

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

ARXIU DE LA SECCIÓ DE CIÈNCIES, LXIV

JOAN J. GUIMERÀ i ROSSO

Del Departament de Geomorfologia i Tectònica de la Universitat de Barcelona
De la Institució Catalana d'Historia Natural

ESTUDI ESTRUCTURAL
DE LES ZONES DE FRACTURA
DE GARRAF I DE VALLCARCA
(MASSÍS DE GARRAF)

PREMI JOSEP R. BATALLER, 1979

BARCELONA
1982

ESTUDI ESTRUCTURAL
DE LES ZONES DE FRACTURA
DE GARRAF I DE VALLCARCA
(MASSÍS DE GARRAF)

This One



BUX8-EY6-PCDO

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

ARXIUS DE LA SECCIÓ DE CIÈNCIES, LXIV

JOAN J. GUIMERÀ i ROSSO

Del Departament de Geomorfologia i Tectònica de la Universitat de Barcelona
De la Institució Catalana d'Historia Natural

ESTUDI ESTRUCTURAL
DE LES ZONES DE FRACTURA
DE GARRAF I DE VALLCARCA
(MASSÍS DE GARRAF)

PREMI JOSEP R. BATALLER, 1979

BARCELONA
1982

L'EXCMA. DIPUTACIÓ PROVINCIAL DE BARCELONA
HA CONTRIBUÏT GENEROSAMENT
A L'EDICIÓ D'AQUEST VOLUM

ISBN 84-7283-038-1
Dipòsit legal: B. 26.543 - 1982

© Joan J. Guimerà i Rosso, Barcelona
La present edició és propietat de l'INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS

A proposta d'una ponència formada pels senyors Lluís Solé i Sabarís, membre de la Secció de Ciències de l'INSTITUT, Oriol Riba i Arderiu, agregat a la Secció de Ciències de l'INSTITUT, i Jaume Rosell i Sanuy, de la Institució Catalana d'Història Natural, l'INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS, en sessió plenària tinguda el dia 17 d'abril de 1979, acordà per unanimitat de concedir dos Premis Josep Ramon Bataller, 1979, un dels quals correspongué al senyor Joan J. Guimerà i Rosso pel seu treball *Estudi estructural de les zones de fractura de Garraf i de Vallcarca (Massís de Garraf)*.

En la sessió plenària del 17 de gener de 1981, l'INSTITUT prengué l'acord de publicar la dita obra, la qual és editada a cura del senyor Oriol Riba i Arderiu.

PREFACI

En aquest treball he estudiat la fracturació a les diverses escales —principalment les falles— de la cobertura mesozoica del Massís de Garraf, fent una atenció especial a les estructures de compressió i llur possible relació amb les grans fractures del sòcol.

De l'anàlisi cartogràfica pot ésser deduïda l'existència de dues famílies principals de falles: una de direcció aproximada E-W i l'altra NNW-SSE. L'angle agut que formen ambdues famílies és bisecat per una direcció aproximada NW-SE i, en principi, caldria suposar que les falles E-W són destres i les NNW-SSE sinistres. No obstant això, les observacions de les estructures menors associades a aquestes falles permeten de concloure que, en la majoria dels casos, les falles E-W són sinistres i les NNW-SSE destres. Aquest fet pot ésser observat directament en alguna de les grans falles cartografiades, i es manifesta clarament quan hom analitza els diagrames de les falles de direcció a l'escala d'aflorament. A vegades hom pot observar que una mateixa falla ha sofert ambdós moviments; hom no n'ha pogut observar, però, la relació temporal. Una tercera família, molt menys desenvolupada, de direcció NNE-SSW, ha actuat amb moviment destre, i hi ha indicis que ho ha fet posteriorment al moviment dominant en les famílies principals.

Totes aquestes dades les interpreto com a resultat de la successió de dues fases de compressió. La primera, amb una direcció d'escurçament màxim aproximadament NW-SE, degué bisecar l'angle agut format per les dues famílies principals de falles i degué ésser la responsable de llur formació (E-W=destres i NNW-SSE=sinistres). La segona fase de compressió devia tenir una direcció d'escurçament màxim aproximadament NE-SW, i bisecà aproximadament l'angle obtús que formen ambdues famílies de falles. Dins aquesta segona fase —més tardanament o localment— es degué produir una rotació de la direcció d'escurçament màxim cap a una direcció ENE-WSW i es formaren les falles destres NE-SW.

Sobreposades a les estructures sobre els plans de falla que indiquen moviments de direcció, n'hi ha d'altres que indiquen un joc de falla normal. Les direccions X i Y d'aquesta distensió corresponen a direccions d'allargament, essent X de direcció NW-SE i, per tant, sensiblement perpendicular a les grans falles normals que limiten les grans unitats morfoestructurals dels Catalànids.

Si hom admet aquesta evolució de la compressió, també, a nivell del sòcol, poden ésser explicades certes característiques del sector central dels Catalànids. La falla de Capellades-Vallcarca (N 160 E), que és sinistra i sincrònica amb el plegament dels Catalànids, degué actuar durant la primera fase compressiva (Z=NW-SE), mentre que la del Llobregat (N 130 E), que és dextra i desplaça clarament les estructures de plegament de la Serralada Prelitoral, degué actuar durant la segona fase compressiva (Z=NE-SW) i no ho degué poder fer durant la primera, car les direccions són sensiblement paral·leles.

La falla de Capellades-Vallcarca passa per dessota el Massís de Garraf i fou probablement la causant de la fracturació de la cobertora d'aquest, amb una disposició de falles de Riedel, durant la primera fase de compressió.

Aquest treball ha estat fet sota la direcció del Dr. Pere F. Santanach i Prat, i el seu ajut ha estat fonamental en la seva realització.

També em cal agrair les indicacions rebudes del Dr. Oriol Riba i Arderiu pel que fa a la present edició i del Dr. Lluís Solé i Sugranyes en la interpretació de les preparacions microscòpiques.

INTRODUCCIÓ

1.1.— Situació geogràfica i geològica

La regió que és objecte d'aquest estudi és situada a la Serralada Litoral Catalana al sud-oest del riu Llobregat i en els materials mesozoics del Massís de Garraf (vegeu la fig. 14).

1.2.— Objecte del treball i metodologia emprada

Aquest treball té com a objecte l'estudi de la fracturació del Massís de Garraf, principalment de la produïda per les fases compressives alpines, de la seva gènesi i de l'evolució de la fracturació al llarg d'aquests processos tectònics.

El treball és dividit en dues parts principals: estudi bibliogràfic i anàlisi estructural.

L'estudi bibliogràfic és basat fonamentalment en aquells temes de tectònica fràgil relacionats principalment amb falles de direcció que siguin aplicables al Massís de Garraf.

L'anàlisi estructural és composta d'un estudi fotogeològic de la fracturació i del treball de camp, el qual consisteix de la realització d'estacions de mesura d'estructures a l'escala de l'aflorament i de l'execució de cartografies a diverses escales.

1.3.— Trets principals de l'estructura dels Catalànids

Les idees clàssiques sobre l'estructura alpina dels Catalànids foren establertes per SCHRIEL (1929) i ASHAUER i TEICHMÜLLER (1935), i posteriorment completades per LLOPIS LLADÓ (1942, 1943 i 1947), que els definiren com un conjunt de materials mesozoics plegats i fracturats amb vergència al NW i, dominant per damunt de tot, llargues fractures longitudinals que delimiten extenses depressions amb rebliment terciari, mentre nombroses fractures transversals amb desplaçaments horitzontals parteixen en múltiples blocs el conjunt.

Les fractures longitudinals actuaren en distensió durant el Miocè, i llur

activitat pot perllongar-se fins als nostres dies, produint depressions estructurals clarament asimètriques –Vallès, Penedès, Camp de Tarragona, Baix Gaià, etc.– amb les vores SE del tipus de “lindar sedimentari”, provocat pel basculament del sòcol (LLOPIS LLADÓ, 1947). Aquest basculament en el Camp de Tarragona i el Baix Gaià provocà la sedimentació d’olistostomes de materials mesozoics en iniciar-se la transgressió miocènica, l’origen dels quals està separat netament en el temps dels processos tectònics compressius (ESTEBAN i SANTANACH, 1974 b). A més de les fractures grans, n’hi ha tot un estol de satèl.lits de característiques semblants.

FONTBOTÉ (1954) elaborà una interpretació força convincent segons la qual aquestes fractures longitudinals actuaren prèviament en compressió durant l’Eocè Superior-Oligocè, provocant falles inverses, corriments i plec-falla, tots ells accidents íntimament lligats amb el sistema de plegament. LLOPIS LLADÓ (1943) ja havia esmentat aquest possible comportament.

Modernament ROBLES OROZCO (1975) ha reconegut importants corriments de la cobertora mesozoica del Bloc del Cardó, desenganxada al nivell del Triàsic i amb desplaçaments cap al N-NNW de l’ordre de 6 a 10 km.

Ja he assenyalat anteriorment l’existència de grans fractures transversals que delimiten els diversos blocs i unitats estructurals, amb un desplaçament predominantment horitzontal. Les més evidents són les del Llobregat i l’Estret de la Riba (que separa la Serra de Miramar de la Serra de Prades), i altres d’importants són les dels rius Anoia, Congost, Tordera, etc.). Aquestes fractures semblen haver actuat amb un desplaçament dret, però en alguna hi ha indicis de desplaçament sinistre.

La influència d’aquestes falles transversals en la sedimentació del Mesozoic i el Terciari s’està posant de manifest darrerament: MARZO (com. pers.) la reconeix al Buntsandstein; ESTEBAN (com. pers.) al Muschelkalk; GINER (com. pers.) al Juràssic; ESTEBAN i ROBLES-OROZCO (1976) al Cretaci Inferior; i SALAS (1977), COLOMBO (com. pers.), GUIMERA i SALAS (1977) i ANADON (1978) al Paleogen. La qual cosa ens indica que, probablement, han estat actuant constantment durant aquests períodes com a falles normals.

Segons GLANGEAUD (1968), LE PICHON (1968), DERCOURT (1971), VAN BEMMELEN (1968) i ESTEBAN (1973) aquestes fractures transversals podrien correspondre a les possibles falles de transformació del solc bètico-balear, en expansió fins al Juràssic Mitjà i en compressió en l’Oligocè. Per a ARTHAUD i MATTE (1975) són les antigues línies de fractura tardihercinianes, que actuaren novament en el Mesozoic, el Paleogen i els moviments alpins.

L’edat de la compressió és situada –com ja he dit– en l’Eocè Superior-Oligocè, i hom aprecia –segons ASHAUER i TEICHMÜLLER (1935) i LLOPIS LLADÓ (1947)– una edat lleugerament més moderna des del NE cap al SW.

La distensió és mio-pliocena —com he dit abans— i, per tant, posterior a la fase compressiva, com s'observa a totes les escales (SANTANACH, 1973, i ESTEBAN i SANTANACH, 1974 a).

SOLÉ SUGRAÑES (1978), de l'anàlisi de les imatges del satèl·lit LANDSAT-1 al NE de la Península Ibèrica, diferencia dos sistemes que podrien relacionar-se amb dues fases diferents de deformació. El sistema NE-SW (sinistres) i NW-SE (destres) degué ésser provocat per una compressió N-S d'edat oligocènica. Un segon sistema, menys clar, és l'E-W (destres) i N-S (sinistres), que correspondria a un escurçament NW-SE d'edat eocènica. Posteriorment hi degué haver la fase de distensió mio-pliocènica.

1.4.— Dades estratigràfiques i tectòniques sobre el Massís de Garraf

1.4.1.— Dades estratigràfiques

Triàsic

Segons VIRGILI (1958) és de fàcies germànica i es pot resumir en la seqüència següent, de base a sostre, discordant sobre el sòcol hercinià:

- Buntsandstein:
 - 50-100 m. Conglomerats de matriu sorrenca roja i còdols de quars.
 - 50-60 m. Gresos roigs amb passades de conglomerats a la base.
 - 15-20 m. Argiles sorrenques que passen superiorment a argiles verdes i blaves.
- Muschelkalk Inferior:
 - 60 m. Calcàries i dolomies en bancs gruixuts i compactes. Alguns nivells amb nòduls de sílex.
- Muschelkalk Mitjà:
 - 50 m. Gresos i argiles roges, sovint amb capes de guix intercalades a la part alta, les quals passen superiorment a argiles verdes i bigarrades.
- Muschelkalk Superior:
 - 70 m. Calcàries i dolomies en bancs gruixuts en la part superior que progressivament passen a capes molt primes amb intercalacions margoses.
- Keuper:
 - 20 m. Margues groguenques amb alguns bancs calcaris margosos.
 - 20 m. Margues amb guix i bigarrades.

Molt esquemàticament la sèrie estratigràfica juràssica i cretàcia és, segons ESTEBAN (1973):

El Juràssic

Entre els últims nivells triàsics i els primers dels datats com a cretaci, s'intercala un paquet fonamentalment dolomític que, a causa de la seva pobresa

faunística, ha estat datat de diferents èpoques. Podem dividir aquests materials en tres trams ben diferenciats:

a) Un tram de bretxes basals, calcàries o dolomítiques, on la major part dels còdols procedeixen del Trias. Normalment reposen sobre el Keuper i tenen una potència variable entre 10 i 20 metres.

b) Un tram de dolomies negres que a la part superior presenten laminacions i "mud-craks", i intercalacions de nivells calcaris. Tenen una potència de l'ordre de 150 m, i descansen amb discordança erosiva sobre el tram anterior (ESTEBAN I JULIÀ, 1973).

c) Un tram de calcàries laminades amb "mud-craks", "algal-mats", etc, que, per la presència de *Clypeina jurassica* i de *Favreina salavensis*, han estat datades del Portlandià, CALZADA (1972). Aproximadament 80 m de potència.

El Cretaci

Éls sediments carbonatats d'aquesta edat poden ésser dividits en tres trams, de baix cap a dalt:

a) Tram de calcàries grises, micrites i biomicrites, amb intercalacions de dolomies. Sediments lacustres amb estromatòlits, "mud-cracks", ..., són la continuació de les fàcies "purbeck" del Juràssic Superior. 300 m. Valangi-nià, Hauterivià i Barremià Inferior.

b) Un tram de calcàries compactes de color gris clar i de pàtina blanca. Algun nivell dolomític intercalat. Abundants rudistes (*Toucasia sp.*), gasteròpodes, braquiòpodes, mil·liòlides i orbitolínids. 450 m. Barremià.

c) Un tram de margues gris-groguenques o blavoses i margo-calcàries. Fauna de foraminífers planctònics i orbitolínids. 120 m. Aptià Inferior (Bedulià). Per damunt hi segueixen 40 m de calcàries beige, biomicrites amb coralls, rudistes i orbitolínids. Aptià Superior (Gargasià).

Terciari: Miocè

Segons l'I.G.M.E. (1973 b i f), és representat per una formació de rebliment de caràcter continental, amb una potència de l'ordre de 20 m.

És format principalment per conglomerats poc rodats i amb grans blocs, amb una matriu margosa de color roig i amb intercalacions de lletilles de margues de color ocre.

1.4.2. – Dades tectòniques

Les dades que hom troba a la bibliografia són poques i molt generals o molt localitzades:

LLOPIS LLADÓ (1947) reconeix quatre tipus de dislocacions que formen l'estructura del massís:

a) Falles directrius: són grans línies de dislocació formades per la reunió de diversos elements menors i on convergeixen les “dovelas” i els feixos de falles satèl·lits. Les anomena “megafalles”.

b) Falles normals, amb salts moderats i de direccions paral·leles o transversals a les anteriors.

c) Falles satèl·lits, de salt escàs. Les anomena “mesofalles”.

d) Microfalles netament derivades de les diàclasis.

CALZADA I VIA (1971) donen un mapa molt general de la part meridional del massís on marquen diverses falles de direcció transversal: la Trinitat, Sitges i E. de Vilanova i la Geltrú.

Per a ESTEBAN (1973), el conjunt del Massís de Garraf apareix com un complex mosaic de blocs fracturats amb un cabussament general de 20° a 30° al WSW. Segons aquest autor les fractures més importants poden ésser agrupades en dos sistemes:

a) Falles NNE-SSW a E-W, amb component vertical dominant.

b) Falles NW-SE, amb un component horitzontal clarament dominant —falles de Garraf i Vallcarca, de les quals pensa que es tracta de la reactivació de les antigues directrius tardihercinianes—.

Afirma que el salt horitzontal en el cas de la falla de Garraf no sembla superior a 500 m i que està relacionada amb afloraments de margues de l'Aptià Inferior, que ocupen els fons de petites depressions estructurals, en les quals són més antigues les parets calcàries. Dins les margues d'aquestes depressions descriu l'existència de plecs d'eix vertical, i estries subhorizontals a les parets. La formació d'aquestes depressions la lliga a falles normals.

Suposa una fracturació inicial entre el Trias i el Juràssic Superior, que tornà a actuar durant l'Eocè Inferior (compressió) i més tard en el Miocè Superior (distensió) produint un gran nombre de fractures associades.

Tots els treballs vistos fins ara fan referència a aspectes molt generals de l'estructura del Massís. SANTANACH (1973), ben al contrari, féu una anàlisi microestructural de dos afloraments de calcàries, un al costat del poble de Garraf i l'altre prop del Coll de l'Ordal.

Observà la presència de microfalles de direccions destres i sinistres, on es produeixen superposicions parcials dels camps de direccions d'ambdós tipus de falles, i obtingué una direcció d'escurçament (Z) NE-SW a Garraf i NW-SE al Coll de l'Ordal. Una segona fase (distensiva) actuà posteriorment, amb una direcció d'allargament X de direcció NE-SW en els dos afloraments estudiats.

ESTUDI BIBLIOGRÀFIC

2.1.— Els eixos d'esforç i de deformació en relació amb la tectònica de fractura. Plans M d'Arthaud (1969)

Les falles poden ésser agrupades en relació amb el camp d'esforços en tres tipus principals: normals, inverses i de direcció (ANDERSON, 1951). En els dos primers tipus l'eix intermedi σ_2 és horitzontal, i és per tant horitzontal la intersecció dels dos plans de fractura conjugats; en les falles normals σ_1 és vertical i σ_3 horitzontal, mentre que en les inverses σ_1 és horitzontal i σ_3 vertical. En les falles de direcció σ_2 és vertical i la intersecció entre els plans de fractura conjugats també és vertical, essent σ_1 i σ_3 horitzontals. La fig. 1-A il·lustra aquests tres tipus de falles i llur representació estereogràfica.

En els assaigs triaxials realitzats experimentalment hom ha observat que l'angle que formen les fractures conjugades amb σ_1 sempre és inferior a 45° , i els més corrents solen ésser de l'ordre de 30° , la qual cosa coincideix amb el criteri de fractura de Coulomb. D'altra banda, segons els càlculs de SIBSON (1974), la relació entre els esforços diferencials ($\sigma_1 - \sigma_3$) necessària per a iniciar el moviment en falles inverses, de direcció i normals és 4:1, 6:1, quan $K = \frac{1}{2}$ i $\mu = 0,75$.

Els eixos de deformació lligats a una tectònica de fractura són establerts amb l'estudi microtectònic de tota una sèrie de sectors afectats per un gran nombre de falles produïbles al llarg d'una fase de tectònica de fractura, la qual cosa ens permet de descriure la geometria de la deformació definint tres eixos principals de deformació, deduïts de l'observació de totes les superfícies estriades (ARTHAUD, 1969).

Segons aquest autor, aquests tres eixos defineixen un model descriptiu sense cap hipòtesi genètica i són constituïts sense cap referència al camp d'esforços. Per analogia amb l'el·lipsoide de deformació definit en la deformació contínua, aquest autor defineix les direccions principals de deformació en tectònica de fractura de la manera següent:

X: direcció principal d'allargament.

Z: direcció principal d'escurçament perpendicular a X.

Y: direcció principal intermèdia perpendicular a X i Z.

La fig. 1-B representa un esquema molt simplificat que il·lustra aquestes nocions.

FIGURA 1:

A.— Relació teòrica entre les direccions d'esforços principals i les falles conjugades que s'hi produeixen, i llur representació estereogràfica (modificat de HOBBS, MEANS i WILLIAMS, 1976).

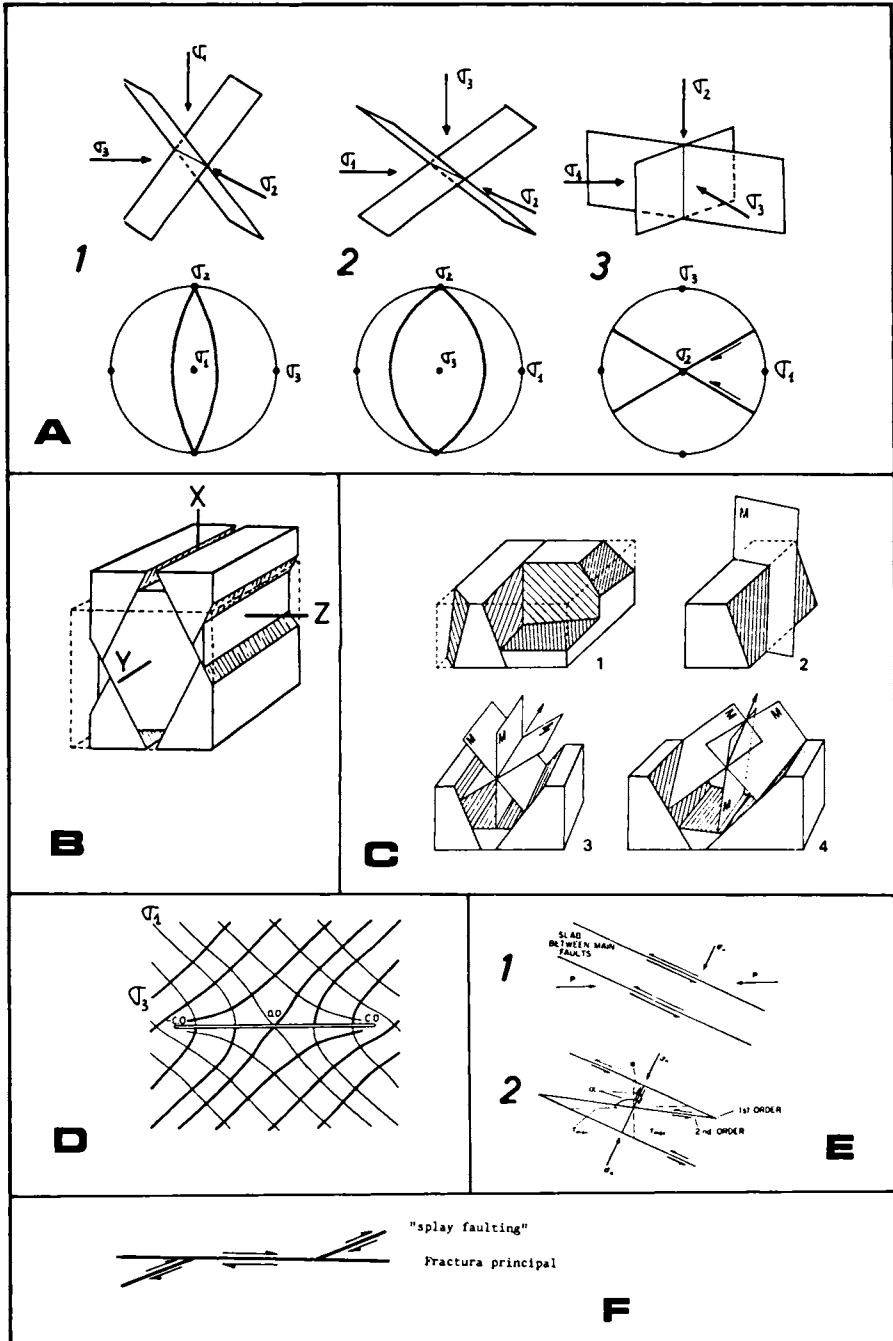
B.— Esquema molt simplificat que il·lustra les nocions de direccions principals de deformació. El cub inicial (línies discontinües) s'escurça segons Z, s'allarga segons X i no varia segons Y. Segons ARTHAUD (1969).

C.— 1) Disposició possible de microfractures no conjugades i de les estries corresponents. 2) Bloc diagrama que mostra la disposició del pla de moviment "M" corresponent a una falla. 3) Exemple de tres falles amb estries horitzontals mostrant la disposició dels plans de moviment corresponents. Aquests es tallen segons una recta que correspon a un eix de deformació. 4) Exemple més complex. Segons MATTAUER (1973).

D.— Trajectòries dels esforços principals als voltants d'un pla de fractura. Segons ANDERSON (1951).

E.— 1) Esforços normal i de cisalla sobre una llenca de material entre dues falles de direcció, verticals i paral·leles. 2) Plans de màxim esforç de cisalla i plans de fractura segons ordre dins la llenca. Segons McKINSTRY (1953).

F.— Disposició de les "splay faults" respecte a una fractura principal. Segons ANDERSON (1951).



Si prenem com a referència un volum qualsevol, individualitzat idealment en la roca abans de la tectònica, la seva longitud augmentarà segons X, minvarà segons Z i augmentarà, minvarà o restarà constant segons Y durant el curs de la deformació. Això no suposa, però, que els esforços soferts per la roca puguin ésser descrits per un sistema d'esforços amb tres components desiguals orientats segons X, Y i Z.

La determinació d'aquests tres eixos de deformació és fàcil quan és realitzada a partir d'un sistema de falles conjugades simètriques. Sovint, però, hom pot comprovar que les falles no pertanyen a sistemes conjugats clars i en diagrama no mostren cap element de simetria.

