



**SOCIETAT D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES BALEARS**

Editorial
On line

Tectònica i Geologia Estructural avui

Tectònica i Geologia Estructural són dos camps dins de la geologia que tenen molts aspectes en comú i que són de difícil separació. La Geologia Estructural s'ocupa de la deformació de les roques, tant des del punt de vista dels mecanismes que la possibiliten i de les condicions en que aquesta deformació es produeix, com des de la perspectiva de les geometries resultants. La Tectònica s'ocupa de la deformació de l'escorça terrestre fins i tot de la litosfera; a més a més d'estudiar les estructures i la seva evolució en els temps, també s'ocupa dels processos que causen la deformació o que resulten d'ella. No hi ha, com es veu, una frontera clara entre Tectònica i Geologia Estructural. Potser podríem considerar que la frontera queda determinada per la mida de l'objecte estudiat, així mentre la Tectònica s'ocupa de les estructures a escala de tota una serralada o d'una placa, la Geologia Estructural estudia estructures individuals o sistemes (ex. sistema d'encavalcaments). Potser una altra frontera es pot delinear en funció de les metodologies utilitzades, i en aquest cas la Tectònica és clarament més complexa i multidisciplinària ja que necessita del suport de la Geofísica i la Geoquímica.

Ambdues disciplines varen néixer conjuntament. En els inicis, la Tectònica era potser una manera parcial o especial d'entendre la Geologia Regional (aquesta darrera s'ocupa de l'estudi de la interrelació de tots els aspectes geològics involucrats en una regió determinada). Durant aquests temps inicials la Geologia Estructural estava focalitzada en l'estructura de les serralades de muntanyes. Així el treball d'Argand (1924) que és un típic treball de Geologia Regional dels Alps, és un excel·lent exemple de Geologia Estructural on es descriuen amb detall les estructures espectaculars que constitueixen aquesta serralada. Però al mateix temps, a l'englobar un orogen sencer i qüestionar-se pels processos que l'han originat, esdevé també un treball de Tectònica clarament avantguardista en el seu temps.

Més endavant, i amb la incorporació del treball a petita escala i amb la introducció de models analògics, la Geologia Estructural ha evolucionat cap a dues branques diferents que són la deformació fràgil i la deformació dúctil. Anderson (1963) va proposar un model conceptual de falles en el que hi ha una correspondència unívoca entre la geometria del sistema de falles i la geometria de l'el·lipsoide dels esforços que les causen. Aquest model ha estat superat i ampliat en la actualitat, però ha estat la base damunt la que ha crescut la teoria de la deformació fràgil. Un altre pas decisiu fou donat pel grup de Geologia Estructural de la Universitat de Montpeller; Mattauer (1973) i els seus deixebles han posat a punt una sèrie de tècniques per a tal de deduir els esforços que han originat les estructures fràgils (falles estriades, estilolits, esquerdes de tensió) observades al camp.

Els avanços en l'estudi de la deformació dúctil han permès conèixer els principals mecanismes de formació de plecs, i han permès quantificar la deformació íntima de la roca (determinació de l'el·lipsoide de deformació) i el tipus de deformació (cisalla pura o simple) al llarg del perfil d'un plec. En molts d'aquests temes l'aportació de Ramsay (1963) ha estat decisiva.

També s'han fet progressos notables en l'estudi de sistemes d'estructures. Així, Bally *et al.* (1966) donen un impuls definitiu al coneixement de la geometria dels sistemes d'encavalcaments degut a la incorporació dels primers perfils de sísmica reflexió disparats de cara a l'exploració petrolera de les Rocalloses del Canadà. El coneixement dels sistemes d'encavalcaments ha estat decisiva en la posta a punt de les tècniques actuals de construcció de talls geològics (talls compensats, regla kink, etc.).

A partir del moment en que la tecnologia ha permès de dur a terme estudis geològics en àrees marines, la indústria petrolera, a la qual cal lligar els avanços de la Geologia Estructural en les darreres dècades, s'ha interessat progressivament en l'exploració dels marges continentals passius i d'altres zones on l'escorça terrestre està sotmesa a extensió. El treball de Gibbs (1984) representa un avanç notable en el coneixement geomètric dels sistemes de falles extensionals (normals).

