

**MECCANISMI DI ROTTURA FRAGILE ED EVOLUZIONE DEL FENOMENO CATACLASTICO
NELLE ROCCE CARBONATICHE DELL'APPENNINO CENTRALE:
SINTESI DELLE CONOSCENZE E PROGRAMMA DI RICERCA**

INDICE

RIASSUNTO	pag. 103
ABSTRACT	” 103
INTRODUZIONE	” 103
CARATTERISTICHE DELLE ZONE DI FAGLIA	” 103
BANCA DATI	” 107
MODELLI	” 107
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	” 108
BIBLIOGRAFIA	” 108

RIASSUNTO

Vengono brevemente esposte le problematiche geo-strutturali oggetto di uno specifico programma di ricerca, nell'ambito del progetto CROP-11, relativo all'Appennino centrale. In particolare sono discussi alcuni caratteri degli indicatori cinematici nelle zone di taglio e delle rocce di faglia. Viene sottolineato come la constatazione di un comportamento invariante rispetto alla scala di osservazione per molti fenomeni legati ai processi geostrutturali possa aprire nuove interessanti prospettive interpretative. Aspetti importanti della ricerca in corso sono la costituzione di una banca dati dei caratteri strutturali delle zone di faglia e lo sviluppo di modelli sperimentali e numerici.

ABSTRACT

This paper briefly outlines the geostructural issues addressed by a research program developed within the framework of the CROP-11 Project (Deep crust seismic profile across the central Apennines). In particular, some characteristics of fault rocks and kinematic indicators on fault planes are discussed in the light of their possible contribution to solve some of the many tectonic problems in the area. It is especially stressed the importance of the fractal behavior of many tectonic phenomena for an improved interpretation of the major tectonic features. Relevant aspects of this research will be the design and operation of a fault zone database (especially focused on geometries, lithologies involved, characters of fault surfaces and fault rocks) and the development of specific experimental and numerical models.

PAROLE CHIAVE: Geologia strutturale, rocce di faglia, indicatori cinematici, banche dati, processi sismici di rottura.

KEY WORDS: Structural Geology, Fault Rocks, Kinematic Indicators, Databases, Seismic Faulting Processes.

(*) ENEA-Disp, via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma.

INTRODUZIONE

Tra gli studi in corso per fornire ogni possibile contributo di superficie all'interpretazione del profilo sismico a riflessione CROP-11, si sta sviluppando un progetto di ricerca sulle caratteristiche strutturali, ed in particolare sui processi di rottura fragile, nelle maggiori zone di faglia dell'Appennino centrale. Questa ricerca mira ad analizzare lo spettro di informazioni strutturali contenute nelle zone di faglia che dislocano i blocchi carbonatici dell'Appennino, al fine di valutare se esistono parametri, e con che grado di approssimazione, per determinare: dimensioni della faglia e rigetto totale (quindi la sua importanza relativa), storia cinematica (variazioni della direzione e del senso di movimento nel tempo), età dei movimenti (attività recente o meno), relazione con la sismicità ed i processi sismici.

In generale, nonostante alcuni sforzi in questa direzione (per es. MONTONE, 1991; VITTORI *et alii*, 1991) moltissimo resta da fare nel campo degli studi di dettaglio dei caratteri da micro a macro-strutturali nelle rocce dell'Appennino, finalizzati a sfruttare appieno l'insieme di informazioni che è certamente registrato nell'intorno delle zone di faglia. Un aspetto essenziale di questa ricerca è quindi la costituzione ed il continuo aggiornamento, da parte di tutti i ricercatori che vorranno contribuirvi, di una banca dati delle faglie nell'area (centrata su geometrie della zona di taglio, litologie interessate e caratteristiche dei piani di taglio e delle rocce di faglia).

Questa nota ha lo scopo di presentare una breve panoramica dello stato dell'arte in questo campo, riassumendo principi e strategie del programma di ricerca, che in parte ricalcano quanto già descritto in precedenti lavori (VITTORI, 1990; VITTORI *et alii*, 1991).

CARATTERISTICHE DELLE ZONE DI FAGLIA

Il tratto centrale della catena appenninica è costituito essenzialmente da carbonati di piattaforma o bacinali e, subordinatamente, depositi clastici, che hanno subito un forte raccorciamento a partire dal Miocene medio-superiore, caratterizzato principalmente da estesi sovrascorrimenti. Alle fasi compressive ha fatto seguito una tettonica con caratteri principalmente distensivi (PAROTTO & PRATURLON, 1975; PATACCA & SCANDONE, 1987), che gli studi di neotettonica ed i caratteri della sismicità indicano tuttora attiva (per es. GASPARINI *et alii*, 1980; AMBROSETTI *et alii*, 1987). Nonostante il forte progredire delle conoscenze in questi ultimi anni, molti problemi riguardanti l'evoluzione tettonica dell'area attendono ancora una soluzione soddi-

sfacente. Tra questi vi sono: individuazione del "motore" del sistema (placca o placche in subduzione, instabilità termiche nel mantello); ruolo del bacino tirrenico; evoluzione cinematica; tempi e sequenza dei sovraccorrimenti; stima dell'accorciamento totale e dell'estensione successiva; ruolo delle faglie trascorrenti; origine ed evoluzione delle strutture distensive (bacini intramontani per esempio).

