

Estructures d'encavalcament en els materials del sòcol hercinià del massís de la Tosa d'Alp (Pirineu oriental)

F. DOMINGO,⁽¹⁾ J. A. MUÑOZ⁽²⁾ i P. SANTANACH⁽¹⁾

(1) Dept. de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia. Facultat de Geologia. Zona universitària de Pedralbes. 08028-Barcelona.

(2) Servei Geològic de Catalunya. Diputació, 92. 08015-Barcelona.

RESUM

Els materials hercïnians estudiats al massís de la Tosa d'Alp, al marge sud de la zona axial del Pirineu oriental, estan estructurats segons un conjunt de làmines encavalcants. Les estructures principals són els encavalcaments, els quals s'han agrupat en dos sistemes: el sistema d'encavalcaments de La Molina-Alp, d'edat alpina i el sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp que inclou encavalcaments d'edat hercïniana. L'encavalcament inferior d'aquest darrer sistema, no aflora al sector estudiat i correspondria a l'encavalcament inferior del mantell del Cadí, d'edat alpina. El tall restituit de les làmines encavalcants del massís de la Tosa d'Alp implica un escurçament mínim del 70 %.

Paraules clau: Pirineu. Encavalcament. Tall compensat. Alpi. Hercinià.

ABSTRACT

The Tosa d'Alp massif, is located at the southern margin of the eastern Pyrenean Axial Zone. It consists of several thrust sheets which involve Hercynian basement rocks. Thrusts are the main structures and they have been grouped in two thrust systems: La Molina-Alp thrust system of Alpine age and the Tosa d'Alp massif thrust system. This system has been developed by a piggy-back thrusting sequence and, at least, the upper thrust are of Hercynian age. The lowermost thrust of the Tosa d'Alp massif thrust system does not outcrop in the studied area. It would correspond to the floor thrust of the Cadí thrust sheet outcropping more to the E and thus an Alpine age has been assumed for it. The hangingwall of the La Molina-Alp thrust consists of Cambro-Ordovician and upper Ordovician rocks which display Hercynian cleavage and related folds. The Tosa d'Alp massif thrust system only involves Silurian, Devonian and pre-Hercynian Carboniferous. The folding structure of the Tosa d'Alp massif thrust sheets is not significative. Most of the observed folds are hangingwall folds and only some metric scale folds are related to a locally developed cleavage. A restored section across the Tosa d'Alp massif demonstrates a minimum shortening of 70 %.

Key words: Pyrenees. Thrust. Balanced cross-section. Alpine. Hercynian.

INTRODUCCIÓ

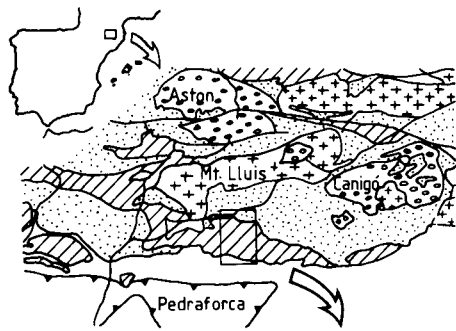
Un dels problemes més actuals referents a la tectònica pirinenca és el de l'estructura alpina dels materials del sòcol hercinià que constitueixen la denominada zona aixal. A la vora sud de la zona aixal, els materials hercïnians, en particular els suprasilurians, estan clarament involucrats en les estructures d'encavalcament alpines, com per exemple, a la zona de les Nogueres (Seguret, 1970) i a les unitats de la vall del Freser (Muñoz, 1985).

L'estructura interna de plegament d'aquestes unitats estructurals és fonamentalment hercïniana, tal com ens mostren les discordances dels terrenys este-fanians i triàsics sobre els més antics plegats. No és evident, en canvi, l'edat de l'estructura interna de fractura i en particular la dels encavalcaments.

En el present treball s'aborden els problemes esmentats en un sector del marge meridional de la zona axial, en concret, al massís de la Tosa d'Alp (fig. 1). Aquest massís forma part del mantell del Cadí.

Els materials que constitueixen les unitats estructurals estudiades tenen una edat compresa entre l'Ordovicià superior i el Carbonífer prehercinià (Domingo, 1985, 1987).

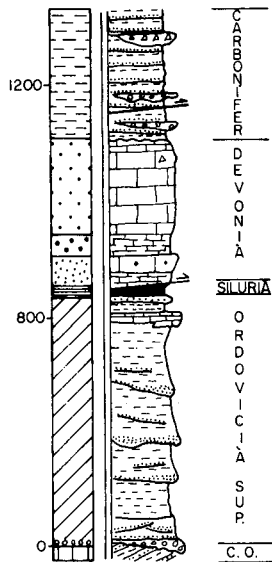
A la part septentrional del massís de la Tosa d'Alp es troba la seqüència detrítica (amb aports volcànics) de l'Ordovicià superior que reposa discordant (Santanach, 1972) sobre els materials cambro-ordovicians (fig. 1). En conjunt, aquesta seqüència és granodreixent, amb conglomerats a la base i, cap a la part superior, intercalacions de lutites, carbonats i quarsites. Al damunt es troben les lutites negres ampelítiques del Silurià.



- Post-hercinia
- Carbonifer inf., Devonian, Silurian
- Ordovician, Cambrian
- Granitoids
- Gneiss

LITOLOGIA

- NEOGEN I QUATERNARI
- MATERIALS POSTHERCINIANS



- Contacte estratigràfic
- Contacte discordant
- Falla
- Encavalcament
- Contacte de moviments en massa



Al sud, i constituint gran part del massís, s'hi reconeixen materials de la seqüència carbonàtica devonocarbonífera i de la seqüència detrítica de fácies culm del Carbonífer inferior. La seqüència carbonàtica presenta dos trams més lutítics, un localitzat a la base i l'altre enmig de la sèrie. A la part alta s'hi troben ben desenvolupades les calcàries griotte, tram que representa un bon nivell guia cartogràfic. Els trams més lutítics del Silurià, del Devonian mitjà i del Carbonífer inferior són els que han afavorit el desplaçament de les làmines encavalcants (*thrust sheets*).

Per sobre dels materials descrits es troben els materials posthercinians, que inclouen trams de l'Estefano-Permià, el Triàsic, el Cretaci superior, la sèrie garumniana i l'Eocè. Tots aquests materials del mantell del Cadí se situen, en la transversal estudiada, per sota dels mantells del Pedraforca (vegeu Vergés i Martínez, 1988).

ESTRUCTURA

L'estructura del massís de la Tosa d'Alp es caracteritza pel predomini dels encavalcaments i estructures associades. Endemés d'aquests, al vessant nord s'observen un conjunt de falles extensionals relacionades amb la formació de la fossa neògena de la Cerdanya (fig. 2).

L'edat de la major part dels encavalcaments no es pot determinar a partir de les observacions realitzades a la zona estudiada i únicament se'ls pot atribuir una edat basada en funció de correlacions amb estructures equivalents situades a d'altres sectors. Així doncs, l'anàlisi geomètrica de les estructures i la seva descripció s'ha fet sense tenir en compte la seva edat, de la qual es tractarà més endavant.

