviluppate nel settore del margine ligure N-tirrenico seguendo le modalità di strutturazione che si sono ampiamente sviluppate nella zona tosco-ligure e toscana, localizzate a S della linea Enza-Taro. In questo comparto infatti oltre all'attivazione tettonica per compressioni N-S si è accompagnata anche una sensibile componente di trasporto E-W alimentata dal *rifting* toscano. Questo *rifting* è stato determinato dall'indietreggiamento progressivo (vedi ad es. ROYDEN *et al.*, 1987; LAUBSCHER *et al.*, 1992 e SCANDONE, comunicazione verbale) dell'asse di inflessione della placca adriatica subdotta e verticalizzata ad opera del mantello "tirrenico" in risalita ed espansione verso NE.

Infine anche la debole sismicità del settore tosco-ligure con fuochi fino a circa 70 km di profondità che, in base alle ricostruzioni focali risulta connessa a meccanismi di sovrascorrimento (TOMMASELLI *et al.*, 1993) è in buon accordo con le ricostruzioni strutturali profonde qui proposte. Queste sono imperniate nella verticalizzazione della litosfera padano-adriatica che è sottoposta a compressioni in direzione NNE e NE ad opera del mantello ligure-tirrenico adiacente (Figg. 4 e 5).

In conclusione: 1) le ampie propagazioni dei sovrascorrimenti nelle zone frontali del sistema strutturale all'interno del prisma di "accrezione" tettonica del Messiniano e Plio-Pleistocene e 2) gli intensi collapsi della catena al di sopra della litosfera sprofondata ("subdotta"),

possono essere interpretati come le conseguenze superficiali della strutturazione profonda soprattutto del mantello astenosferico "Tirrenico" in rapida risalita e propagazione al di sopra della litosfera della Placca Adriatica.

BIBLIOGRAFIA

ARTONI A., BERNINI M., PAPANI G., VESCOVI P. & ZANZUCCHI G. (1994) - *Sezione geologica schematica Bonassola (SP) - Felino (PR)*. Questo volume.

BALLY A., BURBI L., COOPER C. & GHELARDONI R. (1988) - *Balanced sections and seismic reflections profiles across the Central Apennines*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 257-310.

BARTOLE R., TORELLI L., MATTEI G., PEIS D., & BRANCOLI G. (1992) - *Assetto stratigrafico-strutturale del Tirreno settentrionale: stato dell'arte*. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1991/1, 115-140.

BARTOLINI C., BERNINI M., CARLONI G.C., COSTANTINI A., FEDERICI P.P., GASPERI G., LAZZAROTTO A., MARCHETTI G., MAZZANTI R., PAPANI G., PRANZINI G., RAU A., SANDRELLI F., VERCESI P.L., CASTALDINI D. & FRANCAVILLA F. (1983) - *Carta Neotettonica dell'Appennino settentrionale. Note illustrative*. Boll. Soc. Geol. It., **191**, 523-549.

BECCALUVA L., BROTTU P., MACCIOTTA G., MORBIDELLI L., SERRI G. & TRAVERSA G. (1989) - *Caenozoic tectono-magmatic evolution and inferred mantle sources in the Sardo-Tyrrhenian area*. In: BORIANI A. *et al.* (Eds.), *The Lithosphere in Italy*, Acc. Naz. Lincei, 229-248.

BERNINI M. & PAPANI G. (1988) - *Alcune considerazioni sulla struttura del margine appenninico emiliano tra lo Stirone e l'Enza (e sue relazioni con il sistema del Taro)*. Acta Naturalia de l'"Ateneo Parmense", **23** (1987), 219-240.

BERNINI M., BOCCALETTI M., MORATTI G., PAPANI G., SANI F. & TORELLI L. (1992) - *Episodi compressivi neogenico-quadernari nell'area estensionale tirrenica nord-orientale. Dati in mare e a terra*. Mem. Soc. Geol. It., **45** (1990), 577-589.

