

# Evolución de la deformación y los fluidos durante el tránsito dúctil-frágil del basamento cristalino Paleozoico de la Cadena Litoral Catalana

## *Evolution of deformation and fluids during the ductile to brittle transition of the Paleozoic crystalline basement of the Catalan Littoral Chain*

I. Cantarero<sup>1</sup>, G. Alías<sup>1</sup> y A. Travé<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpt. de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona (UB). Martí i Franqués s/n 08028 Barcelona. [i\\_cantarero@ub.edu](mailto:i_cantarero@ub.edu); [galias@ub.edu](mailto:galias@ub.edu); [atrave@ub.edu](mailto:atrave@ub.edu).

**Resumen:** El Turó de les Forques es un horst aislado de la Cadena Litoral Catalana, formado principalmente por filitas ordovícicas, caracterizado por una intensa fracturación que abarca desde el Hercínico al Neógeno. La deformación Hercínica está representada por una foliación muy penetrativa y por venas de cuarzo-clorita sinesquistosas y tardiesquistosas de carácter dúctil. La extensión Mesozoica está definida por venas y brechas cementadas por las asociaciones albita-cuarzo-clorita±titanita-rutilo y dolomita-clorita-cuarzo y marca el cambio hacia condiciones de deformación frágiles. La compresión Paleógena genera cabalgamientos y fracturas cementadas por calcita-barita. Finalmente la extensión Neógena está representada por fallas normales que generan harinas de falla y fracturas cementadas por calcita. Tanto la deformación Hercínica como la Mesozoica están relacionadas con un flujo de fluidos local ligados al metamorfismo de bajo grado. En cambio, durante las dos siguientes fases deformativas, el flujo de fluidos se da a nivel de cuenca. La localización de este bloque a lo largo de la evolución de la Cadena Costero Catalana tuvo que jugar un control principal en la formación de las fracturas y paragénesis exclusivas del Turó de les Forques.

**Palabras clave:** fallas, fluidos, transición dúctil-frágil, basamento cristalino, Cadena Costero Catalana

**Abstract:** *The Turó de les Forques is an isolated horst of the Catalan Littoral Chain, mainly formed by Ordovician phyllites, which is characterized by an intense fracturing that spans from Hercynian to Neogene. Hercynian deformation is represented by a pervasive foliation and syn-cleavage and post-cleavage quartz-chlorite veins of ductile character. The Mesozoic extension is defined by veins and breccias cemented by albite-quartz-chlorite±titanite-rutile and dolomite-chlorite-quartz associations, marking the change towards fragile deformation conditions. The Paleogene compression develops thrusts and fractures cemented by calcite and barite. Finally, the Neogene extension is represented by normal faults that generate gouges and fractures cemented by calcite. The Hercynian and Mesozoic deformation events are related to a local fluid flow associated with low-grade metamorphism. On the other hand, during the two following deformation events, fluid flow occurred at basin-scale. The location of this block during the evolution of the Catalan Coastal Ranges had to play a main control on the formation of fractures and exclusive paragenesis of the Turó de les Forques.*

**Key words:** *faults, fluids, ductile-fragile transition, crystalline basement, Catalan Coastal Ranges*

## INTRODUCCIÓN

En contextos corticales superiores o medios, y bajo condiciones de metamorfismo de grado bajo, el flujo de fluidos puede producirse de escala centimétrica a escala regional (Berwouts et al., 2008). El estudio de venas, unas de las mayores evidencias de flujo de fluidos, desde un punto de vista estructural, petrológico y geoquímico, nos da información sobre el grado de relación entre deformación, metamorfismo y flujo de fluidos (Miller y Cartwright, 2006).

La Cadena Litoral Catalana, formada por el Macizo del Garraf y el Macizo de Collserola-Montnegre, es uno de los horsts que configuran la Cadena Costero Catalanas (CCC) (Fig. 1). La CCC es el resultado de

una larga historia tectónica que abarca del Paleozoico al Neógeno. Su actual configuración en horsts y grabens delimitados por fallas normales de dirección NE-SO fue adquirida durante la extensión Neógena relacionada con la abertura del surco de Valencia. Estas fallas normales reactivaron cabalgamientos previos producidos durante la compresión Paleógena (Eoceno-Oligoceno inicial) que a su vez invirtieron fallas normales producidas durante la extensión Mesozoica (Jurásico final-Cretácico inicial). Además, las rocas cristalinas del basamento Paleozoico que constituyen la zona norte y central de la CCC han registrado estructuras deformativas Hercínicas y tardi-hercínicas que también han ejercido un control sobre las estructuras producidas durante los siguientes episodios tectónicos.