Nell'area in studio considerazioni d'ordine generale (ad esempio spessore della serie stratigrafica, assetto strutturale conosciuto, stile deformativo essenzialmente fragile dei carbonati) sembrano far escludere che siano ora osservabili in superficie zone di faglia attive in passato a profondità superiori ad alcune migliaia di metri. Visto però che attività sismica caratterizza anche livelli crostali piuttosto superficiali (profondità superiori a circa 3 km) (SIBSON, 1983; MARONE & SCHOLZ, 1988) è possibile che siano ora esumate in affioramento zone che abbiano sperimentato in passato processi sismici ipocentrali. Una loro analisi potrebbe quindi fornire interessanti informazioni sui processi ipocentrali. Comunque, indipendentemente dalla collocazione dell'ipocentro, appare necessario esplorare in dettaglio i fenomeni deformativi collegati a movimenti rapidi (cosismici).

Esiste un ampio spettro di rilevazioni possibili in corrispondenza delle zone di faglia, in parte sugli specchi di faglia ed in parte nel volume di roccia deformata circostante la zona di taglio.

Una descrizione dei principali caratteri rilevati su piani di faglia diretta in rocce calcaree dell'area egea si trova in HANCOCK & BARKA (1987), che rappresenta probabilmente l'unico lavoro recente che tratti in modo sistematico l'argomento. Per quanto si noti una buona convergenza di forme con l'Appennino calcareo, appare necessario un approfondimento dei singoli temi, analizzando in maggior dettaglio i processi genetici.

Indicatori cinematici

Un tema di particolare rilevanza è quello concernente gli indicatori cinematici. Ad esempio in Appennino un'attività tettonica polifasica è confermata dall'analisi dei sistemi multipli di strie sui piani di faglia.

Gli indicatori cinematici sono costituiti in primo luogo da lineazioni di varia natura e forma impresse sugli specchi di faglia (TJIA, 1967; MEANS, 1987; PETIT, 1987). Indicazioni cinematiche possono essere ricavate inoltre da geometria dei rigetti, suture stilolitiche, fratture di tensione, piani di Riedel, indicatori di *strain* (ad esempio cristalli o fossili deformati) (FRIEDMAN & HIGGS, 1981; RAMSAY & HUBER, 1987; MONTONE, questo volume).

Le lineazioni formate da cristallizzazioni allungate nel senso del movimento sono da considerare come indicatori di deformazione lenta e più o meno continua, che permette il richiamo di fluidi e l'accrescimento dei cristalli. Strie possono essere anche indotte per deformazione cristallo-plastica in fillosilicati (per es. WILL & WILSON, 1989). Sui piani di faglia che interessano le rocce carbonatiche dell'Appennino le strie più comuni sono quelle prodotte per incisione abrasiva da parte di sporgenze o frammenti intrappolati tra i blocchi in movimento relativo. E' probabile che in generale le strie d'abrasione siano indicative di movimento cosismico o comunque piuttosto rapido. Secondo HANCOCK & BARKA (1987) la lunghezza media delle strie di

questo tipo potrebbe dare un'indicazione sul rigetto caratteristico in occasione di eventi sismici.

Le dimensioni delle strie d'abrasione sono estremamente variabili, presentando lunghezze e profondità nel piano da microscopiche (ENGELDER, 1974) fino a metriche per le lunghezze e di molte decine di centimetri per le larghezze/profondità (Fig. 1). In generale, le dimensioni dei solchi d'abrasione sono da correlare alle dimensioni dei clasti e/o delle asperità sui labbri a contatto della faglia durante lo scorrimento. L'azione di piallamento delle asperità con il procedere dei movimenti sul piano (Fig. 1A) e la generale contemporanea riduzione di diametro dei frammenti rocciosi costituenti le rocce di faglia fanno supporre una relazione inversa tra dimensioni delle strie e spostamento cumulativo sperimentato dalla porzione di piano che le ospita (indipendentemente da verso e direzione di movimento, che possono anche essere variati nel tempo, come probabile per molte strutture in Appennino). Un ruolo importante è certamente svolto dalla componente di sforzo normale al piano (σ_n).

Un aspetto su cui appare opportuno un approfondimento è il rapporto tra strie d'abrasione e lineazioni dovute ad accrescimento di cristalli: le prime presumibilmente indicative di movimenti rapidi, le ultime di movimenti molto lenti, più o meno continui.

Come esempio viene discusso un caso osservato dallo scrivente. Strie calcitiche di accrescimento indicanti un movimento interpretato come inverso sono osservabili in alcuni punti di un esteso piano di faglia messo a nudo dall'attività di una cava lungo il bordo meridionale della conca del Fucino (Abruzzo). Le strie d'abrasione e l'assetto macrostrutturale indicano invece chiaramente il prevalere di movimenti distensivi con un rigetto di una certa entità. Varie ipotesi possono essere fatte: a) le strie individuano due diverse fasi di attività della faglia; b) uno dei due sistemi è stato interpretato in modo errato; c) i due sistemi appartengono alla stessa fase e vanno giustificati entrambi. Le prime due ipotesi sono in qualche modo verificabili sul terreno. La terza possibilità prospettata richiede lo sviluppo di un modello adeguato. Un'ipotesi, che potrebbe essere oggetto di verifica sperimentale, è che le strie d'abrasione siano prodotte da movimenti rapidi, a scatti, caratterizzanti il prevalente senso di movimento della faglia ed il suo comportamento sismico. Gli accrescimenti calcitici invece potrebbero svilupparsi in qualche momento durante gli intervalli intersismici, durante i quali la faglia si dovrebbe muovere lentamente in senso opposto per una sorta di ritorno elastico e/o di riequilibrio gravitativo. Al di là delle possibilità di verifica di un tale modello, rimane la constatazione che osservazioni troppo puntuali possono condurre ad interpretazioni cinematiche non corrette o quantomeno troppo semplicistiche.