BERNOULLI D., HEITZMANN P. & ZINGG A. (1990) - *Central and Southern Alps in Southern Switzerland. Tectonic evolution and first results of reflection seismics*. In: ROURE F., HEITZMANN P. & POLINO R. (Eds.), *Deep structures of the Alps*. Soc. Geol. It., Vol. Spec., **1**, 289-302.

BETTELLI G., BONAZZI V. & PANINI F. (1989) - *Schema introduttivo alla geologia delle Liguridi dell'Appennino modenese e delle aree limitrofe*. Mem. Soc. Geol. It., **39** (1987), 91-125.

BETTELLI G., BONAZZI U., FAZZINI P., GASPERI G., GELMINI R. & PANINI F. (1989) - *Nota illustrativa alla carta geologica schematica dell'Appennino Modenese e delle aree limitrofe* - Mem. Soc. Geol. It., **39** (1987), 487-498.

BIELLA G.C., GELATI R., MAISTRELLA M., MANCUSO M., MASSIOTTA P. & SCARASCIA S. (1987) - *The structure of the upper crust in the Alps - Appennines boundary region deduced from refraction seismic data*. Tectonophysics, **142**, 71-85.

BOCCALETTI M., ELTER P. & GUAZZONE G. (1971) - *Plate tectonic models for the development of the Western Alps and Northern Apennines*. Nature Physical Science, **234**, 108-111.

