

**ANALISI FRATTALE E PROCESSI DI CRESCITA DI POPOLAZIONI  
DI FAGLIE SINSEDIMENTARIE IN APPENNINO CENTRALE**

INDICE

RIASSUNTO	pag. 237
ABSTRACT	" 237
INTRODUZIONE	" 237
ANALISI DEI PROCESSI DI CRESCITA DELLE FAGLIE SINSEDIMENTARIE	" 238
CONCLUSIONI	" 241
BIBLIOGRAFIA	" 241

RIASSUNTO

In questo lavoro vengono presentati i risultati di uno studio relativo ai meccanismi di crescita di popolazioni di faglie sinsedimentarie presenti nell'Appennino umbro-marchigiano nell'ambito della copertura sedimentaria cretacico-paleogenica del margine afro-adriatico.

ABSTRACT

In recent years, systematic studies of fault zone characteristics in situ have greatly improved our knowledge of the relationships governing their growth, spatial distribution, and geometric complexity.

This work is a contribution to the understanding of fault growth processes within populations of synsedimentary faults affecting the "passive" margin succession of the Umbria-Marche Apennines.

**PAROLE CHIAVE:** Faglie sinsedimentarie, analisi frattale, processi di linkage.

**KEY WORDS:** Synsedimentary faults, fractal analysis, linkage processes.

INTRODUZIONE

Recenti studi a carattere strutturale e stratigrafico-sedimentologico effettuati sulla successione umbro-marchigiana (CELLO e COPPOLA, 1989; CELLO *et alii*, 1996; TAVARNELLI, 1996; MARCHEGIANI *et alii*, submitted) hanno rilevato la presenza di un'attività tettonica sinsedimentaria che, a scala dell'intero bacino, si manifesta con variazioni laterali di spessore nell'ambito sia delle sequenze giurassiche che cretacico-paleogeniche. Datazioni micropaleontologiche di dettaglio hanno inoltre evidenziato che i livelli di chiusura delle principali faglie sinsedimentarie sono collocabili in un intervallo di attività che può essere riferito,

con buona approssimazione, all'inizio del Cretacico inferiore e fino all'Eocene medio, in concomitanza con la scomparsa in tutta l'area di variazioni apprezzabili negli spessori delle sequenze oligo-mioceniche.

I dati strutturali, sedimentologici e biostratigrafici acquisiti nel corso di questo studio suggeriscono quindi che importanti fenomeni di subsidenza differenziata sono stati attivi, in questo settore appenninico, sia durante la fase giurassica di *rifting* che durante l'evoluzione *post-rift* del margine afro-adriatico (MARCHEGIANI *et alii*, 1996/97, questo volume). Nella Fig. 1 è rappresentata, in una mappa palinspastica della porzione centro-settentrionale dell'area umbro-marchigiana, e la distribuzione areale degli spessori delle sequenze sedimentarie così come sono state determinate in base ai dati delle sezioni stratigrafiche studiate e sulla scorta dei dati bibliografici disponibili (CHAN *et alii*, 1985, MONTANARI, 1988; MARCHEGIANI *et alii*, 1996/97, questo volume). Questa ricostruzione mostra come i massimi spessori relativi alle formazioni della Maiolica, delle Marne a Fucoidi e della Scaglia, siano localizzati principalmente lungo zone ad andamento NNW-SSE che, presumibilmente, rappresentano aree depresse all'interno del bacino pelagico. Queste aree sono peraltro bordate da diverse faglie normali sinsedimentarie che hanno operato uno stretto controllo deposizionale localizzando i flussi calcarenitici e detritici ai margini dei singoli bacini pelagici.