Le superfici di faglia non sono mai dei veri piani, ma mostrano una caratteristica "rugosità" (*roughness* in inglese), approssimabile ad un andamento ondulato del quale è possibile un'analisi armonica. POWER *et alii* (1987) attribuiscono a tale rugosità un comportamento frattale (cioè invariante rispetto alla scala di osservazione) in un ampio spettro di lunghezze d'onda. L'ampiezza delle ondulazioni lungo la direzione di spostamento risulta di almeno un ordine di grandezza inferiore a quella lungo profili normali al movimento (POWER *et alii*, 1987), fornendo così un'ulteriore possibilità di valutazione cinematica.

La rugosità deve essere anche funzione dell'entità dello spostamento relativo subito. A parità di altre condizioni (litologia, ambiente tettonico e regime di sforzi, dimensioni del piano, grado di fratturazione iniziale), è ipotizzabile una variazione della rugosità all'aumentare dello spostamento cumulativo, caratterizzato da una generale diminuzione dell'ampiezza delle ondulazioni.

Alla diminuzione di rugosità corrisponde un aumento della superficie di contatto e quindi un aumento della resistenza d'attrito lungo la superficie di taglio (BYERLEE, 1978), permettendo così un maggior accumulo di energia elastica, che verrà dissipata in parte come calore. Il repentino e forte aumento di temperatura può indurre la formazione di veli vetrosi (pseudotachilite), soprattutto in assenza di fluidi (SPRAY 1989).

Rocce di faglia

Vengono definiti *Rocce di faglia* quei materiali in corrispondenza di zone di faglia, che hanno acquisito una tessitura diversa da quella originaria in seguito a processi di deformazione per taglio (SIBSON, 1977). A seconda dei meccanismi genetici possono essere distinte due classi principali: *rocce cataclastiche* e *miloniti* (HIGGINS, 1971; SIBSON, 1977; WISE *et alii*, 1984). Mentre le *miloniti* sono legate a processi metamorfici cristalloplastici e mostrano una tipica struttura foliata, le *rocce cataclastiche* si evolvono con meccanismi di tipo fragile indotti dallo scivolamento attritivo tipico delle zone di faglia nei livelli crostali più superficiali (fino a profondità di 8-15 km, SIBSON, 1977, 1983).

Lungo molte zone di faglia dell'Appennino si rinvengono ampi corpi rocciosi caratterizzati da un fittis-

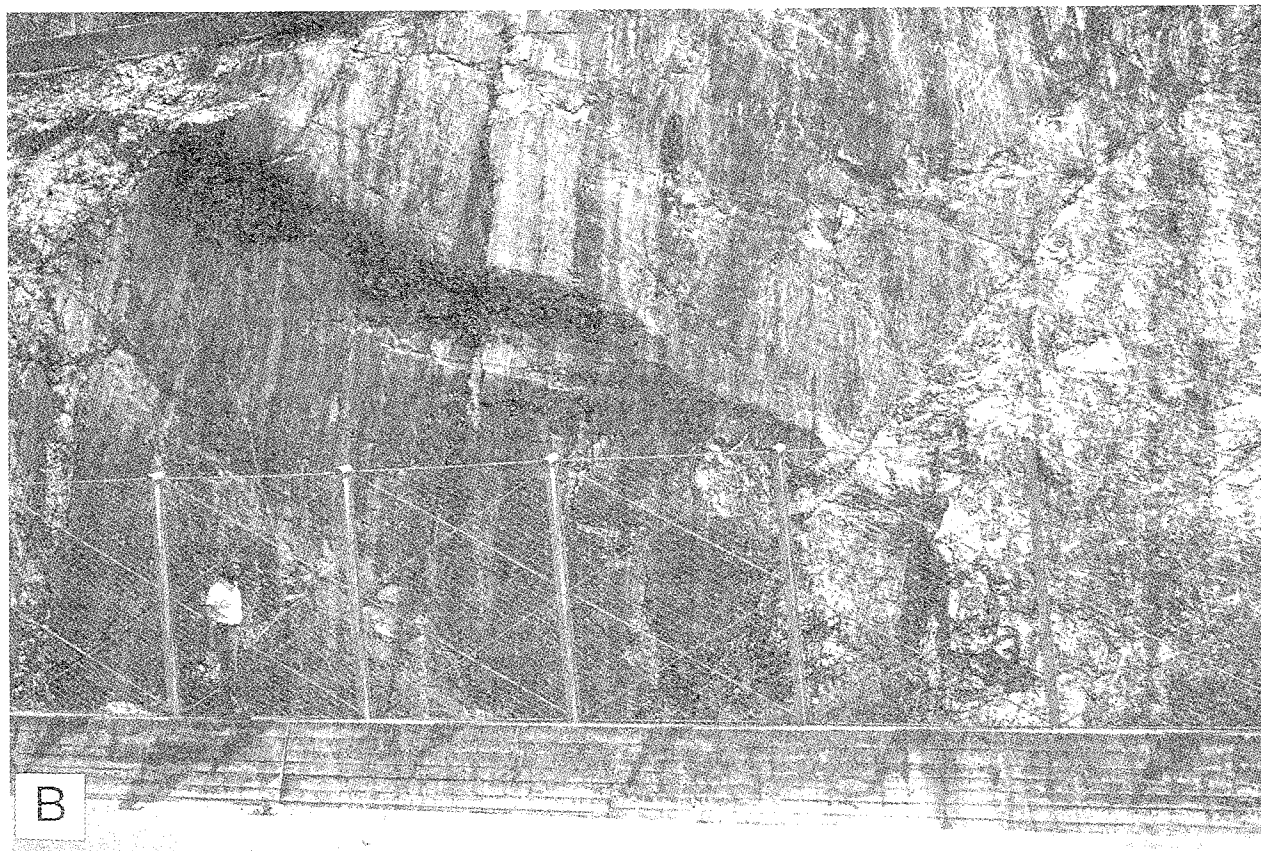
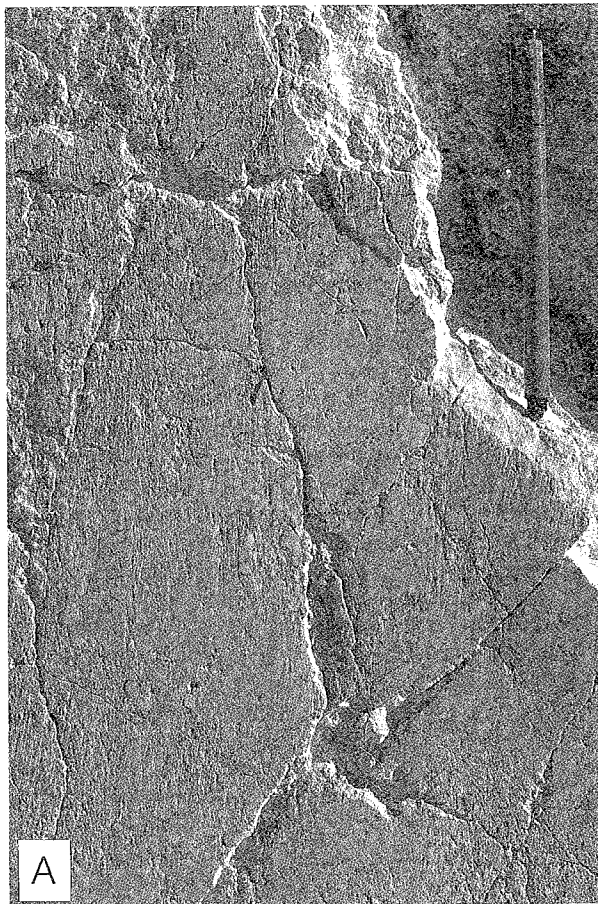


