

# Análisis paleopiezométrico y tasas de deformación de la zona de cizalla dúctil extensional de Santa María de la Alameda (Sistema Central)

I. Romeo<sup>1</sup>, R. Capote<sup>1</sup>, F. Martín-González<sup>2,1</sup>, M. Tsige<sup>1</sup> y B. García Izquierdo<sup>1</sup>

1 Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid. iromeobr@geo.ucm.es, capote@geo.ucm.es, meaza@geo.ucm.es, garciabe@geo.ucm.es

2 Área de Geología-ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, c/ Tulipán s/n, 28933 Móstoles. fmgonzalez@escet.urjc.es

## ABSTRACT

The differential stress that caused the extensional ductile shear of Santa M<sup>a</sup> de la Alameda during the collapse of the Variscan orogen in the Sistema Central (central Iberia) has been estimated using the dynamically recrystallized grain size of quartz. An estimate of the strain rate has been calculated by the flow laws for ductile strain of quartz knowing the deformation temperature. The stress history obtained for this shear band features 3 stages of 22-31 MPa, 34-65 MPa and 53-67 MPa. The increase of the differential stress is caused by the concentration of the strain in smaller bands during mylonitization. The first stage can be correlated to the initial deformation of a wide shear band, the second stage can be related to the formation of two main mylonitic shears, and finally the third stage correspond to the deformation of thin (<1mm) shear bands between grains in granitic synkinematic dikes. The strain rate deduced for the temperature interval of 300-350° C ranges from 10-11 s<sup>-1</sup> to 10-13 s<sup>-1</sup>. An small fault displacement can be assumed based on the low difference of the metamorphic grade, this allows us to discuss different duration for mylonitization according to different strain rates. The strain rates more successful range from 10-12 s<sup>-1</sup> to 10-13 s<sup>-1</sup> giving respectively a mylonitization period of 1,6 ma. and 16 ma. for the observed thickness of 280 m of mylonites.

**Key words:** palaeopiezometer, stress, strain rate, extensional tectonics, Variscan Orogeny.

## INTRODUCCIÓN

La banda de cizalla de Santa María de la Alameda, situada en el Sistema Central (Macizo metamórfico de El Escorial-Villa del Prado), es una estructura extensional generada tardíamente con respecto al pico metamórfico y pertenece a un conjunto de estructuras E-O buzantes hacia el sur, cuyo origen es el colapso extensional del orógeno varisco, que definen el comienzo de la etapa Malagón. La estructura más importante perteneciente a esta etapa tectónica es la Zona de cizalla de Toledo, que presenta una diferencia notable del grado metamórfico a un lado y otro de la banda milonítica, lo cual implica un salto de falla significativo. La cizalla de Santa María de la Alameda es un ejemplo de menor tamaño y aparentemente con un salto menor como parecen indicar las bajas diferencias en el grado metamórfico a un lado y otro de la estructura.

La zona de cizalla consta de dos bandas de milonitas aproximadamente paralelas con una dirección E-O con patrones anastomosados que dejan preservados lentejones sin deformación milonítica (Fig. 1). A techo de cada banda aparece una estrecha zona dominada por rocas de tipo filonita (Capote *et al.*, 2000). El estudio de la fábrica proporciona un criterio de movimiento extensional para la estructura, con todos los indicadores coherentes con un movimiento del bloque de techo

hacia el sur. Este sentido de movimiento indica una extensión cortical en la horizontal con una dirección aproximada N-S.

Estudiando los mecanismos de deformación sobre lámina delgada de los diversos tipos de milonitas se puede establecer el rango de temperaturas a las que se ha producido la milonitización. Analizando el comportamiento de los distintos minerales a cada temperatura frente a la deformación se puede caracterizar la génesis y la evolución de las fábricas miloníticas. La deformación milonítica comenzó con unas temperaturas entre los 400°C y los 350°C (facies de los esquistos verdes), dada la deformación frágil del feldespato potásico y dúctil del cuarzo (cintas de recristalización dinámica) característica de este rango de temperaturas. Posteriormente la deformación continúa hasta los 200° (grado muy bajo de metamorfismo), como demuestran los datos de cristalinidad de la illita. Martín González *et al.* (2001) han aplicado una metodología basada en la geometría fractal de los bordes de cuarzo para estimar temperaturas; este método corrobora las temperaturas obtenidas por el análisis en lámina delgada del comportamiento de las distintas fases minerales en cada roca.