En el sector estudiat es poden diferenciar dos conjunts d'encavalcaments: un sistema d'encavalcaments imbricat (*imbricate thrust system*) de direcció NW-SE

Figura 1.- Situació i esquema geològic de l'àrea estudiada. S'inclou una columna estratigràfica representativa del conjunt de les diferents unitats estructurals.

Figure 1.- Geological sketch of the studied area. Different thrust sheets have been labelled. The simplified stratigraphic series is representative of the all thrust sheets despite the stratigraphic differences between the devono-carboniferous series.

anomenat sistema d'encavalcaments de La Molina-Alp (situat en el contacte entre els materials presilurians i els postsilurians) i un sistema d'encavalcaments que donen lloc a la superposició de diverses unitats de materials del Devonian i el Carbonífer prehercinian, anomenat sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp (figs. 1 i 2).

Les estructures es descriuran de més modernes a més antigues.

Fracturació tardana extensional

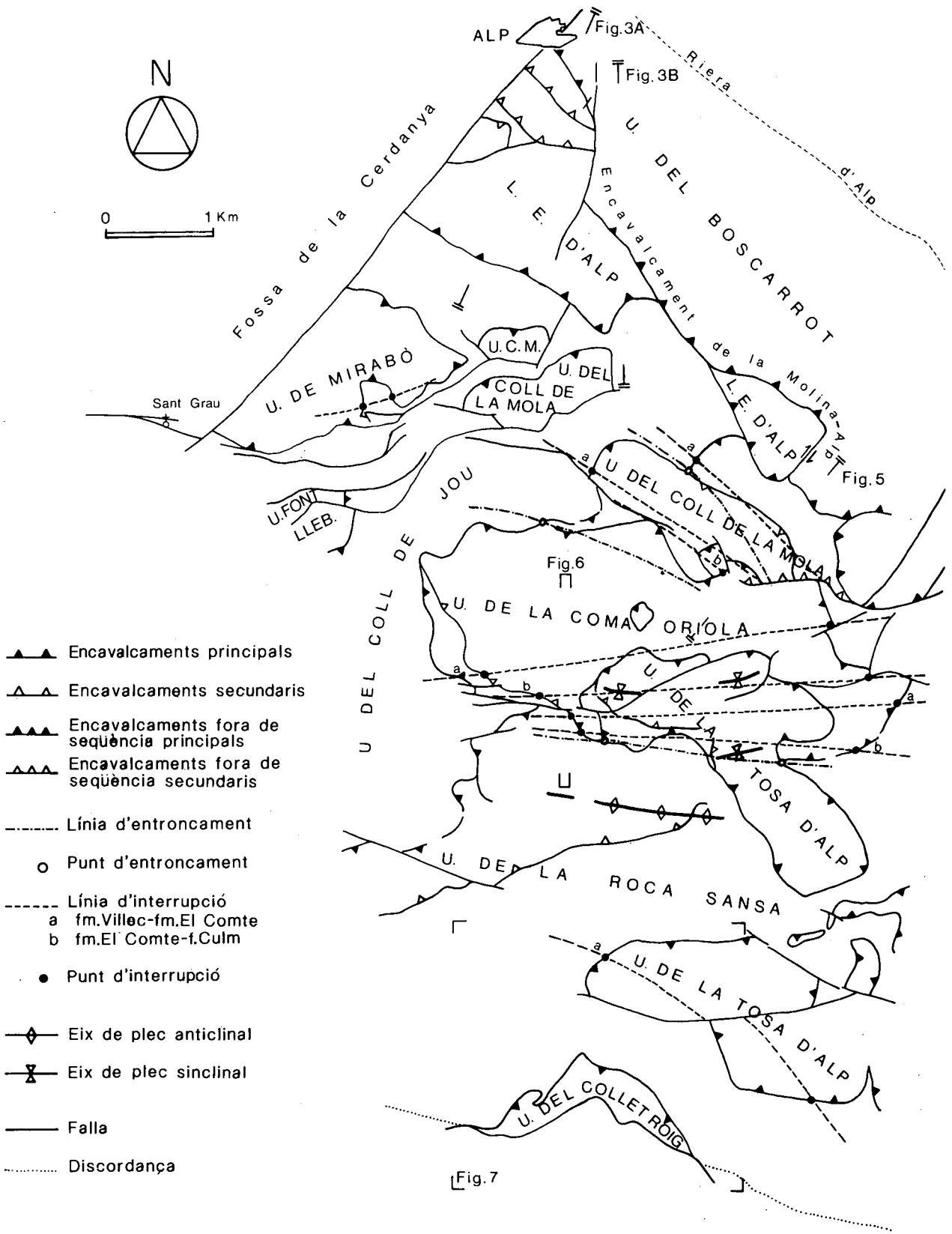
Al vessant nord de la Tosa d'Alp es localitza un seguit de falles normals, d'orientació aproximada E-W, que tallen els encavalcaments (figs. 1 i 2). La majoria tenen els plans inclinats fortament cap el N, igual que alguns encavalcaments que es troben en el mateix sector (fig. 3). Això pot conduir a confusions entre aquests dos tipus de falles allà on no es veu clar la correspondència entre un bloc i l'altre de la falla.

El salt vertical d'aquestes falles es pot avaluar, a l'extrem occidental de l'àrea cartografiada, de l'ordre del centenar de metres. Cap a l'est, les falles normals tenen un salt menor. Algunes poden haver tingut altres moviments relatius anteriors al normal (en alguns casos han pogut aprofitar plans associats al sistema d'encavalcaments de La Molina-Alp).

Les falles normals descrites presenten un paral·lisme amb la falla E-W que limita els materials neògens de la fossa de la Cerdanya a l'oest de l'ermita de St. Grau (fig. 2). A l'est d'aquesta ermita, el límit de la fossa de la Cerdanya ve donat per una falla de direcció NE-SW.

La potència de l'ordre de 700 m de sediments neògens acumulats al marge sud de la cubeta de la Cerdanya, i en concret aprop d'Alp (Pous *et al.*, 1986), dóna una idea del desplaçament vertical mínim de les fractures E-W i NE-SW que la limiten.

El conjunt de fractures E-W del sud de la fossa de la Cerdanya i les falles normals associades que afecten els materials paleozoics del massís de la Tosa d'Alp, han estat interpretades com a estructures extensives localitzades a l'acabament sudoccidental de la falla de la Tet relacionades amb el moviment dextre d'aquesta falla i amb el seu joc normal, posterior al de direcció (Roca, 1986).