Fig. 1 - Esempi di strie d'abrasione di varie dimensioni su piani di faglia in rocce cataclastiche carbonatiche. A) Faglia diretta presso Rivisondoli (Abruzzo); notare i clasti "piallati" sulla superficie di taglio. B) Faglia trascorrente sinistra lungo le Gole di Atina (FR); l'ampio solco tettonico non pare indicativo di movimenti cospicui lungo questo piano.

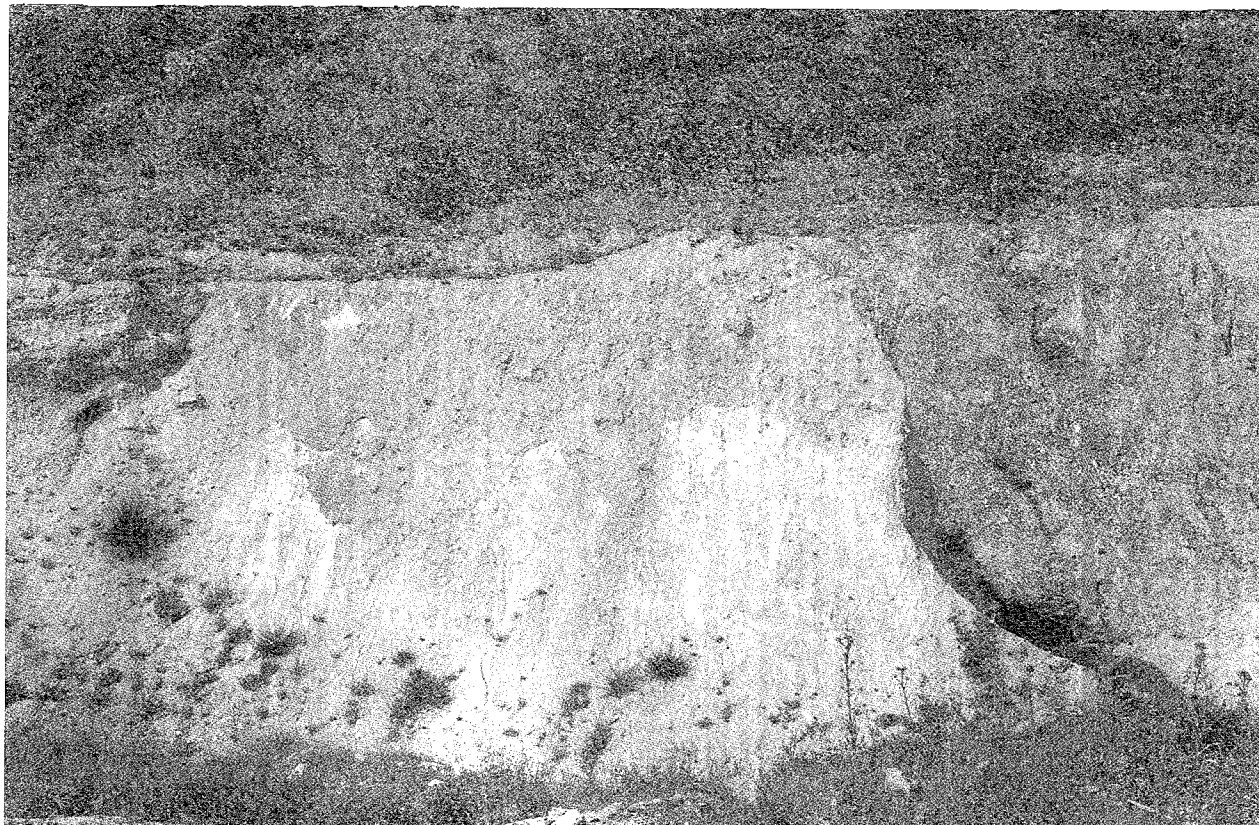


Fig. 2 - Faglia diretta in roccia calcarea microfratturata, posta lungo il bordo orientale del Fucino (Abruzzo). Lo spessore di roccia cataclastica s.s. è di pochi decimetri in corrispondenza del piano. La debole cementazione secondaria, la ruvidezza del piano e l'assenza su di esso di nette incisioni abrasive fanno ritenere che il rigetto totale sia qui piuttosto modesto e che il piano si sia impostato in condizioni molto superficiali (tale piano fa parte della zona di fagliazione superficiale relativa al terremoto di Avezzano del 1915).