Això portà F. ARTHAUD (1969) a definir el "pla de moviment", "M", que és tot pla imaginari perpendicular a un pla de falla i que conté una estria. Aquest autor comprovà que els plans M d'una població de falles no es disposen a l'atzar sinó que es tallen segons una o dues famílies de rectes paral·leles que corresponen als eixos de deformació. Sobre un diagrama estereogràfic els pols d'aquests plans de moviment s'agrupen en garlandes, és a dir, estan continguts en plans, les perpendiculars als quals són els eixos de deformació. La fig. 1-C exemplifica tot això que acabo de dir.

Amb el mateix esperit que ARTHAUD, CAREY (1975) elaborà un model matemàtic que permet de determinar els tres eixos principals de l'el·lipsoide dels esforços en el cas general d'un el·lipsoide triaxial, a partir d'uns plans de fractura d'orientació aleatòria i preexistents.

2.2.— Falles de segon ordre: hipòtesis sobre llur formació

Segons ANDERSON (1951), com a resultat de la formació d'una falla important, la distribució del camp d'esforços als voltants del pla de falla és alterada, principalment als extrems, i ho és de manera que les trajectòries dels esforços principals esdevenen més paral·leles o més perpendiculars al pla de falla (fig. 1-D). Aquesta redistribució local dels esforços produiria la formació de nous sistemes de falles en els extrems de les falles principals, que aquest autor anomena "splay faults" (fig. 1-F). Cal indicar que la distribució dels esforços que suposa aquesta hipòtesi no té en compte la fricció entre els dos llavis de la falla (PRICE, 1966).

McKINSTRY (1953) estudià la reorientació del esforços principals al llarg de les falles produïda per la fricció interna i ho aplicà només a les falles de direcció, car, com que són típicament subverticals, l'acció de les forces degudes a la gravetat actua aproximadament paral·lelament al pla de falla i, consegüentment, la influència d'aquesta acció és mínima.

Suposà que el moviment horitzontal es produeix en dos plans paral·lels separats per una llenca de roca, tal com és representat a la fig. 1-E-2.

Trobà que les falles ocasionades per la reorientació dels esforços —que denomina falles de segon ordre— formaven un sistema conjugat que feia amb la falla principal un angle de $45 - \phi/2$ per a la falla amb gir igual que la principal i de $135 - 3\phi$ per a la falla amb gir oposat; com que ϕ —angle de fricció interna— és igual a 30° , els angles que formen són de 30° i de 90° respectivament, tal i com és representat a la fig. 1-E-2. Aquesta anàlisi fou feta en una llenca de material compresa entre dos plans de falla per tal de facilitar-ne l'explicació, però pot ésser aplicada a un sol pla de falla.

McKINSTRY també suposà que aquestes falles de segon ordre podien produir-ne d'altres de tercer ordre; tanmateix l'energia disponible minvaria ràpidament i impediria la continuació del procés.

MOODY i HILL (1956) consideraren que la combinació dels mecanismes proposats per ANDERSON i McKINSTRY pot donar lloc al desenvolupament de falles importants de segon ordre i de tercer. La reorientació dels esforços als voltants d'una falla principal dóna lloc a la formació de falles de segon ordre. L'angle que forma la direcció d'esforç principal de segon ordre amb la de primer ordre és de 45° .

També postularen la hipòtesi que aquestes falles de diversos ordres poden ésser acompanyades per plecs i encavalcaments, les interrelacions idealitzades dels quals són representades a la fig. 2-A.

Tant els plecs com les falles d'ordre menor poden existir als dos costats de la falla principal, però no poden continuar a través d'aquesta. Segons aquest esquema és impossible de distingir les falles de quart ordre o d'ordre menor de les de primer, segon i tercer.

Conceptes similars han estat expressats per LENSEN (1959), que afirmà que els desplaçaments de falles de direcció conjugades contemporànies que s'intersequen donen lloc a compressions i tensions locals als voltants de la línia d'intersecció d'ambdues falles. D'aquesta manera, als dos sectors aguts, el desplaçament del tascó cap a la línia d'intersecció de les falles ocasiona un escurçament local. Els esforços compressius resultants reforcen els esforços regionals i fan possible la producció de plecs, encavalcaments i falles inverses secundàries en aquests sectors. Anàlogament, als sectors obtusos es produeix una extensió que pot, localment, minvar la compressió regional i donar lloc a falles normals i dics.

En un altre treball LENSEN (1958) suggerí que, en àrees on hi ha dues falles no paral·leles, el desplaçament horitzontal al llarg d'aquestes falles pot produir el desenvolupament de horste i gräben.

Les idees de McKINSTRY i MOODY i HILL han estat combatudes per CHINNERY (1966 a i b), que féu un nou càlcul de la distribució dels esforços als voltants d'una falla principal i trobà que, després de la seva formació, els esforços de cisalla es redueixen als dos costats del pla de falla.

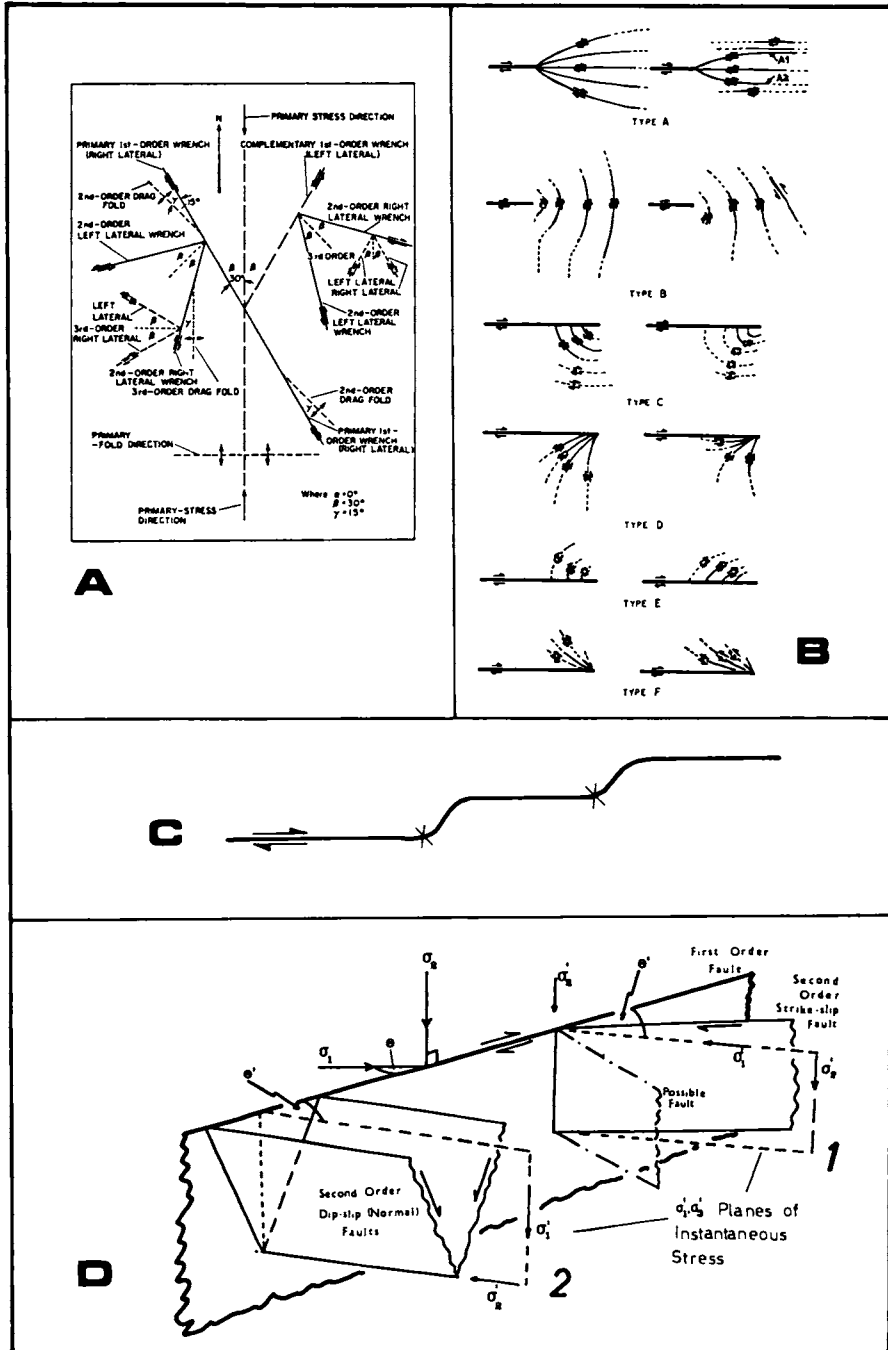
FIGURA 2:

A.— Esquema de les falles de 1^{er}, 2^{on} i 3^{er} ordre i de les direccions dels plecs associats que resulten teòricament d'una compressió primària N-S. Segons MOODY i HILL (1956).

B.— Tipus de falles secundàries. En cada tipus les formes de l'esquerra corresponen a una falla principal formada sota condicions de cisalla simple i les de la dreta són el resultat d'una compressió uniaxial. Segons CHINNERY (1966 b).

C.— Propagació, produint formes corbades, d'una falla principal com a conseqüència de la asimetria en la distribució de les corbes de màxim esforç de cisalla, que indica que el tipus A₁ té més possibilitats de formar-se que l'A₂. Les creus marquen els successius finals de la falla. Segons CHINNERY (1966 b).

D.— Orientació de: 1) falles de direcció de segon ordre quan l'esforç vertical al llarg de la fase d'oscil·lació és l'esforç principal intermedi; 2) falles normals de segon ordre que es poden formar quan —momentàniament— resta vertical la direcció d'esforç principal major. Segons PRICE (1969).



Suggerí que les falles secundàries es formen exclusivament als extrems de la falla principal i que les fractures de segon ordre no poden desenvolupar-se als seus voltants. Les concentracions dels esforços als extrems d'aquestes fractures principals són capaces de donar lloc a diversos tipus de falles secundàries que, per ordre de possibilitat, són les següents (fig. 2-B):

— Tipus A: Representa la tendència de les falles de direcció a continuar propagant-se i inclou les falles de tipus "splay" trobades correntment. Quan la falla principal és conseqüència d'una compressió uniaxial, hi ha una asimetria en la distribució de les corbes de màxim esforç de cisalla, que indica que el tipus A_1 té més possibilitats de formar-se que no l' A_2 . Això suggereix que les falles de direcció formades d'aquesta manera poden tendir a continuar propagant-se produint formes corbades, tal com és representat en la fig. 2-C. Possibles exemples d'aquest fenomen els trobem a la falla de San Andrés (capítol 2.5.3).

— Tipus B: Són bastant freqüents i corresponen a les conjugades del tipus A.

— Tipus C: Són aproximadament equivalents a les falles de segon ordre de McKINSTRY.

Els tipus D, E i F no són tan corrents.

En totes les anàlisis vistes fins ara els canvis en el camp d'esforços produïts pel moviment de la falla principal han estat considerats des d'un punt de vista estàtic, és a dir, hom ha considerat dos estats separats: el primer és el del sistema d'esforços que inicia el moviment de la falla i el segon es desenvolupa quan el desplaçament i els canvis d'esforços han estat completats després d'un lapse, de temps, no especificat.

Malgrat tot, segons PRICE (1969), les anàlisis que segueixen aquest model són incapaces d'explicar el desenvolupament de les falles de segon ordre en regions allunyades dels extrems de les falles principals. No obstant això, les falles de segon ordre en zones allunyades de fractures de primer ordre són comunament observades al camp.

PRICE (1969), basant-se en els resultats obtinguts de l'estudi dels terratrèmols i en consideracions teòriques que indiquen que el desplaçament al llarg d'una falla es produeix freqüentment en un lapse de temps molt curt i que abans que sigui atès el final del desplaçament el sistema sofreix un període d'oscil·lacions, postulà que, en certes circumstàncies, la freqüència i l'amplitud de les ones de xoc ("shock waves") i els esforços associats amb aquestes vibracions poden produir una alteració del camp d'esforços estàtic tal que l'orientació i la intensitat dels esforços principals poden, momentàniament, fer que es desenvolupin petites fractures de segon ordre que, malgrat que inicialment són estructures d'extensió molt limitada, poden, al llarg de cicles successius de vibració i durant increments successius de desplaçament al llarg de la falla de primer ordre, desenvolupar-se fins a produir estructures, relativament, de gran escala.

Segons com siguin el esforços inicials, particularment la intensitat de l'esforç principal vertical, les fractures de segon ordre que es desenvolupen poden ésser falles de direcció o falles normals (fig. 2-D).

Segons aquest autor, la intensitat dels esforços necessària per a produir falles de segon ordre és relativament alta; minva, però, quan la roca és dèbil i l'esforç principal efectiu menor és baix i l'angle que l'eix de l'esforç principal major fa amb la falla de primer ordre és relativament alt ($40-50^\circ$). Per a PRICE, aquestes condicions poden semblar una mica especials; malgrat això, però, hom pot afirmar que les falles de segon ordre només poden desenvolupar-se quan la majoria d'aquestes condicions són satisfetes.

2.3.— Experiment de Riedel: resultats obtinguts variant les diverses condicions

Aquest experiment fou dut a terme primerament per CLOOS (1928) i RIEDEL (1929) i ha estat objecte de nombrosos treballs: els de CLOOS (1955) i TCHALENKO (1970) entre els més importants.

Consisteix, tal com il·lustra la fig. 3-A, en dues taules que tenen damunt un paquet d'argila. Quan es desplacen les dues taules imitant una falla de direcció "de sòcol", apareixen a la "cobertura" d'argila dos sistemes característics de fractures "en escaló": un que forma un angle petit amb la direcció de la fractura representada per la línia de contacte de les dues taules —de l'ordre de 15° — i l'altre que forma un angle més gran —de l'ordre de 75° —. El primer sistema rep el nom de falles de Riedel (R) i el seu sentit de desplaçament és igual al de les dues taules; el segon sistema s'anomena de falles de Riedel conjugades (R') i té un sentit de desplaçament invers a l'anterior.

L'amplada d'aquesta zona de fractura és més gran en superfície i s'estreny en profunditat, com ho mostra la fig. 3-C.

La interpretació mecànica de les falles R i R' és la mateixa que la de l'apartat 2.2 per a les falles de segon ordre tal com la fan ANDERSON, McKINSTRY, MOODY i HILL, etc.

Certs autors, com SKEMPTON (1966), suggereixen l'existència d'una altra família de falles conjugades que es formarien simètricament de R i R' respecte de la línia de fractura del sòcol. Correntment són anomenades falles P i P', on el sentit de moviment de les P és igual que el de les R i el de les P' igual que el de les R' (fig. 3-D-4).

Altres estructures que hom pot observar són plecs i fissures d'extensió. Els plecs apareixen molt aviat, bé que no són sempre visibles, i es produeixen formant un angle de 45° amb la direcció de fractura del sòcol (fig. 3-D-1), mostrant sovint una disposició "en relleu". Les fissures d'extensió també formen un angle de 45° amb la falla del sòcol, però són

perpendiculars als eixos dels plecs i també es disposen en escaló. Solen ésser designades amb la lletra T (fig. 3-D-2); hom suposa que corresponen a un mode de fractura de tipus fràgil i, per tant, es troben paral·leles a la direcció d'esforç màxim local (FABRE i ROBERT, 1975). Si continua l'actuació de la falla del sòcol després de l'aparició dels plecs o les fissures d'extensió, ambdós prenen una forma sigmoide.

TCHALENKO (1970) observa la formació de falles de Riedel a totes les escales, tant experimentalment com en exemples reals, i que cada falla pot presentar-ne d'altres de Riedel de segon ordre, i aquestes d'altres de tercer ordre, etc. Aquest autor anomena aquest fet "Riedel within Riedel".

Veurem més exemples sobre l'experiment de Riedel, sobre l'aparició de les diverses estructures i sobre les relacions entre elles al capítol 2.4.

Podem ésser introduïts en aquest experiment diversos canvis que menen a variacions en els resultats obtinguts. Tot seguit veurem una sèrie de treballs en aquest sentit.

FABRE i ROBERT (1975), introduint variacions en el gruix i l'adherència de la cobertora d'argila sobre el sòcol, arriben a establir dos tipus extrems de cobertora: una de "fina i adherent" i una altra de "gruixuda i poc adherent". En progressar la deformació, en el primer cas, la fractura del sòcol sol arribar a manifestar-se directament a la superfície (fig. 3-B-1), mentre que en el segon cas rarament arriba a fer-ho, sinó que es formen en la cobertora falles que tenen la mateixa direcció que les de Riedel però no afecten el sòcol (fig. 3-B-2).

Una altra variació interessant és introduir en el moviment de la falla del sòcol un component vertical normal o invers. Això és el que fan WILCOX et al. (1973) amb el component normal i LOWEL (1972) amb l'invers, observant la formació de fosses tectòniques al llarg de la zona de fractura en el primer cas, i horsts amb encavalcaments i falles inverses en el segon. WILCOX et al. anomenen "divergent wrenching" el moviment horitzontal amb component vertical normal i "convergent wrenching" el que té el component vertical invers.

EMMONS (1969), estudiant en models de sorra la fracturació produïda per una falla de sòcol vertical però irregular, obtingué que a la superfície (a la cobertora) les falles individualitzen zones lenticulars que corresponen a zones de horst o de graben segons com es desplacen els blocs produïts per les irregularitats, acostant-se o separant-se (fig. 3-C).

2.4.— Evolució de la fracturació en avançar la deformació

En aquest apartat veurem uns quants exemples d'evolució de la fracturació —i les estructures que hi van lligades— en avançar la deformació, basats tant en exemples experimentals com en casos reals.

2.4.1.— Rotació de les falles en avançar la deformació

El primer autor que parlà de la rotació de les fractures en plans de cisalla lligats a aixafament fou SANDER (1948). Hi distingeix dos casos amb rotació interna —ròmbic i monoclínic— i un altre amb rotació externa; de la intensificació d'aquests dos processos pot produir-se en el primer cas un moviment perpendicular a l'eix "B" amb diferents sentits de rotació dels plans de falla que tenen lloc directament l'un contra l'altre; això, però, no es produiria en el segon cas.

R. FREUND (1970), en estudiar les falles de direcció de la regió de Sistan a l'Iran, trobà que a mesura que augmentava la longitud de les falles i llur desplaçament horitzontal, ho feia també l'angle que les fractures formaven amb la direcció de compressió (fig. 4-A), fins a arribar a formar angles de 77° ; alhora, els plecs confinats per falles destres i sinistres giraven en el mateix sentit que les falles que els confinaven mentre que els plecs no confinats restaven perpendiculars.

Basant-se en experiments de CLOOS (1955) i en d'altres de propis en què, en progressar la deformació, les fractures conjugades augmentaven l'angle format entre si i amb la direcció d'escurçament, elaborà un model en el qual, a mesura que avança la deformació, les falles van virant augmentant l'angle que formen amb la direcció de compressió i produint, ensems, la rotació i el desplaçament dels eixos dels plecs confinats entre les falles (fig. 5-A) mentre, alhora, se'n van produint de noves que formen els angles normals de 25° a 30° amb la direcció de compressió. D'aquesta manera es produeix una gamma contínua de falles que en augmentar d'edat també augmenten l'angle format amb la direcció de compressió. Els buits i les superposicions als extrems de les falles són reduïts i eliminats per la redistribució de matèria produïda per branques de falles terminals (fig. 5-A).

En un treball posterior FREUND (1974) estableix dos models d'evolució d'un sol sistema de fractures: irrotacional i rotacional, segons si el rectangle ideal que inscriu la zona fracturada resta rectangle o sofreix una rotació que el transforma en un romboide (fig. 5-B). En el cas d'una deformació irrotacional les fractures han de sofrir una rotació i augmentar l'angle format amb la direcció d'escurçament, mentre que si aquesta rotació de les fractures no es produeix, el model en conjunt ha de sofrir una rotació.

Per exemplificar el model irrotacional féu un experiment amb un sistema de fractures tallat en plastilina (fig. 4-B) on hom observa la rotació de les fractures en avançar la deformació, i que a un desplaçament més gran li correspon també una rotació més gran.

En aquest treball FREUND també parla dels models de moviment de dos sistemes de falles conjugades, qüestió que tractaré en l'apartat proper.

FIGURA 3:

A.— Representació de l'experiment de Riedel. R: falles de Riedel; R': falles de Riedel conjugades; W: amplada de la zona de cisalla. Segons TCHALENKO (1970).

B.— Fractures de la cobertora lligades a una falla de direcció en el sòcol. Tipus 1: cobertora fina i adherent: la fractura del sòcol arriba a manifestar-se directament a la superfície. Tipus 2: cobertora gruixuda i poc adherent: les falles importants a la superfície són les de Riedel (R). Segons FABRE i ROBERT (1975).

C.— Estructures de horst (1) i graben (2) formades experimentalment per translació horitzontal segons una superfície irregular. Cal remarcar que la zona de fractura s'estreny en profunditat. Segons EMMONS (1969).

D.— Estructures que poden aparèixer en una zona de fractura:

- a: plecs en escaló.
- b: fissures d'extensió.
- c: falles conjugades de Riedel.
- d: falles P i P'.

a, b i c segons FABRE i ROBERT (1975).

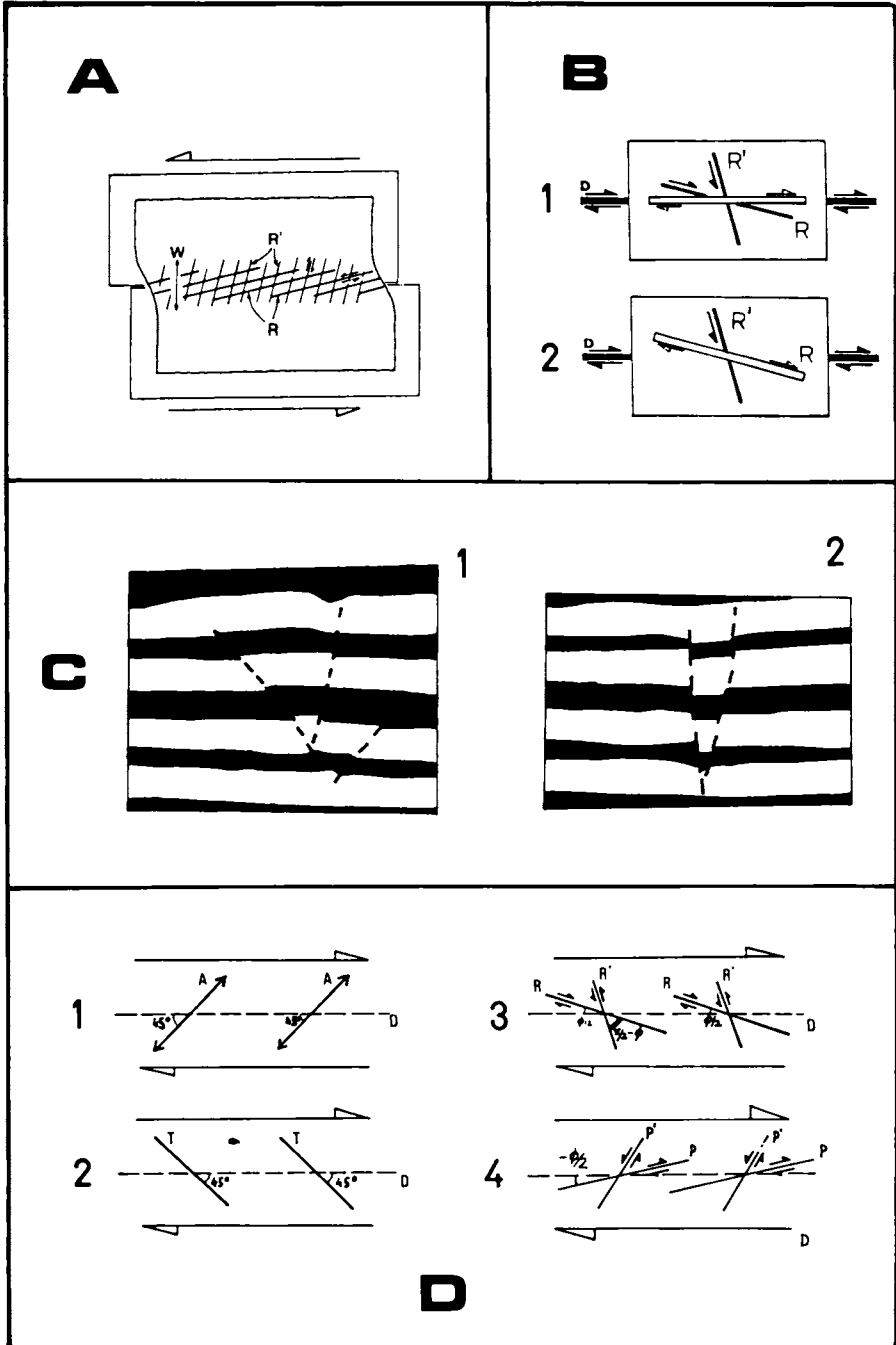
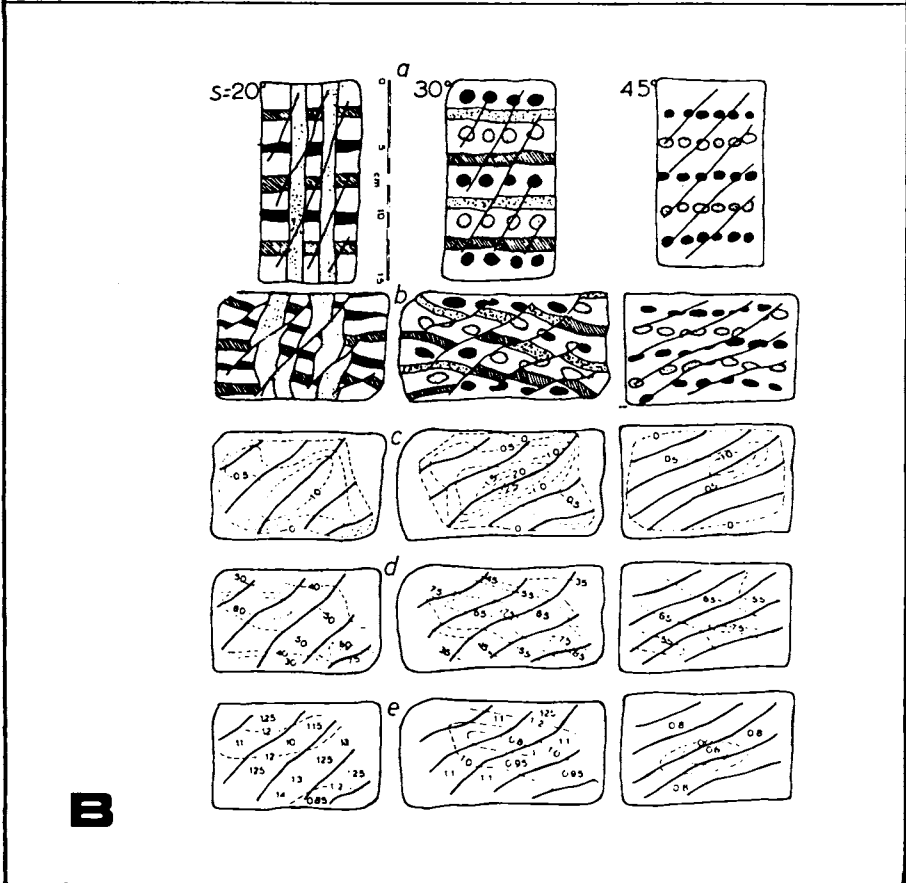
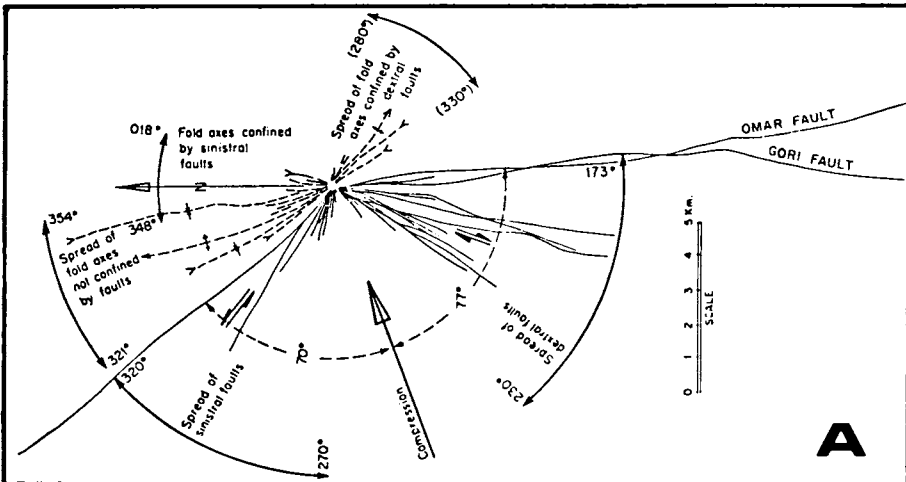