Els temes actualment candents en Geologia Estructural abarquen aspectes molt diferents. D'una banda cal progressar en el coneixement dels mecanismes i de les condicions que possibiliten la deformació íntima de la roca; els avanços en aquest camp s'han de fer conjuntament amb els avanços en Petrologia i en l'estudi de la física dels materials. Un altre tema que preocupa als geòlegs estructurals és la determinació de les diferents deformacions incrementals que han donat lloc a la deformació final observada, tant a petita escala com a escala d'una estructura sencera. En determinades circumstàncies (fibres de les ombres de pressió) és possible caracteritzar les diferents situacions per les quals ha passat el cos deformat en una situació progressiva (la trajectòria de la deformació), però les metodologies per estudiar la deformació progressiva a petita escala encara són escasses. Canviant d'escala, les metodologies que permeten d'esbrinar com a crescut un anticlinal o com s'ha mogut una falla al llarg del temps tampoc són abundants. En aquest camp, la interrelació entre estructura i sedimentació (sediments sintectònics, discordances progressives, etc.) ofereix possibilitats molt interessants que encara estan en gran part per investigar; en aquesta

qüestió és meritòria i molt per davant del seu temps l'aportació d'en Riba (1973). Finalment arribem, no podia faltar, a la modelització. La qüestió es planteja en els termes de com extrapolar (especialment en fondària) les dades per a tal d'obtenir un tall geològic sencer. En el millor dels casos disposarem de dades de superfície, de dades sísmiques i de dades de sondatjes, però fins i tot en aquestes situacions òptimes el tall tindrà zones en blanc que s'hauran d'omplir per extrapolació tot utilitzant models coneguts i ben contrastats. En aquest camp els treballs d'en Suppe (1983) inicien una línia de recerca a continuar ja que permeten d'investigar la geometria i el desplaçament de sistemes d'encavalcaments no directament observats, a partir de la geometria dels plecs superficials associats a aquests encavalcaments.

Pel seu cantó, la Tectònica va rebre un impuls espectacular al formular-se la Teoria de la Tectònica de Plaques. Aquesta teoria considera que la capa externa de la Terra està constituïda per un conjunt de plaques poc deformables i que la deformació es concentra a les vores d'aquestes plaques. La Tectònica de Plaques ha permès entendre el significat d'algunes grans estructures de la Terra (dorsals i fosses oceàniques, falles transformants, marges continentals, orògens) i constitueix un marc global de referència per tots els camps de la geologia. Actualment s'ha arribat a un bon coneixement dels desplaçaments, velocitats i trajectòries de les plaques, però queda tot un camp obert de cara al futur en relació a les causes que originen el desplaçament de les plaques; fins ara només s'han suggerit algunes possibilitats lligades a l'energia gravitatòria (Chapple i Tullis, 1977) i a la rotació de la Terra (Doglioni, 1990)

Actualment s'està fent un esforç notable en intentar entendre els mecanismes que han originat les conques sedimentàries, aquest esforç és justificat perquè les conques tenen una gran transcendència econòmica i també científica. Així mentre els geòlegs estructurals purs estudien l'estructura de les conques, els tectònics intenten esbrinar les diferents causes de la subsidència de les conques i quantificar la contribució de cada una d'aquestes causes a la subsidència total observada en una conca determinada. A títol d'exemple podem mencionar que algunes conques poden ser degudes a processos extensionals que estiren i aprimen la litosfera, mentres d'altres poden estar originades per la flexió de la litosfera sota el pes d'una serralada de muntanyes adjacent. En la formació d'una conca en particular hi poden participar alhora les dues causes mencionades i encara d'altres. El coneixement de l'evolució de la subsidència amb el temps i la seva relació amb l'estructura és important, per exemple, de cara a avaluar el potencial en hidrocarburs (gas i petroli) de la conca.