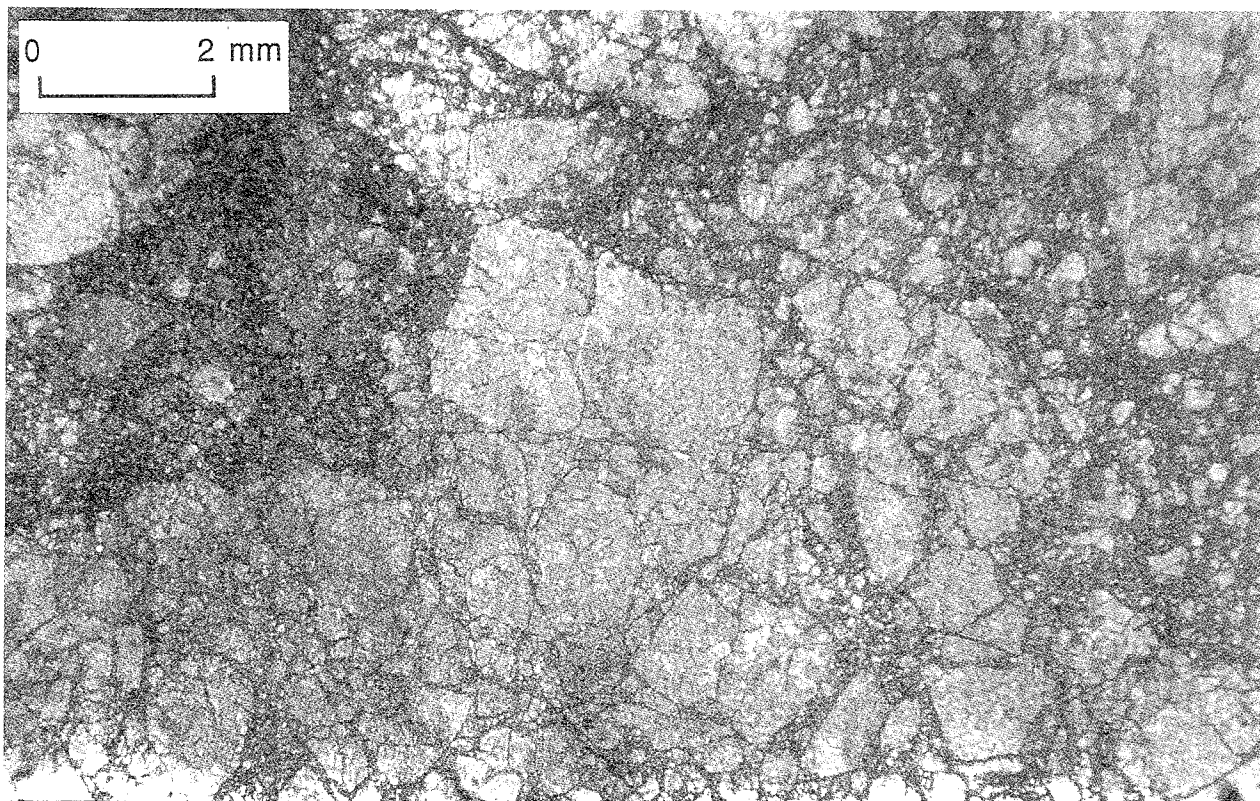


Fig. 3 - Sezione sottile di roccia cataclastica calcarea. Con il procedere del movimento, i fenomeni di roto-traslazione e di urto tra i clasti producono una progressiva riduzione della granulometria (vedi anche VITTORI *et alii*, 1991).

simo campo di fratturazione, dove la struttura sedimentaria originaria è ancora preservata. Il materiale mostra un comportamento simile ad una breccia o una sabbia molto spigolosa, ed appare talora compatto, ma solo per il mutuo incastro dei frammenti; si dimostra infatti del tutto privo di coesione quando scavato. E' possibile che questi corpi siano legati, almeno in parte, a processi di tipo sismico (SIBSON, 1986). Vicino ai piani di taglio questi corpi di roccia frantumata degradano in rocce di faglia s.s. (cataclasiti), di granulometria e spessore molto variabili, talora con una cementazione secondaria (Fig. 2).

La granulometria delle rocce cataclastiche tende a ridursi con il procedere degli spostamenti, poiché i movimenti roto-traslazionali dei clasti (*flusso cataclastico*) inducono una loro progressiva frantumazione per urto (ENGELDER, 1974; SAMMIS *et alii*, 1987; MARONE & SCHOLZ, 1989; VITTORI *et alii*, 1991) (Fig. 3). La granulometria è quindi funzione dello spostamento totale, oltre naturalmente che di altri parametri, quali le dimensioni iniziali dei frammenti rocciosi, la litologia, la distribuzione degli sforzi, i fluidi). La curva granulometrica segue per lo più una legge log-normale o esponenziale e mostra comportamento frattale (BIEGEL *et alii*, 1989; MARONE & SCHOLZ, 1989).

La zona di deformazione cataclastica è in genere delimitata da un piano di taglio su di un lato o ambidue; piani di scorrimento sono però spesso presenti anche al suo interno (per es. VITTORI *et alii*, 1991).

