

# Localización de la deformación en la zona de falla de Valdoviño (NO Macizo Ibérico) asistida por fluidos carbonatados ricos en Fe y el crecimiento de filosilicatos

## *Strain localization in the Valdoviño fault zone (NW Iberian Massif) assisted by Fe-rich carbonated fluids and phyllosilicates growth*

F.J. Fernández<sup>1</sup> y S. Llana-Fúnez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Geología, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo 33005 Oviedo. brojos@geol.uniovi.es

**Resumen:** Las rocas de falla de la base sismogénica de la corteza Ibérica Varisca en la zona de falla de Valdoviño han sido analizadas. Esta zona de falla tiene un núcleo compuesto por rocas ultramáficas, rocas máficas con granate y metavulcanitas emparedadas entre las facies gneísicas alcalina y calco-alcalina de un granitoide sin-cinemático Varisco. Durante el principal evento, el régimen friccional-viscoso estuvo controlado por plasticidad intracrystalina del cuarzo simultáneamente a la cataclasis y fracturación de feldespatos, anfíbol y granate, junto con la serpentización de las rocas ultrabásicas. Posteriormente, la falla se reactivó a menor temperatura y con una alta actividad hidrotermal. Zonas de cizalla de bajo ángulo y espesor milimétrico y la brechificación de la anfíbolita cálcica localizaron la deformación, que estuvo controlada por el crecimiento de filosilicatos y calcita.

**Palabras clave:** rocas de falla, corteza Ibérica Varisca, resistencia mecánica, Macizo Ibérico.

**Abstract:** *Fault-related rocks at the base of the seismogenic zone of the Variscan Iberian crust have been analysed in the Valdoviño fault. Its fault zone has a core composed of ultramafic, garnet-bearing mafic rocks and metavulcanites sandwiched between the alkaline and calc-alkaline facies of a sin-kinematic Variscan granitoid. During the main tectonic event, deformation was controlled by quartz-intracrystalline plasticity coeval with cataclasis and fracturing of feldspar, amphibole and garnet, as well as by the serpentinization of ultramafic rocks. Later, the fault reactivated at lower temperature and accompanied with high hydrothermal activity. Millimetre thickness low-angle shear bands of millimetre thickness and the embrittlement of the carbonated amphibolite localized strain, which is controlled by the phyllosilicates and calcite growth.*

**Key words:** *fault-related rocks, Variscan Iberian crust, mechanical strength, Iberian Massif.*

## INTRODUCCIÓN

La localización de la deformación en zonas de cizalla se puede producir por cambios en las condiciones de deformación como son el esfuerzo, la temperatura o la velocidad de deformación, o por cambios en la roca deformada, como son la reducción del tamaño de grano, la formación de nuevas fases minerales y la circulación de fluidos. Además en la zona de transición entre los regímenes friccional y viscoso, donde la resistencia mecánica de la litosfera es máxima y se localiza la base de la zona sismogénica, las superficies discretas de fracturas co-sísmicas y asísmicas, se pueden formar coetáneamente con bandas de deformación plástica. Sin embargo, el estudio directo de rocas de falla relacionadas con la base sismogénica de la litosfera, raramente es posible.

La falla de Valdoviño (Parga-Pondal et al., 1982, Fig.1) es una falla que separa por el Norte, el Dominio del Olla de Sapo (Zona Centro Ibérica) del Dominio Esquistoso (Zona de Galicia-tras-os-Montes). Tiene un movimiento en dirección sinistro de acuerdo con la

cinemática que indica la lineación sub-horizontal N-S de estiramiento mineral y el desplazamiento relativo entre los Complejos alóctonos de Órdenes y Cabo Ortegal a lo largo de su traza. La erosión actual del basamento Varisco permite el estudio directo de las rocas de falla deformadas en el régimen de transición friccional-viscoso. El núcleo de la falla se muestreó en la ensenada de Prado, al NE de Valdoviño (A Coruña) (Díaz García 1983). El objetivo de este trabajo es conocer los cambios intrínsecos en la roca de falla durante su deformación, así como las condiciones de deformación en las que la falla fue más activa.

## ESTRUCTURA

La Falla de Valdoviño en la ensenada de Prado presenta una estructura definida por un núcleo complejo de rocas de falla bordeado a Este y Oeste por las facies alcalinas (150 m de espesor) y calco-alcalinas (300 m de espesor), respectivamente, del granitoide sin-cinemático de A Espenuca (Ortega et al., 1994; Fig. 2), que también están intensamente deformadas por la falla. Se reconocen tres tipos diferentes de rocas de falla entre las facies gneísicas del granitoide que de

Este a Oeste consisten en budines métricos de rocas ultramáficas, una banda de ~30 m de espesor de rocas máficas con granate y una banda de ~10 m de espesor de metavulcanitas.