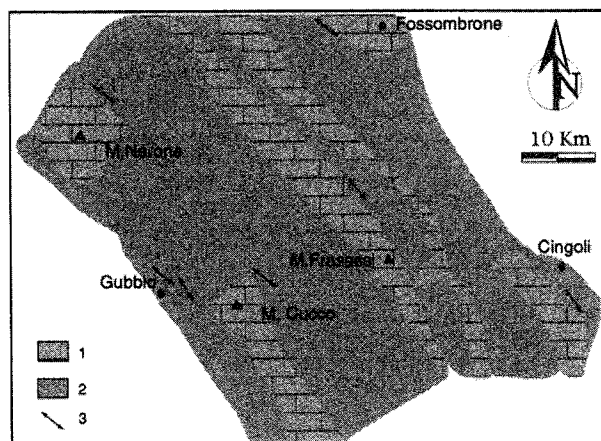


Fig. 1 - Distribuzione areale degli spessori relativi alle sequenze *post-rift* nella porzione settentrionale dell'area umbro-marchigiana (CHAN *et alii*, 1985, MONTANARI, 1988; MARCHEGIANI *et alii*, 1996/97, questo volume). (Legenda: 1: aree con spessori ridotti; 2: aree con spessori elevati; 3: direzione media delle mesostrutture sinsedimentarie).

Il confronto tra questi dati e quelli relativi alla distribuzione delle *facies* giurassiche nell'area umbro mar-

(\*) Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Camerino

chigiana (MARCHEGIANI *et alii*, 1998) mostra che le zone in parola corrispondono alle originarie aree bacinali giurassiche e che pertanto esiste una stretta correlazione tra gli eventi distensivi che hanno agito nelle fasi di *syn-* e *post-rift*. Quest'ultima ipotesi trova riscontro nell'interpretazione di MONTANARI (1988) il quale mette in relazione le mineralizzazioni cuprifere di età cretaco-paleogenica localizzate all'interno della Scaglia rossa con processi di riattivazione delle faglie giurassiche e con la conseguente risalita di acque mineralizzate di provenienza profonda (dalle Evaporiti di Burano e/o dal basamento cristallino). E' quindi plausibile ipotizzare che lo sviluppo di strutture sinsedimentarie sia avvenuto in risposta a processi di riattivazione di faglie crostali generatesi durante la fase *syn-rift*; detti processi sarebbero quindi responsabili della creazione di aree depresse associate ad una deformazione compartimentalizzata lungo pre-esistenti strutture di rilevanza regionale (MARCHEGIANI *et alii*, submitted).

Lo studio di campagna relativo alla qualificazione delle strutture pre-orogeniche è stato effettuato attraverso l'identificazione e l'analisi delle strutture maggiori (a scala regionale o cartografica) e tramite la caratterizzazione geometrica e cinematica delle strutture presenti alla scala mesoscopica. Entrambe le tipologie di strutture sono riferibili a faglie sinsedimentarie e cioè ad elementi strutturali che hanno agito contemporaneamente ai processi deposizionali e che molto spesso ne hanno controllato l'attivazione e lo sviluppo nel tempo. Le mesofaglie esaminate presentano, in generale, caratteristiche di "semi-ductile structures" (*sensu* DAVISON, 1987) e pertanto risultano ben caratterizzate rispetto ai più recenti elementi deformativi neogenici.

Alla scala mesoscopica il riconoscimento di dette strutture risulta spesso agevolato dalla completa visibilità dell'elemento in esame; ciò ha permesso di definirne le caratteristiche geometriche peculiari e di ricavare con precisione i valori relativi al rigetto ed alla lunghezza misurati in affioramento. La qualificazione di tali faglie come strutture sinsedimentarie permette inoltre di definirne temporalmente il *range* di attività e di correlarle con singoli eventi deformativi.

#### ANALISI DEI PROCESSI DI CRESCITA DELLE FAGLIE SINSEDIMENTARIE

Negli ultimi anni, in diversi campi delle Scienze della Terra, ed in particolare nella Geologia Strutturale, l'analisi frattale si è imposta come strumento matematico e statistico capace di descrivere, in maniera quantitativa, sia la geometria delle strutture geologiche che la loro distribuzione nello spazio. L'analisi frattale si rende indispensabile qualora si vogliano caratterizzare geometricamente elementi geologici complessi o comunque non definibili da geometrie riconducibili a forme semplici (punti, linee, piani e solidi).

La caratteristica principale di una struttura frattale, è che non mostra variazioni geometriche e di forma se analizzata a scale diverse e, quindi, ogni singolo componente costituisce una copia ridotta dell'insieme complessivo.