Este trabajo se centra en el estudio de la deformación y los fluidos que afectan a las filitas ordovícicas que afloran en el Turó de les Forques (Fig. 1-2). Este montículo es un horst aislado delimitado por fallas normales que ponen en contacto las filitas ordovícicas con las areniscas y conglomerados miocenos. Estos materiales también yacen de manera discordante sobre las filitas al norte de la zona de estudio.

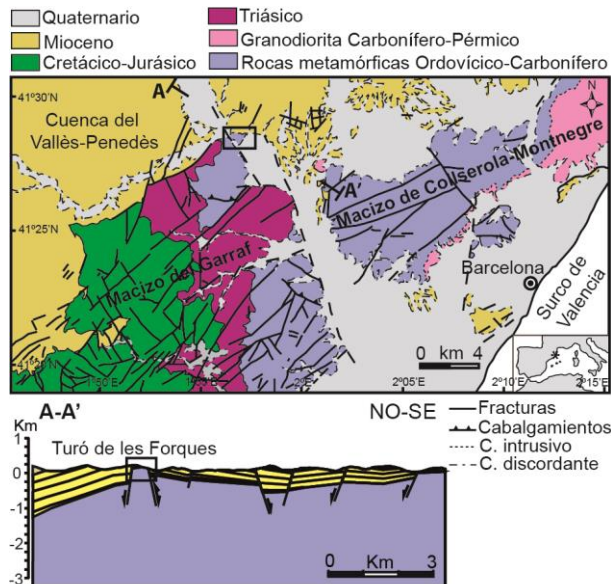


FIGURA 1. Mapa geológico de la zona central de la Cadena Litoral Catalana con la localización de la zona de estudio y corte geológico (modificado de Travé et al., 2009).

## RESULTADOS

### Observaciones de campo

Las filitas ordovícicas presentan una foliación Hercínica regional de orientación ONO-ESE y buzamiento hacia el NNE, que muestra pliegues centimétricos de tipo kink.

Estas rocas muestran dos generaciones de venas de cuarzo. La primera generación muestra pliegues sinesquistosos, apretados que tienen entre 1 y 5 cm de grosor. Estas venas se agrupan en bandas de 4 m de potencia con espaciado de orden métrico (Fig. 2). La segunda generación está representada por venas de hasta 1 m de longitud y 7 cm de grosor que son perpendiculares a la foliación. Ambas generaciones se inyectaron durante el Hercínico: la primera coetáneamente a la principal fase de deformación y el metamorfismo regional de bajo grado y la segunda durante los últimos estadios de formación de la foliación como resultado de la extensión perpendicular al plano de foliación y a los ejes de los pliegues de los cuarzos sinesquistosos.

Además, se han identificado tres fases deformativas posteriores a estas venas. La primera fase consiste en

venas de albíta de orden centimétrico y fallas normales y transtensivas. Las venas tienen una orientación N-S a NE-SO con buzamiento hacia el oeste. Tienen formas rectas y sigmoidales y se distribuyen de manera heterogénea en el afloramiento, donde se presentan diseminadas en las filitas con densidades entre 11 y 75 fracturas/metro o en bandas en-echelon (Fig. 2). Estas bandas en-echelon son tanto sencillas como conjugadas. Las fallas forman un sistema conjugado de orientación NE-SO y buzamiento entre 63 y 87° y producen dos generaciones de brechas. La segunda fase está representada por pequeños cabalgamientos de orientación NO-SE y buzamiento hacia el NE y fracturas subhorizontales de hasta 2 mm de grosor cementadas por calcita de orientación N-S. La tercera fase está representada por dos sistemas de fallas. El primero está formado por fallas normales de orientación NE-SO y buzamiento mayoritariamente hacia el NO que presentan geometrías en abanico (Fig. 2). Estas fallas generan harinas de falla de color gris de hasta 1,5 m de grosor. El segundo sistema está formado por fallas normales conjugadas de dirección NNO-SSE que han sido reactivadas posteriormente con componente direccional como indican las estrías de calcita. Este sistema corta y desplaza la discordancia entre las filitas paleozoicas y las rocas miocenas, situando su formación durante la extensión Neógena.

### Secuencia paragenética y microestructuras

El estudio petrográfico ha permitido establecer la siguiente secuencia paragenética:

1) *Cuarzo±clorita*. Es la principal asociación que forma las venas de cuarzo hercínicas. Los cristales de cuarzo son inequigranulares, hasta 7 mm de tamaño, y tienen bordes interlobulados. Presentan extinción ondulante, subgranos, lamelas de deformación y son ricos en inclusiones (Fig. 3A).