Lligat també amb aquestes qüestions de subsidència o aixecament hi ha un altre tema que també és de molta actualitat. Fa referència a l'alçada màxima que poden assolir les muntanyes de la Terra; d'una banda les roques del nucli de la serralada tenen una resistència concreta, més enllà de la qual es deformen i no poden aguantar el pes de les muntanyes que tenen al damunt, d'altra banda i parlant en termes més globals, el conjunt de l'escorça engruixada que forma la serralada ha d'estar en equilibri isostàtic al damunt del mantell, la qüestió és determinar el tipus d'isostàsia que opera en cada cas. És aplicable la isostàsia local? ¿o bé part del pes està equilibrat per la flexió de la litosfera a escala regional? La resposta a aquestes qüestions passa per la comprensió, no ja només de l'estructura de la serralada en conjunt, sinó per la

comprensió de la física de tota l'àrea en la que està inclosa la serralada. En aquest entorn queden encara moltes qüestions per resoldre, l'objectiu és entendre com i perquè s'han format les serralades.

Al llarg de la història geològica determinats orògens s'han col.lapsat perquè no han pogut aguantar el pes de les serralades que han originat. En algunes ocasions s'han format sistemes de falles extensionals de poc cabussament; la mecànica d'aquests sistemes i les condicions que possibiliten o impedeixen la seva existència no són encara ben conegudes.

Els temes de Tectònica que hem mencionat només poden avançar amb l'ajut imprescindible de la Geofísica. Totes aquestes línies de recerca estan rebent avui en dia una atenció molt especial i s'està fent un esforç considerable en tots els països d'Europa i Nortamerica per disparar perfils de sísmica de reflexió profunda i de refracció de gran angle que permetin conèixer l'estructura a través d'orògens o de continents sencers fins a la base de l'escorça, penetrant en determinades condicions fins a la part alta del mantell (Allmendiger *et al.* 1987; Choukroune *et al.* 1989).

També hi ha un camp molt ampli de cara al futur en l'exploració dels planetes interns del sistema solar. Darrerament les sondes espacials estan recollint una gran quantitat de dades que permeten estudiar el resultat dels processos tectònics en planetes que tenen una configuració diferent de la Terra (Bruegge i Head, 1991). Això obre unes perspectives molt importants ja que al partir de condicions diferents de les de la Terra es pot estudiar i aïllar mecanismes i processos que a la Terra queden enmascarats.

Altres aspectes de la Tectònica estan més lligats amb la Geoquímica. Són els que fan referència al tipus de roques ígnees i metamòrfiques originades en un tipus de procés determinat. La correlació entre tipus de roques i procés tectònic és un tema ja antic, però dia a dia surten noves possibilitats d'anàlítica que augmenten les possibilitats d'investigació. És un tema difícil i molt petrològic en el qual queden moltes incògnites per respondre.

Referències.

- Allmendiguer, R *et al.* 1987. Overview of the COCORP 40° N transect, Western United States: The fabric of an orogenic belt. *Geol.Soc.Am.Bull.* 98: 308-319.
- Anderson, E. 1963. *The dynamics of faulting*. Edimburg i Londres, Olivier and Boyd.
- Argand, E. 1924. *La tectonique de l'Asie*. Comp. Rend. III Cong. Int. Geol. Liège, Imprimerie Vailant-Carmagne.
- Bally, A., Gordy, P. i Stewart, G. 1966. Structure, seismic data and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains. *Cand.Petrol.Geol.Bull.*,14: 337-381.
- Bruegge, R. i Head, J. 1991. Processes of formation and evolution of mountain belts on Venus. *Geology*, 19: 885-888.
- Chapple, W. i Tullis, T. 1977. Evaluation of forces that drive the plates. *Jour. Geophys. Res.*, 82 (14): 1969-1984.

- Choudroune, P. and Ecors team 1989. The ECORS Pyrenean deep seismic profile. *Tectonics*, 8 (1): 23-29.
- Doglioni, C. 1990: The global tectonic pattern. *Jour. of Geodynamics*, 12 (1): 21-38.
- Gsbbs, A. 1984: Structural Evolution of Extensional Basin Margins. *Jour. Geol. Soc.* London 141, 609-620.
- Mattauer, M. 1973: *Les deformations des materiaux de l'ecorce terrestre*. Paris, Herman.
- Ramsay, J. 1963: *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill, New York.
- Riba, O. 1973: Las discordancias sintectónicas del Alto Cardener. *Acta Geol. Hisp.*, 8 (3): 90-99.
- Suppe, J. 1983: Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Am. Jour. Sc.*, 283: 684-721.