- ▲▲▲ Encavalcaments principals
- ▲▲▲ Encavalcaments secundaris
- ▲▲▲ Encavalcaments fora de seqüència principals
- ▲▲▲ Encavalcaments fora de seqüència secundaris
- Línia d'entroncament
- Punt d'entroncament
- Línia d'interrupció
- a fm.Villec-fm.El Comte
- b fm.El Comte-f.Culm
- Punt d'interrupció
- ◆ Eix de plec anticlinal
- ∩ Eix de plec sinclinal
- Falla
- Discordança

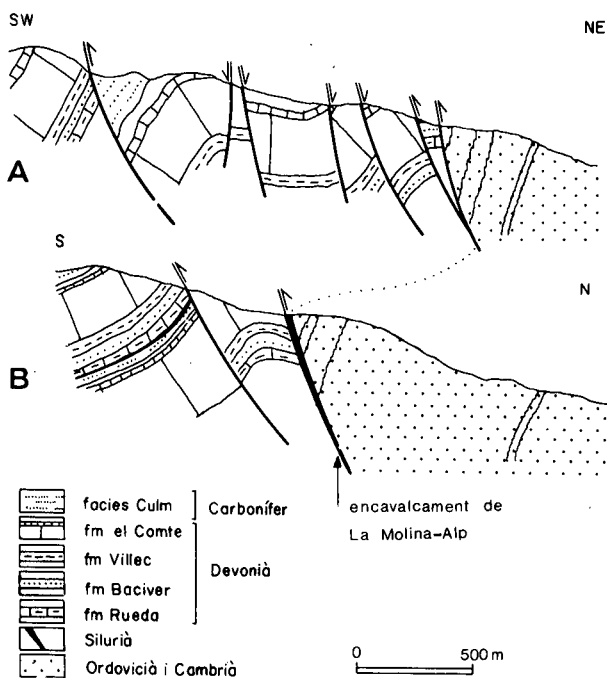


Figura 3.- Talls del sector nord del massís de la Tosa d'Alp. Noteu la coexistència de falles normals associades a la formació de la fossa de la Cerdanya, subparal·leles als encavalcaments del sistema de La Molina-Alp (vegeu figura 2 per a la seva localització).

Figure 3.- Cross sections through the northern margin of the Tosa d'Alp massif. Note the relationships between the normal faults, related to the Cerdanya basin development, subparallel to the thrusts of the La Molina-Alp thrust system (see fig. 2 for location).

Sistema d'encavalcaments imbricats de La Molina-Alp

Al NE del sector cartografiat, el límit entre els materials de l'Ordovicià superior i els del Devonian i Carbonífer prehercinian correspon a un sistema d'encavalcaments imbricats caudal (*trailing imbricate fan*) de direcció NW-SE (figs. 2, 3, 4 i 5). L'encavalcament

Figura 2.- Esquema estructural del massís de la Tosa d'Alp.

Figure 2.- Structural sketch map of the Tosa d'Alp massif. 1.- main thrusts; 2.- minor thrust; 3.- main out-of-sequence thrusts; 4.- minor out-of-sequence thrusts; 5.- branch line; 8.- cut-off point; 9.- anticline; 10.- syncline; 11.- fault; 12.- unconformity.

més important, anomenat encavalcament de La Molina-Alp, coincideix amb el contacte entre els dos grups de materials abans citat, i és assenyalat, al camp, per una alineació de materials del Silurià.

El bloc superior (*hangingwall*) de l'encavalcament de La Molina-Alp, anomenat unitat del Boscarrot, és constituït per materials del Cambro-Ordovicià i de l'Ordovicià superior. L'estructura interna d'aquests materials, d'edat herciniana per comparació amb la d'altres àrees (Hartevelt, 1970 i Santanach, 1974), està representada per un clivatge de direcció ESE-WNW associat a plects vergents al sud. En la unitat del Boscarrot pràcticament no s'observen encavalcaments secundaris, mentre que en el bloc inferior (*footwall*) de l'encavalcament de la Molina-Alp, existeixen encavalcaments associats al principal, els quals afecten els materials suprasilurians i aïllen una sèrie d'unitats anomenades làmines encavalcants d'Alp (fig. 2).

L'encavalcament de la Molina-Alp talla, en el seu bloc inferior, les unitats de materials devonians i carbonífers apilades segons el sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp i, per tant, n'és posterior. És un sistema fora de seqüència (*out-of-sequence thrust*) respecte al sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp.

L'encavalcament de la Molina-Alp (subvertical a l'extrem NW i menys inclinat en el SE de la regió estudiada) no té una traça cartogràfica rectilínia, sinó que descriu una sèrie de graons deguts a fractures de direcció N-S a NE-SW (fig. 2). Aquestes fractures, amb un moviment aparent de direcció dextre, representen rampes (*ramps*) laterals o obliqües de l'encavalcament de la Molina-Alp, ja que no afecten ni el seu bloc superior ni l'inferior, o si ho fan, el desplaçament que hi produeixen és poc important (fig. 1). La falla de direcció que limita al SE les làmines encavalcants d'Alp correspon a una rampa lateral. La direcció de desplaçament (N 45°) de la unitat del Boscarrot que se'n dedueix és congrüent amb les altres estructures transversals que serien rampes obliqües; a més a més, és aproximadament perpendicular a la traça cartogràfica de l'encavalcament de la Molina-Alp.

Aquest encavalcament correspon a la continuació occidental de l'encavalcament de Ribes-Camprodon (Muñoz *et al.*, 1983). De fet, Mengel (1911) ja menciona l'existència d'una gran falla entre Camprodon i Bellver, en la que quedarien inclosos els encavalcaments anteriors. Es desconeix la possible continuació occidental d'aquest encavalcament a l'altre costat de la fossa de la Cerdanya.