- BOCCALETTI M. & GUAZZONE G. (1974) - *Remnant arcs and marginal basins in the Cainozoic development of the Mediterranean*. Nature, **252**, 5478, 18-21.
- BOCCALETTI M. & COLI M. (1982) - *Carta strutturale dell'Appennino Settentrionale. Scala 1:250.000*. C.N.R., PFG, Sottoprogramma Modello Strutturale, Pubbl. **429**.
- BOCCALETTI M., COLI M., EVA C., FERRARI G., GIGLIA G., LAZZAROTTO A., MERLANTI F., NICOLICH R., PAPANI G. & POSTPISCHL D. (1985) - *Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines*. Tectonophysics, **117**, 7-38.
- BOCCALETTI M., CERRINA FERONI A., MARTINELLI P., MORATTI G., PLESI G. & SANI F. (1992) - *Miocene-Quaternary compressive events in the Tyrrhenian side of the Northern Apennines*. Annales Tectonicae, **6**, 2, 214-230.
- BORGIA C., ELMI C. & MARTELLI G. (1986) - *Hydrocarbons in the Tuscan - Emilian Apennines: origin and characters of mineralization*. Mem. Soc. Geol. It., **31**, 255-266.
- BOSSIO A., COSTANTINI A., LAZZAROTTO A., LIOTTA D., MAZZANTI R., MAZZEI R., SALVATORINI G. & SANDRELLI F. (1993) - *Rassegna delle conoscenze sulla stratigrafia del neautoctono toscano*. Mem., Soc., Geol., It., **49**, 17-98.
- BUNESS H. & GIESE P. (1990) - *A crustal section through the northwestern Italy*. In: FREEMAN R., GIESE P. & MUELLER ST. (Eds.), The European Geotraverse: integrative studies. Results from the fifth Study Centre ESF, 297-304.
- CAPOZZI R., MENATO V. & RABBI E. (1994) - *Manifestazioni superficiali di fluidi ed evoluzione tettonica recente del margine appenninico emiliano-romagnolo: indagine preliminare*. Atti Ticinensi Scienze della Terra, Serie speciale, **1**, 247-254.
- CARMIGNANI L. & KLIGFIELD R. (1990) - *The transition from compression to extension in mountain belts: evidence from the Northern Apennines core complex*. Tectonics, **9**, 1275-1303.
- CARMIGNANI L., FANTOZZI P.L., GIGLIA G., KLIGFIELD R. & MECCHERI M. (1993) - *Tettonica di crosta media e di crosta superiore nelle Alpi Apuane: un modello per l'interpretazione dei profili sismici a riflessione dell'Appennino settentrionale*. Studi Geol. Camerti, Vol. spec. **1992/2**, 211-225.
- CARRARO F., COLLO G., FORNO M.G., GIARDINO M., MARAGA F., PEROTTO A. & TROMPEANO D. (1994) - *Convegno "Rapporti tra Alpi e Appennino", Peveragno (CN)*. 31 maggio - 1° giugno 1994, riassunti, 25-26.
- CASSANO E., ANELLI L., FICHERA R. & CAPPELLI V. (1986) - *Pianura Padana, interpretazione integrata di dati geofisici e geologici*. 73° Congr. Soc. Geol. It., Roma, 27 pp.
- CASSINIS R. & SCARASCIA S. (in stampa) - *Examples of interpretative developments of seismic and gravity crustal seismic models*. EUROPROBE. Interplate Tectonics and Basin Dynamics. Opalikhha, May 1993.
- CASTELLARIN A. & VAI G.B. (1986) - *Southalpine versus Po plain apenninic arcs*. In: F.C. WEZEL (Ed.), The Origin of Arcs. Development in Geotectonics, **21**, 280-293, Elsevier.