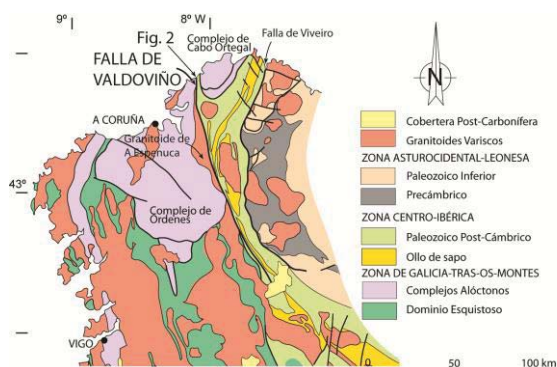


FIGURA 1. Esquema geológico del NO del Macizo Ibérico (basado en Parga-Pondal et al., 1982). La zona de estudio se localiza en la costa, donde se sitúa la Fig. 2.

### Microestructura

El neis alcalino presenta una variación composicional, feldespático hacia el núcleo de la falla y cuarcítico hacia el contacto con el parautóctono. Las fábricas tectónicas son plano-lineares. En las bandas miloníticas, los porfiroclastos fracturados de feldespato presentan extinción ondulante, son sigmoidales y tienen bordes redondeados (Fig. 2a). Las bandas ultramiloníticas están formadas por una matriz de cristales finos y equigranulares de cuarzo y por peces de mica. Las bandas miloníticas presentan cuarzoes con abundantes puntos triples y pocos defectos mecánicos, intercaladas con bandas en las que cuarzoes de bordes irregulares y estructuras parcheadas están bordeados por bandas oblicuas de bajo ángulo formadas por cristales recrystalizados. Las colas sigmoidales que bordean los porfiroclastos de feldespato K y plagioclasa están compuestas por una matriz de grano fino de cuarzo que engloba fragmentos de plagioclasa. En la transición entre ambos dominios son frecuentes los porfiroclastos de feldespatos con estructuras en dominó y formación de budines romboidales. La deformación del neis alcalino se intensifica hacia el contacto con las rocas ultramáficas, donde bandas de cizalla de bajo ángulo y espesor milimétrico se superponen a la fábrica principal y a lo largo de las cuales crecen cintas de clorita monocristalinas.

El neis calco-alcalino presenta fábricas miloníticas lineares definidas por la alternancia de bandas cuarzo-feldespáticas y bandas micáceas. Próximo al contacto con la anfibolita cálcica se forman bandas miloníticas, con porfiroclastos de feldespato fragmentados y parcialmente sericitizados que desarrollan estructuras en manto rotacionales y bandas de ultramilonitas donde también se observan superpuestas bandas de cizalla superpuestas, de bajo ángulo y espesor milimétrico. En imágenes-SEM se observa que la cinta de clorita monocristalina está crenulada y tiene un borde neto

libre de inclusiones y otro gradual que engloba cristales de feldespato, circones y cuarzoes de la matriz milonítica. Estas cizallas están cortadas por venas rellenas de calcita orientadas sub-perpendicularmente al plano de foliación. El conjunto de microestructuras está cortado por otras venas cizalladas de calcita sub-paralelas a la foliación, en las que el plano central de la vena cizalla cristales nanométricos de clorita (Fig. 2b). En ocasiones las cintas de clorita (*ribbons*) forman pliegues disruptados intrafoliares milimétricos. La crenulación se produce en relación con episodios de reactivación de la falla y es anterior a las últimas venas de calcita cizalladas.