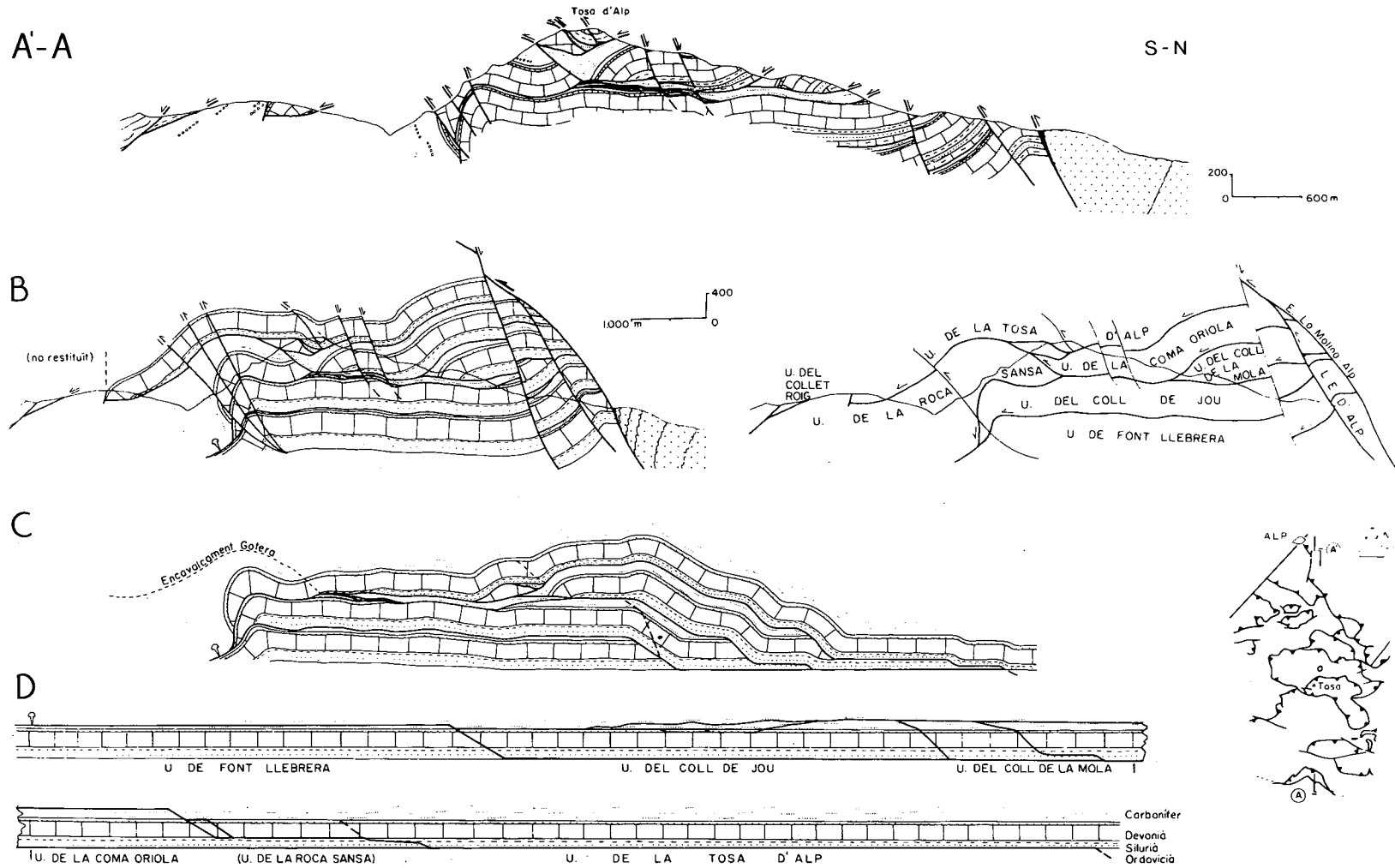


Figura 4.- Tall transversal del massís de la Tosa d'Alp. B) Tall compensat. C) Tall intermedi un cop restituits l'encavalcament fora de seqüència i l'encavalcament gotera. D) Tall restituit. (vegeu fig. 3 per a la llegenda del tall A-A').

Figure 4.- Representative cross-section through the Tosa d'Alp massif. B) Balanced cross section after the restoration of the out of sequence thrusts (La Molina-Alp thrust and the breached-roof thrust). C) Intermediate restored cross section. D) Restored cross-section. (see fig. 3 for llegend of the cross section A-A').

Sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp

El sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp ha donat lloc a la sobreposició d'unitats estructurals al sud del sistema d'encavalcaments de la Molina-Alp (Domingo, 1985). Els encavalcaments que limiten aquestes unitats estructurals mostren a grans trets una disposició subhoritzontal a la part nord del massís, mentre que al sector meridional cabussen cap al sud i fins i tot s'arriben a invertir (fig. 4). A cada unitat s'hi reconeix una sèrie devono-carbonífera gairebé completa, exceptuant-ne alguns dels termes inferiors del Devonian, i part de la sèrie detrítica del Carbonífer inferior. Les unitats queden individualitzades pels replans (*flats*) que s'instal·len, paral·lelament a l'estratificació, en el límit de les lutites negres del Silurià amb la sèrie carbonàtica del Devonian, en els trams més pelítics del Devonian i en els materials detrítics del Carbonífer, i per les rampes que interseccen els materials carbonàtics més competents del Devonian.

Es descriuran les unitats des de les estructuralment inferiors a les superiors.

Unitats estructurals

La unitat més inferior de les que afloren en el sector cartografiat, és l'anomenada unitat de Font Llebrera, que aflora en una reduïda extensió. Tant sols n'afloren unes desenes de metres de la sèrie detrítica del Carbonífer inferior i de la sèrie devoniana. El límit septentrional d'aquesta unitat, que en el mapa (fig. 2) es presenta com a una finestra tectònica, correspon a un seguit de falles normals.

La unitat del Coll de Jou és limitada a la base per l'encavalcament que s'instal·la en les calcàries del Devonian inferior i que correspon a l'encavalcament superior de la unitat de Font Llebrera. L'encavalcament superior de la Unitat de Coll de Jou se situa en els materials del Carbonífer i és paral·lel a l'estratificació observada a l'interior de la unitat (tant dels materials carbonífers com dels devonians). Aquest encavalcament no és una única superfície, sinó que es resol en diverses llenties encavalcants (*horses*) de calcàries del Devonian superior d'escala hectomètrica (figs. 4 i 6). L'encavalcament superior és subhoritzontal en el sector septentrional, mentre que al sector meridional està plegat segons un anticlinal vergent al sud (figs. 2 i 4). Al nord, la unitat del Coll de Jou es veu afectada per nombroses falles subverticals extensionals. Aquesta unitat, també es tallada pel sistema d'encavalcaments imbricat de la Molina-Alp.

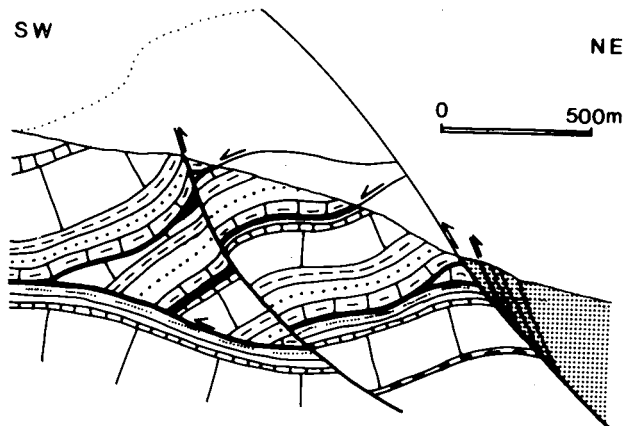


Figura 5.- Tall geològic de les làmines encavalcants de la unitat del Coll de la Mola, la unitat de Coma Oriola i la unitat del Coll de Jou. Vegeu la figura 2 per la localització i la 3 per a la llegenda.

Figure 5.- Cross-section of the Coll de la Mola thrust sheets, Coma Oriola thrust sheet and Coll de Jou thrust sheet. See figure 2 for location and 3 for the legend.

L'encavalcament superior de la unitat del Coll de Jou representa l'encavalcament inferior de quatre unitats estructurals: la unitat de Mirabò, la unitat del Coll de la Mola, la unitat de la Coma Oriola i la unitat de la Roca Sansa (figs. 2 i 6). Les relacions entre aquestes unitats es detallaran un cop descrites cadascuna d'elles per separat.