- CASTELLARIN A. & PINI G.A. (1989) - *L'Arco del Sillaro: la messa in posto delle Argille Scagliose al margine appenninico padano* (Appennino bolognese). Mem. Soc. Geol. It., **39** (1987), 127-142.
- CASTELLARIN A., EVA C., GIGLIA G. & VAI G.B. (1986) - *Analisi strutturale del fronte appenninico-padano*. Giorn. Geol. (3), **47**, 1-2, 47-76.
- CATTANEO M., EVA C., MERLATI F. & TAGLIAFICO A. (1986) - *Anomalie gravimetriche del Mar Ligure*. Atti V Convegno G.N.G.T.S. Roma, 17-19 Novembre, 669-680.
- CATTANEO M., EVA C., SOLARINO S., SPALLAROSSA D. & PAROLAI S. (1993) - *Struttura della litosfera e del mantello superiore delle Alpi occidentali e zone limitrofe derivata da inversione di onde P telesismiche*. Studi Geol. Camerti, Vol. spec. **1992/2**, 77-87.
- C.N.R. (1991) - *Structural Model of Italy, Scale 1:500.000*. Selca, Firenze.
- COLI M. (1993) - *Tettonica estensiva nell'Appennino settentrionale: spunti e problemi*. Studi Geol. Camerti, Vol. spec. **1992/2**, CROP 1-1A, 203-209.
- DALLAN NARDI L. & NARDI R. (1974) - *Schema stratigrafico e strutturale dell'Appennino settentrionale*. Mem. Accad. Lungenese di Sc. "G. Cappellini", **42**, 2-212.
- DEINO A., KELLER J.V.A., MINELLI G. & PIALLI G. (1993) - *Datazioni ⁴⁰Ar/³⁹Ar del metamorfismo dell'Unità di Ortano-Rio Marina (Isola d'Elba): risultati preliminari*. Studi Geol. Camerti/ Vol. spec. **1992/2**, 187-192.
- DOGLIONI C. (1991) - *A proposal of kinematic modelling for W-dipping subductions. Possible applications to the Tyrrhenian-Apennines system*. Terra Nova, **3**, 4, 423-434.
- DONDI L. & D'ANDREA M.G. (1986) - *La Pianura Padana e Veneta dall'Oligocene superiore al Pleistocene*. Giorn. Geol., (3), **48**, 1/2, 197-225.
- DONDI L., MOSTARDINI F. & RIZZINI A. (1982) - *Lessico delle Formazioni del bacino padano orientale*. In: CREMONINI G. & RICCI LUCCHI F. (a cura di), Guida alla Geologia del margine appenninico padano. Congr. 1° Centenario, Soc. Geol. It., 205-236.
- ELTER P. (1972) - *La zona ofiolitifera del Bracco nel quadro dell'Appennino settentrionale. Introduzione alla geologia delle Liguridi*. 66° Congr. Soc. Geol. It., Guida alle escursioni, Pisa, 5-35.
- FANUCCI F. & NICOLICH R. (1986) - *Il Mar Ligure: nuove acquisizioni sulla natura, genesi ed evoluzione di un "bacino marginale"*. Mem. Soc. Geol. It., **27** (1984), 97-110.
- FANUCCI F., EVA C., CATTANEO M., FIRPO M. & PICCAZZO M. (1989) - *Tettonica e morfogenesi olocenica in Mar Ligure*. Mem. Soc. Geol. It., **42**, 221-227.
- GABIN R. (1972) - *Resultats d'une etude de sismique reflexion dans le Canal de Corse, et de sondeur de vase dans le bassin toscan*. Marine Geology, **13**, 267-286.
- GENNESSEAU M., REHAULT P. & THOMAS B. (1989) - *La marge continentale de la Corse*. Bull. Soc. Geol. France, **8**, (2), 339-351.