Tali proprietà hanno portato a riconoscere la natura frattale di molti fenomeni ed oggetti geologici; nel campo della Geologia Strutturale è stata riconosciuta la natura frattale del rapporto tra il rigetto e le dimensioni di una faglia (SCHOLZ & COWIE, 1990; COWIE & SCHOLZ, 1992) della distribuzione dei frammenti rocciosi compresi all'interno di una breccia di faglia (SAMMIS *et alii*, 1987), del *pattern* di superficie di sistemi di fratture (BARTON & LARSEN, 1985) nonché della crescita stessa di sistemi di discontinuità strutturali attraverso processi di *linkage* (CARTWRIGHT *et alii*, 1996).

L'osservazione che diversi oggetti e fenomeni geologici possono considerarsi frattali implica che la loro crescita obbedisce a leggi di potenza le quali ne regolano i processi fondamentali. La definizione di queste leggi e del loro *range* di validità, risulta quindi essenziale per prevedere e quantificare assetti geometrici e processi geologici utilizzando *set* di dati incompleti o rappresentativi solo di un ristretto spettro di scale (si veda anche CELLO *et alii*, 1996/97, questo volume).

Nel presente lavoro sono illustrati e discussi i principali risultati ottenuti dall'analisi frattale di popolazioni di faglie sinsedimentarie che interessano il settore umbro-marchigiano della catena appenninica allo scopo di riconoscere le modalità di crescita di queste tipologie di strutture. L'analisi è stata effettuata principalmente su faglie mesoscopiche appartenenti allo stesso intervallo temporale (Cretaco-Eocene medio) e riferibili quindi alla fase *post-rift* di evoluzione del margine afro-adriatico. I dati raccolti si riferiscono a due caratteristiche dimensionali delle strutture: (1) il rigetto misurato sul piano di faglia (*d*) e (2) l'estensione 'verticale' del piano di faglia (*h*) (Fig. 2).

La prima dimensione varia, nelle strutture analizzate, da pochi centimetri a qualche metro ed è riferibile al valore medio osservabile sul terreno; la seconda, misurabile per un numero minore di strutture, varia da poche decine di centimetri a diversi metri e rappresenta la lunghezza di ogni singola faglia misurata in affioramento. La maggior parte delle misurazioni è stata effettuata direttamente sul terreno e, solo in qualche caso, è stato necessario ricorrere ad una stima su base fotografica attraverso tecniche di *image analysis* su immagini computerizzate.

I risultati ottenuti sono stati accorpati in due *dataset* (popolazioni di faglie P1 e P2) che raccolgono rispettivamente le faglie che interessano: (i) le formazioni della Scaglia rossa e delle Marne a Fucoidi, (ii) quella della Maiolica. I diagrammi logaritmici di Fig. 3 evidenziano le relazioni di scala tra il rigetto e la lunghezza di ogni singola struttura. Dagli stessi grafici si evidenzia inoltre una buona correlazione tra le due dimensioni, sia per i dati relativi alla Scaglia Rossa ( $r^2_{(P1)} = 0.77$ ) che per quelli relativi alla Maiolica ( $r^2_{(P2)} = 0.93$ ); questi dati confermano che rigetto e lunghezza sono quindi relazionabili con una legge di tipo esponenziale (*power-law relation*) valida su almeno tre ordini di grandezza (0,01 m - 10m).

La maggiore dispersione delle coppie di valori *d/h* relative al *dataset* della popolazione P1, può essere messa in relazione con la scarsa maturità del sistema di faglie in parola. I fenomeni di 'linkage' che controllano i processi di crescita che coinvolgono più segmenti di faglia nel-