Tectonics and Structural Geology Nowadays

Tectonics and Structural Geology are two fields within Geology which share many aspects and are of difficult separation. Structural geology deals with rock deformation, both from the viewpoints of mechanisms which make it possible and conditions under which this deformation is produced, and from the perspective of the resultant geometries. Tectonics deals with the earth crust deformation including the lithosphere; besides studying the structures and their evolution in time, it is also concerned with the processes which cause, or result from, this deformation. There is, therefore, no clear limit between Tectonics and Structural Geology. We might consider that the frontier is determined by the size of the study object; thus, while Tectonics considers the structures at a scale of an entire orogenic belt, Structural Geology studies the individual structures or systems (e.g. thrust system). Perhaps another frontier may be the methodology employed, and in that case Tectonics is clearly more complex and multidisciplinary since it needs the support of Geophysics and Geochemistry.

Both disciplines were born simultaneously. At the beginning, Tectonics was perhaps a partial or special way to understand the Regional Geology (which studies the interactions of all geological aspects involved in a given region). During these initial times, Structural Geology was focused on the structure of the mountain ranges. So, the work by Argand (1924), which is a typical study of Regional Geology of the Alps, is an excellent example of the Structural Geology in which the spectacular structures that constitute that orogenic belt are described in detail. But, at the same time, while comprising a whole orogen and asking about the processes which have originated it, it also becomes a Tectonics work clearly with a revolutionary style for those times.

Further on, with the incorporation of studies at a small scale and with the introduction of analogical models, Structural Geology has evolved towards two different branches which are the brittle deformation and the ductile deformation. Anderson (1963) proposed a conceptual model of faults in which there is a univocal correspondence between the geometry of fault systems and the geometry of the stress ellipsoid which causes them. Such model has currently been overpassed and broadened, but it has been the basis on which the theory of brittle deformation has developed. Another decisive step was given by the group of Structural Geology of the University of Montpellier; Mattauer (1973) and his disciples have prepared a technique to deduce the stresses which have given rise to the fragile structures (slickensided surfaces, sthilotites, tension gashes) observed in the field.

The advances in the study of ductile deformation have enabled us to know the main mechanisms of fold formation and to quantify the penetrating strain of the rock (determination of the strain) and the type of strain (pure or simple shear) along the fold profile. In many of these subjects, the contribution by Ramsay (1963) has been decisive.

Notable progresses have also been made in the study of structures. Thus Bally et al. (1966) gave a definitive impulse to the knowledge of the geometry of thrust systems due to the incorporation of the first profile of seismic reflexion made for the oil exploration of the Canadian Rocky Mountains. The knowledge of the thrust system has been decisive in the preparation of current techniques used in the construction of geological cross-sections (balanced cross-sections, kink rule, etc).

From the moment in which technology has allowed us to undertake geological studies in marine areas, the oil industry –to which the advances in Structural Geology in the last decades has to be linked– has become progressively interested in the exploration of the passive continental margins and of other zones in which the earth crust has been submitted to extension. The work by Gibbs (1984) represents a notable advance in the geometric knowledge of the extensional fault (normal fault) systems.

The current topics in Structural Geology include many different aspects. On the one hand, progress is needed in the knowledge of the mechanisms and of the conditions which make possible the penetrating strain of the rock; the advances in this field are to be made simultaneously with the advances in petrology and with the study of the physics of materials. Another subject that concerns the structural geologists is the determination of the different incremental strains which have given place to the finite strains observed, both at a small scale as well as at a scale of an entire structure. In some circumstances (pressure shadow fibres), it is possible to characterize the different situations by which the deformed body has passed in a progressive situation (the strain path of the deformation), but the methodologies used to study the progressive deformation at a small scale are still scarce. Changing the scale, the methodologies which allow us to discern how an anticlinal has grown or how a fault has moved along time are not abundant either. In this field, the relationship between structure and sedimentation (sintectonic sediments, syntectonic unconformities, etc) offer very interesting possibilities most of which are still to be investigated; in this matter, the contribution by Riba (1973) is meritorious and advanced for its time. Finally, we arrive at the modelling. The question posed is how to extrapolate (especially in depth) the data

to obtain an entire geological cross-section. In the best of cases we will have available surface data, seismic data, and core data, but even under these optimum circumstances, the section will have blank zones which will have to be filled by extrapolation and by using known and well contrasted models. In this field, the work by Suppe (1983) initiates a research line to be continued since they allow the investigation of the geometry and of the displacement of not directly observed, thrust systems starting from the geometry of the surface folds associated with such systems.