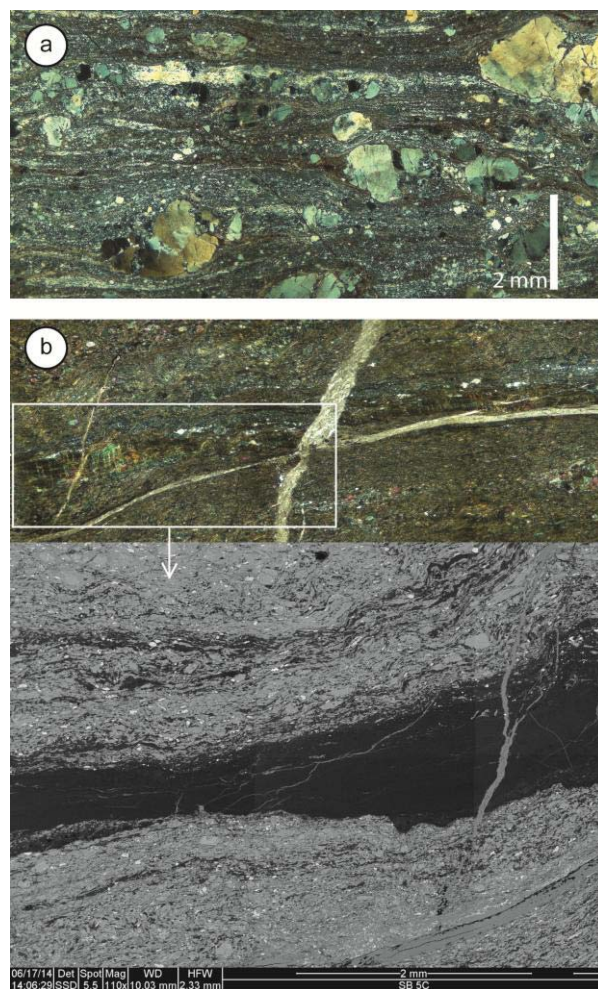


FIGURA 2. (a) Imagen OM con nicoles cruzados del gneis alcalino (muestra SB-4). Se observan porfiroclastos de feldespato con extinción ondulante y parcheada, fracturados y rodeados de una foliación milonítica. El sentido de la cizalla es sinistral. (b) Imagen OM con nicoles cruzados (parte superior) e imagen de detalle ESEM (parte inferior) del gneis calco-alcalino (muestra SB-5C). Se observa una cizalla en una banda ultramilonítica en la que crece un ribbon monocristalino de clorita. El ribbon está crenulado y fracturado posteriormente, formándose una banda rellena de calcita.

Los budines de rocas ultramáficas están serpentinizados y están bordeados por bandas filoníticas. La foliación es anastomosada, con dominios en los que la serpentina se intercala con óxidos de Fe y pentlandita ((Ni,Fe)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>). Estos dominios están

bordeados por una matriz foliada definida por la orientación de cristales de espinela (cromita) y serpentina. No se observan foliaciones relictas, ni cizallas superpuestas por lo que la serpentización parece simultánea a la formación de la fábrica milonítica en los neises.

Las rocas máficas con granate presentan una fábrica foliada heterogénea con alternancia de bandas compuestas por feldespato K+plagioclasa+cuarzo (~70-60%) y bandas compuestas por anfíboles marrones y filosilicatos (~30-40%). Los filosilicatos son básicamente mica blanca y biotita. También son frecuentes los cristales de circón, ilmenita y rutilo como accesorios. La deformación heterogénea conduce al desarrollo de bandas miloníticas y ultramiloníticas, produciendo una matriz foliada de grano fino que bordean estructuras en manto nucleadas sobre porfiroclastos de anfíbol y/o feldespato. Los porfiroclastos de anfíbol suelen estar maclados y fracturados. Los sistemas de fracturas se disponen con un alto ángulo con respecto a la foliación y las fracturas suelen estar rellenas de cuarzo. Las bandas ricas en filosilicatos contienen también porfiroclastos de granate cálcico fracturados. Las fracturas de los granates se disponen también perpendicularmente a la foliación. Las fracturas de los porfiroclastos de plagioclasa y los planos de macla ocasionalmente están sericitizadas. Superpuesta a esta fábrica se observan venas rellenas de turmalina que crece sobre cizallas paralelas a la foliación de espesor centimétrico. La turmalina tiene una composición calco-sódica (feruvita). En ocasiones las turmalinas se cizallan frágilmente por rotación sobre sus secciones basales. Como consecuencia, la forma de las turmalinas se redondea y en las fracturas precipita apatito y cuarzo.

Las anfíbolitas carbonatadas presentan anfíbol cálcico, feldespato, cuarzo y calcita como minerales principales y circón, apatito y rutilos como accesorios. Además, la clorita, ankerita, y dolomita aparecen como minerales secundarios que crecen por alteración hidrotermal con fluidos ricos en Fe. La fábrica milonítica está brechificada por un enjambre de fracturas rellenas de carbonatos que actúan como superficies de cizalla y, posteriormente, como superficies de disolución. También presentan venas rellenas de turmalina. En la fábrica milonítica se reconoce un bandeo con alternancia de niveles cuarzo-feldespáticos y anfibólicos, en los que la deformación plástica del cuarzo acomoda la deformación por fracturación de los feldespatos y anfíboles. Los anfíboles están fragmentados a lo largo de sus planos de clivaje y parcialmente cloritizados.

