

STRUTTURE SISMOGENETICHE IN APPENNINO CENTRALE: POTENZIALE SISMICO, ANALISI FRATTALE E PROCESSI DI CRESCITA

E. Tondi - G. Cello - S. Mazzoli

Dip.to di Scienze della Terra, Università di Camerino, Camerino

ABSTRACT - *Seismogenic structures in the Central Apennines: seismic potential, fractal analysis and fault growth* - Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences, 10(2), 1997, 411-416 - The seismogenic structures of the axial zones of the Central Apennines Fault System have been recognized by means of detailed analyses of the capable faults exposed along a main deformation zone extending from Camerino to L'Aquila. The fault system also includes lower-rank faults, trending roughly NW-SE and N-S, showing normal and strike-slip components, respectively. Expected maximum magnitudes associated with normal and/or transtensional fault segments are lower than 6.0, whereas those expected from the activation of strike-slip faults may be as high as 7.0. The results obtained from our study suggest that seismic activity in the area is mainly due to the development and evolution of a N-S trending strike-slip system composed of 3 main structures, each of which characterized by a surface fault pattern with specific fractal properties. The central structure of the system was interpreted to be the major seismogenic structure in the area and is thought to be responsible for the 1703 seismic sequence in Central Italy.

Parole chiave: Faglia capace, struttura sismogenetica, dimensione frattale, fattore di scala
Key words: Capable fault, seismogenic structure, fractal dimension, scaling factor

1. INTRODUZIONE

L'analisi della sismicità storica e dei dati strumentali disponibili per l'Appennino centrale (Cello *et al.*, 1997, e referenze citate) ha consentito di evidenziare aree a diverso comportamento sismico nell'ambito di province strutturali che mostrano caratteri tettonici abbastanza omogenei.

Questa diversità di comportamento condiziona e complica necessariamente il quadro sismotettonico dell'Appennino centrale ed impone quindi una più approfondita analisi dei fattori e dei processi che ne sono responsabili.

Nel presente lavoro sono sintetizzati i risultati di studi condotti lungo una fascia di deformazione, che si estende da Camerino (a nord) fino a sud dell'Aquila e la cui espressione superficiale è evidenziata dalla presenza di un sistema di faglie quaternarie (Fig. 1; the *Central Apennines Fault System*, CAFS; Cello *et al.*, 1995; 1997) originatesi e/o riattivate in risposta ad un regime tettonico attivo nell'area fin dal Pleistocene medio (Cello *et al.*, 1997).

I dati raccolti ed analizzati nel corso di questi studi riguardano principalmente i caratteri geometrici e cinematici delle faglie capaci presenti in Appennino centrale, la loro organizzazione (gerarchizzazione) in sistemi e strutture componenti, nonché la definizione, attraverso l'analisi frattale, di appropriate relazioni di scala che consentono di effettuare previsioni statistiche quantitative sulla geometria e sui processi di crescita delle strutture e sulla modalità di accumulo e di rilascio dell'energia sismica.

2. FAGLIE SISMOGENETICHE IN APPENNINO CENTRALE

Il settore di catena analizzato fa parte dell'Appennino umbro-marchigiano-abruzzese. Esso rappresenta il

settore centrale dell'orogene appenninico, un segmento post-collisionale del sistema montuoso mediterraneo Africa-vergente, originatosi dalla convergenza e dalla collisione tra il margine continentale europeo e il blocco Adriatico, di affinità africana (Cello *et al.*, 1995a e referenze ivi citate).

Nelle zone assiali dell'Appennino centrale, a partire dal Pleistocene medio, si sviluppa un sistema di faglie (CAFS), che si estende da Camerino fino a sud del bacino dell'Aquila (vedi Fig. 1; Cello *et al.*, 1995b; 1997). Il CAFS costituisce un *interconnecting fracture network* organizzato come un tipico sistema *en-échelon*, comprendente faglie a direzione nord-sud collegate (*linked*) a faglie orientate circa NW-SE. Questo *pattern* si osserva ripetuto a varie scale sia arealmente (si veda il bacino di Norcia e quello di Castel S. Maria) sia lungo singole strutture (come ad esempio la faglia del Cordone di M. Vettore e la faglia più orientale di Colfiorito) (vedi Fig. 1). Nell'ambito del CAFS sono stati anche riconosciuti numerosi segmenti di faglie con forti indizi di attività recente e le cui caratteristiche geometriche e cinematiche sono di seguito riassunte:

- le faglie a direzione N-S sono caratterizzate da movimenti trascorrenti sinistri;
- le faglie orientate NW-SE mostrano rigetti normali e/o obliqui (transtensivi sinistri);
- le faglie a direzione WNW-ESE sono principalmente normali o transtensive destre.