FIGURA 4:

A.— Diagrama de les direccions de les falles de direcció de Sistan (Iran) que mostra la relació entre la longitud del traçat de les fractures i llur direcció. Hom hi observa com augmenta la longitud al mateix temps que l'angle format amb la direcció de compressió. També il·lustra les distribucions angulars dels plecs respecte a les falles. Segons FREUND (1970).

B.— Experiment de deformació irrotacional d'una família de falles tallada en plastilina a diversos angles amb la direcció d'escurçament (a); per un escurçament de més o menys 0,5 (b); (c): variació del desplaçament al llarg de les fractures; (d): angle format per les fractures amb la direcció d'escurçament; (e): canvi dúctil de la distància entre falles adjacents. Hom pot veure-hi la relació directa entre l'augment del desplaçament i l'augment de l'angle format amb la direcció d'escurçament. Segons FREUND (1974).



2.4.2. — *Models de moviment de dues famílies de falles conjugades*

FREUND (1974) classificà els models de moviment de dues famílies de falles conjugades en dos grups: rotacionals i irrotacionals.

El model rotacional correspon a l'experiment de Riedel (cisalla simple) i les falles no hi són paral·leles a la direcció de cisalla, i així, doncs, l'àrea fallada esdevé incompatible amb les que l'envolten (fig. 5-C), tant en longitud com en l'orientació dels límits. Aquestes falles divergeixen $\phi/2$ i $90 - \phi/2$ graus de la direcció de cisalla — essent ϕ l'angle de fricció interna del material— i són, com ja hem vist, correntment anomenades “falles de Riedel”. Un tercer grup de falles —les P— pot aparèixer amb deformacions més grans, formant un angle de $-\phi/2$ amb la direcció de cisalla.

Totes les falles viren cap a l'eix d'extensió principal i cap a l'esforç compressiu menor, de manera que les falles R i P tendeixen a fer-se paral·leles a la direcció de cisalla. La velocitat de rotació és, tanmateix, diferent. Les falles R giren molt a poc a poc, mentre que les R' ho fan ràpidament i, per tant, augmenten l'angle entre elles i l'esforç compressiu màxim. L'esforç normal en les falles R' és, per consegüent, sempre més gran que no en les R. Com que la resistència de fricció és més gran en les falles R', els desplaçaments ocorraran amb preferència en les falles R més que no en les R'. L'esforç normal en les falles P és més gran que no en les R', de manera que els desplaçaments en les falles P són sempre inferiors als de les R.

La incompatibilitat en longitud de l'àrea fallada és positiva en les falles R i negativa en les P. En les falles R' és primer negativa i després es capgira i esdevé positiva. El valor absolut dels canvis és més petit en les falles R' que no en els altres dos tipus. Cal acomodar aquesta incompatibilitat amb una deformació dúctil com és ara un “corbament” (“bending”) de la llenca d'entre les dues falles. Com que la resistència és més petita en les falles R', cal esperar que aquestes seran preferentment actives en els casos que la fricció en les falles és petita en comparació amb la resistència dúctil (“ductil strength”) del material.

En aquest tipus de falles hom pot esperar, com acabem de veure, un cert tipus de deformació dúctil. Aquestes falles seran corbades, i només podran ésser rectes si l'àrea fallada roman compatible amb l'àrea circumdant. Per a aquest autor això només és possible quan les falles són paral·leles a la direcció de cisalla.

Pel que fa al model irrotacional, segons FREUND (1974) és geomètricament impossible de desplaçar simultàniament dues famílies de falles conjugades que es tallen l'una a l'altra. Per aquesta raó les dues famílies o no es tallen o operen alternativament. Aquest model és equivalent a una deformació per cisalla pura.

El primer cas és el mostrat per HOEPPENER et al. (1969) amb una capa d'argila sobre una làmina de cautxú estirada. Amb un escurçament d'aproximadament 0,9 apareixen nombroses fractures de cisalla molt fines formant dues famílies conjugades. En avançar la deformació, algunes d'aquestes fractures es desenvolupen transformant-se en falles amb desplaçament observable, mentre que les altres disminueixen. Les dues famílies de falles del sistema conjugat són presents sempre en nombres iguals i no es tallen l'una a l'altra, ans es localitzen en zones desiguals que només contenen falles d'una de les famílies.

Amb el progrés de la deformació, les dues famílies de falles viuen en direccions oposades envers l'eix principal d'extensió, mentre llurs extrems resten amb l'orientació inicial o es dobleguen lleument cap a la direcció d'escurçament.

Segons FREUND (1974), sembla probable que cada domini d'aquest experiment es comporti com una sola família de falles, tal i com hem vist en l'experiment amb plastilina de la fig. 4-B. El sistema de falles de direcció conjugades del SE d'Iran (FREUND, 1970) que hem vist en parlar del problema de la rotació de les falles presenta, segons aquest autor, una configuració similar.

El segon cas en què les falles conjugades operen alternativament ja fou proposat per ANDERSON (1951) (fig. 6-C).

FREUND (1974) atacà aquest model perquè el mecanisme és en realitat rotacional, encara que, com que es produeixen rotacions oposades en jugar les dues famílies del sistema alternativament, el producte final pot ser irrotacional. Per intentar de superar aquesta dificultat FREUND proposà un model en què en comptes d'actuar alhora moltes falles d'una de les famílies alternativament amb l'altra —com sembla que proposava ANDERSON—, es forma i actua una sola falla de cada família alternativament (fig. 6-A), de manera que la rotació ocasionada cada volta és més petita, i la repetició d'aquest procés pot portar a deformacions irrotacionals importants. L'aspecte final d'aquest fracturament consisteix en dues famílies de falles conjugades que s'intersequen i es desplacen l'una a l'altra alternativament.

En la meua opinió aquest model de FREUND és substancialment igual al d'ANDERSON, ja que ambdós segueixen un camí ("path") rotacional en fer actuar les dues famílies del sistema alternativament, per molt que en un cas actuï una falla tota sola i en l'altre puguin actuar diverses falles, i en ambdós casos l'estat final pot ésser no rotacional si han actuat ambdós sistemes amb la mateixa intensitat.

La detenció del moviment d'una falla preexistent a favor de la formació d'una de nova conjugada requereix una explicació. Segons FREUND (1974), quan es produeix un moviment sobre una falla, o bé els segments

fallats sofreixen una rotació en el sentit oposat al mostrat en la fig. 6-A, o bé els límits són desplaçats contràriament al desplaçament de la falla en relació amb les zones circumdants. Això, segons aquest autor, crea esforços en el bloc fallat que s'oposen al moviment de la falla existent, els quals, però, al mateix temps s'afegeixen a l'esforç general sobre la falla conjugada potencial. Quan aquests esforços arriben a un valor que ultrapassa la resistència de cisalla ("shear strength") del material, es forma la falla conjugada i l'altra cessa el seu moviment. Aquest procés va repetint-se alternativament.

2.4.3. – Formació i evolució de les zones de cisalla *

J. S. TCHALENKO (1970) realitzà el clàssic experiment de Riedel utilitzant caolí com a material de "cobertura". Representà en un gràfic (fig. 6-D) la corba de "força-desplaçament", i veié que mostrava un increment ràpid de la resistència de cisalla fins a un valor màxim, punt en el qual apareixien les primeres fractures; després experimentava un decreixement fins a atènyer un valor estable amb desplaçaments importants quan la zona de cisalla era totalment formada. La resistència de cisalla màxima l'anomenà "resistència de cisalla de pic", i la resistència estable final "resistència de cisalla residual".

Observant el desenvolupament de les fractures individuals i la distorsió dels "marcadors" en la superfície de l'argila, mesurà la proporció aproximada entre el desplaçament de les taules del sòcol (o desplaçament total D) i el moviment de les fractures individuals (d), representant-ho (fig. 6-E) i veient que mostra un increment ràpid del moviment de les fractures després de la "resistència de cisalla de pic".

La fig. 6-B il·lustra la seqüència d'estructures que obtingué en l'experiment. Les estructures foren dibuixades de fotografies fetes durant l'experiment i mostren cinc estadis de deformació. Els desplaçaments mesurats en les fractures són representats en forma d'histogrames que indiquen els valors acumulatius del desplaçament d_i que s'ha produït en fractures de diferents inclinacions "i" respecte a la direcció de cisalla. Els estadis "a" a "e" són els mateixos en les figs. 6-B. D i E.

– Resistència de deformació pre-pic (no representada en la fig. 6-B): el moviment inicial de les taules causa una deformació homogènia en la regió de la futura zona de cisalla. Els cercles inscrits sobre el prisma d'argila es transformen en el·lipses, indicant que la deformació és de cisalla simple. Durant aquesta etapa no es poden distingir fractures.

* En aquest treball he usat sempre el terme "zona de fractura" perquè es tracta de comportament de tipus fràgil; aquí, però, mantinc el terme "zona de cisalla" ("shear zone") tal com l'usa TCHALENKO.

– Estadi “a”, estructura de pic: les primeres falles, les de Riedel, apareixen tot just abans d’atènyer la “resistència de cisalla de pic”, amb una inclinació mitjana de $12^\circ \pm 1^\circ$. En el moment d’atènyer la “resistència de pic” les falles de Riedel han sofert una rotació fins a un angle màxim d’aproximadament 16° . Durant aquest estadi la proporció de desplaçament total localitzada en les fractures individuals augmenta ràpidament del 0 al 50%.

– Estadi “b”, estructura post-pic: algunes Riedels han girat reduint llur angle, i n’apareixen de noves formant angles de l’ordre de 8° . La proporció de desplaçament produït per les falles ateny el 75%.

– Estadi “c”, estructura post-pic: un nou tipus de fractures –les P– és format amb una inclinació mitjana de -10° , és a dir, aproximadament simètriques de les Riedels. Aquestes falles interconnecten parelles de Riedels, formant les característiques estructures de “bull nose” (SKEMPTON, 1966). Més de la meitat de les fractures formen ara angles de l’ordre de 4° , i pràcticament tot el moviment és ocasionat pels desplaçaments al llarg d’aquestes.

– Estadi “d”, estructura pre-residual: les primeres fractures horitzontals contínues –les falles de desplaçament principal– ja s’han format, isolant entre elles lletilles allargades de material essencialment passiu. La major part fan angles de 0° a 4° .

– Estadi “e”, estructura residual: pràcticament tot el desplaçament té lloc al llarg d’una sola falla de desplaçament principal sobreposada al contacte entre les dues taules (sobre la falla de sòcol). La resistència de cisalla és estable i té un valor residual.

Aquesta evolució hi és usant caolins amb un contingut d’aigua del 56%. Quan aquest contingut és menor, en l’estadi “a” es formen les Riedels conjugades (R') amb un angle de $78^\circ \pm 1^\circ$ simultàniament a l’aparició de les Riedels. A causa del gran angle que formen amb la direcció general de moviment, les Riedels conjugades ben aviat esdevenen passives i es deformen adoptant forma de S (fig. 3-A). Tanmateix, les característiques generals dels estadis “a” a “e” no són modificades per la presència de les Riedels conjugades.

El mecanisme de deformació dels diferents estadis és, segons TCHALENKO, essencialment de cisalla simple a l’estadi de pic; l’estadi post-pic és dominat per les limitacions cinemàtiques (“kinematic restraints”) inherents al camp de deformació; l’estadi residual correspon a l’afloreament net en superfície de la fractura del sòcol.

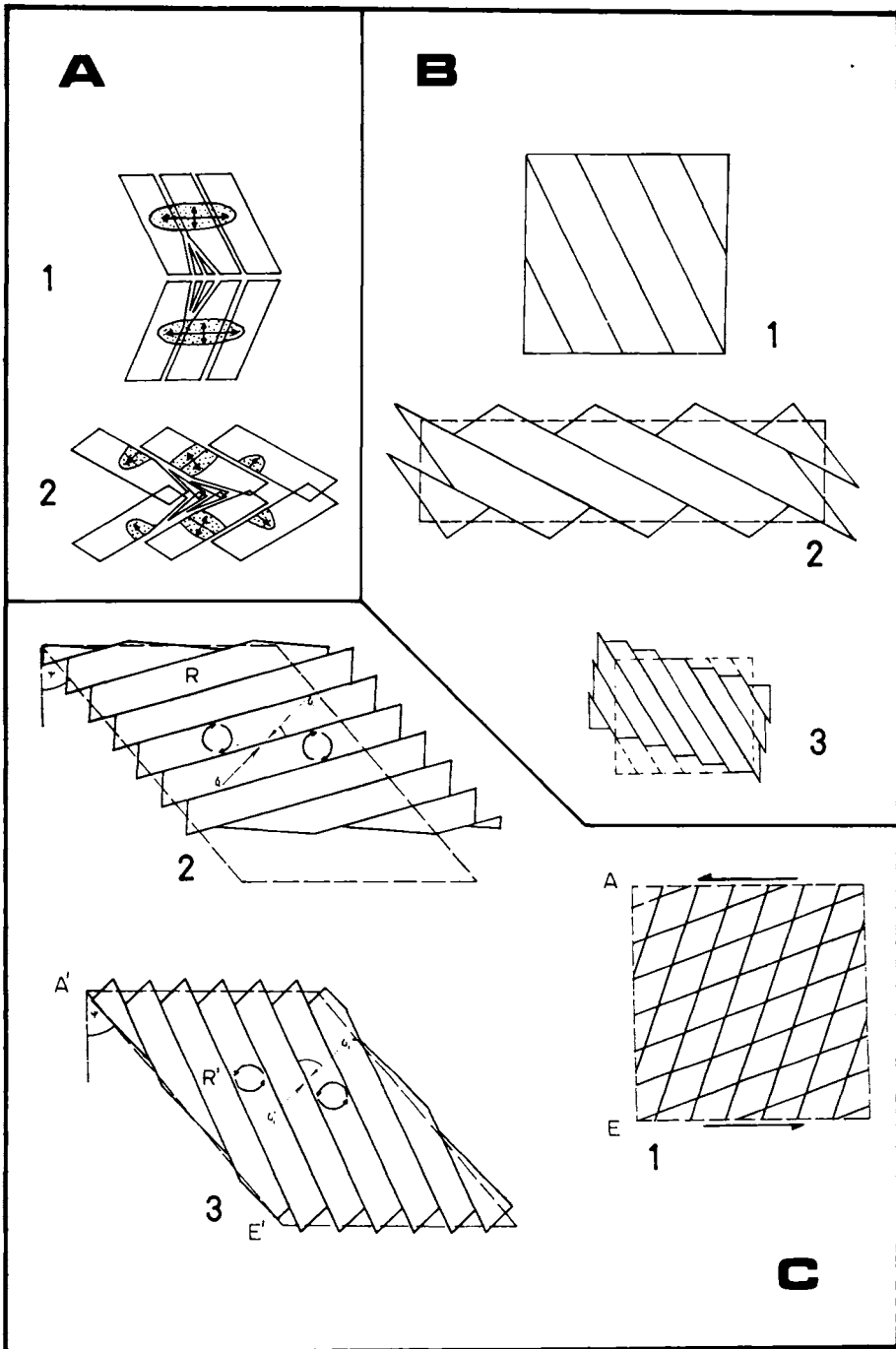
En molts casos, una estructura de Riedel conté Riedels similars de menor escala, fenomen que és anomenat per TCHALENKO (1970) “Riedel within Riedel Structure”.

FIGURA 5:

A.— Model geomètric que mostra: la rotació de les falles de direcció; la rotació i el desplaçament dels plecs; la reducció dels buits i les superposicions als extrems de les falles per redistribució del material amb falles més petites; i la relació geomètrica entre l'angle de rotació (r) i el desplaçament (d). 1) Abans de la deformació, 2) després de la deformació. Segons FREUND (1970).

B.— Models d'evolució d'una sola família de fractures. 1) Abans de la deformació; 2) model "irrotacional", la zona deformada resta inscrita en un rectangle i les fractures giren en avançar la deformació; 3) model "rotacional", les falles no giren en avançar la deformació, però sí els límits de la zona deformada, que es transforma en un romboide. Segons FREUND (1974).

C.— Model rotacional del moviment de dues famílies de falles conjugades (cisalla simple). 1) Abans de la deformació; 2) les falles R giren lleugerament en direcció oposada a la cisalla i produeixen una incompatibilitat de longitud positiva; 3) les falles R' giren ràpidament en la direcció de la cisalla i ocasionen una incompatibilitat de longitud primerament negativa i, després, positiva. Segons FREUND (1974).



2.4.4.— *Canvi de l'eix X d'horitzontal a vertical durant una fase compressiva*

CHOUKROUNE i SÉGURET (1968) i CHOUKROUNE (1969), en estudiar dos exemples reals de materials fracturats i plegats per una sola fase compressiva, observaren que al començament es produïen falles de direcció i en un moment donat es formaven falles inverses i plecs gairebé simultàniament. Això pressuposa que l'eix principal d'allargament X passa d'ésser horitzontal a vertical. En cap d'aquests dos treballs, però, hom no dona cap explicació d'aquests fets.

En dos treballs posteriors ÁLVARO i CAPOTE (1973) i CHOUKROUNE i DELAIR (1976) refermen bàsicament aquest model evolutiu, observant, però, que les falles inverses comencen a formar-se una mica abans que els plecs i continuen llur actuació durant la formació d'aquests.

Segons ÁLVARO i CAPOTE (1973) —basant-se en PRICE (1966)— la fracturació comença quan $\sigma_1 = \sigma_L + K \sigma_3$ (on σ_L és l'esforç de compressió uniaxial). El canvi de l'eix X d'horitzontal a vertical es produeix quan

$$Ca = \sigma_c \frac{m(m-2)}{(m-1)}$$

(essent Ca la compressió horitzontal, σ_c l'esforç vertical i m el nombre de Poisson), i comença la formació de falles inverses. El plegament comença quan s'ateny el valor crític del l'equació d'Euler,

$$F = 4 \pi^2 \frac{EI}{W^2}$$

(on E = mòdul de Young, I = moment d'inèrcia i W = longitud d'ona), mentre continua l'actuació de les falles inverses. En la fig. 6-F trobem una representació esquemàtica d'aquestes etapes successives.

Per a CHOUKROUNE i DELAIR (1976) el canvi en la posició de l'eix X ocorre quan es produeix el bloqueig de la possibilitat d'extensió horitzontal i només resta possible l'extensió vertical. En el moment del canvi hi ha un període en què es formen simultàniament falles de direcció i falles inverses. Per a aquest autors la fracturació amb falles d'intersecció vertical —falles de direcció— és la que necessita una quantitat d'energia més petita, i per això són les primeres de formar-se, la qual cosa està d'acord amb SIMPSON (1974) —vegeu capítol 2.1.—.

2.5.— Alguns exemples reals de falles de direcció

2.5.1.— Distribució de Riedel en la cobertora produïda per una falla de sòcol

F. BERGERAT (1977), en estudiar la fracturació de l'avantpaís juràssic entre les fosses de la Saona i del Rin, hi distingeix dos sistemes de falles conjugades de direcció: a) el sistema juràssic, d'edat pontiana, amb falles de direcció sinistres submeridianes i destres SW-NE a W-E; b) el sistema pre-juràssic, d'edat oligocena, amb falles de direcció sinistres N 110° a N 150° E.

La fracturació pre-juràssica és interpretada en termes de "Riedel", i hom suposa, doncs, l'existència d'una falla de direcció de sòcol sinistra de direcció N 060° E, producte d'un escurçament general N 010-020° E. Les falles N 035-040° E correspondrien aleshores a fractures R i les N 140-150° a fractures R' (fig. 7-A).

Un altre exemple és fornït per FABRE i ROBERT (1975) al Vercors sud-oriental. A nivell fotogeològic la fracturació principal (quilomètrica) es manifestat amb dues famílies de fractures: l'una, de direcció mitjana N 050° E, correspon a falles de direcció destres que han sofert moviments horitzontals molt importants (quilomètrics) i l'altra, amb una direcció mitjana N 120-130° E, formada per petites falles de direcció sinistres amb desplaçaments menys importants (fig. 7-B). A més a més hi ha una fracturació més fina (hectomètrica) molt visible als voltants de la falla de Cléry, formada també per dues famílies de fractures: l'una de direcció N 070° E amb moviments destres i l'altra de direcció N 140-150° E en què no apareix clarament cap moviment.

La interpretació d'aquesta fracturació, feta per aquests autors, és la següent:

- El sistema constituït per les famílies N 070° E i N 140-150° E (hectomètric) sembla que són les falles R i R' de la falla de Cléry (N 050° E).
- El sistema constituït per les famílies N 050° E i N 120-130° E és interpretat com les falles R i R' respectivament d'una falla de sòcol dreta de direcció N 030° E (fig. 7-C).

2.5.2.— Un exemple actual de fracturació produïda per un terratrèmol: Dasht-e Baýaz (Iran)

TCHALENKO i AMBRASEYS (1970) realitzaren una anàlisi estructural de les fractures formades en la zona de fractura associada amb el terratrèmol de Dasht-e Bayaz el 31 d'agost de 1968, que produí una zona de falla de més de 80 km. Estudiaren un segment de més de 25 km de llargada i

FIGURA 6:

A.— Model de moviment de dues famílies de falles conjugades, segons FREUND (1974). Observeu que és similar en tot al model d'ANDERSON (1951), actuant, però, una sola falla de cada família alternativament.

B.— Seqüència d'estructures produïdes durant l'experiment de Riedel (vegeu D i E). D: desplaçament total de les taules; i: inclinació de les fractures en graus respecte a la direcció de moviment general; d_i : desplaçament acumulatiu en les fractures inclinades i graus en cada estadi de moviment; a, b, c, d, e: estadis de deformació. Segons TCHALENKO (1970).

C.— Model de moviment de dues famílies de falles conjugades segons ANDERSON (1951). Les falles conjugades operen alternativament. En cada moviment es produeix una rotació, però el resultat final és irrotacional.

D.— Resultats de l'experiment de Riedel amb caolí. Corba de força-desplaçament. Contingut d'aigua: 56%. D: desplaçament total de les taules; T: força de cisalla horitzontal; a, b, c, d, e: estadis de la deformació (igual que en la fig. B). Segons TCHALENKO (1970).