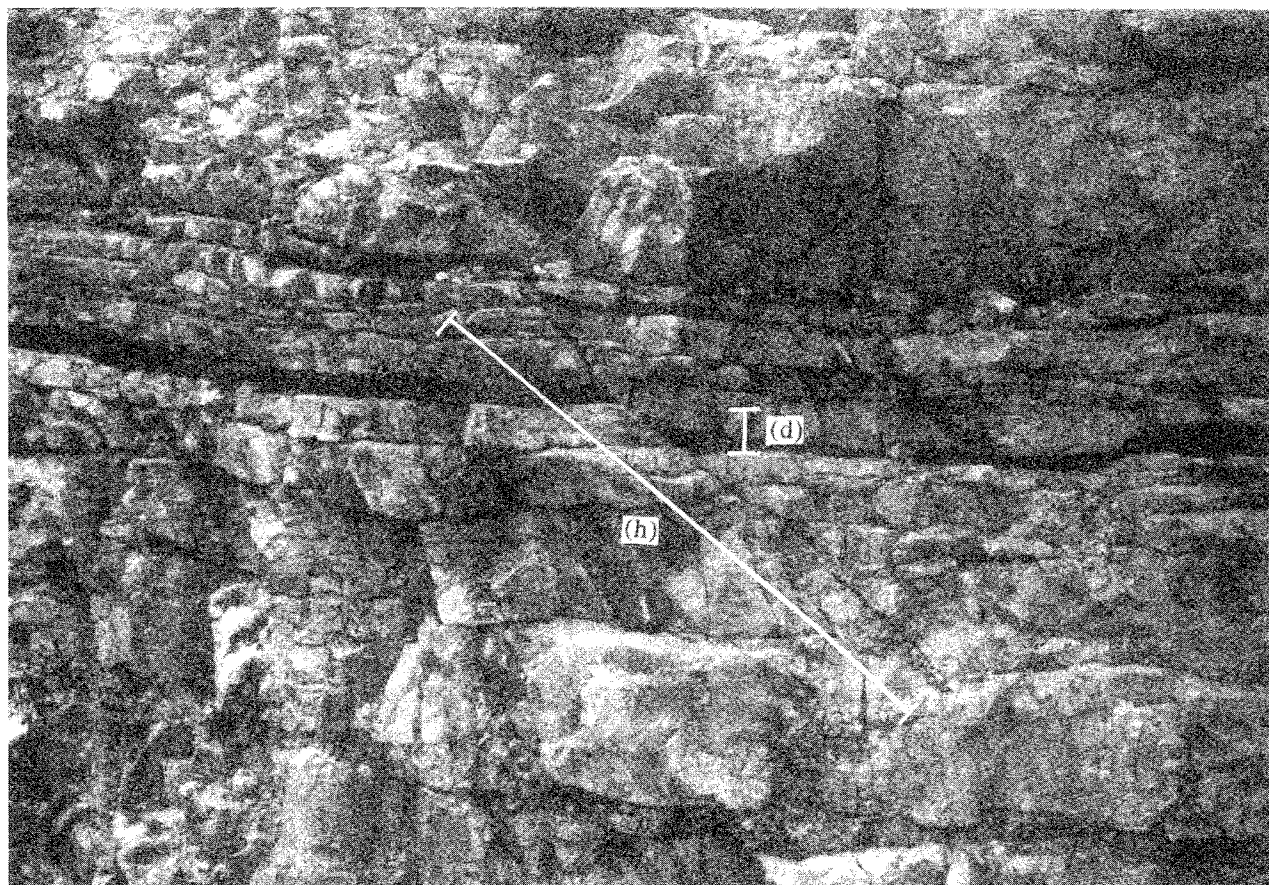


Fig. 2 - Faglia normale sinsedimentaria con rigetto centimetrico nella Maiolica nodulare (h=lunghezza del piano; d=rigetto).