In Figura 1 sono rappresentate sia le faglie capaci (quelle cioè con evidenze di fagliazione cosismica recente: posteriore a 20-25 ka), sia le faglie che non mostrano evidenti segni di attività tettonica recente, anche se queste ultime risultano geometricamente e cinematicamente compatibili con le altre faglie attive del CAFS. La geometria del campo di *stress* responsabile della genesi e dell'evoluzione del CAFS (così come emerge dall'analisi dei meccanismi focali degli *after-*

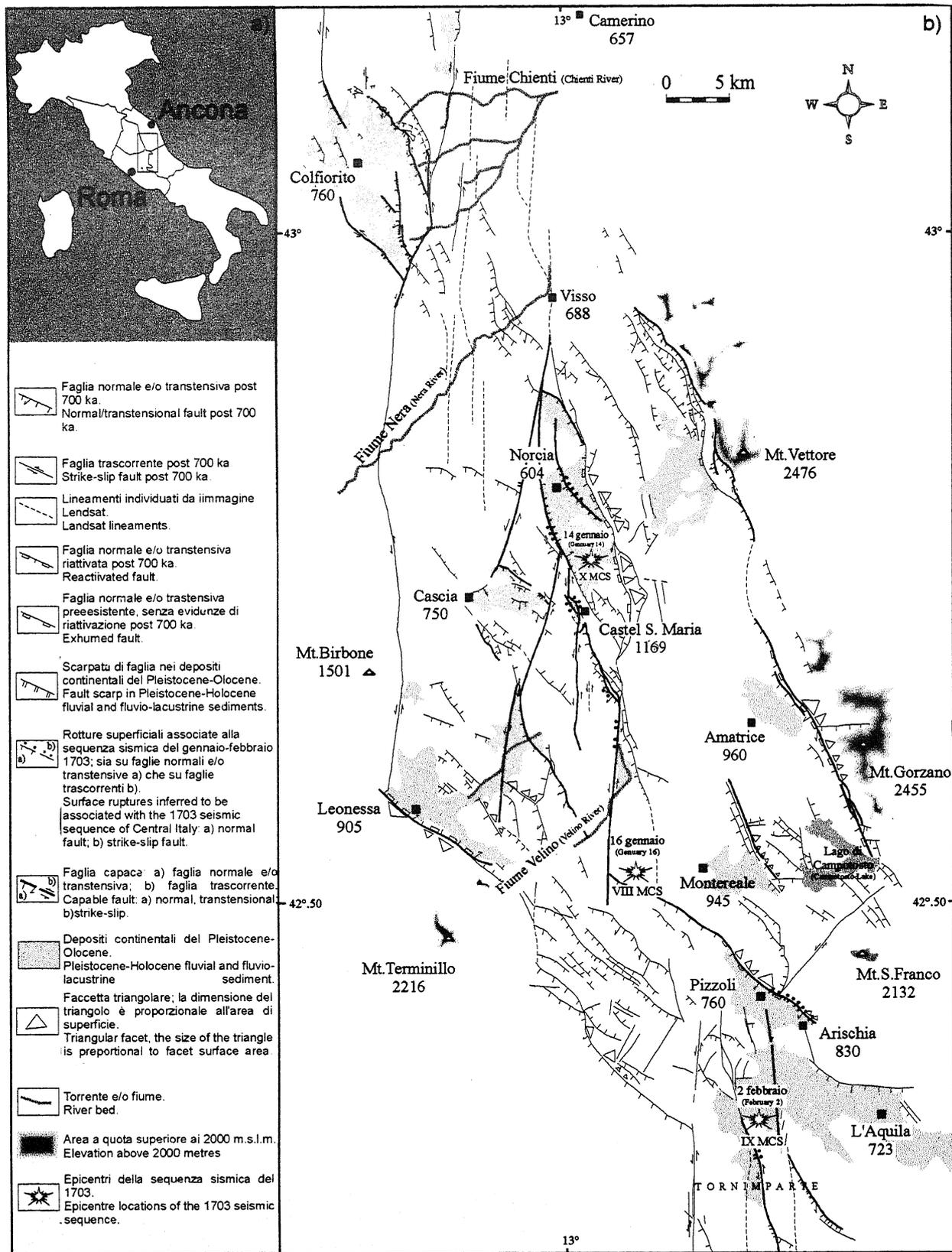


Fig. 1 - a) Ubicazione dell'area; b) sistema di faglie tardo-quadernarie delle zone assiali dell'Appennino centrale: il *Central Apennines Fault System* (CAFS).

Location map (a) and (b) the *Central Apennines Fault System* (CAFS).

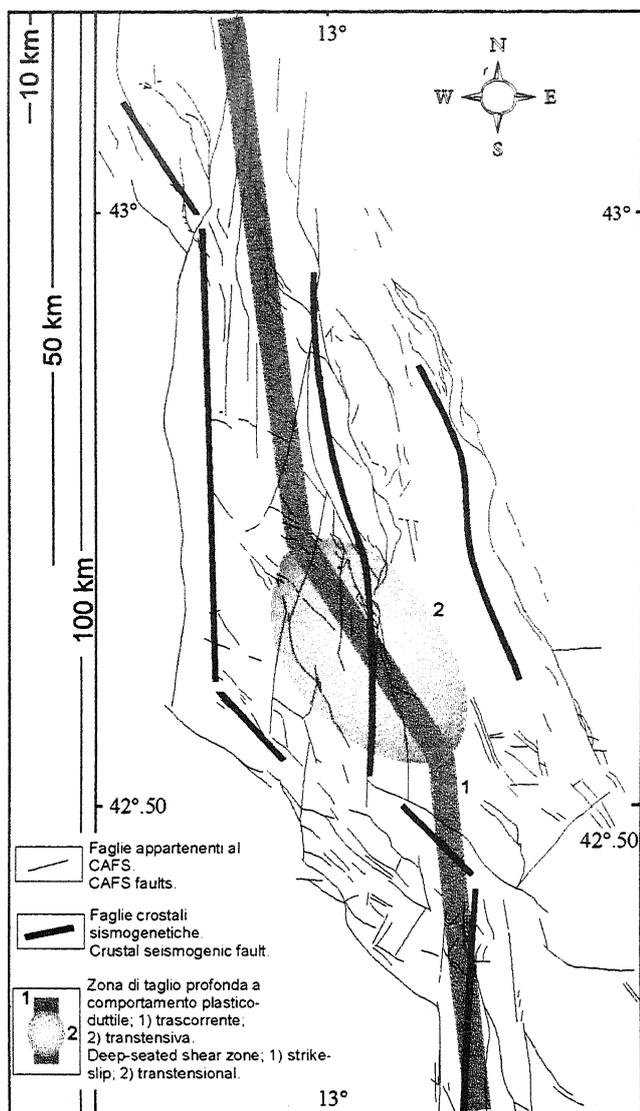


Fig. 2 - Schema delle strutture sismogenetiche.
Sketch of seismogenic structures.

shocks seguiti al terremoto di Norcia del 1979, $M_s = 5.9$, e dall'inversione di dati mesostrutturali relativi alle faglie capaci analizzate) risulta caratterizzata da un asse di compressione massima sub-orizzontale orientato NW-SE e da una estensione diretta circa NE-SW (Fig. 3; Cello *et al.*, 1995b; 1997).

Il pattern di superficie delle faglie analizzate, nonché la cinematica dell'intero sistema e la distribuzione areale dei bacini interni al CAFS, sono stati interpretati, nel loro insieme, come una combinazione di associazioni di strutture congruenti, espressione superficiale di tre strutture sismogenetiche, ad andamento circa nord-sud, caratterizzate principalmente da movimenti trascorrenti sinistri (Fig. 2). Il calcolo degli *slip-rate* effettuato da Cello *et al.* (1995b), per le faglie capaci sia trascorrenti che normali appartenenti alla struttura sismogenetica centrale (struttura a cui si sovrappone l'area epicentrale della sequenza sismica del gennaio-febbraio 1703, vedi Fig. 1), mostra che le prime sono caratterizzate da valori