La unitat de Mirabò es troba a la part nordoccidental i és tallada per una falla NE-SW, límit sudoriental de la fossa de la Cerdanya. La seva estructura interna és constituïda per diverses llenties encavalcants de calcàries del Devonian inferior.

La unitat del Coll de la Mola consta de dues làmines encavalcants (figs. 2 i 5). El seu encavalcament superior s'entronca frontalment amb l'encavalcament superior de la unitat del Coll de Jou (fig. 4) i és tallat per un encavalcament secundari del sistema de la Molina-Alp (fig. 2), sistema que limita al nord la unitat del Coll de la Mola. Les dues làmines encavalcants, amb una sèrie devoniana pràcticament completa, estan disposades en forma de rampa de bloc superior, per sobre de la unitat del Coll de Jou (fig. 5).

La unitat de la Coma Oriola es troba a cavall de la unitat del Coll de la Mola i de la unitat del Coll de Jou. El punt triple on es posen en contacte aquestes tres unitats correspon al punt d'entroncament (*branch point*) abans citat entre els encavalcaments superiors de les unitats del Coll de Jou i del Coll de la Mola (en l'esquema estructural de la fig. 2 s'ha representat

la línia d'entroncament corresponent). Al sud, la unitat de la Coma Oriola encavalca una tercera unitat: la de la Roca Sansa. L'encavalcament superior de la unitat de la Coma Oriola és subparal·lel a l'estratificació i s'entronca amb el seu encavalcament inferior. La línia d'entroncament (*branch line*), deduïda a partir dels dos punts d'entroncament observats, representa el límit meridional de la unitat de la Coma Oriola (fig. 2). Al nord de la línia d'entroncament l'estratificació de les calcàries del Devonià superior de la unitat de la Coma Oriola descriu una rampa de bloc superior (*hangingwall ramp*) que es tradueix en un anticlinal obert per sobre de l'encavalcament inferior de la unitat (fig. 4). Les línies d'interrupció (*cut-off lines*) de la unitat de la Coma Oriola mantenen una orientació E-W paral·lela a la línia d'entroncament dels encavalcaments inferior i superior de la mateixa unitat (fig. 2).

Al sud de la unitat de la Coma Oriola i també encavalcant la unitat del Coll de Jou, es troba la unitat de la Roca Sansa. El seu encavalcament superior se situa en els materials del Carbonífer i puja estratigràficament cap al sud. Com a conseqüència d'aquesta disposició en resulta un increment aparent de la potència, en la mateixa direcció, dels materials del Carbonífer que constitueixen gran part de la unitat de Roca Sansa, i també de la seva extensió cartogràfica (figs. 1 i 4). La unitat de la Roca Sansa descriu un anticlinal de dimensions quilomètriques, el mateix que plega, almenys en part, la unitat del Coll de Jou. Aquest plec constitueix l'estructura de plegament més rellevant del massís de la Tosa d'Alp (figs. 2 i 4). Les calcàries del Devonià cabussen fortament cap el N, invertides, o fortament cap el sud, en el flanc meridional del plec, paral·leles, en superfície, a l'encavalcament inferior de la unitat de la Roca Sansa. S'ha interpretat l'acabament meridional i en profunditat de la unitat com a una rampa de bloc superior, per tal d'implicar un mínim escurçament (fig. 4).

El límit septentrional de la unitat de la Roca Sansa, que correspon a l'encavalcament inferior de la unitat de la Coma Oriola és una rampa de bloc inferior (*footwall ramp*). Les calcàries devonians es veuen interrompudes per l'encavalcament inferior de la unitat de la Coma Oriola (fig. 6). En aquest sector, al desota del cim de la Tosa d'Alp, es juxtaposen diverses estructures que donen lloc, en detall, a una certa complicació estructural (fig. 6). En efecte, en el mateix punt s'enfronten l'anticlinal de rampa de bloc superior de la unitat de la Coma Oriola i la rampa de bloc inferior de la unitat de la Roca Sansa. Ambdues rampes són lleugerament oblíquies i divergents cap a

l'oest, tal com es dedueix de la traça cartogràfica de les línies d'interrupció (fig. 2). Entre les dues rampes s'observa un sinclinal amb materials del Carbonífer que coincideix aproximadament amb la situació, immediatament a sobre, d'una llentia encavalcant de calcàries devonians, situada entre les unitats de la Coma Oriola i la Roca Sansa i a sota de la unitat de la Tosa d'Alp (figs. 4 i 6). Aquesta complicació estructural s'ha interpretat com el resultat del desenvolupament d'un encavalcament que ha tallat unitats estructurals

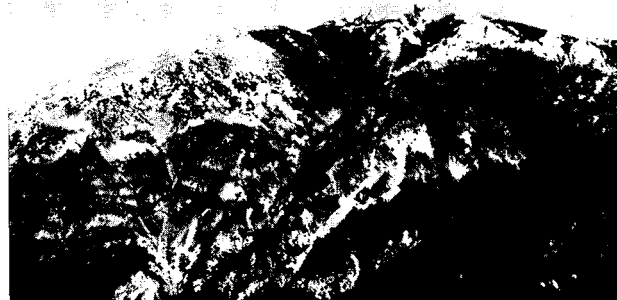
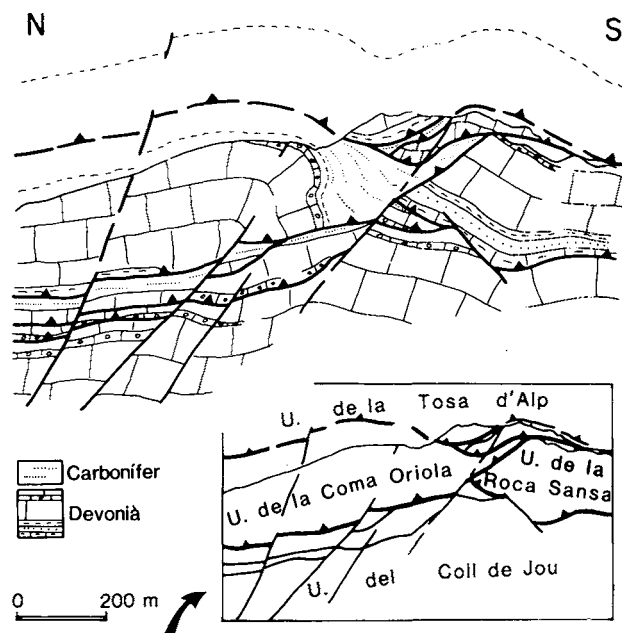


Figura 6.- Fotografia i tall esquemàtic de les unitats estructurals prop del cim de la Tosa d'Alp vist des del Coll de Jou. (vegeu fig. 2 per a la localització).