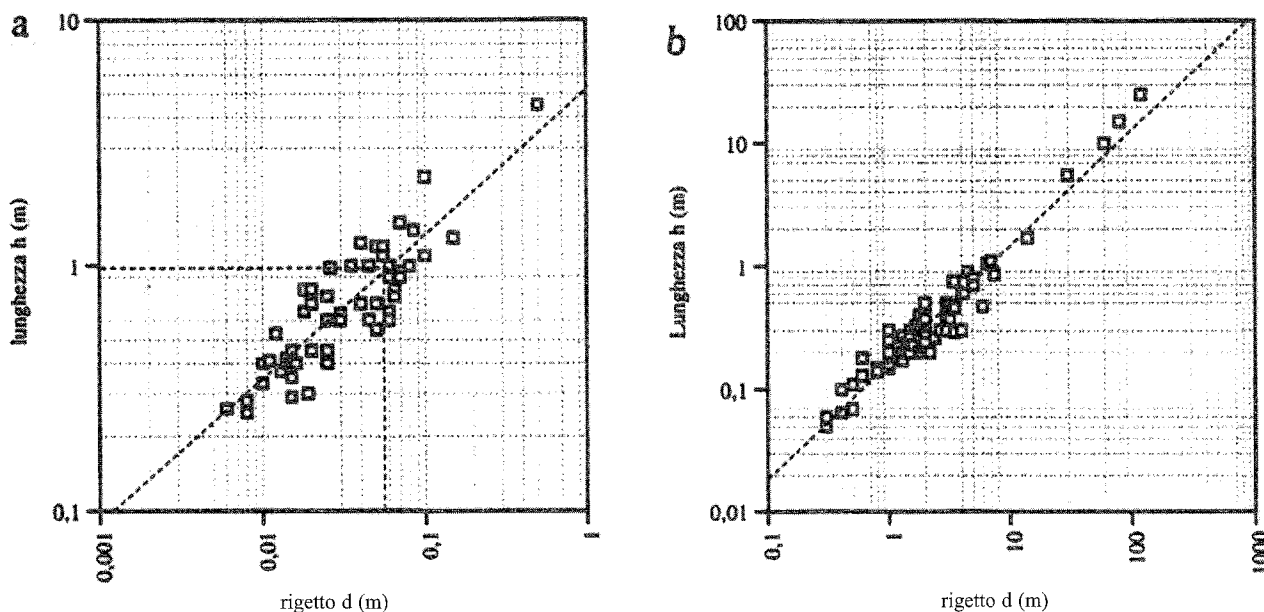


Fig. 3 - Diagrammi bilogarithmici d-h per le popolazione P1 (a) e P2 (b).

l'ambito di un sistema, producono infatti un aumento di lunghezza senza però produrre un aumento proporzionale del rigetto, che rimane perciò inalterato e pari a quello di un segmento singolo (CARTWRIGHT *et alii*, 1995). Solo quando si arriva alle fasi finali di crescita il rigetto cumulato su piani di faglia *linked* conduce a valori di h e d che risiedono lungo la retta di correlazione (Fig. 4); a questo punto il sistema sarà cinematicamente stabile e potrà

quindi definirsi strutturalmente maturo (CARTWRIGHT *et alii*, 1996; CELLO, 1997).

I dati relativi al rigetto ed alla lunghezza di ogni singola faglia sono stati anche plottati cumulativamente nei diagrammi di Fig. 5 dove si può osservare che la proporzione di faglie con rigetti o lunghezze 'piccole' e 'grandi' tende ad essere la stessa confermando così il concetto

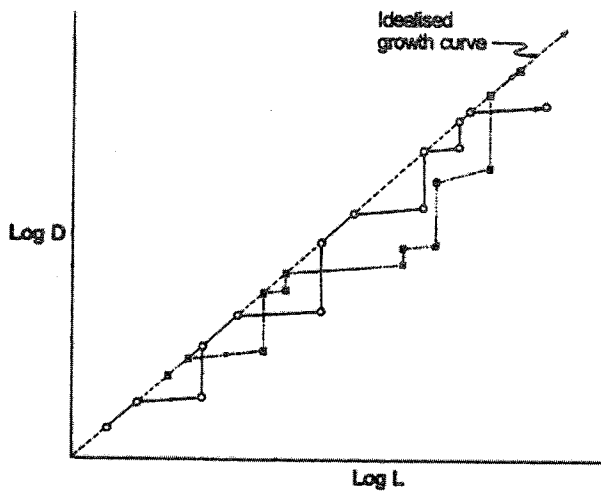


Fig. 4 - Dispersione dei valori D-L prodotta da fenomeni di *linkage*. Viene mostrata la crescita di due faglie in seguito ad un processo continuo di *linkage* su di un diagramma Log D-Log L; in ogni istante della crescita, la coalescenza di singoli segmenti di faglia, produce un aumento di L senza che si produca un proporzionale aumento di D. Ciò porta ad una dispersione dei valori plottati al di sotto della retta di correlazione lineare (*idealised growth curve*) (da CARTWRIGHT *et alii*, 1996).

di *'self-similarity'* su di un ampio spettro di scale (si veda anche NEEDHAM & YELDING, 1996). In questo caso è possibile allora estrapolare la relazione di scala così ricavata anche a faglie che hanno dimensioni diverse (maggiori o minori) di quelle osservabili direttamente sul terreno.

Dal diagramma di Fig. 5 si nota anche che il calcolo della dimensione frattale non può essere effettuato sull'intero *range* di valori plottati e che un valore rappresentativo della pendenza delle rette di correlazione può essere calcolato solo per la porzione centrale del grafico, dove il coefficiente di correlazione è molto elevato ( $0.92 > r^2 > 0.98$  per la P1 e  $0.89 > r^2 > 0.98$  per la P2).