Lo spessore della fascia di materiale cataclastico (*fault gouge*) sembra essere correlato allo spostamento totale (SCHOLZ, 1987; HULL, 1988; MARRETT & ALLMENDINGER, 1990) (Fig 4). Questa dipendenza dovrebbe derivare dall'azione abrasiva prodotta dallo scorrimento. L'utilizzo pratico di tale relazione per una valutazione del rigetto cumulativo lungo una faglia, così come di altre relazioni empiriche, come quella riscontrata tra lunghezza della faglia e rigetto (WALSH & WATTERSON, 1988; MARRETT & ALLMENDINGER, 1990), non appare certo di facile realizzazione nei sistemi maggiori,

a causa della complessità dei parametri strutturali e morfometrici in gioco (HULL, 1988; SCHOLZ & COWIE, 1990). Data la sua potenziale importanza, esso merita comunque un'analisi accurata.

La presenza di forti spessori di *fault gouge* appare avere un ruolo essenziale sul comportamento attritivo e sulla sismicità nelle zone di faglia, in particolare di riduzione di tali fenomeni a profondità inferiori a 3-5 km (*strain softening*) (MARONE *et alii*, 1990).

BANCA DATI

E' in fase di realizzazione una banca dati contenente la gamma più ampia possibile di informazioni relative a zone di faglia di ogni dimensione e per tutti i litotipi affioranti, per caratterizzare anche in modo statistico, oltre che puntuale, le modalità di deformazione. Tra le informazioni considerate vi sono: a) parametri descrittivi a scala macroscopica (ad es. tracciato digitalizzato per restituzioni grafiche, dimensioni lineari, eventuale suddivisione in segmenti, rapporti con altre strutture tettoniche, litologie interessate, indicazioni cinematiche, indizi paleosismologici e/o geomorfologici di attività, eventi sismici correlati con la faglia, etc. ...), b) osservazioni puntuali a scala meso e microscopica (coordinate dei punti di raccolta dati, indicatori cinematici, giaciture, caratteri dei piani di taglio e delle rocce di faglia, etc. ...) con il maggior dettaglio possibile.

Oltre alle logiche possibilità di estrazioni mirate, viene data una grande importanza alle possibilità di restituzione grafica, sia di mappe che di foto, schemi, stereoplots.

MODELLI

Negli ultimi decenni, modelli sperimentali a scala ridotta e, più recentemente, modelli numerici hanno esplorato i meccanismi deformativi e la distribuzione dei campi di sforzi in una vastissima gamma di condi-

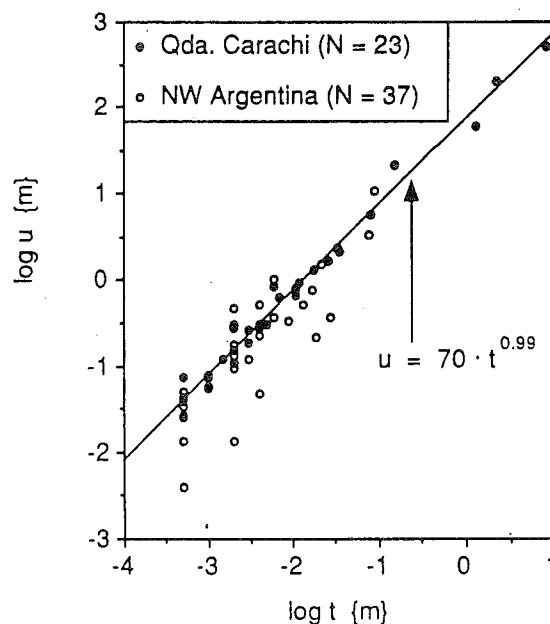
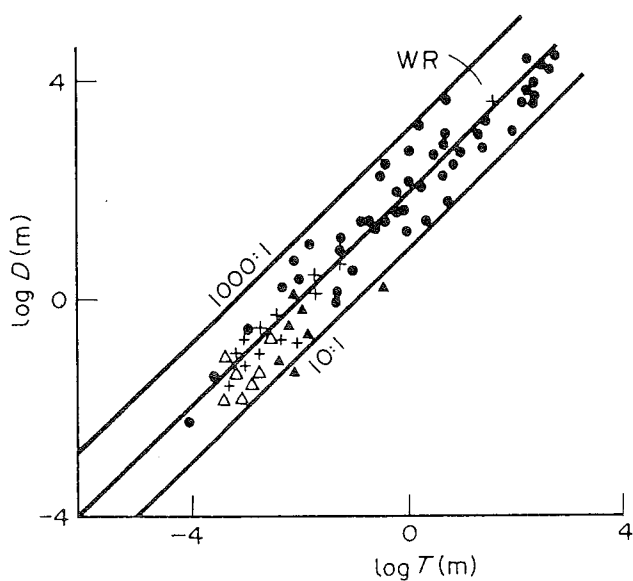


Fig. 4 - Grafici bilogarithmici che mettono in rapporto spessore della fascia cataclastica (t) e rigetto (D o u) pubblicati da HULL (1988) (A) e da MARRETT & ALLMENDINGER (1990) (B). La retta di regressione ha in entrambi i casi un'inclinazione prossima a 45° .