Figure 6.- Photograph and sketch cross-section showing the relationships between the Tosa d'Alp, Coma Oriola, Roca Sansa and Coll de Jou thrust sheets (view from the west, near Coll de Jou. Note a footwall ramp located in front of a hangingwall ramp. See fig. 2 for location).

superiors previament apilades. Aquest encavalcament, anomenat encavalcament gotera (*breached roof thrust*), ressegueix la part septentrional de l'encavalcament superior de la unitat del Coll de Jou i correspon a l'encavalcament superior de la unitat de la Roca Sansa (fig. 4).

La unitat de la Tosa d'Alp (de la qual Fontboté, 1949 i IGME, 1971, en diferencien la *klippe* que integra el cim de la Tosa d'Alp) consta de diverses subunitats situades a la part meridional del massís. La major part de la unitat és formada per calcàries devonianes, en pocs llocs amb una sèrie completa degut a l'erosió. L'encavalcament inferior és subparal·lel a l'estratificació de les calcàries devonianes. Prop del cim de la Tosa d'Alp aquesta unitat presenta uns sinclinals hectomètrics amb l'eix aproximadament ENE-WSW (fig. 4). El límit meridional de la *klippe* situada més al sud correspon a una rampa de bloc superior tallada posteriorment per una falla subverical. L'anticlinal de rampa afecta les calcàries del Devonià superior i els materials del Carbonífer (fig. 2 i 7).

En el sector més meridional es troba la unitat del Collet Roig (figs. 2 i 7). L'encavalcament inferior és paral·lel a l'estratificació dels materials carbonàtics devonians del bloc superior i se situa per sobre dels materials detrítics carbonífers amb continuïtat aparent amb els de la unitat de la Roca Sansa. Tot i que aquesta unitat presenta una posició estructural similar a la unitat de la Tosa d'Alp, s'ha considerat com una unitat diferent ja que gran part de la unitat del Collet Roig és constituïda per materials lutífics del Devonià mitjà, nivells estratigràfics que més al nord, a la unitat de la Tosa d'Alp, estan involucrats, conjuntament en la resta del Devonià, amb la rampa de bloc superior abans descrita. Per tal que ambdues unitats tinguessin una continuïtat estructural caldria suposar l'existència d'un sinclinal molt apretat, entre l'aflorament de les dues unitats, tallat per l'encavalcament i actualment erosionat.

Si suposem però que el Carbonífer que hi ha a sota de la unitat del Collet Roig pertany a la unitat de la Roca Sansa, caldria imaginar una línia d'entroncament, també erosionada, entre les unitats de la Tosa d'Alp i del Collet Roig perquè ambdues siguin realment unitats estructurals diferents.

La unitat del Collet Roig està interrompuda al sud, per una falla subtractiva que posa en contacte els materials triàsics amb els del Devonià, faltant-hi els de l'Estefano-Permià.

El clivatge a les unitats estructurals amb materials suprasilurians

En els nivells més lutífics del Devonià inferior i mitjà i de les fàcies culm de totes les unitats estructurals descrites, s'hi ha desenvolupat un clivatge, gairebé sempre cabussant cap el N i amb un angle aproximat de 35° amb l'estratificació. Aquest clivatge és paral·lel al pla axial d'alguns plecs mètrics a decamètrics amb vergència sud, únicament localitzats a les làmines encavalcants d'Alp i a la unitat de la Tosa d'Alp. Els eixos dels plecs presenten un ampli ventall d'orientacions. En els trams carbonàtics més competents del Devonià s'hi ha reconegut un sistema de diàclasis d'espaiat centimètric a decimètric, ben desenvolupat en l'anticlinal de la unitat de la Roca Sansa.

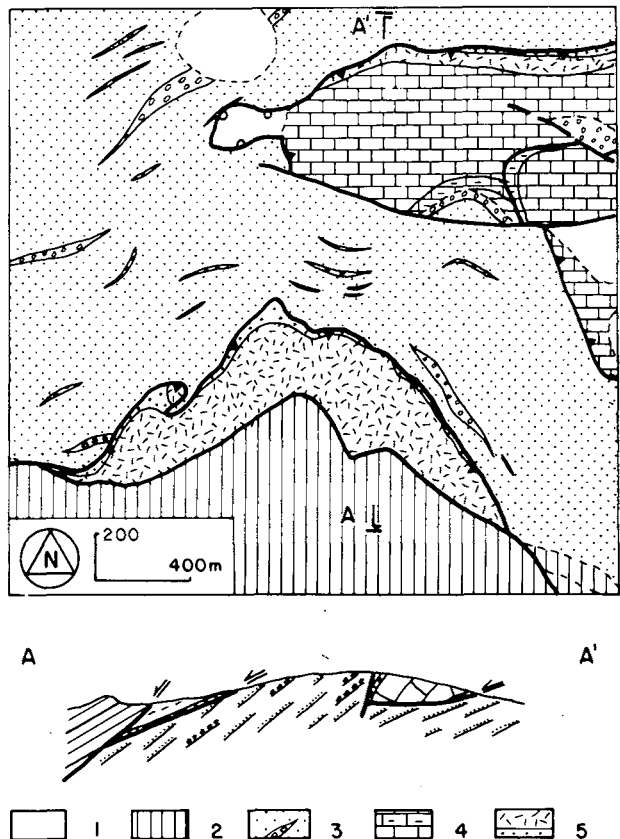


Figura 7.- Mapa geològic i tall de la unitat del Collet Roig (unitat estructural més meridional del sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp). 1.- formacions superficials, 2.- materials posthercynians, 3.- Carbonífer prehercynià, 4.- Devonià superior (formació El Comte) i 5.- Devonià inferior i mig.

Figure 7.- Geological map and cross-section of the Collet Roig thrust sheet (southernmost and uppermost thrust sheet of the Tosa d'Alp thrust system). 1.- Quaternary, 2.- posthercynian materials, 3.- prehercynian Carboniferous, 4.- Upper Devonian (El Comte formation) and 5.- Lower and Middle Devonian.

Puntualment s'observen sigmoides del clivatge prop del plans d'encavalcament. Aquest fet demostra que el clivatge no pot ser posterior als encavalcaments, no s'ha trobat cap criteri per discernir si el clivatge és anterior o sincrònic als encavalcaments. De tota manera, el clivatge és compatible amb la deformació interna de les làmines encavalcants produïda durant el desenvolupament dels encavalcaments.

La seqüència d'encavalcaments

Les relacions geomètriques entre els encavalcaments i les unitats estructurals descrites permeten deduir, en certs casos, quina ha estat la seqüència de propagació d'encavalcaments.

L'encavalcament superior de la unitat del Coll de la Mola i l'encavalcament que separa les dues subunitats de què consta aquesta unitat estan involucrats en un anticlinal de rampa per sobre de l'encavalcament superior de la unitat del Coll de Jou (fig. 5). Aquesta disposició geomètrica demostra una seqüència de bloc inferior (*piggy-back thrust sequence*).