E.— Igual que en B i D. Proporció de moviment total localitzat en les fractures.

F.— Diagrama esquemàtic que mostra les successives etapes de deformació per compressió al llarg del temps, en augmentar l'esforç màxim horitzontal σ_1 . Quan σ_1 ateny, en el temps t_1 , les condicions de ruptura —segons el criteri de Navier-Coulomb—, es formen falles de direcció amb l'eix X horitzontal. A partir de t_2 es formen falles inverses amb l'eix X vertical. Els plecs es formen a partir de t_3 quan, en augmentar l'esforç compressiu, s'ateny el valor donat per l'equació d'Euler. Segons ÁLVARO i CAPOTE (1973).

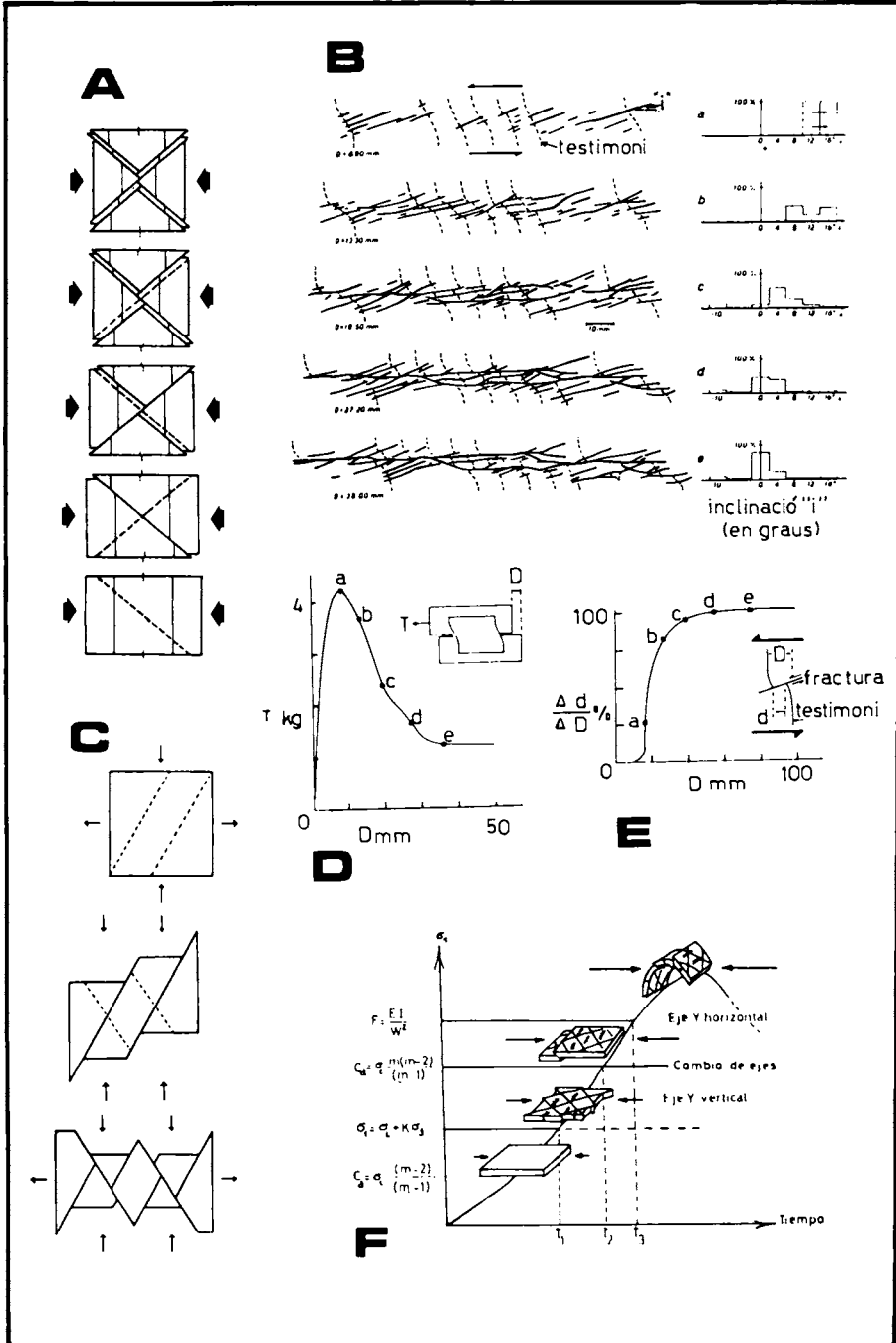


FIGURA 7:

A.— Esquema interpretatiu de la fracturació principal de les regions subvosgianes i prejurassianes. Hom admet l'existència en el sòcol d'una falla de direcció sinistra N 060° E i interpreta el feix de falles sinistres N 040° E que afecten la cobertora com a falles R de Riedel. Altres fractures, menys importants, destres — no representades en l'esquema— són també presents i corresponen a les R' (Riedel conjugades). Segons BERGERAT (1977).

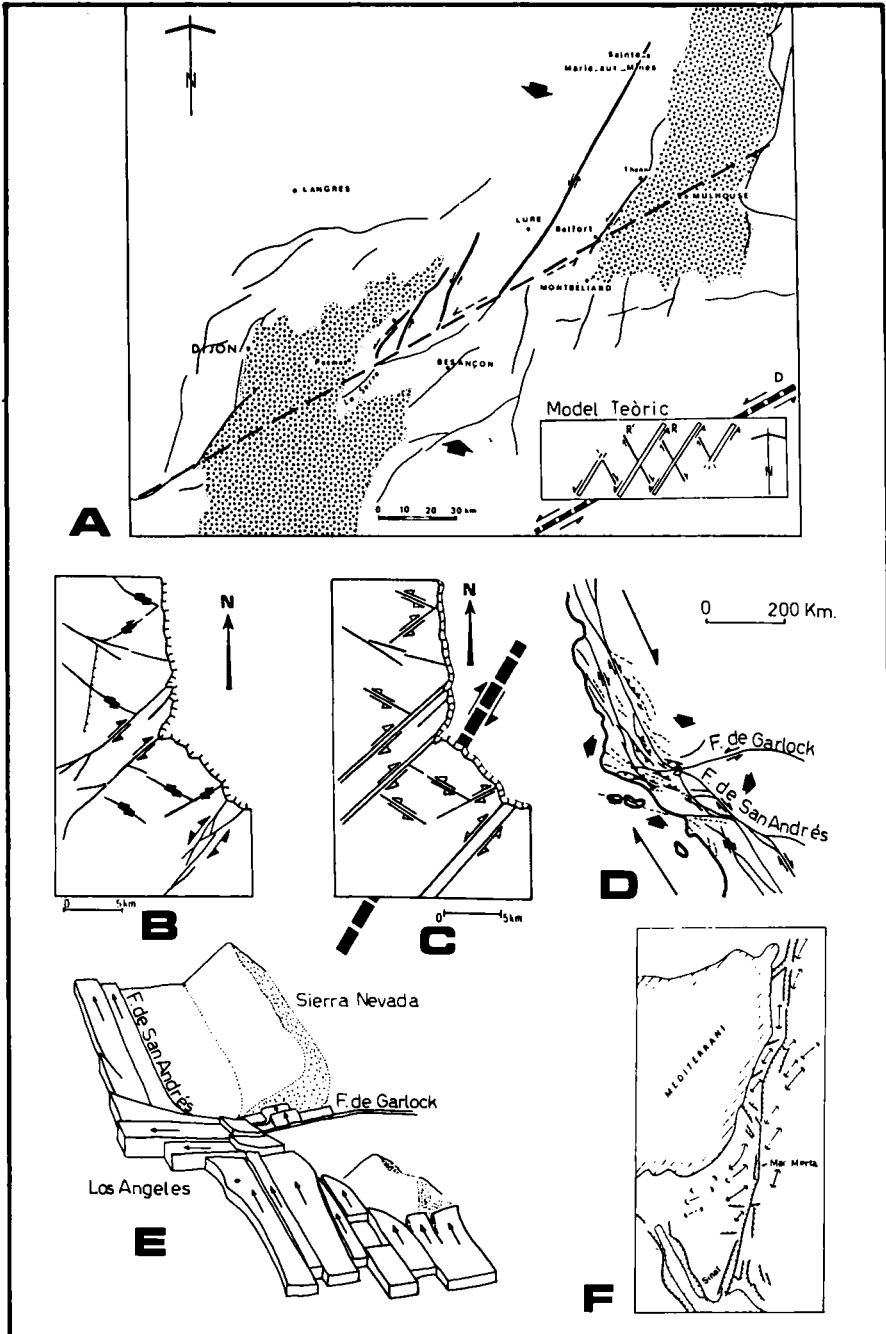
B.— Fracturació principal del Vercors sub-oriental. Segons ARNAUD, *in* FABRE i ROBERT (1975).

C.— Interpretació de la fracturació principal del Vercors sud-oriental com a falles R i R' d'una falla de direcció dreta en el sòcol. Segons FABRE i ROBERT (1975).

D.— Disposició general de la Falla de San Andrés i les falles i plects associats. Hi són indicades les direccions i l'allargament. Segons el "Tectonic Map of North America" (1969) *in* MATTAUER (1973).

E.— Interpretació de la Falla de San Andrés i tot el complex de falles associades com a corresponent a una gran falla transformant. Segons ANDERSON (1971).

F.— Disposició dels plects a ambdues parts de la falla de direcció sinistra de la Mar Morta. Els sediments recents de les fosses d'esfondrament són representats amb punts. Segons PICARD (1966), *in* MATTAUER (1973).



de 2 a 3 km d'amplada, localitzat en els sediments quaternaris de la vall de Nimbluk. El màxim desplaçament relatiu observat en la zona de falla és de més de 450 cm en moviment horitzontal sinistre i de 250 cm en moviment vertical, i es concentra en una zona principal de desplaçament de direcció E-W de 2 a 100 metres d'amplada.

La zona de fractura és caracteritzada en la major part de la seva longitud per un desplaçament principal pronunciat, resultat de diferents tipus de fracturació. Per estudiar-la, la dividiren en cinc seccions, per ordre de complexitat: en la secció 1, la zona de desplaçament principal és formada per una sola zona de cisalla. En la secció 2, hi trobem fractures R i P. En la secció 3, una estructura intermèdia entre una zona R i una de T. La secció 4 il·lustra un exemple on apareixen zones R' a més de R i P. Finalment, en la secció 5 les zones R' dominen sobre totes les altres estructures.

Segons aquests autors, considerant totes aquestes seccions en conjunt, les zones R formen un angle de 15° a 20° amb la zona de desplaçament principal, i les zones R' de 60° a 70° . L'angle de resistència de cisalla varia entre 35° i 40° .

D'altra banda la secció 4 proporciona un exemple perfecte d'estructures formades sota condicions de cisalla simple. En el segment oriental les falles de Riedel conjugades mostren un mateix grau de desenvolupament en la totalitat de la zona de desplaçament principal. Algunes zones R' han pres una lleugera forma de S que indica que comencen a respondre passivament a una deformació que resta relativament homogènia.

Com a conclusió TCHALENKO i AMBRASEYS afirmen que l'anàlisi estructural mostra que un model de deformació per cisalla simple interpretat en termes del criteri de fractura de Coulomb pot explicar la major part de les estructures observades.

2.5.3. – Grans falles de direcció

2.5.3.1. – La falla de San Andrés (Califòrnia)

És un dels exemples més coneguts de gran falla de direcció i és actualment activa. Ha estat estudiada principalment per WILLIS (1938), TALLIAFERRO (1943) i HILL i DIBBLEE (1953), i té una longitud de gairebé 900 km; es bifurca en els extrems. WILLIS (1938) trobà que ha estat produïda per una direcció de compressió $N 015^\circ E$ (fig. 7-D) i el seu moviment és destre.

HILL i DIBBLEE (1953) consideren la possibilitat que la falla sigui precretàcia i que hagi estat actuant periòdicament fins a l'actualitat. El desplaçament acumulatiu fóra de 580 km, dels quals 16 des del Plistocè i 370 des de l'Eocè Superior; es fa més difícil de calibrar el desplaçament en les fases més antigues.

Segons HOWARD (1968) hi ha un desplaçament continu —que pot atènyer 4 cm l'any— que és producte d'una deformació contínua en profunditat. Aquest autor, mitjançant mesures geodèsiques precises, ha obtingut unes direccions d'escurçament i d'allargament coincidents amb les obtingudes amb mètodes clàssics (fig. 7-D).

M. A. CHINERY (1966 b) interpreta les inflexions en la direcció de la falla com a antics extrems, segons el model de la fig. 2-D.

Darrerament D. L. ANDERSON (1971) ha interpretat la falla de San Andrés, i tot el complex de falles associades, com a corresponent a una gran falla transformant (fig. 7-E). Segons aquest autor, el moviment de l'escorça terrestre en la Califòrnia meridional té una tendència general cap al NW, llevat del lloc on el conjunt de blocs més inferior xoca amb les profundes arrels de la Sierra Nevada. En aquest punt els blocs són desviats cap a l'oest, ocasionant d'aquesta manera la cadena transversal i la gran inflexió en el sistema de falles de San Andrés. Al nord de la inflexió, els blocs reprenen llur marxa cap al NW, arrossegant amb ells la serralada costera. La depressió del mar Salton, a l'extrem SE, representa una zona de "rift" que s'ha desenvolupat entre dos blocs.

2.5.3.2. — *La falla de la Mar Morta*

Aquesta fractura, estudiada entre d'altres per PICARD (1966) i FREUND, ZAK i GARFUNKEL (1968), és una gran falla de direcció sinistral produïda pel moviment levogir de la Península d'Aràbia que ocasionà l'obertura de la Mar Roja (MATTAUER, 1973).

La fig. 7-F il·lustra la inflexió dels eixos dels plecs als voltants de la falla, que mostra, així, el seu caràcter sinistre. Arrenglerades al llarg de la falla hi ha tot un seguit de fosses tectòniques en forma de rombe, conseqüència de la disposició no rectilínia de la falla. Aquesta tectònica s'ha produït durant el Miocè, el Pliocè i el Plistocè.

ANÀLISI ESTRUCTURAL

3.1.— Introducció

3.1.1.— *Hipòtesi plantejada*

El problema plantejat en començar aquest treball era l'estudi de la fracturació del Mesozoic del Massís de Garraf i de la seva gènesi.

La hipòtesi de partida era que aquesta fracturació es devia haver produït per l'acció d'una falla de sòcol transversal —falla Capellades-Vallcarca— que, segons SANTANACH (com. pers.), devia ésser sinistra.

3.1.2.— *Metodologia*

Dins les tècniques emprades podem distingir dos grups principals: estudi fotogeològic i treball de camp.

3.1.2.1.— *Estudi fotogeològic*

Per a fer aquest estudi he utilitzat les fotografies aèries del full de GAVÀ (núm. 448), rotlle 489, fotos 49856, 49857, 49858, 49859, 49860, 49861, 49862, i 49879, fetes el juny de 1957; i del full de VILANOVA I LA GELTRÚ (núm. 447), rotlle 281, fotos 28524, 28525 i 28526, fetes l'octubre de 1956.

Sobre aquestes fotos he fet la fotointerpretació de la fracturació a escala fotogeològica, utilitzant per a la confecció del mapa (fig. 14) només les parts centrals de cada fotografia, de manera que la distorsió fos mínima.

Una vegada feta aquesta fotointerpretació he realitzat el comptatge estadístic de la fracturació utilitzant els paràmetres orientació i longitud de les fractures, portant a terme aquest compte individualment en les zones utilitzades de cada foto i respecte al N calculat en cada cas, i amb intervals de 5° sexagesimals.

Amb les mesures obtingudes d'aquesta manera he confegit un diagrama de “rosa del vents” (fig. 15-A).

3.1.2.2. — *Treball de camp*

El treball de camp pot ésser dividit en dues parts: cartografia i anàlisi d'estacions.

El treball de cartografia l'he concentrat en la zona de fractura de Garraf i ha tingut com a finalitat l'estudi de l'estructura d'una zona de fractura a diverses escales. Amb aquesta finalitat he confegit dos mapes, un a escala 1:10.000 (fig. 12) de tota la zona de fractura i l'altre a escala 1:2.000 (fig. 13) centrat en una de les fossetes tectòniques arrengraderades al llarg de la dita zona. Aquestes cartografies van acompanyades de diagrames de la fracturació a l'escala de l'aflorament.

Per a realitzar l'anàlisi d'estacions he tingut en compte les conseqüències metodològiques que es poden treure de treballs semblants fets anteriorment al Massís de Garraf. Així, de SANTANACH (1973) es desprèn la gran dificultat d'interpretar diagrames amb un nombre elevat de mesures si això suposa agafar zones extenses —de l'ordre del centenar de metres—, i la no aplicabilitat del mètode de determinació dels eixos de deformació proposat per ARTHAUD (1969).

Aquestes dues qüestions, vaig poder posar-les de manifest ben aviat. Així, a la primera estació que vaig realitzar —estació núm. 3— vaig veure que els plans M no es disposaven en dues garlandes, la qual cosa confirmà la no aplicabilitat d'aquest mètode en aquest cas. Quant a la dificultat d'interpretació dels diagrames amb un nombre elevat de mesures, he vist que es produeix per la superposició dins un mateix diagrama de zones no homogènies estructuralment, qüestió sobre la qual parlaré a l'apartat 3.2.1.2.4. Això m'ha menat a realitzar estacions en zones estructuralment homogènies i a projectar en diagrames diferents mesures realitzades en una mateixa pedrera (ex.: estacions 8A, 8B, i 8C i figs. 9-A, 10-C i 10-D).

La direcció d'escurçament l'he presa, simplificadament, com la bisectriu del camp que queda entre les falles destres i sinistres, tenint en compte només la direcció del pla. Això ho he fet perquè els plans de fractura són heretats i producte d'un camp d'esforços diferent i, consegüentment, les estries no guarden necessàriament les relacions angulars que es troben en les falles conjugades típiques. Tot això és degut a la complexa evolució de la compressió, amb la successió de fases compressives les més tardanes de les quals reaprofiten les fractures produïdes per les anteriors (com veurem a l'apartat 3.2.3).

Una altra opció presa ha estat de mesurar exclusivament falles netes i ben desenvolupades i d'escala mètrica com a mínim, per tal d'evitar la dispersió que es produiria en projectar conjuntament dades de diverses escales.



1



2



3



4

FOTO 1: Estació 10-A. Dues falles conjugades. La direcció d'escurçament biseca l'angle agut. Les fletxes indiquen el moviment del bloc que falta.

FOTO 2: Estació 3. Pla de falla dreta NNW-SSE amb gran desenvolupament d'estries i estilòlits oblics i algun creixement orientat de calcita.

FOTO 3: Estació 7. Dues falles conjugades d'escala fotogeològica NNW-SSE (dreta) i E-W (sinistra). Les fletxes indiquen el moviment del bloc que falta. Escurçament per l'angle obtús.

FOTO 4: Fossa del Castellet. Aspecte de les fractures E-W dels diagrames 4 a 6 de la FIG. 13. Observeu la clara disposició "en escaló".

També he tingut molt en compte les observacions qualitatives de la cronologia relativa entre les diferents famílies de falles i de les estries que indiquen moviments oposats sobre un mateix pla de falla.

Finalment, de les estructures diferents de les falles, he observat el poc desenvolupament dels estilòlits i he mesurat, també, les esquerdes de tensió en les estacions on n'he trobades.

3.1.2.3. — Consideracions

Una volta dut a terme tot això que he dit suara, he procedit, amb l'anàlisi de les dades obtingudes, a l'elaboració d'un model de la gènesi i l'evolució de la fracturació al Massís de Garraf i, una vegada establert aquest model, he intentat de veure si és aplicable a alguns trets estructurals dels Catalànids, tal com els coneixem a partir de la bibliografia.

3.1.3. — Tècniques d'exposició

Per tal de realitzar l'exposició he intentat de seguir un ordre lògic —d'allò més senzill a allò més complex— que, en certa manera, coincideix amb l'evolució dels coneixements i de les idees al llarg de la realització del treball.

La representació de les dades obtingudes l'he feta mitjançant projeccions estereogràfiques (hemisferi inferior). Els símbols utilitzats en aquests diagrames són els representats en la fig. 8-A, i al costat de cada diagrama he posat el nombre de mesures de cada tipus (ex.: $s=2$, $d=5$, etc) i l'angle d'obertura (0) entre les famílies de falles conjugades segons la direcció d'escurçament. En cada diagrama, a més de la representació estereogràfica de cadascuna de les estructures observades, he marcat el camp de variacions de les direccions de les diverses famílies de falles (zona ratllada).

Finalment, he realitzat esquemes de síntesi del Massís de Garraf amb la representació de les dades obtingudes en totes les estacions (fig. 11) i de la formació i evolució de la fracturació (fig. 15-B).

3.2. — Compressió

3.2.1. — A l'escala de l'aflorament

3.2.1.1. — Anàlisi d'estacions

En la redacció d'aquest apartat seguiré el fil de les idees tal com han anat evolucionant al llarg de la realització del treball, que coincideix amb

una exposició que comença per allò més senzill i evident fins a arribar, progressivament, a una comprensió dels problemes plantejats.

3.2.1.1.1.— *Descripcions i consideracions*

El primer que hom copsa a l'escala de l'aflorament, en la major part de les estacions, és l'existència de dos sistemes de falles conjugades: aproximadament NNW-SSE i E-W. El primer sistema correspon a falles amb moviment dretre i el segon a falles sinistres, tal com veiem a les estacions núms. 4, 11 i 3 (figs. 8-B, C i D). Segons aquesta disposició, l'escurçament, que mostra una variabilitat sobre la qual parlaré més avant, es produeix bisecant l'angle obtús que formen tots dos sistemes, tal com s'observa a les figures abans esmentades i en una direcció general NE-SW. Aquests angles poden arribar a ésser de l'ordre de 130-140° (fig. 9-A i 10-E) i al camp molt sovint són de 120°.

Això planteja un problema important, puix que, com hem vist al capítol 2, mecànicament no s'explica la formació de falles conjugades formant un angle més gran de 45° amb la direcció d'escurçament.

Però, ja en alguna de les figs. vistes fins ara —fig. 8-D, que correspon a l'estació 3— i en d'altres de noves (fig. 8-F), hi ha dades no compatibles amb un escurçament NE-SW. En la fig. 8-F —emmarcada dins un cercle—, una estria que indica moviment sobre un pla d'estratificació, que assenyalava una direcció de moviment NW-SE; en la fig. 8-D —també envoltats d'un cercle—, quatre pols de falles dretres dins el camp de les falles sinistres i, fins i tot, he trobat un mateix pla amb estries horitzontals indicatives de moviments oposats; no he pogut, però, establir-ne la relació cronològica. També, les esquerdes de tensió indiquen un escurçament de direcció diferent, aproximadament NNW-SSE.

Tot això queda molt més palès en la fig. 9-A i fot. 1), on queden clarament diferenciats dos camps de falles —de direccions E-W i NW-SE— en cada un dels quals coexisteixen falles dretres i sinistres i on he trobat sobre un mateix pla de falla de direcció E-W estries horitzontals que indiquen moviments dretres i sinistres, sense haver pogut, però, establir-ne la cronologia.

El mateix pot ésser dit a l'estació núm. 10 (figs. 9-B i C), on he projectat en diagrames separats els diversos moviments observats en falles de la mateixa direcció, i on és més gran el nombre de mesures que indiquen, per a cadascuna de les direccions, un moviment oposat a l'observat en les descrites en primer terme (figs. 8-B, C i D). En tenim un bon exemple a la fot. 1, on la falla dreta té una direcció aproximadament E-W (106,75° N) i la sinistreta és aproximadament N-S (177,85° W), la qual cosa indica un escurçament de direcció NW-SE que biseca l'angle agut entre ambdues direccions.

Així, doncs, fins ara he trobat arguments que fan pensar en dues direccions d'escurçament "grosso modo" perpendiculars, amb unes direccions generals NW-SE i NE-SW. Aquestes dues direccions d'escurçament degueren produir el moviment dels mateixos sistemes de plans de fractura, com ho demostra el fet de trobar falles de direcció similar i moviment oposat, així com estries horitzontals que indiquen moviments oposats sobre un mateix pla de falla. No he pogut, però, establir "in situ" la cronologia relativa d'aqueixos dos moviments; així, doncs, cal mirar de trobar altres arguments que permetin d'establir-la.

Com ja hem vist al capítol 2, segons el criteri de fractura de Coulomb els plans de màxim esforç de cisalla —plans de fractura— formen un angle amb la direcció d'esforç principal menor de 45° —el més corrent és als voltants de 30° — i només en casos excepcionals formen angles als voltants de 45° . D'aquesta manera les falles conjugades produïdes sempre formaran angles inferiors a 90° , i els més corrents seran de l'ordre de 60° .

La direcció d'escurçament més palesa pertot arreu —NE-SW— biseca l'angle obtús de les falles conjugades, que correntment és aproximadament de 100° i en certs casos extrems arriba fins a 140° . Com ja hem vist, mecànicament no s'explica que es formin falles amb angles de 60° amb σ_1 ; així, doncs, podem suposar que quan la fase compressiva es produí i aquesta direcció d'escurçament actuà, les fractures ja existien. La direcció d'escurçament NW-SE biseca l'angle agut de les falles conjugades, i per tant sí que pot explicar la formació dels dos sistemes de falles.