2) *Albíta-cuarzo-clorita±titanita-rutilo*. Esta paragénesis está asociada a la primera fase deformativa identificada tras los filones de cuarzo (Fig. 3B). Se desarrolla en las venas de dicha fase y cementa la primera generación de brechas (Fig. 3C). También se observa en pequeñas cizallas y fracturas de abertura que afectan a los grandes cristales de cuarzo hercínicos y en el contacto entre dichos cristales. El cuarzo está limpio de inclusiones y en las fracturas de abertura crece en continuidad óptica con los granos encajantes. La albíta forma cristales prismáticos, de 50 a 770 μm, con macla de Carlsbad y alterados a caolinita. La clorita generalmente presenta morfología vermicular.

3) *Cuarzo-dolomita-clorita*. Esta paragénesis se desarrolla en pequeñas fracturas que afectan a los cristales de cuarzo hercínicos, en puntos triples generados entre los cristales de cuarzo y en vacuolas (Fig. 3D). El cuarzo está limpio de inclusiones y crece en continuidad óptica con los granos encajantes. La

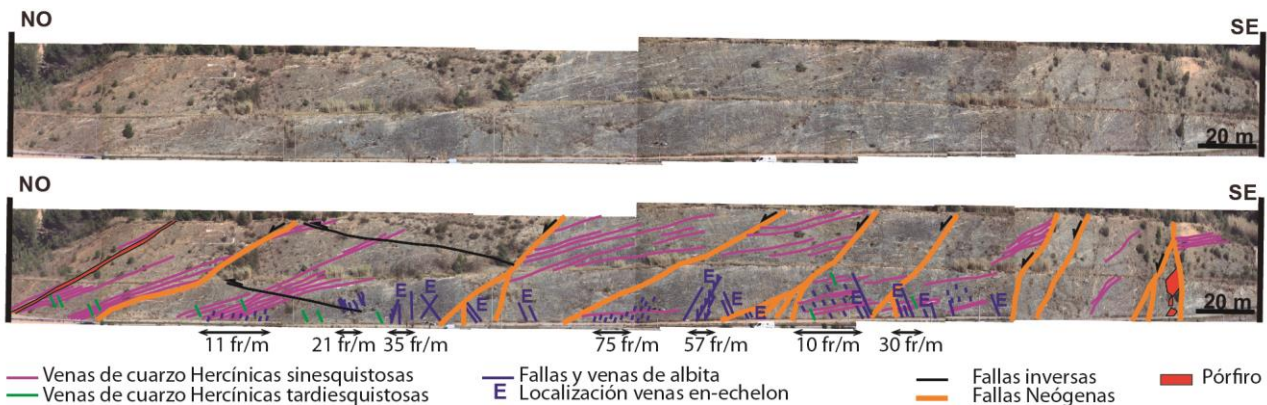


FIGURA 2. Interpretación con las diferentes estructuras identificadas en el afloramiento del Turó de les Forques.

dolomita forma rombos de tamaño entre 50 y 340  $\mu\text{m}$  y presenta una catodoluminiscencia rojo apagado. Finalmente la clorita presenta morfología vermicular y fibroso-radial.

4) *Calcita 1 ± barita*. Esta asociación se presenta en las fracturas subhorizontales de la segunda fase deformativa, en porosidades residuales y como cemento de la segunda generación de brechas (Fig. 3D-E). La calcita se caracteriza por cristales euhédricos de tipo drusy entre 40  $\mu\text{m}$  y 1 mm de tamaño y catodoluminiscencia naranja zonada. La barita forma prismas de hasta 1,5 mm de longitud y 140  $\mu\text{m}$  de grosor.

5) *Calcita 2*. Esta calcita es de edad Neógena pues cementa las últimas fallas normales de dirección NNO-SSE asociadas a esta etapa. Se caracteriza por cristales subhédricos de tipo drusy de 80 a 520  $\mu\text{m}$  de tamaño con catodoluminiscencia naranja en las fracturas de cizalla y por cristales blocky subhédricos a redondeados de 60  $\mu\text{m}$  a 1 mm de tamaño con una catodoluminiscencia zonada naranja-no luminiscente en las fracturas de abertura (Fig. 3F).

### Geoquímica

*Cementos de calcita y dolomita*. La dolomita se caracteriza por valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -6.3 y -4.9‰VPDB y de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -11.7 y -8‰VPDB. La calcita 1 presenta valores entre -9 y -6.5‰VPDB para  $\delta^{18}\text{O}$  y entre -12.7 y -9.7 para  $\delta^{13}\text{C}$  mientras que la calcita 2 tiene valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -15 y -12.2‰VPDB y de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -7.4 y -6.3‰VPDB.