(0.9-1.5 mm/a) circa tre volte più elevati di quelli caratteristici delle faglie normali (0.3-0.5 mm/a). Questi valori, che definiscono un rapporto di circa 3:1 tra il dislocamento associato a faglie N-S trascorrenti sinistre e faglie ad andamento NW-SE normali e/o transtensive confermano che l'attività delle strutture trascorrenti è dominante rispetto a quella delle faglie distensive. Inoltre, poiché il dislocamento massimo individuato per le faglie trascorrenti è di circa 1 km (vedi Fig. 1), mentre quello osservato per le faglie normali risulta essere circa 200-300 m (Cello *et al.*, 1995b e referenze ivi citate; 1997), ne consegue che la struttura sismogenetica centrale, risulta essere attiva da circa 600-700 ka.

Recenti studi paleosismologici (Tondi *et al.*, 1996; Tondi, 1997; Michetti *et al.*, 1996) effettuati lungo la faglia che borda ad ovest il bacino di Norcia (area epicentrale del terremoto del 14 gennaio 1703; I = XI MCS) hanno mostrato uno *slip* cosismico durante il terremoto di circa 0.5 m. Considerando quindi che lo *slip* totale nel periodo post-würmiano risulta di circa 7-8 m (Cello *et al.*, 1995b; 1997), eventi fortemente energetici, come il terremoto del 14 Gennaio 1703, mostrano periodi di ritorno dell'ordine del millennio (Cello *et al.*, 1997). La correlazione individuata tra faglie superficiali e struttura sismogenetica ha importanti implicazioni anche per l'analisi della pericolosità sismica dell'Appennino centrale. In base ai rapporti esistenti tra superficie di faglia ed energia liberata in un singolo evento sismico (Wells & Coppersmith, 1993 e referenze ivi citate), determinando la massima lunghezza delle faglie sismogenetiche appartenenti al CAFS è possibile calcolare il momento sismico e quindi la magnitudo massima corrispondente.

La relazione che lega il momento sismico (M_0) di un terremoto e l'area (A) della faglia attivata è data dalla seguente equazione: $M_0 = \mu Adu$; dove: A = superficie della faglia; μ = modulo di rigidità = $3 \cdot 10^{11}$ dyne/cm²; du = ultimo incremento di *slip* sulla faglia; mentre la relazione tra momento sismico e magnitudo è la seguente: $M_w = (\log M_0/1.5) - 10.73$ (Kanamori, 1977).

In Appennino centrale lo spessore dello strato sismogenetico, come risulta dagli ipocentri dei più recenti forti terremoti e dalla distribuzione degli ipocentri degli *aftershock* seguiti al terremoto di Norcia del 1979 ($M_s = 5.9$), è dell'ordine dei 14-16 km. Considerando quindi una lunghezza massima di 15 km (Fig. 2) e un dislocamento cosismico superficiale dell'ordine di 0.3-0.5 m, per le faglie normali (vedi Fig. 2), si ha un momento sismico massimo $M_0 = 1.8 \cdot 10^{25}$ dyne/cm² a cui corrisponde una magnitudo massima attesa di $M_w = 6.0$.

Le faglie trascorrenti invece, mostrano lunghezze massime di circa 40 km (vedi Fig. 2) e, in base al rapporto di 1:3 tra gli *slip-rate* rispettivamente di faglie normali e trascorrenti, un dislocamento cosismico di circa 1.0-1.5 m, per cui il momento sismico massimo risulta $M_0 = 2.5 \cdot 10^{26}$ dyne/cm² a cui corrisponde una magnitudo massima di $M_w = 7$.