Un dels sinformes que afecta la unitat de la Tosa d'Alp està situat entre la rampa de bloc inferior de la unitat de la Roca Sansa i la rampa de bloc superior de la unitat de la Com Oriola (fig. 4). Aquesta disposició demostra que les dues rampes i, per tant, l'encavalcament inferior de la unitat de Coma Oriola es formaren amb posterioritat a l'encavalcament inferior de la unitat de la Tosa d'Alp.

L'encavalcament gotera (fig. 4), límit superior de la unitat de Roca Sansa, tot i que pot representar un rejoc tardà d'un encavalcament desenvolupat segons una seqüència de bloc inferior situat més ensota, equival a un encavalcament fora de seqüència respecte als encavalcaments inferiors situats al sud i prèviament apilats. Així doncs, el sector septentrional de l'encavalcament superior de la unitat del Coll de Jou i la part meridional de l'encavalcament inferior de la unitat de la Tosa d'Alp han rejugat com a encavalcament fora de seqüència. Aquest fet podria explicar el plegament menys intens de la unitat de la Tosa d'Alp per sobre del plec relativament més apretat de la unitat de la Roca Sansa.

Apart de les anomalies degudes al desenvolupament de l'encavalcament gotera no s'ha observat cap altre encavalcament fora de seqüència en el sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp, i és per això, que es pot suposar que aquest sistema s'ha format segons una seqüència de bloc inferior.

Direcció i sentit de desplaçament

L'estructura interna de plegament de les unitats estructurals amb materials suprasilurians abans descrites és poc significativa respecte a l'estructura d'encavalcament. Els encavalcaments es disposen majoritàriament paral·lels a les capes, els plecs observats són de bloc superior associats a encavalcaments inferiors i els plecs sinesquistosos són d'escala mètrica. Tots aquests fets permeten considerar les relacions geomètriques entre l'estratificació i els encavalcaments per tal de deduir-ne la direcció i el sentit de desplaçament.

S'han observat tres rampes de bloc superior (límits meridionals de les unitats de la Tosa d'Alp, Coma Oriola i Coll de la Mola, vegeu fig. 4) i una rampa de bloc inferior (límit nord de la unitat de la Roca Sansa).

Les línies d'interrupció de les rampes de les unitats de la Roca Sansa i Coma Oriola (fig. 2) encara que un xic divergents cap a l'est, tenen una direcció aproximada E-W; direcció subparal·lela a la línia d'entroncament entre els encavalcaments inferiors de les unitats de la Coma Oriola i de la Tosa d'Alp.

Les línies d'interrupció de la unitat del Coll de la Mola i les línies d'entroncament entre els encavalcaments d'aquesta unitat i l'encavalcament superior de la unitat del Coll de Jou (fig. 2) mostren, en canvi, una direcció NW-SE. Totes aquestes línies descriuen una inflexió de tal manera que tendeixen a paral·lelitzar-se a la traça cartogràfica de l'encavalcament de La Molina-Alp. Aquesta disposició, juntament amb l'existència d'encavalcaments secundaris del sistema de La Molina-Alp de direcció E-W al límit SE de la unitat del Coll de la Mola, permeten suposar una rotació d'aquesta unitat durant el desplaçament de l'encavalcament de La Molina-Alp.

De tots els fets exposats es dedueix que la direcció de desplaçament del sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp és aproximadament N-S. Per tal de precisar més, i com a hipòtesi, es pot considerar que la direcció de desplaçament correspon a la perpendicular a la línia d'entroncament entre els encavalcaments inferiors de les unitats de Coma Oriola i de la Tosa d'Alp, línia que es disposa paral·lelament a l'anticlinal d'escala quilomètrica que descriuen les unitats estructurals en el sector meridional (figs. 2 i 4). És a dir una direcció de desplaçament N 01°.

Les rampes observades tallen nivells estratigràfics superiors en direcció sud, i, per tant, demostren un sentit de desplaçament de les unitats cap al sud. El clivatge de les unitats estructurals no s'oposa a la direc-

ció i sentit del desplaçament deduïts a partir dels elements cartogràfics del sistema d'encavalcaments i en cas de que fossin sincrònics, indicaria un sentit també cap al sud.

El tall compensat

A partir de l'anàlisi del sistema d'encavalcaments, s'han elaborat els talls de la figura 4, on es representa una solució en la que s'avalua un escurçament mínim per la sobreposició d'unitats estructurals. S'ha representat el tall compensat (*balanced cross-section*), el mateix tall restituint (*restored cross-section*) i un dels passos intermedis entre ambdues situacions. L'estructura interna de plegament poc intensa permet de restituir el tall amb les regles senzilles de la geometria d'encavalcaments.

En primer lloc s'han restituint l'encavalcament fora de seqüència de la Molina-Alp, del qual no s'ha pogut avaluar la seva magnitud ja que no aflora l'homòleg del bloc superior en el seu bloc inferior; i l'encavalcament gotera que afecta tardanament el sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp. A continuació s'han restituint les làmines encavalcants d'Alp junt amb les unitats estructurals del sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp.

Per tal d'obtenir un mínim escurçament s'han representat les rampes necessàries per poder restituir el tall, tot limitant al màxim l'extensió de les unitats estructurals, tant cap al sud com cap al nord.

A l'hora de restituir l'encavalcament gotera s'ha buscat l'equivalència de la rampa de bloc inferior de la unitat de la Roca Sansa al sud de la mateixa unitat, i s'ha proposat la correspondència entre aquesta rampa i la rampa de bloc superior de la unitat de la Tosa d'Alp. Després de restituir les unitats de la Coma Oriola i de la Tosa d'Alp cap al nord s'ha obtingut el tall intermedi de la figura 4. Aquest tall mostra una seqüència de bloc inferior. La seva restitució és senzilla si seguim tenint en comte que tota rampa de bloc superior n'ha de tenir una d'homòloga en el seu bloc inferior.

La unitat de Font Llebrera, s'ha considerat com a autòctona relativa. La unitat de Coll de Jou s'ha limitat al sud amb una rampa de bloc superior interpretada com a responsable del plec antiformal de la unitat de la Roca Sansa.

La restitució de la seqüència d'encavalcaments (fig. 4) mostra la posició de totes les unitats estructurals abans de la deformació. La comparació del tall compensat amb el restituint permet calcular un escurçament mínim del massís de la Tosa d'Alp d'un 70%. La unitat de la Tosa d'Alp (unitat amb major desplaçament) se situaria aproximadament a una distància mínima de 21 km al nord respecte a la situació actual.

L'EDAT DELS ENCAVALCaments

El sistema d'encavalcaments de La Molina-Alp és posterior al sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp, tal com demostren les relacions d'intersecció entre ambdós sistemes. L'encavalcament de La Molina-Alp es continua vers l'est i enllaça amb l'encavalcament de Ribes-Camprodon, d'edat clarament alpina (Muñoz *et al.*, 1983; Muñoz *et al.*, 1986).