*Cementos de clorita*. La clorita se divide en dos grandes grupos. Las cloritas que pertenecen a las asociaciones cuarzo ± clorita y cuarzo-albita-clorita ± titanita-rutilo se clasifican como ripidolitas mientras que las cloritas de la asociación cuarzo-dolomita-clorita se clasifican como brunsvigitas según la clasificación de Foster (1962).

### DISCUSIÓN

Las venas de cuarzo son muy frecuentes en las rocas metamórficas de grado bajo a lo largo de la CCC pues están estrechamente ligadas a la deformación y fluidos ricos en sílice producidos durante este metamorfismo. En cambio, las venas de albita (cuarzo-albita-clorita ± titanita-rutilo) y la paragénesis cuarzo-dolomita-clorita, son exclusivas de las filitas ordovícicas del Turó de les Forques. La asociación mineral cuarzo-albita-clorita ± titanita-rutilo cementa las primeras brechas producidas durante la primera fase deformativa, marcando el cambio de condiciones dúctiles a frágiles. Además, las bandas de venas en echelon cementadas por dicha paragénesis indican su formación bajo un campo de esfuerzos extensivos. Por lo tanto, esta primera fase deformativa está posiblemente ligada a la extensión Mesozoica. No obstante, esta paragénesis no ha sido observada en ninguno de los estudios sobre deformación y fluidos en rocas mesozoicas y paleozoicas de la CCC (Baqués et al., 2012; Cantarero et al., 2014). Este hecho tiene dos implicaciones: 1) La roca encajante ejerce un control importante sobre el tipo de fluidos. Las filitas ordovícicas están formadas por la paragénesis cuarzo-albita-moscovita-clorita y dentro de la secuencia metamórfica también están las calizas devónicas que podrían aportar el carbonato para el cemento de dolomita. 2) Debe existir también un control estructural diferencial del Turó de les Forques respecto a otras localizaciones de la CCC donde afloran estas filitas.

La segunda fase deformativa, debido al desarrollo de cabalgamientos y fracturas subhorizontales, se ha relacionado con la compresión Paleógena. La señal isotópica de la calcita 1, asociada a esta etapa, está más empobrecida en oxígeno y carbono que en otras zonas del macizo del Garraf (Baqués et al., 2012). El ligero empobrecimiento en oxígeno podría deberse a un aumento de las condiciones de enterramiento, y por tanto de temperatura, de las filitas respecto a los depósitos cretácicos. Por otro lado, el empobrecimiento de carbono, podría deberse a procesos de sulfato reducción, como podría indicar la asociación de esta calcita con barita. La segunda brecha cementada por esta asociación se produciría durante una segunda