I grafici di Fig. 6 mostrano valori di pendenza delle rette di correlazione che sono variabili tra 0,58 (per la formazione della Scagliarossa) e 1,28 (per la formazione della Maiolica); detti valori suggeriscono che la distribuzione delle faglie presenti all'interno della popolazione P2 è frattale, mentre la popolazione P1 sembra essere non frattale (e/o multifrattale). Per le mesostrutture che interessano la formazione della Scaglia rossa, si osserva infatti un andamento irregolare dei valori di *d* e *h*, marcato da numerosi flessi associati a brusche variazioni nella pendenza delle rette di correlazione (Fig. 5a).

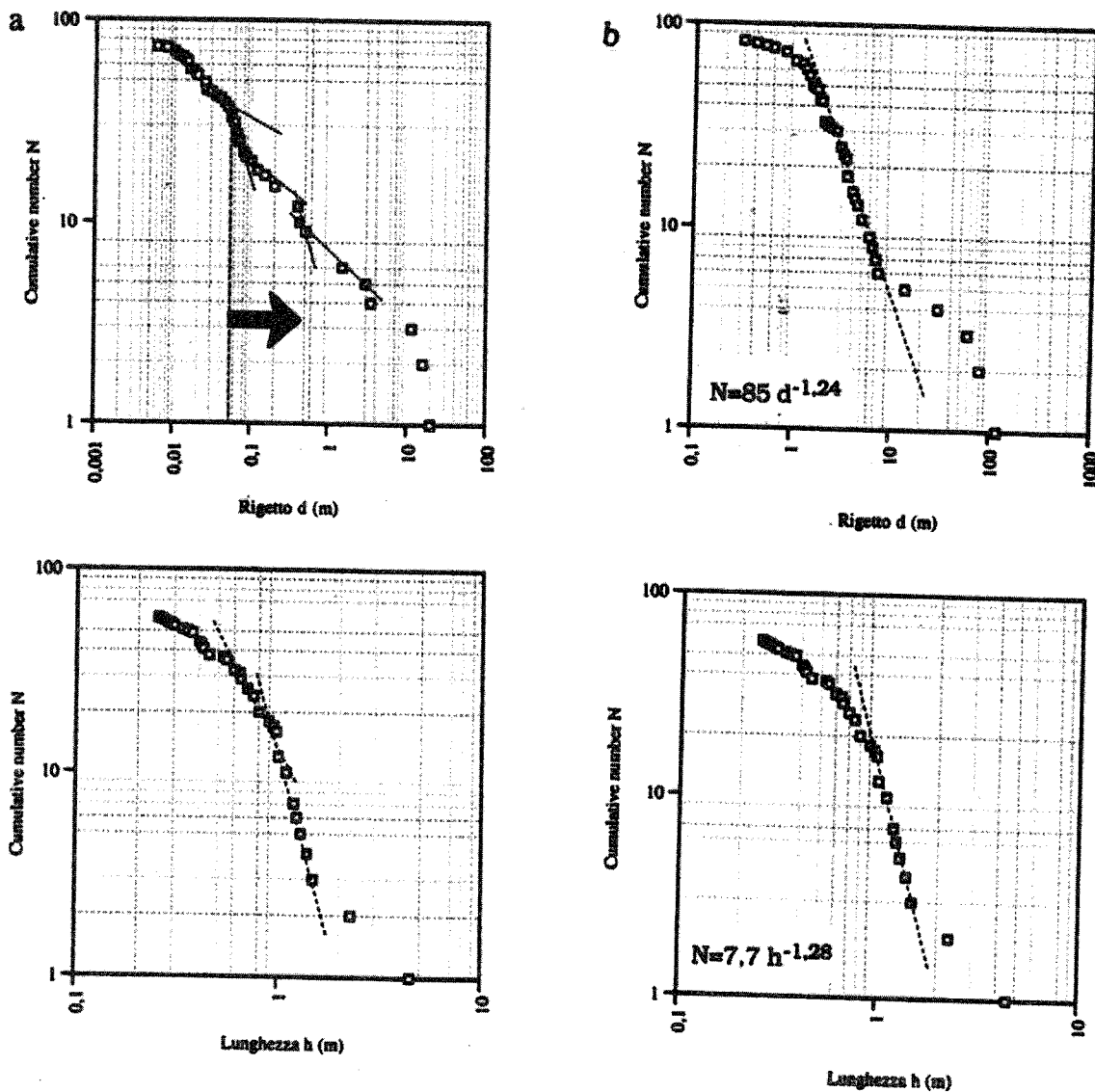


Fig. 5 - Diagrammi bilogaritmici d-N e h-N per le popolazioni P1 (a) e P2 (b).