Tectonics, on the other hand, received a spectacular impulse with the on of formulating the Theory of Plate Tectonics. This theory considers that the external layer of the Earth is constituted by a set of little deformable plates and that the deformation takes place mainly at the sides of these plates. Plate tectonics has allowed us to understand the meaning of some large structures of the Earth (oceanic ridges and trenches, transform faults, continental margins, orogens) and constitutes a global framework which serves as a reference for all fields in Geology. Currently, displacements, speeds and plate trajectories have become well known; yet, an entire field remains open to the future in relation to the causes of plate displacement. So far, only some possibilities linked to gravitational energy (Chapple and Tullis, 1977) and to Earth rotation (Doglioni, 1990) have been suggested.

Nowadays, a notable effort is being made to understand the mechanisms which have given rise to the sedimentary basins. This effort is justified because the basins have a great economic and also scientific relevance. Thus whereas pure structural geologists study the structure of the basins, the students of Tectonics try to discern the different causes of basin subsidence and quantify the contribution of each of these causes to the total subsidence observed in a given basin. As an example, some basins may be due to extensional processes that pull and stretch out the lithosphere, while others may be originated by the lithosphere flexure under the weight of an adjacent mountain chain. These two causes, and even others, can participate in the formation of a given basin. The knowledge of subsidence evolution over time and its relationship with the structure is important, for instance, when evaluating the hydrocarbon potential (gas and oil) of the basin.

Linked also with these matters of subsidence or elevation there is another subject which is of current importance. It refers to the maximum height which the Earth's mountains can reach. On the one hand, the rocks of the mountain range nucleus have a concrete strength beyond which they are deformed and cannot stand the weight of the mountains above them. On the other hand, and in more global terms, the set of the thickened crust which forms the mountain range must be in isostatic equilibrium above the mantle. The point is to determine the kind of isostasis operates in each case. Is local isostasis applicable? Or is part of the weight in equilibrium because of the lithosphere flexure at a regional scale? The answer to these questions goes through the understanding not only of the whole orogenic belt structure but also of the physics of the entire area in which this belt is included. In this framework, there are still many questions to be answered. The goal is to understand how and why these orogenic belts have been formed.

Along the geologic history, some orogens have collapsed because they have not stood the weight of orogenic belts which have originated. On some occasions, low angle normal fault systems have been formed; the mechanics of these systems and the conditions which make possible or preclude their existence are not well known yet.

The subjects on Tectonics mentioned above can only advance with the essential help of Geophysics. All these research lines are today receiving very special attention, and a considerable effort is being made in all European and North American countries to make deep seismic profiles of reflexion and of great angle refraction which allow us to know the structure down to the base of the crust, by means of orogens or whole continents penetrating under some conditions down to the taller parts of the mantle (Allmendiger et al. 1987; Choukroune et al. 1989).

There is also a very wide field for the future in the exploration of the inner planets of the solar system. Spatial probes are collecting a large quantity of data which allow us to study the result of tectonic processes in planets which have a configuration different from that of the Earth (Bruegge & Head, 1991). This opens some very important perspectives since starting from different conditions to those of the Earth, it is possible to study and to isolate mechanisms and processes which remain masked in the Earth.

Other aspects of Tectonics are more linked to Geochemistry. They are those referred to the types of igneous and metamorphic rocks which have originated from a given kind of process. The correlation between types of rocks and tectonic process is an already old subject, but every day new analytic are coming out which increase all means research possibilities. It is a difficult and very petrologic al topic in which there are still many questions to be answered.

Francesc Sàbat

Dept. de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia
Facultat de Geologia
Universitat de Barcelona