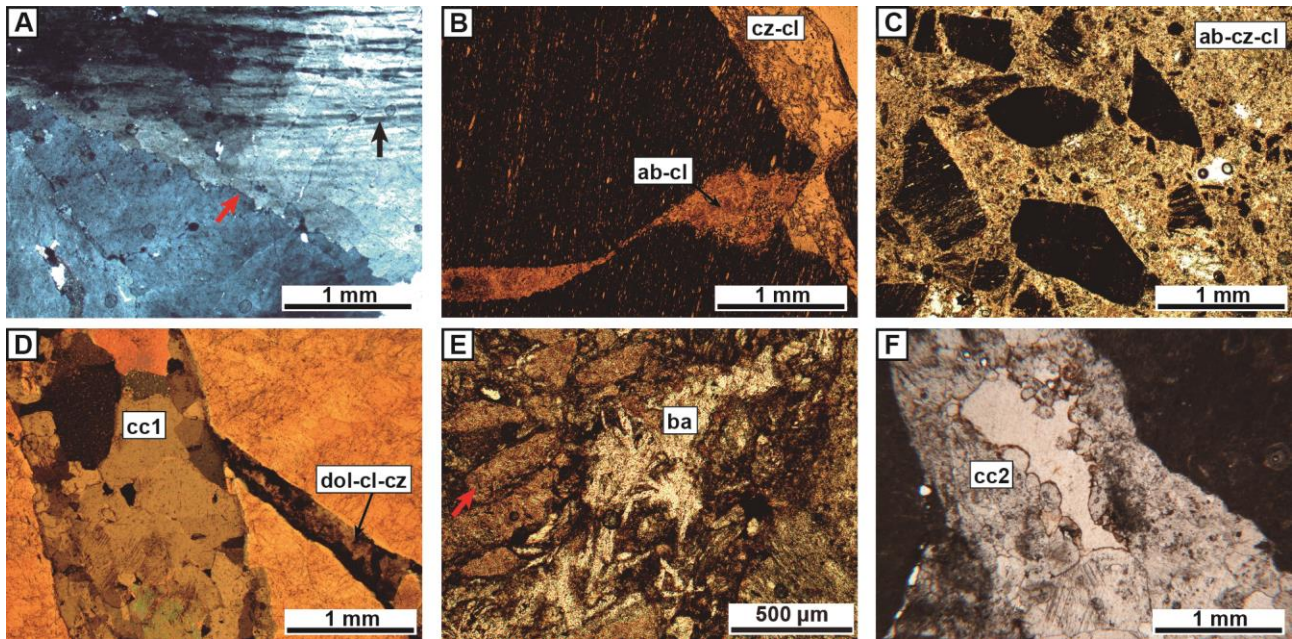


FIGURA 3. Microfotografías de las asociaciones minerales. A) Cristales de cuarzo hercínicos con subgranos, bordes interlobulados (flecha roja) y lamelas de deformación (flecha negra) (nícoles cruzados). B) Vena de cuarzo-clorita desplazada por la vena de albíta-clorita (luz paralela). C) Primera generación de brechas cementada por la asociación albíta-cuarzo-clorita (luz paralela). D) Fractura cementada por dolomita-clorita-cuarzo cortada por una fractura cementada por la calcita 1 (nícoles cruzados). E) Segunda generación de brechas con clastos formados por venas de albíta (flecha roja) y filitas cementadas por cristales prismáticos de barita (luz paralela). F) Fractura cementada por la calcita 2, caracterizada por sus cristales redondeados (luz paralela).

reactivación de la falla formada en el Mesozoico durante este episodio compresivo.

Finalmente, la calcita 2 tiene los mismos valores de oxígeno y carbono que la calcita en las fallas normales desarrolladas en las areniscas y conglomerados Burdigalienses del alrededor del Turó de les Forques (Travé et al., 2009). Éstos fueron interpretados como fluidos meteóricos que entraron en la cuenca por su margen norte durante la etapa de sin-rift.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten establecer que el flujo de fluidos durante las deformaciones Hercínica y Mesozoica tuvo lugar a escala local y estuvo claramente controlado por la roca encajante, es decir, las filitas ordovícicas. Por el contrario, en el caso de la deformación Paleógena y Neógena el flujo de fluidos se produce a escala de cuenca en un sistema hidrológico abierto establecido por la entrada de aguas meteóricas. Además, la elevada superposición de venas y fracturas en el Turó de les Forques formadas del Hercínico al Neógeno, y algunas de ellas exclusivas de esta zona, indica un importante control estructural en este pequeño bloque aislado.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está financiado por el proyecto CGL2015-66335-C2-1-R y el Grup Consolidat de Recerca Geologia Sedimentària 2014SGR-251.

## REFERENCIAS

- Baqués, V., Travé, A., Roca, E., Marín, M., Cantarero, I. (2012): Geofluid behaviour in successive extensional and compressional events: a case study from the southwestern end of the Vallès-Penedès Fault (Catalan Coastal Ranges, NE Spain). *Petroleum Geoscience*, 18: 17-31.
- Berwouts, I., Van Noorden, M., Mucchez, Ph., Boyce, A.J., Sintubin, M. (2008): Inferring intermediate-scale fluid flow in a heterogeneous metasedimentary multilayer sequence during progressive deformation: evidence from the Monts d'Arrée slate belt (Brittany, France). *Geofluids*, 8: 143-158.
- Cantarero, I., Travé, A., Alías, G., Baqués, V. (2014): Polyphasic hydrothermal and meteoric fluid regimes during the growth of a segmented fault involving crystalline and carbonate rocks (Barcelona Plain, NE Spain). *Geofluids*, 14: 20-44.
- Foster, M.D. (1962): Interpretation of the composition and a classification of the chlorites. *US Geological Survey Professional Paper*, 414-A: 1-33.
- Miller, J.A. y Cartwright, I. (2006): Albite vein formation during exhumation of high-pressure terranes: a case study from alpine Corsica. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 409-428.
- Travé, A., Roca, E., Playà, E., Parcerisa, D., Gómez-Gras, D., Martín-Martín, J.D. (2009): Migration of Mn-rich fluids through normal faults and fine-grained terrigenous sediments during early development of the Neogene Vallès-Penedès half-graben (NE Spain). *Geofluids*, 9: 303-320.