zioni (ad es. COX & SCHOLZ 1988; COBBOLD, ed., 1991). Nonostante questo, sembra che non ci sia ancora un adeguato sviluppo degli studi sul comportamento "sismico" dei materiali, rocce carbonatiche in particolare. Non è ancora sufficientemente chiaro ad esempio come lo sviluppo delle zone di intensa fratturazione ed i caratteri delle rocce di faglia siano legati al ciclo sismico ed al progredire dei rigetti e quale sia l'effettivo ruolo dei fluidi (vedi ad es. MARONE *et alii*, 1990). Appare quindi necessario promuovere ulteriori studi in questo settore specifico, al fine di migliorare le nostre possibilità interpretative delle osservazioni di terreno, sia a livello qualitativo che quantitativo.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Un'importante aspetto degli studi strutturali riguarda i fattori di scala dei fenomeni in gioco. Numerosi studi, anche con prove sperimentali, hanno ormai accertato che molti fenomeni in campo tettonico mostrano un comportamento indipendente dalla scala di osservazione in un ampio spettro di ordini di grandezza (e.g. SCHOLZ & AVILES, 1986; MARRETT & ALLMENDINGER, 1990; SORNETTE & DAVY, 1991). La verifica di tale assunto per determinate caratteristiche e la sua applicazione potrebbe avere notevoli ricadute nella valutazione delle zone di taglio maggiori. Renderebbe in-

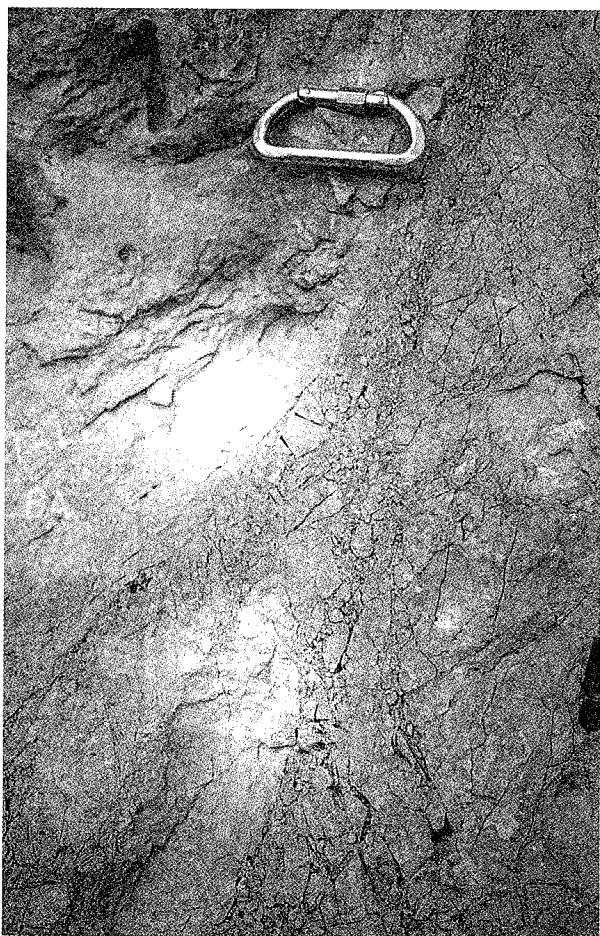


Fig. 5 - Particolare di una zona di taglio (faglia diretta) a scala mesoscopica in calcari del Giurassico (Monte Moneta, zona costiera del Lazio meridionale). Il rigetto totale è di circa 1 metro. Il moschettonone usato come riferimento è lungo 10 cm.

fatti lecite estrapolazioni basate su osservazioni fatte a scale dove i fenomeni possono essere descritti nella loro globalità. Questo principio è esemplificabile attraverso la foto di Fig. 5, relativa ad un particolare di una piccola zona di taglio normale in calcari giurassici (rigetto totale di circa 1 m). Qui sono possibili, direttamente sul terreno, una serie di osservazioni estremamente interessanti, anche quantitative, sullo sviluppo della deformazione associata ad una zona di taglio.

Questa breve rassegna di considerazioni in ambito strutturale non ha la pretesa di aver offerto un quadro esaustivo delle problematiche inerenti le zone di faglia. Si è cercato di focalizzare l'attenzione su alcuni temi che sono senz'altro suscettibili di notevoli approfondimenti per il potenziale di informazioni che contengono e che si deve imparare ad interpretare. Il programma di ricerche in corso mira perciò ad individuare i problemi sui quali una risposta soprattutto quantitativa sia ragionevolmente possibile, anche con l'ausilio di modelli numerici e prove sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- AMBROSETTI P., BOSI C., CARRARO F., CIARANFI N., PANIZZA M., PAPANI G., VEZZANI L. & ZANFERRARI A. (1987) - *Neotectonic map of Italy*. C.N.R. Prog. Fin. Geod. S.P. Neotettonica. 4 carte scala 1:500.000.
- BIEGEL R.L., SAMMIS C.G. & DIETERICH J.H. (1989) - *The frictional properties of a simulated gouge having a fractal particle distribution*. J. Struct. Geol., **11**(7), 827-846.
- BYERLEE J.D. (1978) - *Friction of rocks*. Pure & Applied Geophysics, **116**, 615-626.
- COBBOLD P.R. (a cura di) (1991) - *Experimental and numerical modelling of continental deformation*. Tectonophysics, **188** (1/2), 207 p..
- COX S.J.D. & SCHOLZ C.H. (1988) - *On the formation and growth of faults: an experimental study*. J. Struct. Geol., **10** (4), 413-430.
- ENGELDER J.T. (1974) - *Cataclasis and the generation of fault gouge*. Bull. Geol. Soc. Am., **85**, 1515-1522.
- FRIEDMAN M. & HIGGS N.G. (1981) - *Calcite fabrics in experimental shear zones*. In: Mechanical Behavior of Crustal Rocks, American Geophysical Union, Geophys. Monograph, 11-27.
- GASPARINI C., IANACCONE G. & SCARPA R. (1980) - *On the focal mechanisms of Italian earthquakes*. Rock Mechanics, **9**, 85-91.
- HANCOCK P.L. & BARKA A.A. (1987) - *Kinematic indicators on active normal faults in Western Turkey*. J. Struct. Geol., **9**(5/6), 573-584.
- HIGGINS M.W. (1971) - *Cataclastic rocks*. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 687, 97 pp., Reston, Virginia.
- HULL J. (1988) - *Thickness-displacement relationships for deformation zones*. J. Struct. Geol., **10** (4), 431-435.
- MARONE C. & SCHOLZ C.H. (1988) - *The depth of seismic faulting and the upper transition from stable to unstable slip regimes*. Geophys. Res. Lett., **15**, 621-624.
- MARONE C. & SCHOLZ C.H. (1989) - *Particle-size distribution and microstructures within simulated fault gouge*. J. Struct. Geol., **11**(7), 799-814.
- MARONE C., RALEIGH C.B. & SCHOLZ C.H. (1990) - *Frictional behavior and constitutive modeling of simulated fault gouge*. J. Geophys. Res., **95** (B5), 7007-7025.