Una distribuzione di frequenza di questo tipo suggerisce che la deformazione è distribuita in modo pervasivo e che i processi di *linkage* sono sviluppati in maniera non ancora sufficiente a localizzare lo *strain* su strutture regionali.

## CONCLUSIONI

I risultati dell'analisi quantitativa del sistema di faglie sinsedimentarie che interessa la successione umbro-marchigiana nell'intervallo temporale compreso tra il Cretacico inferiore e l'Eocene medio, consentono di riconoscere due diverse popolazioni (P1 e P2) che presentano un differente grado di maturità strutturale.

Questo risultato implica che il processo di crescita del sistema è caratterizzato da fenomeni di coalescenza parziale che sono registrati dalle "anomale" relazioni di scala che intercorrono tra le faglie della popolazione P1 (cioè le strutture più recenti analizzate). Dai dati rappresentati in Fig. 5a, sembra infatti emergere che l'incremento di pendenza ( $D=1,7$ ) delle rette di correlazione in corrispondenza dei flessi, possa essere dovuto a processi di *linkage* tra più segmenti (Fig. 6); fenomeni, questi, capaci di perturbare le "normali" correlazioni (*power law relations*) che descrivono la crescita di un singolo segmento di faglia.

L'osservazione che il grado di maturità del sistema diminuisce a mano a mano che si esaminano strutture più recenti (Fig. 5a) sembra infine suggerire che il processo

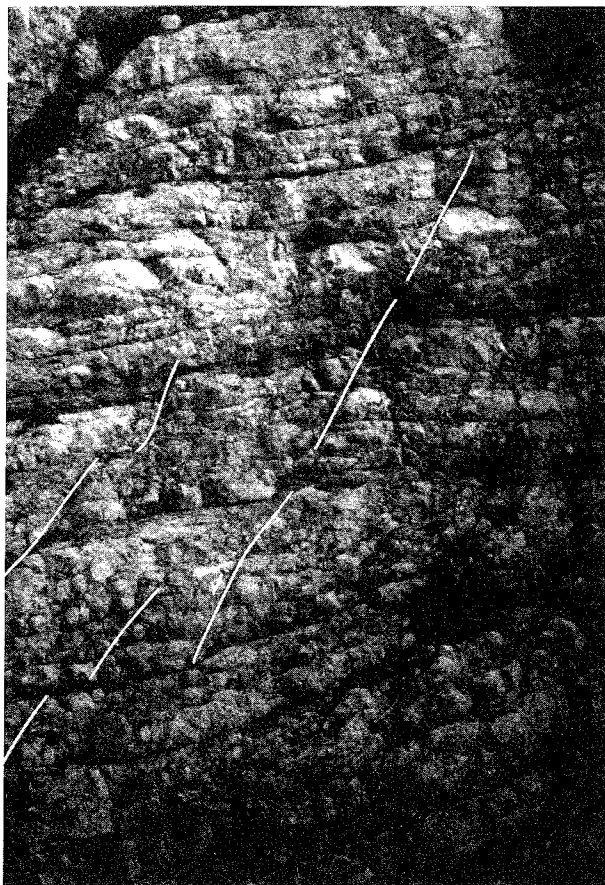


Fig. 6 - Linkage tra singoli segmenti di faglia presenti all'interno della formazione delle Marne a Fucoidi.

di crescita delle faglie normali appartenenti alla popolazione P1 sia rimasto "incompiuto" e che si sia definitivamente interrotto nel Paleogene, probabilmente a causa dei primi eventi tettonici connessi con le fasi iniziali dell'accrescimento del sistema a *thrust* centro-appenninico.