I valori di magnitudo così calcolati sembrano essere confrontabili con i dati storici e geologici disponibili per la sequenza sismica del 1703. Le rotture superficiali registrate durante i tre eventi principali verificatesi tra il 14 Gennaio e il 2 Febbraio 1703, sono infatti distribuite su di una lunghezza di oltre 75 km (Cello *et al.*, in stampa e

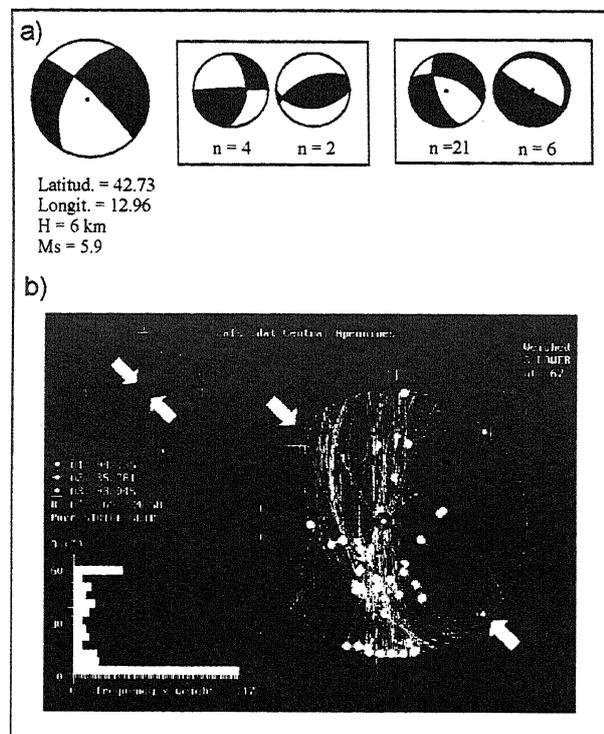


Fig. 3 - a) Meccanismi focali degli *aftershock* seguiti al terremoto di Norcia del 19 settembre 1979; b) geometria del campo di *stress* derivata dall'analisi delle faglie capaci (da Cello *et al.*, 1997).

Graphical representation of the Sept. 19, 1979 Norcia earthquake fault plane solution (left) and focal mechanism solutions for the related *aftershock* sequence.

referenze citate; Tondi *et al.*, 1996). Considerando che il terremoto di Norcia del 14 Gennaio fu di gran lunga il più distruttivo, è possibile ipotizzare che in occasione di questo terremoto si sia attivato un segmento di faglia con lunghezza prossima a quella massima ipotizzata per una faglia trascorrente.

3. ANALISI FRATTALE

Il *pattern* di superficie del CAFS e delle singole faglie sismogenetiche che rappresentano parti costituenti dell'intero sistema sono stati analizzati in termini di statistica frattale mediante la tecnica del *box-counting* (Mandelbrot, 1993; Cello, 1997)

I risultati dell'analisi sono riportati nei diagrammi bilogarithmici di Figura 4. Come si può osservare dai diagrammi, la distribuzione dei punti è espressa da una funzione esponenziale che nel grafico ad assi logarithmici è rappresentata da una relazione lineare del tipo:

$$\text{Log } N(s) = K + D \text{ Log}(s)$$

dove K = costante e D è l'esponente della funzione (che coincide con il valore della pendenza della retta). Nell'analisi geometrica frattale D rappresenta anche la dimensione frattale della struttura esaminata.

Sulla base di questi dati si può dedurre che il CAFS, e gli insiemi di faglie appartenenti ad esso, rappresentano strutture frattali caratterizzate da differenti valori di D

($1.2 < D < 1.4$) (Fig. 4). Se si confrontano questi risultati con i dati relativi ad altri sistemi di faglie tettonicamente più maturi, si osserva che la dimensione frattale del CAFS, e delle sue strutture componenti, risulta inferiore ai valori caratteristici di dette strutture ($D = 1.5$). Ciò suggerisce che il CAFS è geologicamente ancora poco evoluto e che il valore di D può essere anche utilizzato come un indice del grado di maturità del sistema (Cello, 1997).

Al fine di meglio caratterizzare una geometria frattale è inoltre indispensabile valutare il range di validità o fattore di scala (*scaling factor*) delle strutture naturali (a differenza dei frattali sintetici). In altri termini, ciò che si vuole conoscere è l'ambito di validità entro il quale una struttura naturale può essere considerata auto-similare.