- MARRETT R. & ALLMENDINGER R.W. (1990) - *Kinematic analysis of fault-slip data*. J. Struct. Geol., **12** (8), 973-986.
- MEANS W.D. (1987) - *A newly recognized type of slickenside striation*. J. Struct. Geol., **9**, 585-590.
- MONTONE P. (1990) - *Su alcune caratteristiche microscopiche dei piani di faglia*. Rend. Soc. Geol. It., **13**, 107-110.
- MONTONE P. (1992) - *Microstrutture nelle calciti lungo una zona di taglio trascorrente (Sabina, Appennino centrale)*. In questo volume.
- MORROW C.A. & BYERLEE J.D. (1989) - *Experimental studies of compaction and dilatancy during frictional sliding on faults containing gouge*. J. Struct. Geol., **11**(7), 815-825.
- PAROTTO M. & PRATURLON A. (1975) - *Geological summary of Central Apennines*. In: Structural Model of Italy - C.N.R. Quad. Ric. Scient., **90**, 257-311.
- PATACCA E. & SCANDONE P. (1987) - *Post-Tortonian mountain building in the Apennines: the role of the passive sinking of a relic lithospheric slab*. In BORIANI A. et alii (Editors), Proceedings of "The lithosphere in Italy", Accademia Nazionale dei Lincei, Atti dei Convegni Lincei, **80**, 157-176.
- PETIT J.P. (1987) - *Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks*. J. Struct. Geol., **9**, 597-608.
- POWER W.L., TULLIS T.E., BROWN S.R., BOITNOTT G.N. & SCHOLZ C.H. (1987) - *Roughness of natural fault surfaces*. Geophys. Res. Lett., **14**, 29-32.
- POWER W.L. & TULLIS T.E. (1989) - *The relationship between slickenside surfaces in fine-grained quartz and the seismic cycle*. J. Struct. Geol., **11**(7), 879-893.
- RAMSAY J.G. & HUBER M.I. (1987) - *The techniques of modern structural geology*. Academic Press, London, 700 p..
- SAMMIS C.G., KING G. & BIEGEL R.L. (1987) - *The kinematics of gouge deformation*. Pure and Appl. Geophys., **125**, 777-812.
- SCHOLZ C.H. (1987) - *Wear and gouge formation in brittle faulting*. Geology, **15**, 493-495.
- SCHOLZ C.H. & AVILES C.A. (1986) - *The fractal geometry of faults and faulting*. In: Earthquake source mechanics, DAS S., BOATWRIGHT J. & SCHOLZ C.H. editors, Am. Geophys. Union Geophys. Monographs, **37**, 147-155.
- SCHOLZ C.H. & COWIE P.A. (1990) - *Determination of total strain from faulting using slip measurements*. Nature, **346**, 837-839.
- SIBSON R.H. (1977) - *Fault rocks and fault mechanisms*. J. Geol. Soc. Lond., **133**, 191-213.
- SIBSON R.H. (1983) - *Continental fault structure and the shallow earthquake source*. J. Geol. Soc. Lond., **140**, 741-767.
- SIBSON R.H. (1986) - *Brecciation processes in fault zones: inferences from earthquake rupturing*. Pure Appl. Geophys., **124**, 159-175.
- SORNETTE D. & DAVY P. (1991) - *Fault growth model and the universal fault length distribution*. Geophys. Res. Lett., **18** (6) 1079-1081.
- SPRAY J.G. (1989) - *Slickenside formation by surface melting during the mechanical excavation of rock*. J. Struct. Geol., **11**(7), 895-905.
- TJIA H.D. (1967) - *Sense of fault displacements*. Geol. Mijnb., **46**, 392-396.
- VITTORI E., CAVINATO G.P., MICCADEI E., RUGHI D. & SERVA L. (1991) - *First results of a study on cataclastic and intense fracturing processes in calcareous rocks (central Apennines, Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., **110**, 489-499.
- VITTORI E. (1990) - *Contributi della geologia strutturale all'analisi paleosismica*. Rend. Soc. Geol. It., **13**, 65-70.
- WALSH J.J. & WATTERSON J. (1988) - *Analysis of relationship between displacements and dimension of faults*. J. Struct. Geol., **10** (3), 239-247.
- WILL T.M. & WILSON C.J.L. (1989) - *Experimentally produced slickenside lineations in pyrophyllitic clay*. J. Struct. Geol., **11**(6), 657-667.
- WISE D.U., DUNN D.E., ENGELDER J.T., GEISER P.A., HATCHER R.D., KISH S.A., ODOM A.L. & SCHAMEL J. (1984) - *Fault-related rocks: suggestions for terminology*. Geology, **12**, 391-394.