Para caracterizar las condiciones de deformación se han analizado las orientaciones cristalográficas preferentes (OCP) de cuarzo por microscopía SEM-EBSD. La orientación preferente de ejes-*c* de cuarzo presenta dos patrones diferentes. El más general, se

caracteriza por una guirnalda simple de simetría monoclinica centrada sobre el eje-*Y* (Fig. 3), lo que sugiere el deslizamiento de los sistemas prismáticos en la dirección <a> (p.e. Law, 1990). Además en las bandas de recristalización dinámica por rotación de sub-granos se obtienen guirnaldas simples inclinadas hacia el plano de foliación (*XY*) y la lineación mineral (*X*). Este patrón de OCP es habitual en deformación progresiva no-coaxial y se producen por el dominio de los sistemas de deslizamiento basales del cuarzo en la dirección <a> (p.e. Law, 1987). La recristalización dinámica por rotación de subgranos es característica del régimen II de Hirth y Tullis (1992), en el que la migración de dislocaciones dentro de los subgranos puede causar el desarrollo de bordes de grano de alto ángulo. Aunque los patrones obtenidos no permiten hacer estimaciones precisas de la temperatura de desarrollo de estas fábricas, el patrón OCP de cuarzo más general es similar al que Stipp et al. (2002) encuentran en condiciones naturales a temperaturas próximas a los 500° C, en la transición de los regímenes II al III de Hirth y Tullis, en los que los bordes de grano tienen una alta movilidad, mientras que los patrones OCP de las bandas recristalizadas indican temperaturas de deformación más bajas, lo que sugiere la reactivación de la falla en condiciones de la facies de los esquistos verdes. De acuerdo con el alto gradiente geotérmico del basamento Varisco, las fábricas de orientación preferente del cuarzo de más alta temperatura (~500°C) se pudieron desarrollar a profundidades ~ 8 km de profundidad. En estas condiciones la deformación progresivamente se localizó a lo largo de bandas de cizalla discretas controladas por la debilidad mecánica de los filosilicatos y una elevada presión de fluidos.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El núcleo de la falla de Valdoviño en la ensenada de Prado presenta una estructura simple. Sin embargo, la variedad de rocas de falla que contiene, la distribución heterogénea de la deformación y la superposición de estructuras discretas sobre la fábrica milonítica general desarrollada en un régimen friccional-viscoso hace muy compleja su reconstrucción tectono-metamórfica.

La composición y paragénesis de las rocas máficas con granate y ultramáficas serpentizadas que aparecen en el núcleo de la falla, indican que estas rocas deben proceder de los Complejos Alóctonos de alta P y T. Sin embargo, el aspecto corroído de los porfiroclastos de feldespato de las anfíbolitas carbonatadas sugiere un origen vulcano-sedimentario.

Las condiciones de fusión parcial del granitoide de A Espenuca (0,5 GPa y 800° C; Ortega et al., 1994), durante la tercera fase de deformación regional, es coherente con la evolución temporal del modelo de resistencia litosférica de Llana-Fúnez y Marcos (2007),

momento en el que se alcanzó el máximo gradiente geotérmico del orógeno Varisco. La fábrica tectónica principal de las rocas de falla se caracteriza por la deformación plástica del cuarzo que se desarrolla simultáneamente a la fracturación de los feldespatos y de otras fases minerales más resistentes como son los anfíboles y los granates. Por lo que definen un comportamiento reológico característico del régimen de transición friccional-viscoso.