Questa informazione non è di facile acquisizione perché i dati relativi ad oggetti e/o processi geologici sono spesso insufficienti per definire una soglia minima di validità statistica. Cello (1997) ha però osservato che l'elevato coefficiente di correlazione ($r > 0.99$) che caratterizza i dati derivati dalla struttura di Castelluccio-Monte Vetore (vedi Fig. 3), non è di per sé sufficiente per definire frattale l'intera struttura (che presenta dispersioni sistematiche ai bordi del diagramma bilogarithmico) ed ha proposto un metodo di analisi specifico per valutarne il *range* di validità. È possibile infatti riconoscere, nell'ambito di un sistema, due o più segmenti caratterizzati da specifici valori di D. Nel presente lavoro questo stesso metodo è stato utilizzato per ricavare il *range* di validità frattale del CAFS. I risultati dell'analisi mostrano che il sistema, nel suo insieme, può considerarsi auto-similare per dimensioni maggiori ai 1406 m (Fig. 5). Una diretta applicazione del valore ottenuto è quella di poter calcolare la magnitudo minima al di sopra della quale un terremoto è rappresentativo del sistema. Utilizzando le relazioni usate per il calcolo della massima magnitudo attesa e considerando un modello di faglia circolare ($A = \text{area della faglia} = \pi (L/2)^2$ dove L = lunghezza della faglia) si ottiene un valore della magnitudo $M_w = 3.8$.

4. CONCLUSIONI

L'analisi geologico-strutturale effettuata sulle faglie capaci presenti nelle zone assiali dell'Appennino centrale ha evidenziato che:

1 - Il *pattern* di superficie e le caratteristiche cinematiche delle faglie capaci analizzate, la distribuzione dei bacini intrappenninici, la sismicità e il regime di *stress* agente nell'area sin dal tardo-Quaternario risultano compatibili con una interpretazione strutturale che considera il CAFS come l'espressione superficiale di tre strutture sismogenetiche ad andamento circa nord-sud con dislocamento dominante a componente trascorrente sinistra;

2 - Le massime magnitudo attese per strutture normali e per strutture trascorrenti sono rispettivamente $M_w = 6.0$ e $M_w = 7$;

3 - I tempi di ritorno per terremoti ad elevata energia ($M_s > 6.5$) sono dell'ordine del millennio;

4 - Il CAFS e gli insiemi di faglie appartenenti ad esso hanno geometria frattale e sono caratterizzati da

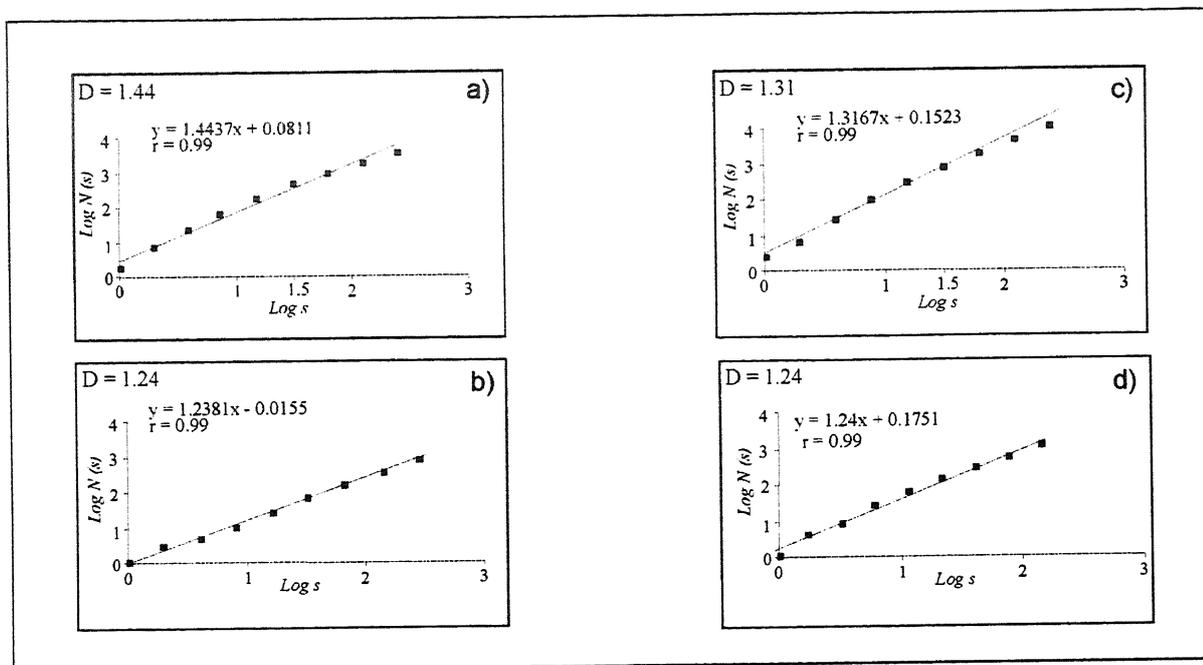


Fig. 4 - Relazioni di scala del *pattern* di superficie delle faglie appartenenti al CAFS (a), alla struttura sismogenetica centrale (b), orientale (c) e occidentale (d).