## BIBLIOGRAFIA

- BARTON C. C. & LARSEN E. (1985) - *Fractal geometry of two-dimensional fracture networks at Yucca Mountain, Southwest Nevada*. Proc. Int. Symp., "Fundamentals of Rock Joints", Bjorkkliden, Sweden, 77-84.
- CARTWRIGHT J. A., TRUDGILL B. & MANSFIELD C. S. (1995) - *Fault growth by segment linkage: an explanation for scatter in maximum displacement and trace length data from the Canyonlands Grabens of S. E. Utah*. J. Struct. Geol., **17**, 1319-1326.
- CARTWRIGHT J. A., MANSFIELD C. S. & TRUDGILL B. (1996) - *The growth of normal faults by segment linkage*. Geol. Soc. Special Publication, **99**, 163-177.
- CELLO G. (1997) - *Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy*. J. Struct. Geol., **19**(7), 945-953.
- CELLO G. & COPPOLA L. (1989) - *Modalità e stili deformativi nell'area anconetana*. Studi Geologici Camerti, **11**, 37-47.
- CELLO G., DEIANA G., GAZZANI D., MARCHEGIANI L., & MAZZOLI S. (1996) - *Riconoscimento ed analisi di alcune associazioni di strutture sinsedimentarie pre-orogeniche in Appennino Centrale*. Studi Geologici Camerti, volume speciale (1995/1): 323-335.
- CELLO G., MARCHEGIANI L., MAZZOLI S. & TONDI E. (1996/97) - *Analisi frattale di insiemi di faglie tardo-quadernarie in Appennino Centrale*. Studi Geologici Camerti, questo volume.
- CHAN L. S., MONTANARI A. & ALVAREZ W. (1985) - *Magnetic stratigraphy of the Scaglia Rossa: implications for syndepositional tectonics of the Umbria-Marche basin*. Riv. It. Pal. Strat., **91**/2: 219-258.
- COWIE P. A. & SCHOLZ C. H. (1992) - *Displacement-length scaling relationship for faults: data, synthesis and discussion*. J. Struct. Geol., **14**, 1149-1156.
- DAVISON I. (1987) - *Normal fault geometry related to sediment compaction and burial*. J. Struct. Geol., **9**(4), 393-401.
- FALCONER K. (1990) - *Fractal geometry: Mathematical foundations and applications*. Wiley, Chichester.
- MANDELBROT B.B. (1983) - *The fractal geometry of Nature*. W. H. Freeman, New York.
- MARCHEGIANI L., BERTOTTI G., CELLO G., DEIANA G., MAZZOLI S. & TONDI E. - *Pre-orogenic tectonics in the Umbria-Marche sector of the Afro-Adriatic continental margin*. Tectonophysics, submitted.
- MARCHEGIANI L., DEIANA G. & TONDI E. (1996/97) - *Tettonica pre-orogenica in Appennino centrale*. Stud. Geol. Cam., questo volume.
- MARRETT R. & ALLMENDINGER (1992) - *Amount of extension on "small" faults: an example from the Viking graben*. Geology, **20**, 47-50.
- MONTANARI A. (1988) - *Tectonic implications of hydrothermal mineralization in the late Cretaceous-Early Tertiary pelagic basin of the Northern Apennines*. Boll. Soc. Geol. It., **107**, 399-411.
- NEEDHAM T., YIELDING G. & FOX R. (1996) - *Fault population description and prediction using examples from the offshore U. K.* J. Struct. Geol., **18**:155-167.
- SAMMIS C., KING G. & BIEGEL R. (1987) - *The kinematics of gouge deformation*. Pure and Appl. Geophys., **125**, 777-812.

- SCHOLZ C. H. & COWIE P. (1990) - *Determination of total strain from faulting*. *Nature*, **346**, 837-839.
- TAVARNELLI E. (1996) - *Controllo delle faglie dirette giurassiche e cretacico-paleogene sullo sviluppo dei sovrascorrimenti neogenici nell'Appennino umbro-marchigiano*. *Studi Geologici Camerti*. Volume speciale (1995/1).
- WOJTAŁ S.F. (1996) - *Changes in fault displacement populations correlated to linkage between faults*. *J. Struct. Geol.*, **18**, 265-279.
- WALSH J.J. & WATTERSON J. (1993) - *Fractal analysis of fracture patterns using the standard box-counting technique: valid and invalid methodologies*. *J. Struct. Geol.* **15**, 1509-1512.