Així, doncs, cal pensar en un primer escurçament de direcció NW-SE que produí la fracturació i un segon escurçament de direcció NE-SW que aprofità les falles ja existents en comptes de formar-ne de noves. Aquesta evolució explicaria que la segona direcció d'escurçament —NE-SW— es manifestés en els plans de falla rarament per cristallitzacions orientades de calcita i, molt sovint, per estries molt ben desenvolupades o per estil·lits oblics (fot. 2), que serien producte de l'orientació força perpendicular dels plans de falla respecte a la direcció d'escurçament i que, normalment, destruirien les recristallitzacions o estries produïdes pel primer moviment —escurçament NW-SE— que, d'aquesta manera, només s'han preservat molt localment.

En les estacions 2 i 5 (figs. 9-D i 10-A) trobem dos nous exemples on queda molt palès l'escurçament de direcció NE-SW bisecant l'angle obtús de les falles conjugades, i amb indicis —dins un cercle— de moviments de les falles corresponents a l'escurçament NW-SE. En la fig. 9-D els dos pols de falla dreta i esquerra de direcció NNW-SSE —dins un cercle— han estat mesurats sobre el mateix pla de falla. A l'estació núm. 5 (fig. 10-A) veiem un exemple de dues falles conjugades dretes i esquerra —A i B— amb la direcció d'escurçament que biseca l'angle obtús (100°) i unes esquerdes de

tensió (D) i estries sobre un pla d'estratificació (C) compatibles amb aquesta direcció d'escurçament.

Troblem noves dades sobre l'evolució de la fracturació a l'estació núm. 7 (figs. 9-E i F). En la fig. 9-E hi ha representades les mesures de camp, on els punts i les creus més grans són falles importants, de l'ordre de les visibles en fotografia aèria (fot. 3). En la fig. 9-F hi ha representats els camps dels diversos tipus d'estructures presents; el camp de les falles destres (D) i sinistres (S) és clarament diferenciat, tret d'una petita llenca de direcció NE-SW on coexisteixen ambdós tipus de falles (D-S) i on el moviment sinistre és anterior al destre; d'altra banda, dins les falles grans —representades per traços continus— en trobem una de sinistra de direcció E-W i dues de destres, l'una NW-SE i l'altra NE-SW. Aquesta disposició pot ésser explicada si hom admet dins el període d'escurçament NE-SW una petita rotació de la direcció d'escurçament, tal com és indicat a la fig. 9-F de Z_2 a Z'_2 ; d'aquesta manera la llenca de falles de direcció NE-SW passarien d'actuar com a sinistres a fer-ho com a destres, la qual cosa explicaria les observacions de camp referents a la cronologia relativa d'aquests dos moviments i, també, si això fos així, les falles destres NW-SE quedarien orientades perpendicularment a la direcció d'escurçament, i se'n bloquejaria l'actuació com a falles de direcció, la qual cosa afavoriria la formació d'un nou sistema de falles destres conjugat de les sinistres de direcció E-W, i que tindria una direcció NE-SW. D'aquesta manera s'explicaria l'existència de falles destres d'aquesta direcció, ja observades en altres estacions i ben manifestes a nivell de massís com veurem més avant, en estudiar la fracturació visible en fotografia aèria (capítol 3.2.2.).

En aquesta mateixa estació trobem dues direccions d'esquerdes de tensió (et), NW-SE i NE-SW, que ens indiquen les dues direccions d'escurçament trobades a les anteriors estacions, i és doncs així aquesta l'estació on trobem representada d'una manera més completa tota l'evolució vista fins ara.

Un altre exemple, d'aquesta possible rotació, el trobem a l'estació núm. 6 (fig. 10-B), on també hi ha dues direccions de falles destres que podrien ésser explicades segons aquest model, i en la fig. 10-C (estació 8-B), on amb creus més grans he representat dues falles destres importants —possiblement visibles en fotografia aèria— i de direccions N 171° E i N 028° E; malgrat que en aquest cas no he pogut observar si la segona és posterior a la primera, sí que es veu, però, que la direcció d'escurçament global obtinguda és practicament perpendicular a la falla destra N 171° E, la qual cosa ens fa pensar que devia restar bloquejada quan la falla N 028° E actuava com a destra. Un cas particular fóra el representat en la fig. 10-D (estació 8-C), on la direcció NW-SE és formada per falles sinistres exclusivament, potser per no haver actuat com a falles destres o, potser, perquè no he trobat

FIGURA 8:

A.— Simbologia dels diagrames. 1.— Falla de direcció destra. 2.— Falla de direcció sinistra. 3.— Falla de direcció amb sentit no establert. 4.— Estries sobre plans d'estratificació. 5.— Esquerdes de tensió. 6.— Pics estilolítics. 7.— Falles inverses. 8.— Falles normals. 9.— Angle d'obertura entre les direccions de falles conjugades que és bisecat per la direcció d'escurçament.

B.— Estació 4. Dues famílies conjugades. NNW-SSE i E-W. L'escurçament biseca l'angle obtús.

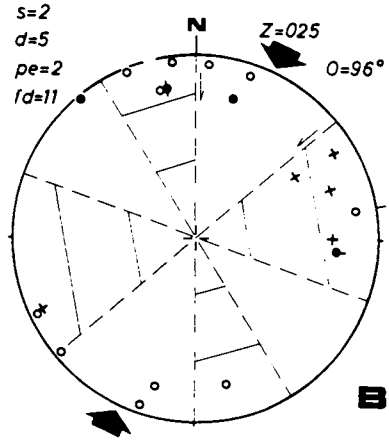
C.— Estació 11. Dues famílies conjugades. L'escurçament biseca l'angle obtús.

D.— Estació 3. Dues famílies de falles conjugades que mostren una gran dispersió. L'escurçament biseca l'angle obtús. Algunes mesures —dins cercles— indiquen moviments oposats.

E.— Estació 3. Mesures fetes sobre el pla de falla de la fot. 8. Pla E-W amb moviment sinistre.

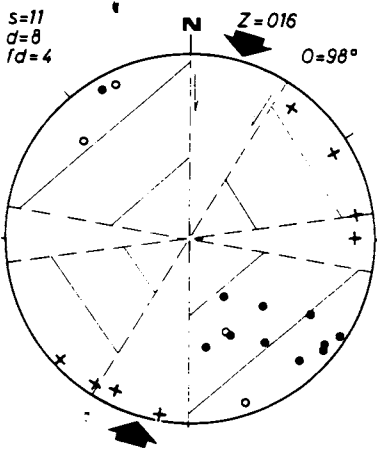
F.— Estació 1. L'escurçament biseca l'angle obtús.

1- +, d	5- /, et
2- ●, s	6- √, est
3- ○, fd	7- ^, i
4- ⊙, pe	8- ◆, n
9- 0	

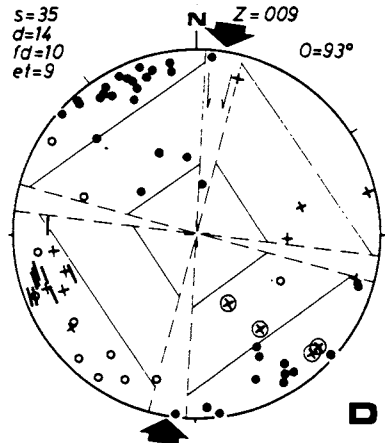


A

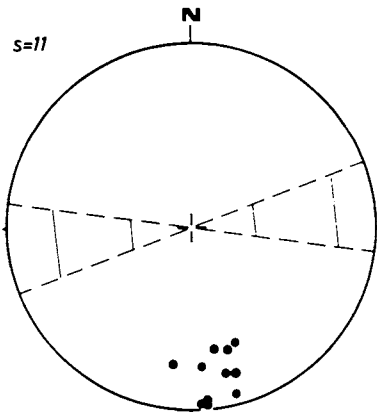
B



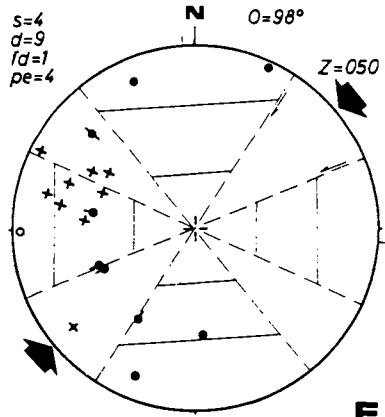
C



D



E



F

restes d'aquest moviment, ja que hom només hi observa estries pertanyents al primer moviment, mentre que les falles destres NNE-SSW i sinistres ENE-WSW corresponen al segon període d'escurçament —NE-SW—.

Això darrer pot fer pensar en la possibilitat que, localment, l'orientació de Z_2 ja des del començament d'aquesta segona fase fos tal que les fractures NNW-SSE no poguessin actuar com a falles de direcció, perquè eren orientades perpendicularment a la direcció d'escurçament, i que les falles destres NNE-SSW es formessin des del començament d'aquesta segona fase.

D'aquesta manera s'explicaria que en algunes estacions (figs. 8-F, 9-C, 9-D, 10-A i 10-C) l'angle entre les dues famílies conjugades corresponents al segon període d'escurçament sigui agut, a causa de l'existència de falles destres NNE-SSW.

Una qüestió que crida l'atenció en totes les estacions descrites fins ara és l'absència de falles inverses. Només n'he trobades a l'estació núm. 9 (FIG. 10-E), clarament relacionades amb el segon període d'escurçament —biseccant l'angle obtús— amb un escurçament local pràcticament N-S, i solament he trobat falles d'un dels sistemes conjugats, amb un cabussament dels plans de fractura cap al N.

Com hem vist a l'apartat 2.4.4., el canvi d'eixos —l'eix X passa d'ésser horitzontal a vertical— es produeix, segons ÀLVARO i CAPOTE (1973), quan la compressió horitzontal

$$Ca = \sigma_c \frac{m(m-2)}{(m-1)}$$

on σ_c és l'esforç vertical i m el nombre de Poisson; mentre que segons CHOUKROUNE i DELAIR (1976) s'ocasiona quan es produeix un bloqueig de la possibilitat d'extensió lateral i només resta possible l'extensió vertical. Per consegüent, si apliquem aquestes hipòtesis al nostre cas, caldrà pensar que cap d'aquests dos supòsits no s'ha produït a nivell del massís durant les dues fases compressives observades o que només s'han donat localment en la segona fase.

Segons aquests autors, i com ja observaren CHOUKROUNE i SEGURET (1968) i CHOUKROUNE (1969), la formació de falles inverses precedeix lleugerament el començament del plegament, o bé són esdeveniments simultanis i actuen sincrònicament durant tot el procés de plegament. La inexistència de plecs en la zona estudiada pot refermar la hipòtesi que no han estat atesos els supòsits dits anteriorment.

Com a resum de tot el que hem vist en aquest capítol, en la fig. 11-A he representat les direccions d'escurçament obtingudes en les diferents estacions analitzades.

3.2.1.1.2. — Explicacions alternatives al model evolutiu proposat

Tres poden ésser les explicacions d'un angle, entre les falles conjugades, més gran de 90° en la direcció de l'escurçament:

— La preexistència de les fractures, que han estat reaprofitades per una segona compressió amb la direcció d'escurçament més o menys perpendicular al primer. Aquesta és la hipòtesi que he jutjat que té més arguments a favor seu.

— La formació de les fractures fent més de 45° amb la direcció de màxim esforç, possibilitat que ja ha estat rebutjada perquè no es pot explicar mecànicament segons el criteri de fractura de Coulomb i, a més, no explica que hi hagi falles amb estries indicant un moviment invers al que els correspon per llur orientació i, fins i tot, moviments oposats sobre el mateix pla de falla.

— La tercera possibilitat és que s'hagi produït una rotació de les fractures en avançar la deformació, segons el model proposat per FREUND (1970, 1974) i que sembla haver estat reconegut a diferents regions — com ja he dit a l'apartat 2.4.1.

Segons FREUND (1970), les fractures en direcció destres i sinistres s'originen formant entre elles un angle de 50° a 60° i, a mesura que progressa la deformació, van virant augmentant l'angle que formen els dos sistemes conjugats entre ells i amb la direcció de màxim esforç. Simultàniament amb aquest procés, se'n formen de noves que fan entre elles l'angle normal de 50° a 60° . Conseqüentment, aquest model exigeix l'existència de tota una gamma de falles que augmenten progressivament l'angle que formen amb la direcció de màxim esforç i que, alhora, són cada vegada més antigues. No he trobat cap argument que aboni, en la zona estudiada, cap d'aquestes dues suposicions, ja que l'angle que formen les falles amb la direcció d'escurçament més palesa — que jo postulo que correspon a una segona direcció de compressió— és invariablement més gran de 45° —correntment 60° —, excepte en uns pocs casos (figs. 9-E i F) l'origen dels quals sembla raonablement explicat. D'altra banda, aquesta hipòtesi tampoc no explica la presència de moviments oposats dins un mateix pla de falla o en falles d'orientació similar.

3.2.1.2. — Zona de fractura de Garraf

3.2.1.2.1. — La zona de fractura:

En el capítol 3.2.1.1.1., on he fet una descripció de les observacions portades a cap en les diverses estacions, i de les conclusions que n'he pogut

FIGURA 9:

A.— Estació 8-A. Fot. 1. Es diferencien dues famílies de falles: NW-SE i E-W. En ambdues hi ha falles destres i sinistres. Dues direccions d'escurçament: N 041° W, que biseca l'angle agut (51°), i N 023° E, que biseca l'angle obtús (132°).

B.— Estació 10-A. Mesures compatibles amb un escurçament NNW-SSE que biseca l'angle agut. Vegeu la figura següent.

C.— Estació 10-B. Mesures compatibles amb un escurçament NE-SW. Vegeu la figura anterior.

D.— Estació 2. Dues famílies de falles. Estries que indiquen moviments oposats sobre el mateix pla (dins un cercle). Dues direccions d'escurçament: N 050° W, que biseca l'angle agut (75°), i N 047° E, que biseca l'angle obtús (105°) i que és la més visible al camp.

E.— Estació 7. Projectió de les dades de camp. Les creus i el punt més grossos corresponen, respectivament, a les falles destres i sinistra d'escala visible en fotografia aèria: falles destra NNW-SSE i sinistra E-W (fot. 3) i la destra NNE-SSW.

F.— Estació 7. Representació dels camps de variació de les dades de la figura anterior. El camp "d-s" correspon a fractures que primer han actuat com a sinistres i, després, com a destres, dins un escurçament global NE-SW. Això fa pensar en una rotació de la direcció d'escurçament tal com s'indica en la figura. Les esquerdes de tensió NE-SW indiquen la presència d'un escurçament d'aquesta direcció.

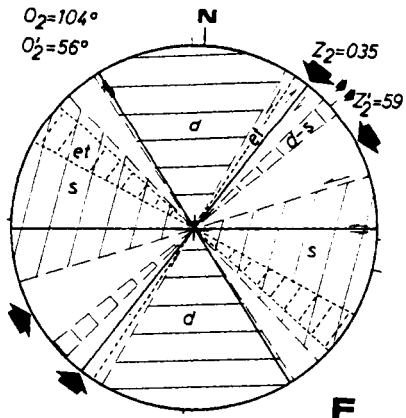
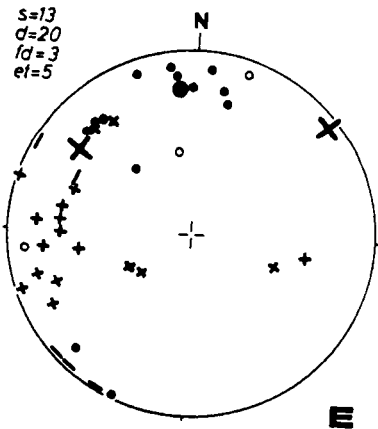
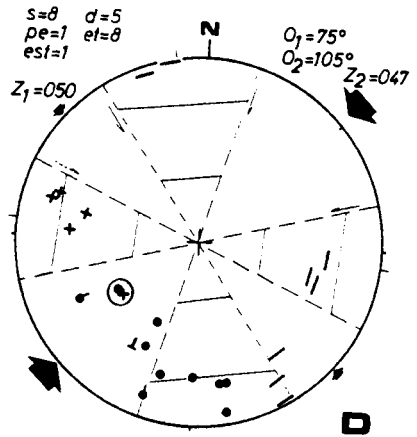
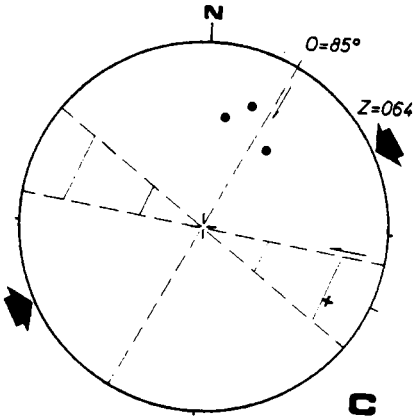
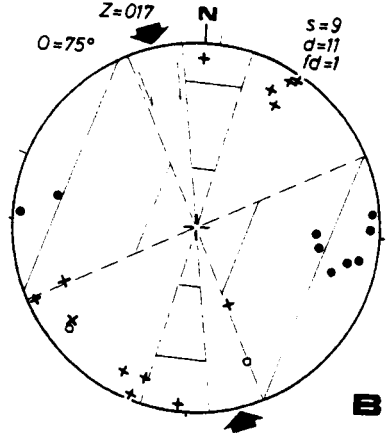
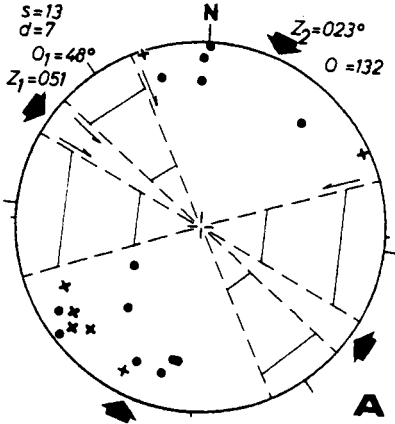


FIGURA 10:

A.— Estació 5. Disposició similar a la de la fig. 9-D.

B.— Estació 6. Hi ha dues direccions de falles destres (NNW-SSE i NNE-SSW) i una de sinistres (NE-SW), que poden ésser explicades admetent una rotació com la de la fig. 9-F.

C.— Estació 8-B. Amb creus més grans són representades dues falles destres de l'escala visible en fotografia aèria (N 171° E i N 028° E). La direcció d'escurçament obtinguda és pràcticament perpendicular a la falla N 171° E; això fa pensar que aquesta devia restar bloquejada després d'actuar com a destra, la qual cosa exigeix una rotació com la que hem vist.

D.— Estació 8-C. La direcció NW-SE és formada exclusivament de falles sinistres pràcticament perpendiculars a la direcció d'escurçament més palesa (NE-SW) que degué formar les falles destres NNE-SSW.

E.— Estació 9. Falles inverses només d'una família lligades a un escurçament N-S que biseca l'angle obtús (140°). Estries destra i sinistra sobre un mateix pla de falla (encerclat) indiquen també una direcció d'escurçament E-W.

F.— Interpretació de la gènesi de la disposició de les esquerdes de tensió del Coll d'En Vallgrassa (fig. 12, diagrama G). En actuar successivament les falles destres i sinistres es formen, respectivament, esquerdes de segon ordre ENE-WSW i N-S que es tallen mútuament.

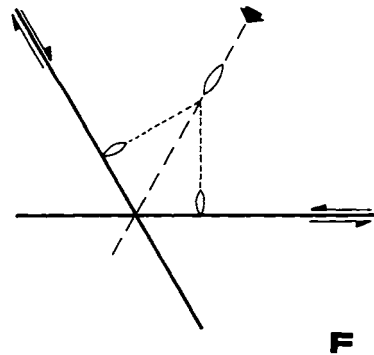
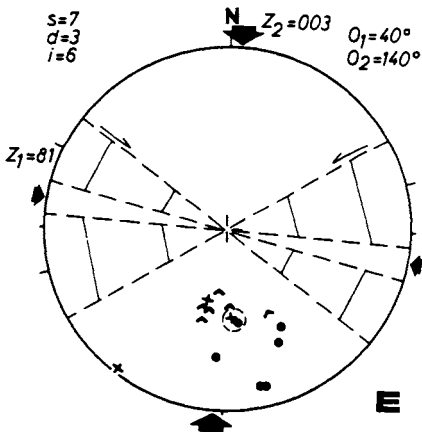
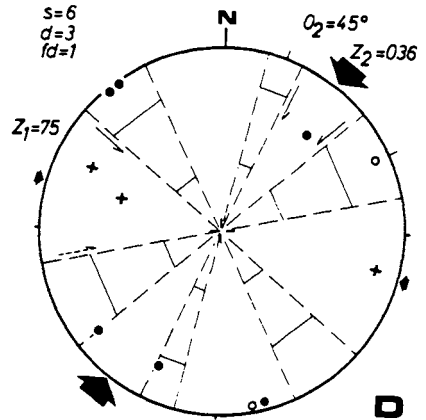
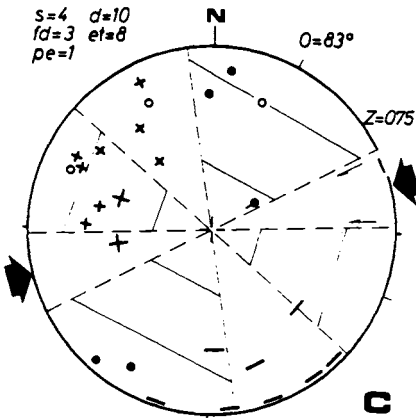
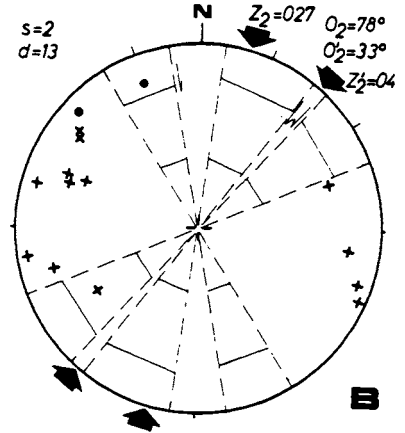
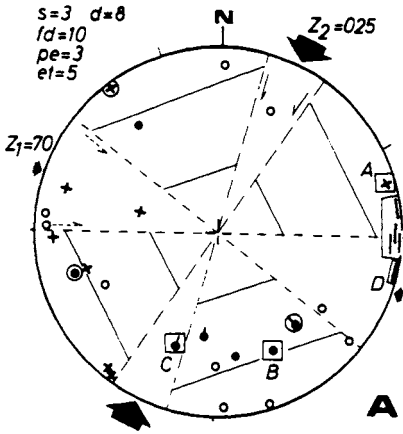
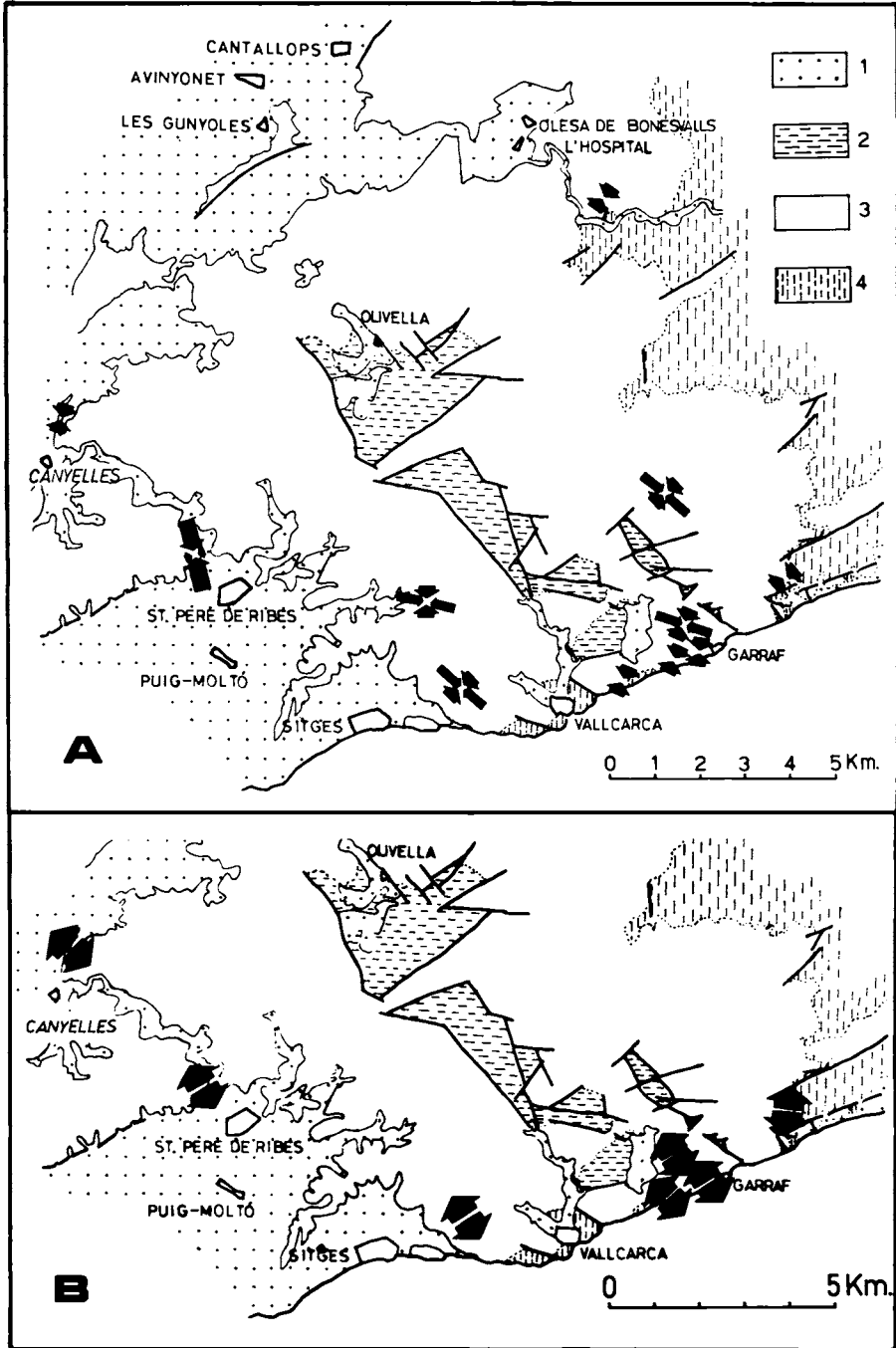


FIGURA 11:

A.— Representació de les direccions d'escurçament —durant les fases compressives— obtingudes en les diferents estacions analitzades. Amb fletxes petites és indicada la direcció menys palesa en cada estació i amb fletxes grans la que ho és més, que en totes les estacions és la segona (que biseca l'angle obtús) tret de l'estació 10 (al NW de Sant Pere de Ribes) en què ho és la primera (que biseca l'angle agut). Les fletxes llargues indiquen la direcció d'escurçament de la primera fase de compressió, i les curtes de la segona. Mapa geològic segons l'I.G.M.E., fulls 419, 420, 447 i 448, simplificat.