- GIESE P. (1990) - *Recent crustal structure and young tectonics along the EGT - Segment Southern Alps - Ligurian Sea: an attempt of a balancing study*. In: FREEMAN R., GIESE P. & MUELLER ST. (Eds.), *The European Geotraverse: integrative studies. Results from the Fifth Study Centre, ESF*, 305-310.
- GIGLIA G. (1974) - *L'insieme Corsica-Sardegna ed i suoi rapporti con l'Appennino settentrionale: rassegna dei dati cronologici e strutturali*. Rend. Sem. Fac. Scienze Cagliari, Suppl. V, **13**, 245-275.
- KLIGFIELD R., HUNZIKER J., DALLMEYER R.D. & SCHAMEL ST. (1986) - *Dating of deformation phases using K-Ar and Ar⁴⁰/Ar³⁹ techniques*. Results from the Northern Apennines. J. Struct. Geol., **8**, 781-798.
- LAUBSCHER H.P. (1990) - *Deep seismic data from Central Alps, mass distribution and their kinematics*. In: *Deep Structure of the Alps*. Soc. Geol. It., vol. spec. **1**, 335-343.
- LAUBSCHER H.P., BIELLA G.C., CASSINIS R., GELATI R., LOZEJ A., SCARASCIA S. & TABACCO I. (1992) - *The collisional knot in Liguria*. Geologische Rundschau, **81/2**, 275-289.
- LAVECCHIA G., MINELLI G. & PIALLI G. (1984) - *L'Appennino Umbro-Marchigiano: tettonica distensiva e ipotesi di sismogenesi*. Boll. Soc. Geol. It., **103**, 467-476.
- LAVECCHIA G. & STOPPA F. (1990) - *The Tyrrhenian zone: a case of lithosphere extension control of intra-continental magmatism*. Earth and Planetary Science Letters, **99**, 336-350.
- 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.
- MANTOVANI E., ALBARELLO D., BABBUCCI D. & TAMBURELLI C. (1992) - *Recent geodynamic evolution of the Central Mediterranean Region*. Dipart. Sc. Terra, Univ. Siena, 1-88, Tipografia Senese.
- MARABINI S. & VAI G.B. (1985) - *Analisi di facies e macrotettonica della Vena del Gesso in Romagna*. Giorn. Geol., (2), **42**, 1, 165-180.
- MOORE C. & VROLIJK P. (1992) - *Fluids in Accretionary Prisms*. Rev. of Geophysics, **30**, 113-135.
- PANZA G.F., CALCAGNILE G., SCANDONE P. & MUELLER ST. (1980) - *La struttura profonda dell'area mediterranea*. "Le Scienze", **141**, 60-69.
- PATACCA E. & SCANDONE P. (1986) - *Struttura geologica dell'Appennino emiliano-romagnolo: ipotesi sismotettoniche*. Atti Sem. Prog. Cart. Geol., Reg. Emilia Romagna, 102-117.
- PATACCA E., SARTORI R. & SCANDONE P. (1992) - *Tyrrhenian Basin and Apenninic arcs: kinematic relations since Late Tortonian times*. Mem. Soc. Geol. It., **45** (1990), 425-451.
- PATACCA E., SARTORI R. & SCANDONE P. (1993) - *Tyrrhenian Basin and Apennines. Kinematic evolution and related dynamic constraints*. In: BOSCHI E. et al. (Eds.), *Recent Evolution and Seismicity of the Mediterranean Region*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 161-171.
- PIERI M. (1983) - *Three seismic profiles through the Po Plain*. In: BALLY A. (Ed.), *Seismic expressions of structural styles*. AAPG Studies in Geology, Series 15, **3**, 3.2.2, 25-28.
- PIERI M. & GROPPI G. (1981) - *Subsurface geological structure of the Po Plain*. C.N.R., PFG, Sottoprogramma "Modello Strutturale", pubbl. **414**.
- POLINO R., DAL PIAZ G.V. & GOSSO G. (1990) - *Tectonic erosion of the Adria margin and accretionary processes for the Cretaceous orogeny of the Alps*. In: ROURE F., HEITZMANN P. & POLINO R. (Eds.), *Deep structures of the Alps*. Soc. Geol. It., Vol. Spec., **1**, 345-367.
- REUTTER K.J., GIESE P. & CLOSS H. (1980) - *Lithospheric split in the descending plate: observations from the Northern Apennines*. Tectonophysics, **64**, T1-T9.
- RICCI LUCCHI F. (1986) - *The Oligocene to Recent foreland basins of the Northern Apennines*. Spec. Publ. Int. Ass. Sediment., **8**, 105-139.
- 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.
- SCARASCIA S. & CASSINIS R. (1993) - *Profili sismici a grande angolo esplorati in prossimità del tracciato del Profilo CROP 01: una raccolta dei risultati e qualche revisione*. Studi Geol. Camerti, Vol. spec. **1992/2**, 17-26.
- SERRI G., INNOCENTI F., MANETTI P., TONARINI S. & FERRARA G. (1991) - *Il magmatismo neogenico-quadernario dell'area Tosco-Laziale-Umbra: implicazioni sui modelli di evoluzione geodinamica dell'Appennino settentrionale*. Studi Geol. Camerti, Vol. spec. **1991/1**, 429-463.
- TOMASELLI A., PASTORE S., AUGLIERA P. & EVA C. (1993) - *Sismicità dell'Appennino nord-occidentale*. Studi Geol. Camerti, Vol. spec. **1992/2**, 35-42.
- TREVISAN L. (1952) - *Sul complesso sedimentario del Miocene superiore e Pliocene della Val di Cecina e sui movimenti tettonici tardivi in rapporto ai giacimenti di lignite e di salgemma*. Boll. Soc. Geol. It., **70**, 65-78.
- VAI G.B. (1988) - *A field trip guide to the Romagna Apennine geology, The Lamone Valley*. In: DE GIULI C. & VAI G.B. (Eds.), *Fossil Vertebrates in the Lamone Valley Romagna Apennines*, 7-37, Lithographica Faenza Publisher.
- VAI G.B. (1989) - *Migrazione complessa del sistema fronte deformativo - avanfossa - cernice periferico: il caso dell'Appennino settentrionale*. Mem. Soc. Geol. It., **38**, 95-105.
- VANOSI M., PEROTTI C.R. & SENO S. (1994) - *The Maritime Alps arc in the Ligurian and Tyrrhenian systems*. Tectonophysics, **230**, 75-89.
- WERNICKE B. (1981) - *Low angle normal faults in the Basin and Range province: nappe tectonics in an extending orogen*. Nature, **291**, 645-648.
- WERNICKE B. (1985) - *Uniform sense of normal simple*

shear of the continental lithosphere. Can. J. Earth Sci., **22**, 108-125.

ZANZUCCHI G. (1980) - *I lineamenti geologici dell'Appennino parmense - Note illustrative alla Carta e Sezioni geologiche della Provincia di Parma e zone limitrofe - (1:100.000)*. Vol.

dedic. a S. Venzo, Università di Parma, Grafiche Step Editrice, Parma, 201-233.

ZITELLINI N., TRINCARDI F., MARANI M. & FABBRI A. (1986) - *Neogene tectonics of the Northern Tyrrhenian sea*. Giorn. Geol., (3), **48**, 1-2, 25-40.