L'edat dels encavalcaments del sistema del massís de La Tosa d'Alp és més problemàtica de determinar. Encavalcaments similars, situats a l'est del sector cartografiat, han estat interpretats com d'edat tardiherciniana, desenvolupats per gravetat durant l'abombament produït per l'emplaçament del granitoide d'Andorra-Montlluís (Hartvelt, 1970). Una edat també tardiherciniana (estefano-permiana) ha estat atribuïda als encavalcaments del massís de La Tosa d'Alp (Llac, 1979).

A l'est de la zona cartografiada, a la vall del Freser, un encavalcament subhoritzontal o amb un cabussament cap el sud, separa les làmines encavalcants amb materials infrasilurians de les que inclouen materials suprasilurians. Aquest encavalcament, anomenat encavalcament de Serra Cavallera, se situa per sobre dels terrenys del Garumnà (és per tant alpí) i representa l'encavalcament inferior del mantell del Cadí (Muñoz, 1985). L'encavalcament de Serra Cavallera és tallat entre la Vall del Freser i la zona objecte d'aquest article per l'encavalcament de Ribes-Camprodon. Al massís de la Tosa d'Alp l'encavalcament de Serra Cavallera se situaria, per tant, al bloc inferior de l'encavalcament de La Molina-Alp, per sota dels encavalcaments del sistema del massís de la Tosa d'Alp descrits.

No hi ha cap evidència que l'encavalcament inferior de la unitat del Collet Roig continui en els materials prehercinians. Així doncs, tot i que el contacte d'aquesta unitat amb els materials triàsics és per fa-

lla, el seu emplaçament seria anterior a l'Estefano-Permià. Més concluent són les observacions realitzades prop del sector cartografiat, a l'est de Gavarrós (fig. 1), on els materials Estefano-Permians se situen discordantment per sobre d'una unitat estructural equivalent a la del Collet Roig. També més enllà de l'àrea objecte del present article, (treball en curs) es troben criteris per assignar una edat herciniana (anterior als terrenys Estefano-Permians) als encavalcaments inferiors de les unitats de la Tosa d'Alp i de Roca Sansa.

Resumint, al massís de la Tosa d'Alp hom pot considerar l'existència de dos sistemes d'encavalcaments d'edat alpina: el sistema d'encavalcaments de La Molina-Alp i l'encavalcament de Serra Cavallera que en el massís de la Tosa d'Alp no aflora. Els encavalcaments de les unitats estructurals superiors que afecten materials devono-carbonífers són d'edat herciniana. Els encavalcaments inferiors del sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp, no fossilitzats pels materials Estefano-Permians i que es troben per sobre de l'encavalcament de Serra Cavallera, tenen una edat incerta, ja que poden ser alpins o hercinians, o bé poden haver funcionat durant ambdues orogènies.

CONCLUSIONS

El sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp està tallat pel sistema d'encavalcaments de La Molina-Alp (encavalcament fora de seqüència), el qual, com que enllaça amb el de Ribes-Comprodon, se li assigna una edat alpina.

El sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp s'explica segons una seqüència de bloc inferior, amb desplaçament cap el sud i un escurçament mínim del 70%.

Els materials lutítics del Carbonífer, Devonià mitjà i Silurià han facilitat el lliscament i la formació del sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp.

Les unitats estructurals superiors del sistema d'encavalcaments del massís de la Tosa d'Alp es troben fossilitzades pels materials estefano-permians, fet que permet atribuir una edat herciniana als encavalcaments d'aquestes unitats. Els encavalcaments infe-

riors tenen una edat incerta, però l'encavalcament basal, per correlació amb l'encavalcament de Serra Cavallera, ha de tenir una edat alpina.

BIBLIOGRAFIA

- DOMINGO, F., 1985: *Estructura geològica del massís de la Tosa d'Alp (Berguedà-Cerdanya)*. Tesi de Llic., Univ. de Barcelona., 123p. (Inèdit).
- DOMINGO, F., 1987: Estratigrafia dels materials prehercinians del massís de la Tosa d'Alp (Ordovicià sup. -Carbonífer inf.). *Llibre Homenatge Dr. Faura i Sans*. Serv. Geol. Catalunya (en premsa).
- FONTBOTÉ, J.M., 1949: Nuevos datos geológicos sobre la cuenca alta del Ter. *An. Inst. Est. Gerundenses.*, IV: 129-185.
- HARTEVELT, J.J.A., 1970: Geology of the upper Segre and Valira Valleys, Central Pyrenees, Andorra-Spain. *Leidse. Geol. Med.* 45: 167-236.
- IGME, 1971: Mapa geológico de España. Escala 1:50.000, 217: Puigcerdá. Madrid, Serv. Publ. Ministerio Industria, 100 p., 1 mapa pleg.
- LLAC, F., 1979: Les nappes tardi-hercyniennes entre Cerdagne et Llobregat. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XXI (4): 467-473.
- MENGEL, O., 1911: Feuille de Prades au 1:80.000 et région espagnole adjacente. *Bull. Serv. Cart. géol. Fr.*, 21 (134): 119-123.
- MUÑOZ, J.A., MARTÍNEZ, A. i VERGÉS, J., 1986: Thrust sequences in the Spanish eastern Pyrenees. *Journ. Struct. Géol.*, 8 (3/4): 399-405.
- MUÑOZ, J.A., 1985: *Estructura alpina i herciniana a la vora sud de la zona axial del Pirineu oriental*. Tesi Doctoral, Univ. de Barcelona, 305p. (Inèdit).
- MUÑOZ, J.A., SÀBAT, F. i SANTANACH, P., 1983: Cisaillements alpins et hercyniens dans le versant méridional de la zone axiale des Pyrénées entre le Freser et le Ter (Pyrénées Catalanes). *C.R. Ac. Sc. Paris*, II (296):1453-1458.
- POUS, J., JULIÀ, R. i SOLÉ SUGRAÑES, L., 1986: Cerdanya basin geometry an its implication on the Neogene evolution of the Eastern Pyrenees in E. Banda and S.M. Wickham (Editors), *The Geological Evolution of the Pyrenees. Tectonophysics*, 129: 355-365.
- ROCA, E., 1986: *Estudi geològic de la fossa de la Cerdanya*. Tesi de Llic. Univ. de Barcelona. 109 p.
- SANTANACH, P., 1972: Sobre una discordancia en el Paleozoico inferior de los Pirineos Orientales. *Act. Geol. Hisp.*, VII (5): 129-132.

SANTANACH, P., 1974: *Estudi geològic del Paleozoic inferior del Pirineu entre la Cerdanya i el riu Ter*. Tesis Doctoral. Fund. S. Vives Casajuana. Barcelona, 133 p.

SEGURET, M., 1970: *Étude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées. Caractère synsédimentaire, rôle de la compression et de la gravité*. Tesis Doctoral. Univ. de Montpellier, 210 p.

VERGÉS, J. i MARTÍNEZ, A., 1988: Corte compensado del Pirineo oriental: geometria de las cuencas de antepaís y edades de emplazamiento de los mantos de corrimiento. *Acta. Geol. Hispánica*, 23 (2): 95-105.

Rebut, gener 1987