### SB-01 (Fabrica total de ejes-c de cuarzo)

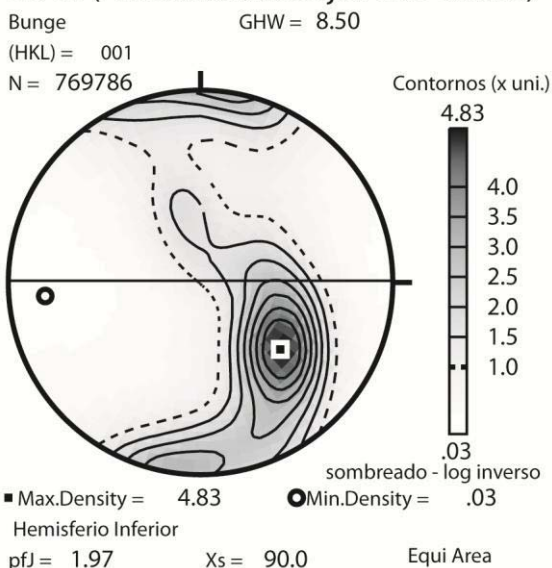


FIGURA 3. Orientación cristalográfica preferente (OCP) del dominio cuarcítico en la facies milonitizada del granitoide varisco alcalino (muestra SB-01) en secciones perpendiculares al plano de foliación (marcado como una línea horizontal) y paralelas a la lineación (El N está a la izquierda). La proyección equiareal de ejes-c de cuarzo (indexados [HKL] como 001, es ligeramente oblicua con respecto a la lineación y foliación de la fábrica utilizada como sistema de referencia externo).

La presencia de serpentinitas en la zona de falla pudo reducir la resistencia friccional de la falla de forma significativa, al igual que el incremento modal de filosilicatos tales como la clorita y sericita (p.e. Imber et al. 2001). La serpentización de las rocas ultramáficas implica una reacción de alteración hidrotermal. Al igual que ocurre con las venas de turmalinas, formadas por una reacción entre fluidos hidrotermales ricos en Fe con minerales desestabilizados ricos en Ca, tales como la plagioclasa y la horblenda (p.e. Imber et al. 2001). La formación de cintas de clorita monocristalinas sobre venas cizalladas y de las venas rellenas de calcita también sugieren el reemplazamiento de anfíbol durante su cataclisis en condiciones saturadas de acuerdo con la reacción:  $3\text{Anfíboles} + 2\text{Epidotas} + 10\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O} = 3\text{Cloritas} + 10\text{Calcitas} + 21\text{SiO}_2$  (p.e. Imber et al. 2001).

La presencia de serpentinitas, la falta de evidencias de calentamiento friccional (episodios de deshidratación de serpentinitas), el aumento modal de

los filosilicatos y la presumible elevada presión de fluidos sugieren un comportamiento “débil” de esta falla de escala cortical durante los últimos episodios tectónicos del Orógeno Varisco.

### AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada con los proyectos de investigación del plan estatal de excelencia CGL2010-14890 y CGL2014-53388-P del Ministerio de Economía y Competitividad. A Ana Crespo-Blanc y Gabriel Gutiérrez Alonso por la revisión del manuscrito.

### REFERENCIAS

- Díaz García, F. (1983): Estratigrafía y estructura del Complejo de Órdenes y de la Unidad del Olló de Sapo en el Sector Pantín-Cabo Prior (La Coruña, NW de España). *Trabajos de Geología*, 13, 129-138.
- Hirth, G. y Tullis, J. (1992): Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Journal of Structural Geology*, 14, 145-160.
- Imber, J., Holdsworth, R.E., Butler, C.A. y Strachan, R.A. (2001): A reappraisal of the Sibson-Scholz fault zone model: the nature of the frictional to viscous (“brittle-ductile”) transition along a long-lived, crustal-scale fault, Outer Hebrides, Scotland. *Tectonics* 20 (5), 601-624.
- Law, R.D. (1987): Heterogenous deformation and quartz crystallographic fabric transitions: natural examples from the Moine thrust zone at the Stack of Glencoul, northern Assynt. *Journal of Structural Geology* 9, 819-833.
- Law, R.D. (1990): Crystallographic fabrics: a selective review of their applications to research in structural geology. In: Knipe, R.J., Rutter, E.H. (Eds.), *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 54, pp. 335-352.
- Llana-Fúnez, S. y Marcos, A. (2007): Convergence in a thermally softened thick crust: Variscan intracontinental tectonics in Iberian plate rocks. *Terra Nova*, 19, 1-8.
- Ortega, L.A., Carracedo, M. Larrea, F.J. Y Gil Ibarguchi, J.I. (1994): Geoquímica del granito de dos micras de A Espenuca: origen y evolución. *Cuaderno Xeolóxico de Laxe*, 19, 319-333.
- Parga-Pondal, I., Vegas, R. y Marcos, A. (1982): Mapa Xeolóxico do Macizo Hespérico. In: *Publicacións da Área de Xeoloxía e Minería, Seminario de Estudos Galegos*, A Coruña, Spain.
- Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R. y Schmid, S.M. (2002): The eastern Tonale fault zone: a “natural laboratory” for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 °C to 700 °C. *Journal of Structural Geology* 24, 1861-1884.