B.— Representació de les direccions d'allargament (X_3) de la fase distensiva obtingudes en les diferents estacions analitzades.



treure, em basava en dades puntuals en llocs concrets. En aquest capítol, ben al contrari, tinc en compte una visió més espacial, havent fet una cartografia a escala 1:10.000 de la zona de fractura de Garraf fins on hi ha afloraments de margues, realitzant-hi estacions tot al llarg per tal d'estudiar les possibles variacions en el camp local de deformacions, i quantificant la distribució espacial de les falles, amb un diagrama del tipus "rosa dels vents" que serveixi, alhora, per a efectuar comparacions amb el diagrama general de la fig. 15-A; he portat a terme també un estudi detallat d'un d'aquests afloraments de margues —característics tant d'aquesta zona de fractura de Garraf com de la de Vallcarca— i que són petites fosses tectòniques que s'arreglaren al llarg d'aquestes.

Començaré fent un comentari general del mapa a escala 1:10.000 (fig. 12). Tal com il·lustra la rosa dels vents —i com de fet es copsa al primer cop d'ull— hi ha tres direccions de falles clarament diferenciades: una aproximadament E-W, una altra NW-SE i la tercera NNE-SSW. Aquestes tres direccions són les mateixes que ja hem vist al capítol 3.2.1.1. i que corresponen —en el seu moviment més evident— a falles sinistres, les E-W, i a falles destres, les NW-SE i les NNE-SSW. Les observacions de camp abonen aquesta correspondència, tal com veurem més avant.

Dins la direcció NW-SE hi ha dos màxims clarament diferenciats: N 115° E i N 145° E, que sobre la cartografia s'observen espacialment separats. En efecte, des del Castellet fins a Can Planes la primera direcció és la dominant, mentre que de Can Planes a la Collada d'En Vallgrassa ho és la segona. Això implica, per tant, un canvi en la direcció de la zona de fractura, i no la coexistència de dues direccions semblants de falles destres. No hem trobat, de moment, cap explicació d'aquest fet. Cal subratllar, no gensmenys, que el màxim N 115° E en el comptatge general de la fig. 15-A resta molt reduït en importància respecte al N 145° E.*

La intersecció d'aquestes tres direccions de fractures —principalment la E-W i la NW-SE— dona lloc, a tot el llarg del sector de la zona de fractura estudiat, a unes fossetes tectòniques ocupades per margues —que estratigràficament són més modernes que les calcàries que les envolten—, com per exemple la fosseta del Castellet (fig. 13) i la fosseta al sud de Can Lluçà (fig. 12).

Als diagrames A, C i E, de la fig. 12, hi trobem representades tres estacions de microfalles de direcció, i als diagrames D i F diàclisis verticals que per llur disposició poden ésser relacionades amb un escurçament horitzontal. La direcció d'escurçament varia de N 008° E al diagrama C a N 055° E al diagrama E; aquestes variacions poden ésser explicades per les pertorbacions produïdes a prop de les falles E-W sinistres, en el cas dels escurça-

* Aquestes variacions podrien ésser ocasionades per irregularitats en la direcció de la falla de sòcol, que devien afavorir la formació de les fosses a la superfície (vegeu l'apartat 3.2.1.2.2.).

ments més o menys N-S, i de les destres NW-SE, per als escurçaments NE-SW, tal com ho exemplifica la fig. 15-C-2, explicable per un escurçament general NNE-SSW.

En les estacions on la direcció d'escurçament biseca l'angle agut entre les falles conjugades —p. ex. diagrames D i E—, cal pensar que les fractures no eren preexistents, sinó que es formaren durant l'acció d'una compressió NE-SW.

El diagrama G representa una estació d'esquerdes de tensió escalonades de manera que s'han de relacionar amb falles de direcció. S'hi diferencien tres màxims: WNW-ESE, N-S i ENE-WSW.

Les relacions de cronologia de la primera direcció amb les altres dues no han pogut ésser establertes "in situ"; però, per l'orientació que té, podríem atribuir-la a la primera fase compressiva. Els altres dos màxims es tallen mútuament i són, consegüentment, sincrònics.

Aquest fet podria ésser explicat admetent el model de moviment de falles conjugades proposat per ANDERSON (1951) i FREUND (1974) —vegeu el capítol 2.4.2.— en què ambdues famílies conjugades es mouen alternativament. Llavors, tal com il·lustra la fig. 10-E, podrien formar-se esquerdes de tensió secundàries degudes a la reorientació del camp d'esforços als voltants de les falles principals i, admetent l'acció alternativa de les dues famílies de falles, trobaríem que les esquerdes de tensió secundàries de cada una d'aquelles es tallarien mútuament.

3.2.1.2.2.— *La fossa tectònica del Castellet*

Al mapa núm. 4 represento l'estudi detallat d'un fragment de la més meridional de les fosses tectòniques i en la qual els afloraments són millors. La fot. 3.15 mostra les falles sinistres aproximadament E-W dels diagrames 4 a 6.

Com pot ésser observat en totes aquestes fotografies, les margues, que constitueixen l'interior de les fosses, produeixen zones deprimides respecte a les calcàries que les envolten, de manera que els plans de fractura resten ben exposats i poden ésser estudiats fàcilment. Les fractures que a la fig. 12 són netes, aquí es manifesten formades per falles conjugades i, en algun cas, disposades clarament en relleu —diagrames 4, 5 i 6. Sobre el mapa han estat marcats amb fletxes els sentits de desplaçament observats, i en els diagrames assenyalats amb la lletra "a" hom representa en negre el camp de variació de les direccions de les mesures efectuades —mitja dotzena per diagrama per terme mitjà—

Els moviments observats indiquen un escurçament NE-SW, llevat d'un parell d'estries als diagrames 4a i 9a on hom ha observat moviments inversos que poden ésser atribuïts a l'escurçament NW-SE deduït abans.

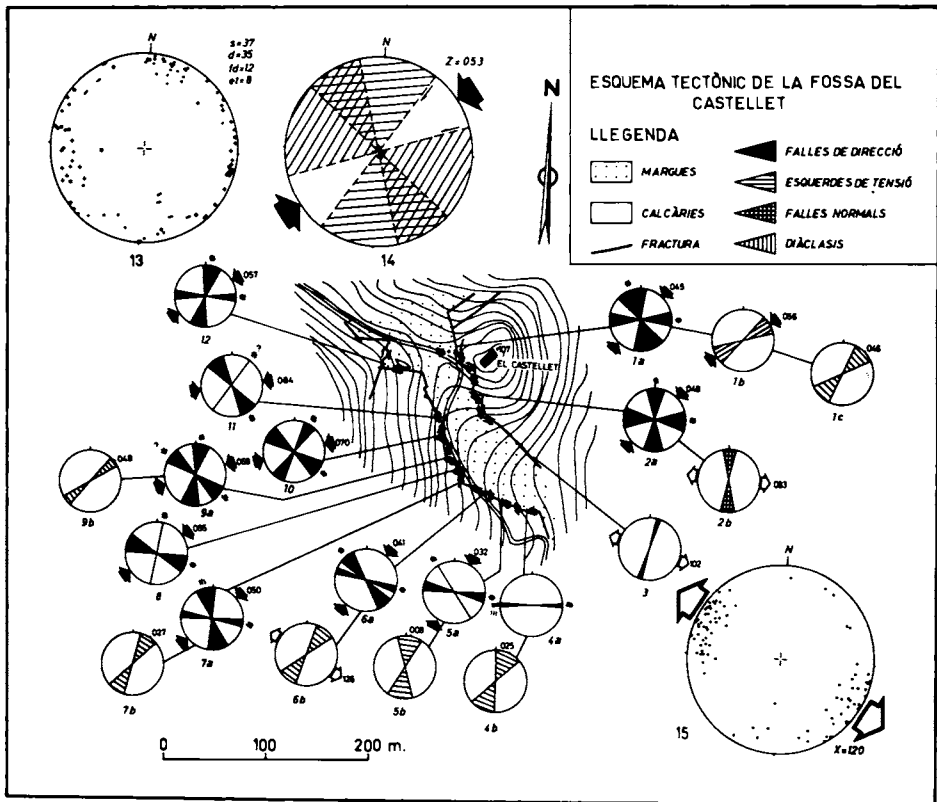


FIGURA 13

Si representem globalment totes aquestes mesures (diagrames 13 i 14), observem la superposició dels camps de les direccions de fractura destres i sinistres. Aquesta superposició, però, no es produeix en cap dels diagrames individuals, que poden agrupar-se en “zones homogènies” dins les quals els camps ocupats per ambdós tipus de falles i l’escurçament que se’n dedueix són similars. Per exemple, a tota la banda SW de la fossa podem distingir dues zones: una que inclou els diagrames 4a, 5a i 6a i, l’altra, els diagrames 8, 9a, 10a, 11 i 12. En la primera zona les falles sinistres són E-W i les destres NW-SE, i l’escurçament —que és NE-SW— biseca un angle obtús molt obert, mentre que en la segona zona les falles sinistres són NW-SE i les destres NE-SW, i la direcció d’escurçament s’acosta cap a l’E-W (diagrama 11: $Z = N 084^\circ E$).

Així, doncs, hi ha en un espai reduït falles de la mateixa direcció que han actuat, sembla, en una mateixa fase compressiva, amb direccions de desplaçament oposades. L’explicació cal buscar-la, novament, en l’acció pertorbadora sobre el camp d’esforços produïda per altres falles; en aquest cas sembla lògic d’atribuir-la a una falla de direcció NE-SW —vegeu figs. 12 i 13— que passa unes desenes de metres al N del Castellet. Aquesta falla devia ésser —d’acord amb tot allò que hem vist al capítol 3.2.1.1.1.— destra, la qual cosa ens explicaria la presència de falles d’aquesta direcció i d’aquest sentit de desplaçament als diagrames 8-12, diferents de les falles destres NW-SE dels diagrames 4a-6a.

Una explicació alternativa d’aquest fet fóra admetre que aquesta falla NE-SW —versemblantment destra— hagués actuat posteriorment a les falles destres NW-SE, o hagués començat a fer-ho cap a la darrera del moviment d’aquestes —tal com ho hem vist en casos semblants, figs. 9-E i F— i hagués deformat les falles, girant-les en el sentit de les busques del rellotge —moviment destre— la qual cosa explicaria la presència de falles “corbades” —deformades?— segons aquest moviment. Cal no rebutjar, tanmateix, la possibilitat de l’acció conjunta d’ambdós processos.

Les fractures que limiten les fossetes tectòniques (fot. 4) presenten una disposició lleugerament inversa. Aquesta disposició no és, en principi, compatible amb la formació de les fosses.

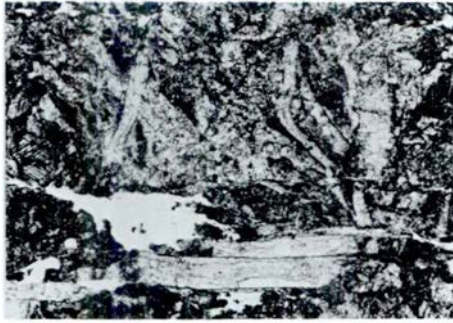
Si ens fixem en la disposició de les falles conjugades que limiten la fossa del Castellet (fig. 13), veiem que per llur disposició han hagut de formar-se durant la primera fase compressiva, que ha d’ésser, consegüentment, la causant de la formació de les dites falles. Observant la disposició de les falles NW-SE de la fig. 12 —principalment el canvi de direcció de què he parlat, a l’alçada de Can Lluçà— veiem que en la primera fase (moviment sinistre) hi devia haver, localment, distensió, la qual cosa devia provocar la formació de les fosses segons un model semblant a l’estudiat experimentalment per EMMONS (1969) —vegeu apartat 2.3 i fig. 3-C. En actuar la segona fase compressiva (moviment destre) es devia produir la situació inversa,



5



6



7



8

FOTO 5: Aspecte dels plans d'esquistositat al costat d'una falla sinistra E-W (fig. 13, diagrama 5), la direcció de la qual és marcada pel llapis. Observem la disposició sigmoide dels plans, que indiquen moviment sinistre.

FOTO 6: Aspecte dels plans d'esquistositat de la foto 5. Hom observa creixements orientats de calcita que indiquen moviments horitzontals sinistres.

FOTO 7: Visió microscòpica dels materials afectats per "esquistositat". Esquerdas de tensió sigmoides reblertes de calcita i tallades per plans estilolítics. x 100.

FOTO 8: Estació 3. Falla sinistra E-W d'escala fotogeològica.

és a dir que les fosses, ja formades, devien ésser fortament comprimides, la qual cosa degué ocasionar la deformació de les falles que les limiten, adoptant l'aspecte invers que presenten actualment.

Aquesta compressió dels materials que formen les fosses podria explicar la formació d'"esquistositats" locals bastant penetratives prop de les zones de fractura (fot. 5). Estructures semblants han estat descrites per ROBERT i VIALON (1976) —fig. 17-C— als nivells estructurals superiors, i les atribueixen a la concentració d'esforços en les zones de falla que limiten blocs poc deformats i que correspondrien, d'aquesta manera, a plans d'"esquistositat" formats en zones de cisalla. La disposició d'aquests plans (fot. 5) indica clarament el moviment sinistre de les fractures al costat de les quals es troben —compareu les fotografies amb la fig. 17-C— i que són E-W (diagrama 5a de la fig. 13).

L'evolució en el nostre cas sembla, però, més complexa. A nivell de mostra de mà (fot. 6), hom observa clarament, per la presència de recristal·litacions orientades, que en aquests plans s'han produït moviments horitzontals sinistres.

A nivell microscòpic, no es conserva l'estructura original (marga) i hom observa dos tipus principals d'estructures:

a) Esquerdes de tensió reblertes de calcita que, sovint, tenen forma sigmoide (fot. 7) i que es poden relacionar amb els moviments horitzontals vistos en la fot. 6.

b) Plans estilolítics que tallen clarament les esquerdes de tensió (fot. 7) i els són, per tant, posteriors. Plans estilolítics molt penetratius ("esquistositat" de dissolució) han estat descrits en calcàries per ÁLVAREZ et al. (1976) i ÁLVAREZ et al. (1978) i en materials argilosos per SOLÉ-SUGRANES (1976).

Lligats amb els moviments cisallants que donaven lloc a les esquerdes sigmoïdes, trobem cristalls de calcita amb l'exfoliació clarament deformada i, fins i tot, plegada amb estructures de tipus "kink-band" i que, de més a més, presenten extinció ondulant.

Els plans estilolítics per llur orientació són compatibles amb la direcció d'escurçament local (N 032° E, diagrama 5a de la fig. 13).

3.2.1.2.3.— *Conclusions*

Per tot això que ha estat vist en aquest capítol puc afirmar que la zona de fractura de Garraf ha sofert, en el seu moviment més evident, un desplaçament dret, producte d'una compressió NNE-SSW. Com que l'angle que formen els sistemes de falles conjugades és, sovint, obtús, cal suposar que es produïren per una primera compressió NW-SE, possibilitat que és reforçada per l'existència de falles amb estries que indiquen moviments oposats als dits anteriorment.

3.2.1.2.4.— *Consideracions i repercussions en la metodologia a utilitzar en les estacions*

Aquesta variabilitat espacial que acabem de veure m'ha menat a fer estacions amb no massa mesures —de l'ordre de 40 a 60—, parant sempre compte de fer-les en zones “homogènies”; representant, per exemple, les dades d'un mateix front de pedrera en diagrames separats (ex.: estacions 8A, 8B i 8C) quan ho he considerat necessari.

Aquestes inhomogeneïtats en la distribució dels esforços —o també, potser, la deformació d'una zona per l'acció posterior d'una falla— poden explicar alguns casos de falles de direcció semblant però d'oposat moviment. Tanmateix, als exemples vistos al capítol 3.2.1.1.1. (figs. 9-A, B, C, etc) hi ha dos camps de falles clarament diferenciats, cadascun amb falles destres i sinistres, mentre que en el diagrama 14 (fig. 13) aquests dos camps se superposen en una franja comuna —de direcció NW-SE— on hi ha, alhora, falles destres i sinistres. Aquest cas s'explica, com hem vist, mitjançant la superposició en el mateix diagrama de dues zones “no homogènies”, mentre que el primer cas —que fóra una zona “homogènia”— requereix dues direccions d'escurçament per a explicar la presència de moviments oposats sobre plans de direcció similar i, àdhuc, sobre el mateix pla —cosa que no s'explica admetent només una petita rotació del camp d'esforços—.

Puc concloure, doncs, que és absurd de fer en aquestes condicions estacions amb un nombre elevat de mesures si això obliga a agafar una gran extensió, ja que això portaria a representar en un mateix diagrama estructures produïdes sota uns camps d'esforços diferents, la qual cosa entrebancaria greument la interpretació de les dades obtingudes.

3.2.2.— *Estudi fotogeològic*

En aquest capítol faré una descripció dels resultats obtinguts de l'estudi fotogeològic de la zona de què tracta aquest treball i de les relacions que es poden establir amb les dades de camp.

Primerament vaig fer la interpretació fotogeològica de la fracturació en la zona estudiada (fig. 14). De totes aqueixes fractures és difícil de distingir quines són falles i quines són simplement diàclasis, la qual cosa només pot fer-se observant la presència o no d'estries sobre el pla de falla, cosa impossible de fer en la majoria dels casos, i l'observació de desplaçaments, difícils d'observar i encara més de mesurar. Tanmateix, hom pot suposar que totes les fractures de la mateixa direcció han sofert idèntics moviments i han estat produïdes per un mateix camp d'esforços i, d'aquesta manera, hom pot generalitzar les observacions de camp d'unes quantes falles a la resta

de les de la mateixa direcció. Pel que fa a la distinció entre falla i diàclasi —molt difícil de realitzar al camp— és poc important si suposem que les falles i les diàclasis d'identica direcció sotmeses al mateix camp d'esforços tenen la mateixa significació.

Un cop fet el mapa fotogeològic (fig. 14), he portat a cap el comptatge de les fractures observades tenint en compte la longitud i l'orientació, i ho he representat en un diagrama del tipus de "rosa dels vents" (fig. 15-A). He mesurat en total gairebé 29 metres de fractures sobre la fotografia aèria: tenint en compte que l'escala és aproximadament 1:33.000, això suposa que el comptatge és fet sobre un total aproximat a escala real de 900 km de fractures.

La distribució de les diferents direccions de fractures sembla bastant homogènia per tot el mapa, i per això he fet un sol diagrama total (fig. 15-A). Hi ha dues famílies de fractures dominants (E-W i NNW-SSE) i unes altres dues de secundàries (WNW-ESE i NE-SW).

La família E-W (N 090° E) correspon —en els casos en què n'he pogut establir el sentit de moviment sobre el camp— a falles sinistres. p. ex. estació núm. 3 (fig. 8-E i fot. 8) i estació núm. 7 (figs. 9-E i F i fot. 3).

La família NNW-SSE (N 145° E) són falles destres, tal com hem vist a l'apartat 3.2.1.2. i a diverses estacions (p. ex., estació núm. 7, figs. 9-E i F i fot. 3).

Aquestes dues direccions, amb aquests moviments, cal atribuir-les a la segona fase de compressió; llur formació, però, correspon a la primera.

Las fractures de la família de direcció NE-SW (N 047° E), basant-me en les observacions de l'estació núm. 7 (figs. 12 i 13), puc atribuir-les a falles destres formades tardanament durant la segona fase compressiva.

La quarta família, de direcció WNW-ESE, (N 112° E), si comparem el diagrama de la fig. 15-A amb el comptatge de la fig. 12, pot ésser atribuïda també a falles que van actuar com a destres en la segona etapa compressiva.

3.2.3.— *Consideracions generals sobre les fases compressives al massís de Garraf*

Als capítols anteriors he fet una descripció de totes les observacions portades a cap a diverses escales i tant al camp com en fotografia aèria i, alhora, he anat fent consideracions sobre aquestes dades i llur interpretació. Una vegada fet això, intentaré una interpretació global de tot el que he exposat, i noves consideracions que hom en pugui treure.

La disposició global de la fracturació, tal i com es veu a les figs. 12 i 13 i a la fig. 15-A, presenta dos màxims clarament diferenciats: l'un E-W i l'altre NNW-SSE. Tal com es desprèn de l'anàlisi feta anteriorment, aquests dos màxims corresponen a dos sistemes de fractures conjugades produïdes

per una compressió de direcció NW-SE que degué bisecar l'angle agut entre ambdues.

Si tenim en compte els treballs de RIEDEL (1929), CLOOS (1928), TCHALENKO (1970), etc., aquesta fracturació produïda en la cobertora mesozoica pot ésser interpretada com el producte d'una falla de sòcol sinistra*, tal com hem vist als apartats 2.5.1. i 2.5.2. L'existència d'aquesta falla ha estat suggerida per M. ESTEBAN (1973) i l'existència i el sentit de moviment en resten clarament establerts més cap al NW —als voltants de Capellades— com veurem a l'apartat 3.4.

Posteriorment es produí una fase compressiva amb un escurçament "grosso modo" NE-SW que féu actuar novament les fractures produïdes durant el primer moviment; és a dir, les falles de direcció E-W actuaren com a sinistres i les NNW-SSE com a destres. Aquest moviment és el que, com ja hem dit, resta més palès pertot arreu, car l'angle que formen entre elles les falles conjugades en la direcció de l'escurçament és obtús.

Lligades amb aquesta fase, he trobat falles destres de direcció aproximada NE-SW que, en certs llocs (estació nùm. 7, figs. 9-E i F), he vist que es poden interpretar com a produïdes per variacions del camp d'esforços cap al final d'aquesta segona fase, i que ocasionaren el bloqueig de l'actuació de les falles NNW-SSE com a destres. Cal, però, no rebutjar la possibilitat que en certs punts es produïssin des del començament d'aquesta fase compressiva, si el camp d'esforços restava ja de bell antuvi amb un eix Z excessivament perpendicular a les falles NNW-SSE, cosa fàcilment possible si tenim en compte que la direcció d'escurçament biseca l'angle obtús de les falles conjugades (vegeu fig. 15-C).

Aquesta evolució l'he sintetitzada en la fig. 15-B— 1, 2 i 3.

Com hem vist, la distribució de les dues famílies principals de fractures pot explicar-se considerant-les falles de Riedel conjugades (R') d'una falla de sòcol sinistra. Fóra interessant d'estudiar la possibilitat que la fracturació d'ordre menor —a l'escala de l'aflorament— seguís aquesta distribució respecte a les falles a l'escala de la fotografia aèria, tal i com proposa TCHALENKO (1970) a totes les escales.