Scale relations relative to the CAFS (a), to the central (b) -, eastern (c) -, and western (d) - seismic structures.

un valore della dimensione frattale compreso tra 1.2 e 1.4. Detti valori risultano essere più bassi di quelli che caratterizzano strutture geologicamente più mature, suggerendo quindi che il CAFS è geologicamente ancora poco evoluto;

5 - Il *range* di validità frattale riferito al CAFS nel suo insieme consente di ricavare il valore minimo di magnitudo ($M_w = 3.8$) al di sopra del quale un terremoto può considerarsi rappresentativo del livello di sismicità del sistema;

6 - La non linearità delle curve ottenute dal *box-counting* per il sistema nel suo insieme è dovuta alla complessità di questa particolare struttura. Il CAFS infatti, essendo una struttura poco evoluta costituita da singole parti componenti (cioè, le tre strutture sismogenetiche), sta ancora crescendo probabilmente attraverso processi di *linkage* (Cello, 1997) che avvengono tra fratture di rango inferiore che si auto-organizzano fino a raggiungere, per dimensioni maggiori di 1.4 km, una geometria frattale.

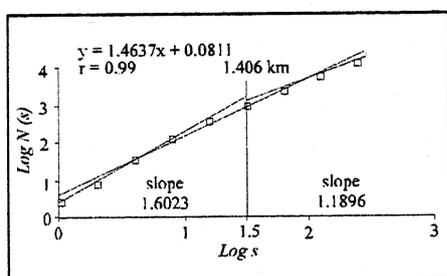


Fig. 5 - Range di validità frattale (fattore di scala) del CAFS. Validity range of CAFS.

Lavoro eseguito con il contributo CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) contratto n. 9500353 e GNNT (Gruppo Nazionale di Difesa dai Terremoti).

BIBLIOGRAFIA

- Cello G., 1997 - *Fractal analysis of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy*. J. Struct. Geol., **19**, No. 7, 945-953.
- Cello G., Turco E. & Zuppetta A., 1995a - *Cinematica del settore centrale del Mediterraneo ed implicazioni sulla strutturazione dell'Arco Calabro*. In: Cinquanta anni di attività didattica e scientifica del Prof. Felice Ippolito. G. Bonardi, B. de Vivo, P. Gasparini & A. Vallario (Eds.), Liguori Editore, Napoli, 293-301.
- Cello G., Mazzoli S., Tondi E. & Turco E., 1995b - *Tettonica attiva in Appennino centrale ed implicazioni per l'analisi della pericolosità sismica del settore assiale della catena umbro-marchigiana-abruzzese*. Studi Geol. Camerti, **XIII**, 115-138.
- Cello G., Mazzoli S., Tondi E. & Turco E., 1997 - *Active tectonics in the central Apennines and possible implications for seismic hazard analysis in peninsular Italy*. Tectonophysics, **272**, 43-68.
- Kanamori H., 1977 - *The energy release in great earthquake*. J. Geophys. Res., **82**, 2981-2987.
- Mandelbrot B. B., 1983 - *The fractal geometry of Nature*. W.H. Freeman, New York.
- Tondi E., Cello G. & Mazzoli S., 1996 - *The 1703 seismic sequence of central Italy: A major evidence for the existence of a crustal seismogenic zone in the Apennines*. Abstract Volume, T.S.G. Annual Meeting, Cardiff.

Wells D.L. & Coppersmith K.J., 1994 - *New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement.* Bull. Seismol. Soc. Amer., **84**, 974-1002.

Ms. ricevuto il: 15. 5. 1997
Testo definitivo ricevuto il: 8. 9. 1997

Ms received: May 15, 1997
Final text received: Sept. 8, 1997