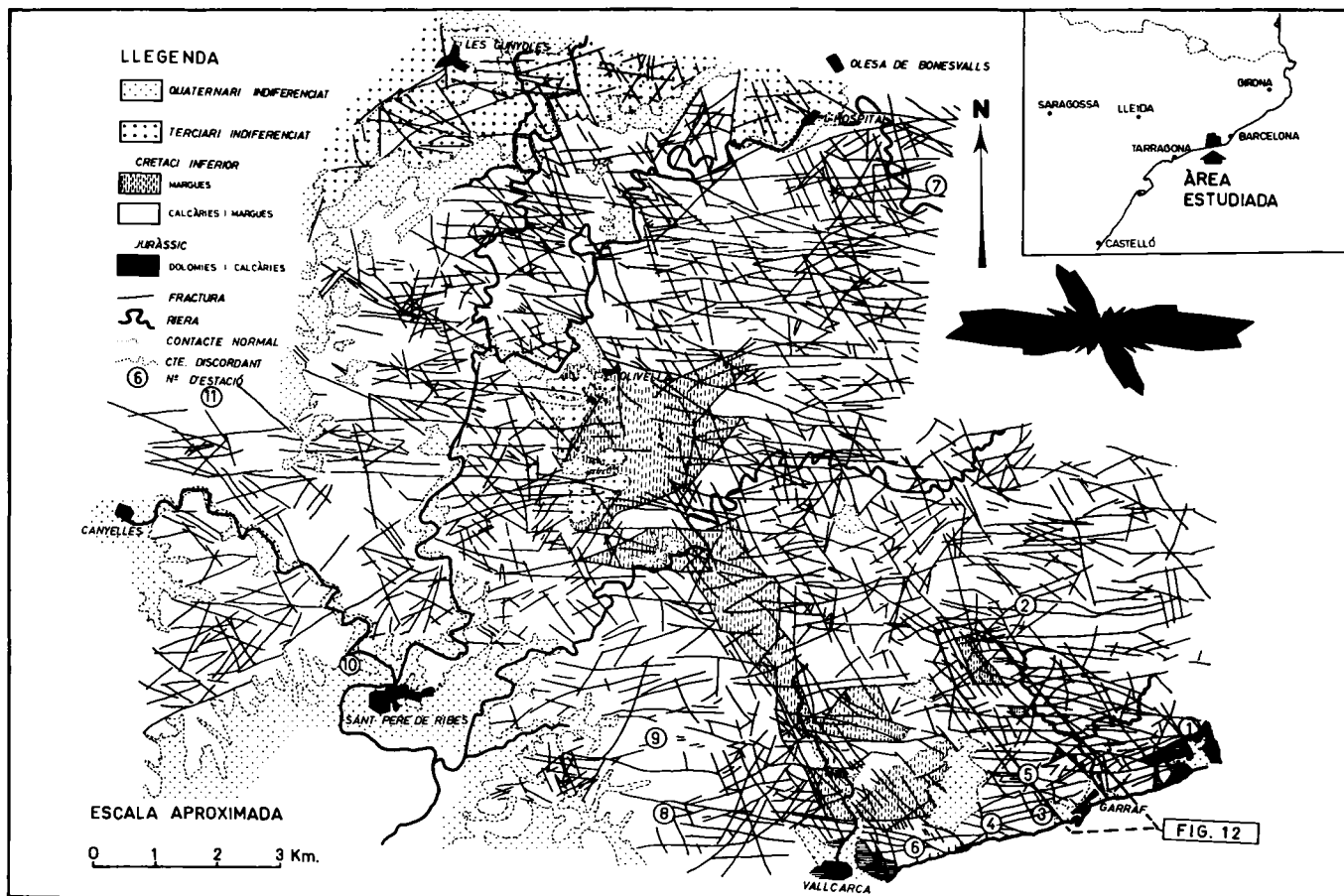
Cal tenir en compte que el fet que s'hagin produït dues fases compressives gairebé perpendiculars, que han ocasionat l'actuació dels mateixos sistemes de falles, ha hagut de produir, indubtablement, complicacions pel que fa a aquesta distribució, agreujada per l'acció de les falles destres NNE-SSW que actuaren durant la segona fase.

La fig. 15-C representa la distribució teòrica de les famílies conjugades R i R' de segon ordre en el cas del Massís de Garraf, per un escurçament Z_1

* També es podria pensar en una falla de sòcol dreta WSW-ENE. Els criteris regionals, però, ens indueixen a acceptar una falla de sòcol sinistra NNW-SSE.

FIGURA 14:

Interpretació fotogeològica de la fracturació de l'àrea estudiada. El mapa de l'angle superior dret n'indica la localització geogràfica.



= NW-SE (fig. 15-C-1) que biseca l'angle agut i per un altre Z_2 = NE-SW (fig. 15-C-2) que biseca un angle obtús. En el segon cas suposo que les relacions angulars entre la direcció d'escurçament principal (Z_2) i les direccions d'escurçament secundàries (Z_2^a i Z_2^b) són les mateixes ($\pm 15^\circ$) que en el primer cas, qüestió sobre la qual no he trobat cap referència bibliogràfica, ni teòrica, ni experimental, ni de casos reals.

Com es desprèn de les relacions geomètriques entre les diverses estructures, tal com són representades en la fig. 15-C, en el cas de la segona fase d'escurçament horitzontal (Z_2) i als voltants d'una falla NNW-SSE (dreta) les relacions entre les falles de segon ordre teòriques d'aquesta segona fase amb les de la primera són tals que les falles destres de la primera fase actuaren amb moviment sinistre en la segona, mentre les falles sinistres de la primera fase difícilment pogueren actuar com a destres en la segona perquè resten força perpendiculars a la direcció local d'escurçament Z_2^b ; això afavoriria la formació de falles NNE-SSW destres, fet que hem observat ja en diversos diagrames (figs. 9-F, 10-B, etc.). Si fem una anàlisi similar als voltants d'una falla E-W (sinistra) veiem que les falles sinistres de la primera fase poden actuar ara com a destres, mentre que les destres de la primera fase resten força perpendiculars a la direcció local d'escurçament (Z_2^a); d'aquesta manera podrien ésser explicades certes distribucions de falles sinistres de la segona fase de direcció NE-SW, com en la fig. 8-D (estació 3), que es troba als voltants d'una falla sinistra E-W (fot. 8); altres exemples en podrien ésser les figs. 8-C i 10-A.

Trobem exemples clars de distribució de Riedel al mapa núm. 3 en relació amb la segona fase compressiva. Les mesures del diagrama C són fetes tocant a una falla E-W (sinistra) i indiquen una direcció d'escurçament més N-S que la direcció d'escurçament general (vegeu fig. 15-C-2), mentre que en el diagrama E, amb mesures fetes tocant a una falla NNW-SSE (dreta), indiquen una direcció local d'escurçament que es desvia de la direcció general en un sentit oposat a l'anterior (vegeu fig. 15-C-2). Les altres estacions no han estat fetes arran mateix de les falles principals i presenten situacions menys diferenciades.

3.3.— Distensió

En aquest capítol estudio les estructures que revelen distensió. Fractures amb estries o recristal·litzacions de calcita, mostrant llur caràcter de falles normals, les he trobades pertot arreu i, si coexisteixen sobre un mateix pla amb estries horitzontals, sempre els són posteriors. Cal advertir que han estat considerades com a falles normals falles que sobre el terreny es presentaven com a inverses, sempre, però, amb un pla amb cabussament

fort, i les he considerades com a falles normals basculades fins a aparèixer com a inverses, o com a falles normals amb un pla de falla irregular que fa que, localment, semblin inverses.

Aquesta fase distensiva aprofità les nombrosíssimes falles ja existents, i cap de les famílies representades en la fig. 15-A no li pot ésser atribuïda en la seva formació: totes les famílies de falles presenten mostres d'estries horitzontals anteriors a la distensió.

De la fig. 16 (estacions 11, 3, 10, 8, 5 i 4) hom dedueix que aquesta fase distensiva té un eix d'allargament X de direcció aproximada NW-SE — de N 130° E a N 145° E —, que la direcció de la majoria de les falles oscil·la als voltants de NE-SW, de N-S a E-W, i que també hi ha algunes falles NW-SE. només a l'estació núm. 1 les observacions fetes —principalment esquerdes de tensió— indiquem una direcció d'allargament lleugerament diferent (N-S).

Totes aquestes observacions són esquematitzades en la fig. 15-B-4, on els sistemes dominants són NE-SW i E-W, i el sistema NW-SE actua com a secundari, i en la fig. 11-B, on he representat la direcció D d'allargament obtinguda en les diferents estacions. El fet que les de la família NW-SE actuen també com a falles normals fa pensar que l'eix de deformació intermedi Y també és d'allargament (fig. 15-B-4).

A més de les falles normals, en tota una zona al nord de la població de Garraf s'han desenvolupat gran quantitat de diàclisis, molt visibles en la fotografia aèria. En fer l'estudi de la zona de fractura de Garraf vaig estudiar-les, i les conclusions obtingudes són representades en les figs. 12 i 13.

A la fig. 13 —voltants del Castellet— he representat en els diagrames aquestes diàclisis: 1c, 4b, 5b, 6b, 7b i 9b. En el diagrama 6b he pogut veure'n la relació amb esquerdes de tensió "en escaló" verticals, prova evident de llur relació amb la distensió. Totes aquestes mesures de diàclisis han estat ajuntades en el diagrama 15 d'aquest mapa on la direcció d'allargament (N 120° E) és perfectament concordant amb l'obtinguda de l'estudi de les falles normals. En els diagrames 2b i 3 hi ha representades falles normals de direcció més o menys N-S, que és la direcció aproximada local de les falles destres —diagrames 1a i 2a— els plans de les quals pot suposar-se que aprofiten.

A la fig. 12, diagrama B, hi ha representada una altra estació d'aquest tipus de diàclasi, amb una direcció de allargament semblant en tot a l'obtinguda anteriorment.

Així, doncs, puc concloure que aquesta etapa distensiva es caracteritza per un eix d'allargament X de direcció NW-SE, amb falles normals que aprofiten la fracturació preexistent —tret del lot de diàclisis vist darrera— i que són, sempre, posteriors a les falles de direcció de les etapes compressives, les estries horitzontals de les quals tallen.

FIGURA 15:

A.— Representació en rosa dels vents del comptatge de la fotointerpretació de la zona estudiada (fig. 14). L'escala gràfica indica la longitud de falles en quilòmetres mesurada en cada interval de 5°. 1) Primer moviment de la falla de sòcol (sinistra), formació de la fracturació de la cobertora: falles R (N 145 E) i falles R' (N 090 E). 2) Possible segon moviment (destre) de la falla de sòcol.

B.— Esquema de síntesi de l'evolució de la fracturació en la cobertora mesozoica del Massís de Garraf. 1) Compressió NW-SE; formació de les falles NNW-SSE sinistres i E-W destres. 2) Compressió NE-SW: reaprofitament de la fracturació formada en la fase anterior; les falles NNW-SSE actuen amb moviment drete i les E-W amb moviment sinistre. 3) Rotació de la direcció d'escurçament al final de la segona fase compressiva: les falles destres NNW-SSE són bloquejades i es formen falles destres NNE-SSW. 4) Fase distensiva: allargament principal X = NW-SE, l'eix intermedi Y = NE-SW també és d'allargament; les falles E-W, NNE-SSW i NNW-SSE actuen com a falles normals.

C.— Representació de la distribució teòrica de les famílies conjugades R i R' de segon ordre en el cas del Massís de Garraf. 1) En l'escurçament $Z_1^a = NW-SE$: Z_1^a i Z_1^b són els escurçaments de segon ordre. 2) En l'escurçament $Z_2 = NE-SW$: Z_2^a i Z_2^b són els escurçaments de segon ordre.

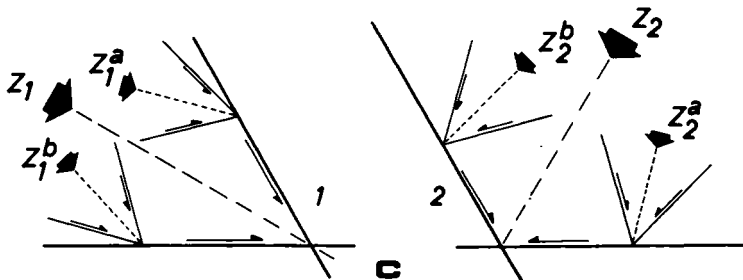
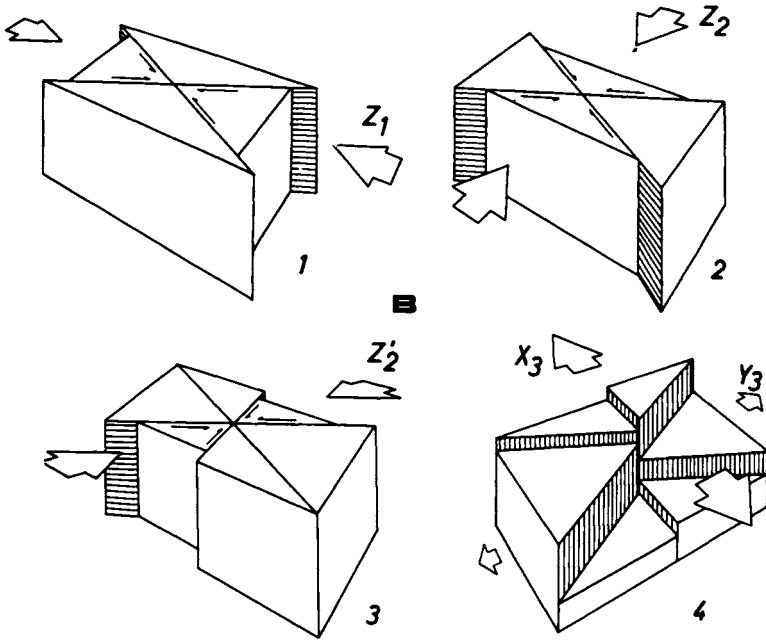
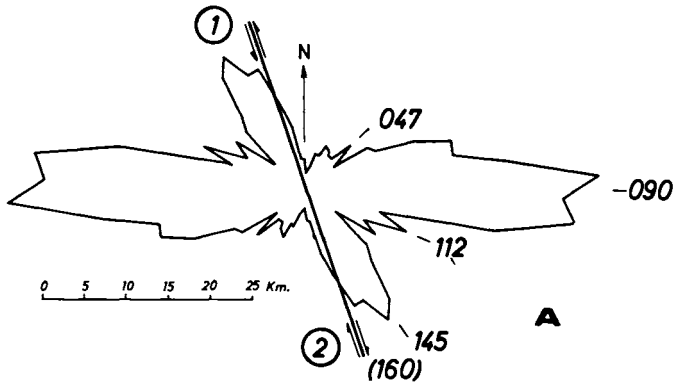
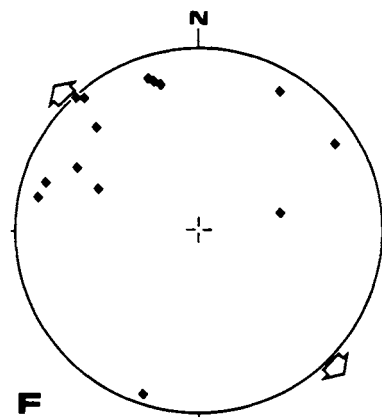
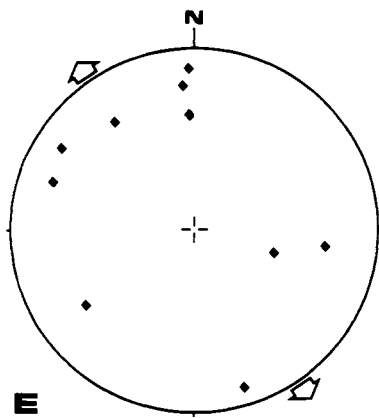
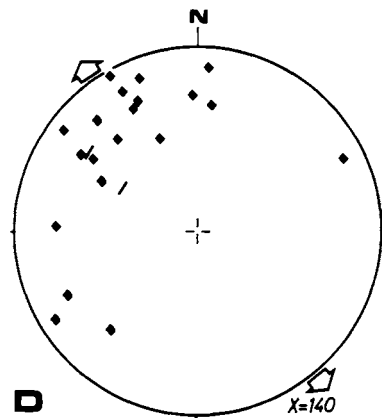
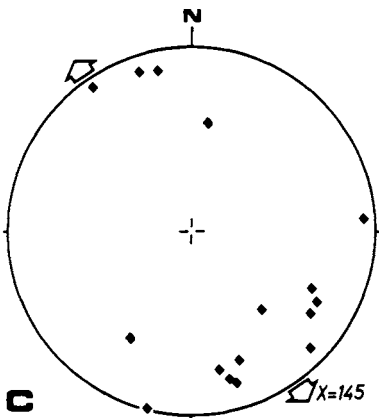
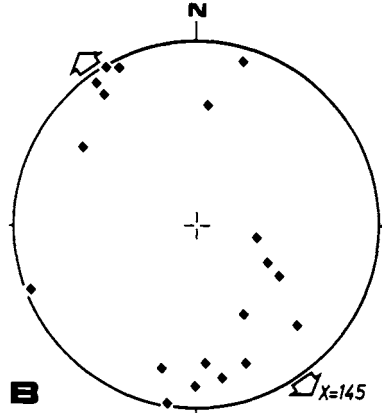
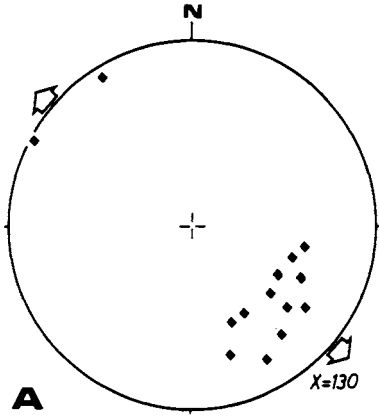


FIGURA 16:

Diagrames de les falles normals mesurades en les diferents estacions analitzades. Hom observa un allargament principal NW-SE en tots els diagrames i la presència, també, de falles NW-SE – que indicarien, de més a més, un allargament NE-SW – en els diagrames D, E i F.

- A.– Estació 11.
- B.– Estació 3.
- C.– Estació 10.
- D.– Estació 8.
- E.– Estació 5.
- F.– Estació 4.



3.4.— La falla de sòcol transversal als voltants de Capellades

La falla de sòcol transversal suggerida per ESTEBAN (1973), mapa núm. 1, a l'acció de la qual he atribuït la gènesi de la fracturació de la cobertura mesozoica del Massís de Garraf, continua cap al NNW travessant la Serralada Prelitoral als voltants de Capellades.

L'estructura d'aquesta regió (fig. 17-A), principalment la virgació dels eixos dels plecs triàsics al S de Capellades i del front d'encavalcament de l'escata paleozoica, suggereix l'acció d'una falla de direcció sinistra. Aquesta possibilitat ha estat confirmada amb observacions de camp.

En els diagrames 3 i 4 de la fig. 17-A he representat les mesures de plans d'estratificació fetes a les calcàries i dolomies del Muschelkalk Superior en dos llocs diferents, l'un lluny del suposat traçat de la falla (3) i l'altre molt a prop (4). El resultat és que en el diagrama 4 obtenim l'eix d'un plec de direcció típicament catalana $-N 060^{\circ}E-$, mentre que en el diagrama 3 l'eix del plec obtingut és força diferent i gairebé perpendicular a l'anterior $-N 150^{\circ}E-$. Aquest fet confirma a la suposició d'una virgació tal com caldria esperar per l'acció d'una falla de direcció sinistra.

L'escata paleozoica del N de Capellades, tal com ho mostra el mapa núm. 1, té una direcció NE-SE i encavalca cap al NW. Prop del traçat de la falla postulada sofreix un canvi de direcció i, així, al lloc on ha estat fet el diagrama 2 de la fig. 17-A té una direcció aproximadament N-S i l'encavalcament hi és cap a l'oest. Aquesta disposició també induïx a pensar en una falla de direcció sinistra.

Així, doncs, puc afirmar l'existència d'una falla de sòcol de direcció sinistra, el traçat de la qual passa aproximadament una mica a l'oest de Capellades i separa l'escata de Paleozoic encavalcant del Triàsic plegat. La disposició de l'escata indica que aquesta falla té en aquesta regió un cert component invers, car el bloc NE és l'aixecat i el NW l'enfonstat.

Els diagrames 1 i 2 de la FIG. 17-A representen dues estacions de fractures fetes als materials de la formació de Collbàs (FERRER, 1971) (1) i les calcàries del Muschelkalk (2) (fig. 3.34). El segon diagrama representa falles de direcció i inverses que donen una direcció d'escurçament $Z = N 021^{\circ}E$; i el primer representa una falla dreta i dues famílies de diàclisis que, per llur disposició, poden ésser atribuïdes a una fase compressiva amb un escurçament $Z = N 022^{\circ}E$. Aquestes estructures no són compartibles genèticament amb la falla de direcció sinistra i les virgacions que hem discutit abans.

Així, puc concloure que en la regió dels voltants de Capellades poden ésser posades de manifest dues fases d'escurçament horitzontal: una de direcció NW-SE i que féu actuar la falla de sòcol NNW-SSE com a falla sinistra i

produí les virgacions esmentades, i l'altra de direcció NNE-SSW, de la qual només he observat fractures a l'escala de l'aflorament. Aquestes dues fases poden ésser correlacionades amb les observades al Massís de Garraf; la de direcció NW-SE és la primera en el temps i la de direcció NNE-SSW la segona.

3.5.— Implicacions a nivell regional

Arreu dels Catalànids hi ha tot un seguit de formes cartogràfiques i d'observacions microestructurals fetes per diversos autors que poden ésser explicades admetent aquestes dues fases compressives i que, consegüentment, abonen aquesta hipòtesi.

Dins les observacions microestructurals tenim la feta per ANSALDO-PÉREZ (1978) a les calcàries del Muschelkalk Inferior, prop de Pontons, on ha trobat una primera compressió NNW-SSE i una de segona ENE-WSW, perfectament compatibles amb les nostres observacions. També GUIMERA i SALAS (1977), descriuen, al km 5,2 de la carretera de Seva a Viladrau, on talla el barranc de la Vall d'Oriola, una estació de microfalles de direcció feta als nivells vermells de la base del Terciari de la Depressió Central Catalana que indica una direcció d'escurçament $Z = N 046^\circ E$, que correspondria a la segona fase postulada per mi.

Dins l'estructura a gran escala dels Catalànids hem vist casos de falles transversals sinistres (fig. 17-A) i d'altres que cartogràficament indiquen un moviment dretre, com la falla del Llobregat. Aquesta disposició de falles transversals aproximadament paral·leles amb moviments oposats pot ésser explicada mitjançant dues fases compressives diferenciades. D'altra banda, el paral·lelisme entre ambdós tipus de falles no és perfecte, car les falles sinistres solen tenir direccions $N 160^\circ E$ (fig. 17-A) i les dretres $N 130^\circ E$. Aquesta orientació diferent ha pogut ocasionar comportaments diferents sota l'acció de les dues fases compressives reconegudes.

La fig. 17-B-1 representa un esquema del possible comportament de les falles de Capellades-Vallcarca i del Llobregat durant l'actuació de la primera fase compressiva (NW-SE). La falla de Capellades-Vallcarca, a causa de la seva orientació, pot actuar com a falla de direcció sinistra simultàniament al plegament de la Serralada Prelitoral, mentre la falla del Llobregat resta gairebé paral·lela a la direcció d'escurçament i no pot, per tant, sofrir desplaçaments horitzontals importants, però pot, per contra, actuar com a falla normal amb un important salt vertical, puix que hi resta perpendicular la direcció d'allargament.

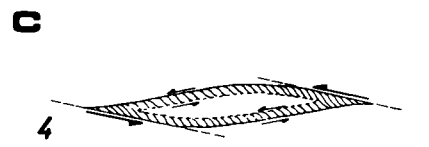
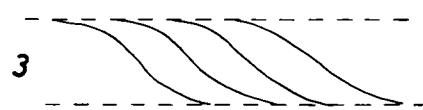
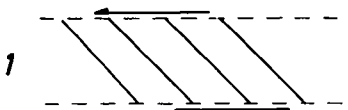
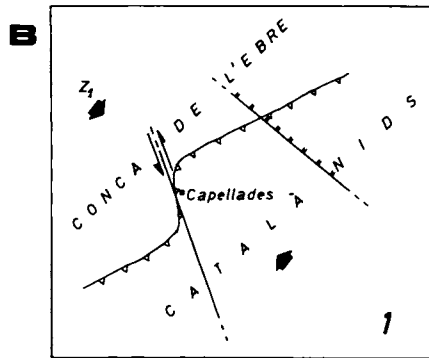
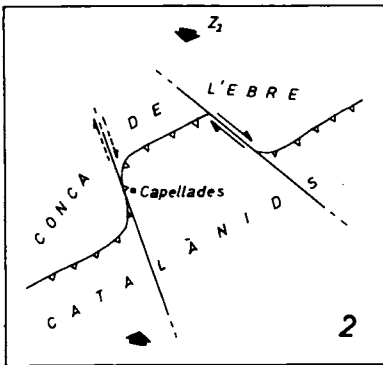
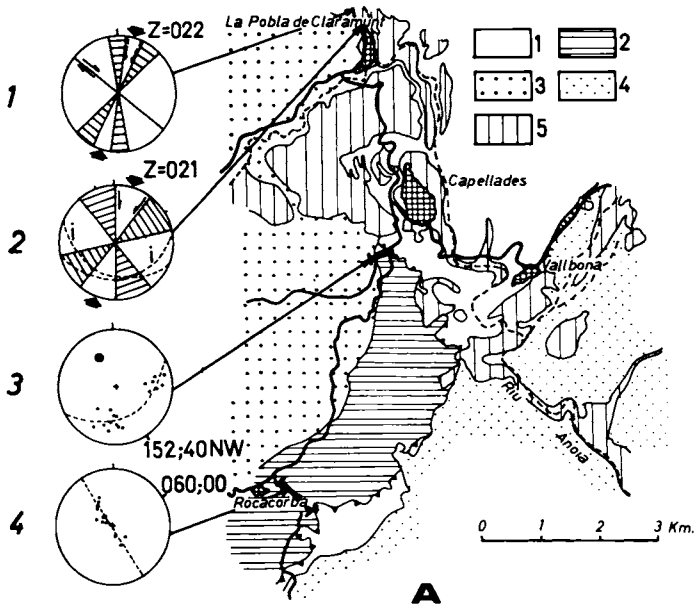
La fig. 17-B-2 representa la possible actuació d'ambdues falles durant la segona fase compressiva en què totes dues poden fer-ho com a falles de direcció dretres. En aquest cas, però, ho ha fet la falla del Llobregat amb

FIGURA 17:

A.— Mapa geològic dels voltants de Capellades (segons GARCIA RODRIGO, 1957, simplificat). 1) Estació de fractures feta als materials de la Fm. de Collbàs (Eocè): escurçament NNE-SSW. 2) Id. de falles feta al Muschelkalk: escurçament NNE-SSW. 3) i 4) Projecció dels plans d'estratificació mesurats, respectivament, prop i lluny del traçat suposat de la falla de Capellades-Vallcarca; vegeu la inflexió clara de l'eix de l'anticlinal dels materials triàsics que indica un moviment sinistre.

B.— Esquema de l'evolució possible del sector de la Serralada Prelitoral comprès entre els rius Anoia i Llobregat. 1) Primera fase compressiva: formació de plecs i encavalcaments de direcció catalana; la falla de Capellades-Vallcarca actua com a falla de direcció sinistra sincrònicament amb la formació dels plecs; la falla del Llobregat no sofreix cap desplaçament horitzontal important, i pot actuar com a falla normal. 2) Segona fase compressiva: la falla del Llobregat actua com a falla de direcció destra i desplaça les estructures de plegament catalanes; la falla de Capellades-Vallcarca pot actuar també amb moviment horitzontal destre.

C.— Formació d'"esquistositat" en zones de cisalla, segons ROBERT i VIALON (1976). 1), 2) i 3) Els plans d'esquistositat formen inicialment 45° amb la direcció de la fractura; amb el progrés de la deformació adopten forma sigmoide per deformació de les vores. 4) Aspecte lenticular dels blocs poc deformats dins la zona de cisalla, en els límits dels quals es desenvolupen les esquistositats ("clivage schisteux").



més intensitat, desplaçant les estructures de plegament dels Catalànids ja formades en la primera fase. Estructures similars a aquestes es troben en altres llocs dels Catalànids, per exemple a l'escata de les Pedritxes.

Puc concloure, doncs, que les falles transversals sinistres actuen sincrònicament amb el plegament —els plecs s'amotllen al seu moviment (fig. 17-B-1)— mentre que les destres tallen les estructures del plegament i li són posteriors.

Un altre exemple de macroestructures dels Catalànids explicables per l'acció de falles transversals sinistres el constitueix el Massís de Bonastre amb el seu arc perifèric. La virgació de les estructures pot ésser explicada admeten un moviment sinistre a la falla de l'estret de la Riba.

Recentment ROBLES OROZCO i INIESTA (1977) han trobat al Mesozoic de la serra de la Vall de la Torre —entre les depressions de Móra i de l'Ebre— un sistema de plecs NW-SE superposats als de direcció catalana (NE-SW). Aquest sistema, molt localitzat, l'interpreten com a produït per l'acció d'una falla de sòcol transversal dreta i, per la geometria de les formes cartogràfiques, cal pensar que és anterior als plecs de direcció catalana. Això exigiria una direcció de compressió NNE-SSW anterior a la fase NW-SE que produí les estructures de direcció catalana. Aquesta fase es diferencia clarament de la mateixa direcció deduïda en aquest treball, que talla clarament les estructures catalanes i, per tant, els és posterior (fig. 17-B-2).

3.6.— Conclusions

De tot l'exposat en aquest treball puc concloure:

1) La fracturació de la cobertora mesozoica del Massís de Garraf és interpretada en termes de Riedel (falles R: NNW-SSE i R': E-W) d'una falla de sòcol sinistral de direcció N 160° E.

2) Aquestes deformacions es produïren sota l'acció d'una fase compressiva NW-SE que és, també, la responsable de la formació de les estructures de plegament de direcció catalana.

3) Posteriorment hi hagué una altra fase compressiva de direcció general NNE-SSW que reaprofità la fracturació ja existent i li ocasionà moviments oposats als que havia sofert durant la primera fase. Al final d'aquesta segona fase hi hagué una rotació de la direcció de compressió que bloquejà les falles NNW-SSE destres i afavorí la formació d'altres de direcció NNE-SSW.

4) Hi ha tot un seguit d'observacions microestructurals i cartogràfiques als Catalànids que poden ésser explicades mitjançant l'acció successiva d'aquestes dues fases.

5) Finalment tingué lloc una fase distensiva amb una direcció d'allargament NW-SE que féu actuar com a falles normals les fractures generades per les fases compressives.

BIBLIOGRAFIA

- ÁLVAREZ, W., ENGELDER, T., i GEISER, P.A. (1978).— *Classification of solution cleavage in pelagic limestones*. *Geology*, 6: 263-266.
- Íd., íd., i LOWRIE, W. (1976).— *Formation of spaced cleavage and folds in brittle limestones by dissolution*. *Geology*, 4: 698-701.
- ÁLVARO, M., i CAPOTE, R. (1973).— *Las estructuras menores de un anticlinal de la Sierra de Altomira (Cuenca, España)*. *Est. Geol.*, 29: 467-478.
- ANADÓN, P. (1978).— *El Paleógeno continental anterior a la transgresión Biarritziense (Eoceno Medio) entre los ríos Gaià i Ripoll (Prov. de Tarragona y Barcelona)*. Tesi Doctoral. Univ. de Barcelona. Dept. Estratigrafia i Geologia Històrica. 267 p. Inèdit.
- ANDERSON, D.L. (1971).— *San Andreas Fault*. *Scientific American*, Novembre de 1971.
- ANDERSON, E.M. (1951).— *The dynamic of faulting and dyke formation with application to Britain*. Oliver & Boyd. Reprinted of the Revised Second Edition (1963), 206 p.
- ANSALDO PÉREZ, E.J. (1978).— *Cartografía y estudio tectónico de la zona Torrelles de Foix-Pontons*. Univ. de Barcelona, Fac. Geologia, Dept. Geomorfologia i Geotectònica, 20 p. Inèdit.
- ARTHAUD, F. (1969).— *Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles*. *Bull. Soc. Géol. France*, 7 (11): 729-737.
- Íd. i MATTAUER, M. (1969).— *Sur les décrochements NE-SW senestres contemporains des plis pyrénéens en Languedoc*. *C.R. somm. Soc. Géol. France*, 8: 290-291.
- Íd. i MATTE, P. (1975).— *Les décrochements tardiherciniens du Sud-ouest de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de déformation*. *Tectonophysics*, 25: 139, 171.
- ASHAUER, H. i TEICHMÜLLER, R. (1935).— *Die Variscische und Alpische Gebirgsbildung Kataloniens*. *Abh. Gessells. Göttingen, Math. Phys. Kl., Het.* pp. 16-98. Berlín. Traduc. castellana: Publ. Extr. Geol. España, III: 1-93. Madrid. 1946.
- BERGERAT, F. (1977).— *La fracturation de l'avant-pays jurassien entre les fossés de la Saône et du Rhin*. *Analyse et essai d'interpretation dynamique*. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dynam.*, 19 (4): 325-337.
- CALZADA, S. (1972).— *Torinosuella sp. y Cropulus sp. en el Valanginiense y Hauteriviense de Garraf*. *Rev. Española de Micropaleontologia*, núm. extra Dic.: 51-58, Madrid.
- Íd. i VIA, L. (1971).— *Sobre el supuesto Jurásico del Macizo de Garraf (Barcelona)*. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 2: 483-488.

- CAREY, E. (1975).— *Méthode numérique d'approche d'un tenseur moyen pour une population de failles*. 3^{ème} réunion ann. des Sciences de la Terre (Montpellier). Résumés des comm., p. 92.
- CHINNERY, M.A. (1966 a).— *Secondary faulting. I. Theoretical aspects*. Canadian Jour. Earth Sc., 3: 163-174, Ottawa.
- Id. (1966 b).— *Secondary faulting. II. Geological aspects*. Canadian Jour. Earth Sc., 3: 175-190, Ottawa.
- CHOUKROUNE, P. (1969).— *Un exemple d'analyse microtectonique d'une série calcaire affectée de plis isopaques ("concentriques")*. Tectonophysics, 7 (1): 57-70.
- Id. i DELAIR, J. (1976).— *Un modèle cinématique de la fracturation liée au plissement concentrique: l'exemple des Petites Pyrénées*. Bull. Soc. Géol. France, 7^e sér., 28 (6): 1591-1597.
- Id. i SEGURET, M. (1968).— *Un exemple de relations entre joints de cisaillement, fentes de tension, plis et schistosité (autochtone de la nappe de Gavarnie. Pyrénées Centrales)*. Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn., 3: 239-246.
- CLOOS, E. (1955).— *Experimental analysis of fracture patterns*. Geol. Soc. Amer. Bull., 66 (3): 241-256.
- CLOOS, H. (1928).— *Experimente zur inneren Tektonik*. Zentrabl. f. Mineral., Geol. u. Pal., 1928 B, pp. 609-621.
- DER COURT, J. (1971).— *L'expansion océanique actuelle et fossile: ses implications géotectoniques*. Bull. Soc. Géol. France, 7^e sér., 12 (2): 261-317.
- EMMONS, R.C. (1969).— *Strike slip fracture pattern in sand models*. Tectonophysics, 7 (1): 71-87.
- ESTEBAN, M. (1973).— *Petrología de las calizas cretácicas del sector central de los Catalánides (Prov. de Tarragona y Barcelona)*. Tesi Doctoral, Dept. Petrologia, Univ. de Barcelona. 425 p. Inédit.
- ESTEBAN, M. i JULIÀ, R. (1973).— *Discordancias erosivas intrajurásicas en los Catalánides*. Acta Geol. Hispánica, 8 (5): 153-157.
- Id. i ROBLES OROZCO, S. (1976).— *Sobre la paleogeografía del Cretácico Inferior de los Catalánides entre Barcelona y Tortosa*. Acta Geol. Hispánica, 11 (3): 73-78.
- Id. i SANTANACH, P.F. (1974 a).— *¿El modelo de cuña compuesta de C.I. Migliorini (1948) es aplicable a la estructura del sector central de los Catalánides?* Acta Geol. Hispánica, 9 (2): 37-41.
- Id. i id. (1974 b).— *Deslizamientos gravitacionales y olistostromas miocenos en el Bajo Gaià y Camp de Tarragona*. Acta Geol. Hispánica, 9 (4): 117-126.
- FABRE, D. i ROBERT, J.P. (1975).— *Analyse expérimentale des ruptures de la couverture liées à un mouvement décrochant du socle et applications*. Ann. Soc. Géol. Nord, 14 (3): 175-182.
- FERRER, J. (1971).— *El Paleoceno y Eoceno del borde Sur-oriental de la Depresión del Ebro (Catauña)*. Easo. Birkhauser Verlag Basel, Soc. Helv. Sci. Natur., 90.
- FONTBOTÉ, J.M. (1954).— *Las relaciones tectónicas de la depresión del Vallés-Penedés con la Cordillera Prelitoral Catalana y con la Depresión del Ebro*. R. Soc. Española Hist. Nat., tomo Homenaje Prof. E. Hernández Pacheco, pp. 281-310, Madrid.
- FREUND, R. (1970).— *Rotation of strike slip faults in Sistan, southeast Iran*. J. Geol., 78: 188-200.

- Id. (1974).— *Kinematic of transform and transcurrent faults*. *Tectonophysics*, 21 (1): 93-134.
- Id., ZAK, I. i GARFUNKEL, Z. (1968).— *Age and rate of the sinistral movement along the Dead Sea Rift*. *Nature*, 220: 253-255.
- GARCIA RODRIGO, B. (1957).— *El Valle del Anoiá*. *Mem. y Com. Inst. Geol. Prov.*, 16: 45-80. Barcelona.
- GLANGEAUD, L. (1968).— *Les méthodes de la Géodynamique et leurs applications aux structures de la Méditerranée Occidentale*. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, (2), 10 (2): 83-135.
- GROSS, G. (1974).— *Untersuchungen zur Stratigraphie und Genese der Tertiären Sedimentgesteine in Ebrobecker (NE Spanien)*. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 145 (3): 243-278.
- GUIMERA, J. i SALAS, R. (1977).— *Les fractures d'esquinçament del Congost i de Coll Formic. Lur comportament i influència en la sedimentació triàsica i terciària*. *Dept. Geomorf. i Geotectònica, Univ. de Barcelona*, 33 p. i un mapa 1:10.000. Inèdit.
- HILL, M.L. i DIBBLEE, Jr. (1953).— *San Andreas, Garlock and Big Pine Faults. California*. *Geol. Soc. America Bull.*, 64: 443-458.
- HOBBS, B.E., MEANS, W.E. i WILLIAMS, P.F. (1976).— *An outline of Structural Geology*. John Wiley & Sons, Inc., 571 p., Nova York.
- HOEPPENER, R., KALTHOFF, E. i SCHRADER, P. (1969).— *Zur physikalischen Tektonik: Bruchbildung bei verschiedenen Deformationen im Experiment*. *Geol. Rundsch.*, 59: 179-193.
- HOWARD, J.H. (1968).— *Recent deformation of the Cholame and Taft-manicopa areas, California*. *Proc. Conf. Geol. Probl. San Andreas Fault system*. Stanford, Stanford Univ. Press, Geol. Soc., vol. 1.
- I.G.M.E. (1972).— *Mapa geológico de España, 1:200.000. Síntesis de la cartografía existente*. Hoja núm. 41: Tortosa. 45 p.
- Id. (1973 a).— *Mapa geológico de España, 1:50.000, hoja 418, Montblanch*, 2ª ser., 1ª ed., Madrid.
- Id. (1973 b).— *Mapa geológico de España, 1:50.000, hoja 419, Vilafranca del Penedés*, 2ª ser., 1ª ed., Madrid.
- Id. (1973 c).— *Mapa geológico de España, 1:50.000, hoja 473, Tarragona*, 2ª ser., 1ª ed., Madrid.
- Id. (1973 d).— *Mapa geológico de España, 1:50.000, hoja 446, Valls*, 2ª ser., 1ª ed., Madrid.
- Id. (1973 e).— *Mapa geológico de España, 1:50.000, hoja 447, Vilanova i la Geltrú*, 2ª ser., 1ª ed., Madrid.
- JULIVERT, M., FONTBOTÉ, J.M., RIBEIRO, A. i CONDE, L. (1974).— *Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares. 1:1.000.000*. Instituto Geol. Min. España. Memoria explicativa, 113 p.
- LE PICHON, X. (1968).— *Sea-floor Spreading and Continental Drift*. *Jour. Geoph. Res.*, 73: 3661-3697.
- LENSEN, J.G. (1958).— *A method of Graben and Horst formation*. *J. Geol.*, 66: 579-587.
- Id. (1959).— *Secondary faulting and transcurrent splay-faulting at transcurrent fault intersections*. *New Zealand J. Geol. Geophys.*, 2: 729.

- LLOPIS LLADÓ, N. (1942).— *Tectomorfológia del Macizo del Tibidabo y Valle inferior del Llobregat*. Est. Geogr., 7: 321-387, Madrid.
- Id. (1943).— *Estudio tectomorfológico de la terminación meridional de la depresión prelitoral catalana*. Est. Geogr., 10: 31-111, Madrid.
- Id. (1947).— *Contribución al conocimiento de la morfoestructura de los Catalánides*. Publ. Inst. Lucas Mallada, 372 p.
- LOWEL, J.D. (1972).— *Spitsbergen Tertiary orogenic belt and the Spitsbergen fracture zone*. Geol. Soc. America Bull., 83 (10): 3091-3102.
- MATTAUER, M. (1973).— *Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre*. Collections Méthodes, Hermann, 493 p. París.
- MCKINSTRY, H.E. (1953).— *Shears of second order*. American Jour. Sci., 251: 401-414, New Haven.
- MOODY, J.D. i HILL, M.J. (1956).— *Wrench-fault tectonics*. Geol. Soc. America Bull., 67: 1207-1246, Nova York.
- PICARD, L. (1966).— *Thoughts on the graben system in the Levant*. World rift system; Int. Upp. Mantle project. Geol. Survey of Canada, paper 66-14.
- PRICE, N.J. (1966).— *Fault and joint development in brittle and semibrittle rock*. Pergamon Press, 176 p.
- Id. (1969).— *A dynamic mechanism for the development of second order faults*. Proceedings, conference on research in tectonics (kink-bands and Brittle deformation). Edited by A.J. BAER & D.K. MORRIS, pp. 49-90. Ottawa, March 1968.
- RIEDEL, W. (1929).— *Zur Mechanik geologisches Brucherscheinungen*. Centralbl. f. Mineral. Geol. u. Pal., 1929 B: 354-368.
- ROBERT, J.P. i VIALON, P. (1976).— *Déformation interne et déformation aux limites dans un assemblage de blocs découpés par un cisaillement. Le clivage schisteux des niveaux structuraux supérieurs*. Bull. Soc. Géol. France, 7^e sér., 18 (6): 1599-1604.
- ROBLES OROZCO, S. (1975).— *Síntesis de la evolución estratigráfica y tectónica de los materiales secundarios del bloque del Cardó y sectores adyacentes (Prov. de Tarragona)*. Acta Geol. Hispánica 10 (2): 59-66.
- Id. i INIESTA, J. (1977).— *Pliegues superpuestos en el Mesozoico de la Sierra de la Vall de la Torre (Tarragona) y su relación con desgarres regionales del zócalo, transversales a la orientación catalánide*. Acta Geol. Hispánica 12 (1/3): 18-22.
- SALAS, R. (1977).— *La Tossa de Montbui*. En R. SALAS (ed.): 1^{er} seminario práctico de asociaciones arrecifales evaporíticas. pp. 3.15-3.27. Dept. de Petrologia i Geoquímica. Univ. de Barcelona.
- SANDER, B. (1948).— *Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. I. Allgemeine Gefügekunde und Arbeiten im Bereich Handstück bis Profil II. Die Korngefüge*. Springer Verlag, Wien. (Trad. Anglesa: *An introduction to the study of fabrics of geological bodies*, Oxford, Pergamon Press, 1970).
- SANTANACH PRAT, P.F. (1973).— *Análisis microestructural de dos afloramientos en las calizas cretácicas del macizo de Garraf (prov. de Barcelona, España)*. Acta Geol. Hispánica, 8 (3): 100-104.
- SCHRIEL, W. (1929).— *Der geologischen Bau des Katalonischen Küstengebirges zwischen Ebromündung und Ampurdán*. Sitz. z. Geol. West. Mediterran. gebietes n^o 2, Abh. d. Ges. Wissen zur Göttingen. Mat-Phys. Kl. N. f. Bol. XVI: 79 p. Berlín. (Trad. castellana: Publ. Extr. Geol. España, I:103-168. Madrid, 1942).

- SIBSON, R.H. (1974).— *Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults*. Nature, 249 (5457): 542-544.
- SKEMPTON, A.W. (1966).— *Some observations on tectonic shear zones*. 1st. Cong. Internat. Soc. Rock Mech Proc., Lisbon, 1: 329-335.
- SOLÉ-SUGRAÑES, L. (1976).— *Formación de esquistosidad por crenulación y disolución*. Acta Geol. Hispánica, 11 (5): 113-119.
- Id. (1978).— *Alineaciones y fracturas en el sistema catalán según las imágenes LANDSAT-I*. Tecniterrae, 22: 6-16.
- TALIAFERRO, N.L. (1943).— *Franciscan-Knoxville problem*. Am. Ass. Petr. Geol. Bull., 27: 109-219.
- TCHALENKO, J.S. (1970).— *Similarities between shear zones of different magnitudes*. Geol. Soc. America Bull., 81: 1625-1640.
- Id. i AMBRASEYS, N.N. (1970).— *Structural analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) earthquake fractures*. Geol. Soc. America Bull., 81: 41-60.
- VAN BEMMELEN, R.W. (1969).— *Origin of the Western Mediterranean Sea*. Symposium on the problem of oceanization of Western Mediterranean. Geol. Minj., 26: 13-52.
- VIRGILI, C. (1958).— *El Triásico de los Catalánides*. Bol. Inst. Geol. Min. Espana., LXIX, 856 p.
- WILCOX, R.E., HARDING, T.P. i SEELY, P.R. (1873).— *Basic wrench tectonics*. A.A.P.G. Bull., 57 (1): 74-96.
- WILLIS, B. (1938).— *San Andreas Rift in California*. Jour. Geol., 46: 793-827.

SUMMARY

The fracturing in several scales —especially the faults— of the mesozoic cover of the Garraf Massif is studied, paying especial attention to the compressional structures and to their possible relationship with the great faults in the basement.

From the mapping analysis the existence of two main sets of faults can be deduced: one with an approximate E-W direction and another NNW-SSE. The acute angle which forms both sets is bisected by an approximate NW-SE direction and, on principle, it could be said that the E-W faults would have been right-hand faults and those NNW-SSE left-hand. In spite of that, the observation of minor structures associated with those faults point to determine that, in most cases, the E-W faults are left-hand faults and those NNW-SSE are right-hand. This fact can be directly observed in some of the great mapped faults and is clearly shown when analysing the diagrammes of the strike-slip faults to the outcrop scale. Sometimes I could observe that the same fault had undergone both movements, but I was not able to observe its temporal relationship. A third far less developed set of faults of NNE-SSW direction had moved in right-hand movement, and there are traces which show that this movement had been made at a later period to that dominating in the both main sets.

All this data are interpreted as a result of the succession of two compressional phases. The first one, with an approximately NW-SE maximum shortening direction, would have bisected the acute angle formed by the two main sets of faults and which would have been responsible for their formation (E-W=right-hand faults and NNW-SSE=left-hand faults). The second compressional phase would have a NE-SW maximum shortening direction, and would have bisected approximately the obtuse angle which forms both sets of faults. Within this second phase —later on or locally— a rotation in the maximum shortening direction would have taken place towards an ENE-WSW direction and the NE-SW right-hand faults would have formed.

Other minor structures which indicate normal fault movements overlap the minor structures over the fault planes which indicate strike-slip movements. The X and Y directions of this distension had been extension directions, being X the NW-SE direction and, consequently, sensibly perpendicular to the great normal faults which limitate the great morphostructural units of the Catalanids.

Several characteristics of the central sector of the Catalanids can be explained if such an evolution of compression is accepted for the basement. The Capellades-Vallcarca fault (N 160 E), which is a left-hand fault and synchronous with the folding of the Catalanids, would have acted during the first compressional phase (Z=NW-SE), while the Llobregat fault (N 130 E), which is right-hand and clearly shifts the folding structures of the Serralada Prelitoral, would have done it during the second compressional phase (Z=NE-SW) and would not have been able to do it during the first phase as their directions are sensibly parallel.

The Capellades-Vallcarca fault runs under the Garraf Massif and would have been responsible for the fracturing formation of its cover, with an array of "Riedel" faults, during the first compressional phase.

TAULA

1.- INTRODUCCIÓ	
1.1.- Situació geogràfica i geològica	9
1.2.- Objecte del treball i metodologia emprada	9
1.3.- Trets principals de l'estructura dels Catalànids	9
1.4.- Dades estratigràfiques i tectòniques sobre el Massís de Garraf	11
1.4.1.- Dades estratigràfiques	11
1.4.2.- Dades tectòniques	12
2.- ESTUDI BIBLIOGRÀFIC	
2.1.- Els eixos d'esforç i de deformació en relació amb la tectònica de fractura	15
2.2.- Falles de segon ordre: hipòtesis sobre llur formació	18
2.3.- Experiment de Riedel: resultats obtinguts variant les diverses condicions	23
2.4.- Evolució de la fracturació en avançar la deformació	24
2.4.1.- Rotació de les falles en avançar la deformació	25
2.4.2.- Models de moviment de dues famílies de falles conjugades	30
2.4.3.- Formació i evolució de les zones de cisalla	32
2.4.4.- Canvi de l'eix X d'horitzontal a vertical durant una fase compressiva	36
2.5.- Alguns exemples reals de falles de direcció	37
2.5.1.- Distribució de Riedel en la cobertura produïda per una falla de sòcol	37
2.5.2.- Un exemple actual de fracturació produïda per un terratrèmol: <i>Dasht-e Bayāz (Iran)</i>	37
2.5.3.- Grans falles de direcció	42
2.5.3.1.- La falla de San Andrés (Califòrnia)	42
2.5.3.2.- La falla de la Mar Morta	43
3.- ANÀLISI ESTRUCTURAL	
3.1.- Introducció	45
3.1.1.- Hipòtesi plantejada	45
3.1.2.- Metodologia	45
3.1.2.1.- Estudi fotogeològic	45

3.1.2.2.— Treball de camp	46
3.1.2.3.— Consideracions	48
3.1.3.— <i>Tècniques d'exposició</i>	48
3.2.— Compressió	48
3.2.1.— <i>A l'escala de l'aflorament</i>	48
3.2.1.1.— Anàlisi d'estacions	48
3.2.1.1.1.— Descripcions i consideracions	49
3.2.1.1.2.— Explicacions alternatives al model evolutiu proposat	55
3.2.1.2.— Zona de fractura de Garraf	55
3.2.1.2.1.— La zona de fractura	55
3.2.1.2.2.— La fossa tectònica del Castellet . .	64
3.2.1.2.3.— Conclusions	68
3.2.1.2.4.— Consideracions i repercussions en la metodologia a utilitzar en les esta- cions	69
3.2.2.— <i>Estudi fotogeològic</i>	69
3.2.3.— <i>Consideracions generals sobre les fases compressives al Massís de Garraf</i>	70
3.3.— Distensió	74
3.4.— La falla de sòcol transversal als voltants de Capellades	80
3.5.— Implicacions a nivell regional	81
3.6.— Conclusions	84
BIBLIOGRAFIA	87
SUMMARY	93

**ACABAT D'IMPRIMIR
A ROMARGRAF, S.A.,
DE L'HOSPITALET DE LLOBREGAT,
EL DIA 1 DE JULIOL DE 1982**