En el presente estudio se han medido los tamaños de granos de recristalización dinámica del cuarzo con objeto de estimar los esfuerzos que han generado la zona de cizalla, procediendo posteriormente a un cálculo aproximado de la

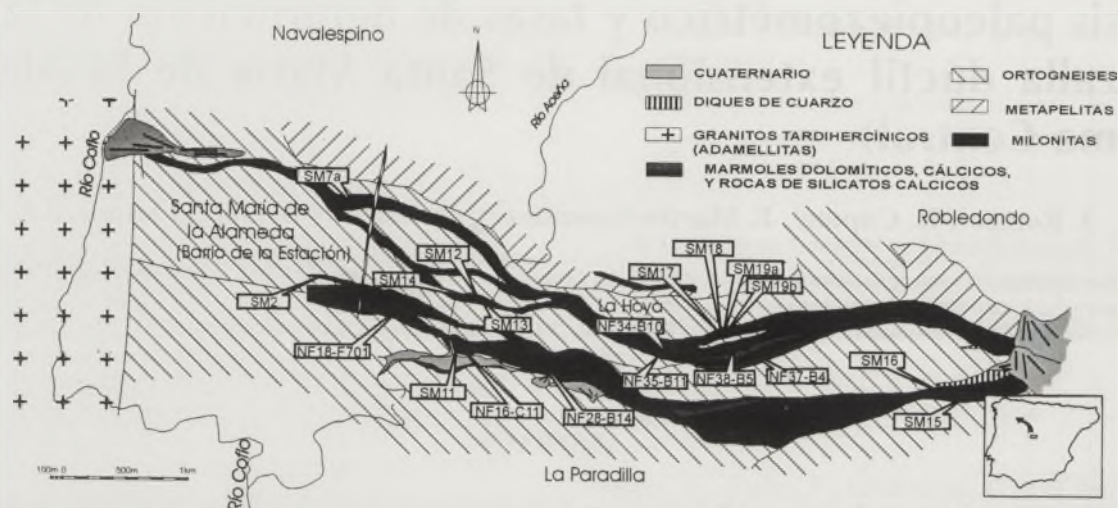


FIGURA 1. Localización de las muestras empleadas en los análisis paleopiezométricos sobre la estratigrafía geológica.

tasa de deformación (*strain rate*) a la que tuvo lugar la deformación mediante el conocimiento previo de las temperaturas de deformación.

#### PALEOPIEZÓMETROS Y TASAS DE DEFORMACIÓN

Se recogieron muestras (Fig. 1) ricas en cuarzo deformado durante la milonitización: venas de cuarzo intrafoliares, milonitas ricas en cuarzo y diques cuarzofeldespáticos intruidos sincinemáticamente. Observando en lámina del-

gada se evidenció la existencia de deformación intracristalina por *creep* de dislocaciones correspondiente a los regímenes 2 y 3 (Gleason y Tullis, 1995) (granos nuevos creciendo a favor de bordes de grano, texturas de *core-mantle*, texturas de recristalización dinámica parcial, y mosaicos de recristalización total). Se midió el tamaño medio de los granos de recristalización dinámica mediante el método de la intersección, consistente en calcular la media de tamaño de los granos interceptados por un segmento de longitud conocida multiplicando este valor por un

TABLA 1. Valores de número de granos interceptados, media geométrica del tamaño de grano ( $D$ ) en  $\mu\text{m}$ , logaritmo decimal del tamaño de grano con error estadístico y valor de asimetría de la distribución logarítmica con error estadístico, tipo de muestra (VC: vena de cuarzo, MC: milonita rica en cuarzo, M: milonita, PM: protomilonita, DS: dique sincinemático) y estado de la recristalización dinámica (RD) (RT: recristalización total, RP: recristalización parcial, BG: recristalización a favor de bandas estrechas entre granos). En SM2 se realizaron dos mediciones una paralela y otra perpendicular a la foliación de forma.

Banda N							
Muestra	Nº de granos	D( $\mu\text{m}$ )	Log(D)	Asimetría		Tipo	RD
SM7a	981	30,04	3,51	$\pm 0,03$	-0,14 $\pm 0,34$	VC	BG
SM12	1294	35,42	3,34	$\pm 0,04$	0,14 $\pm 0,28$	MC	RT
SM13	1195	43,44	3,14	$\pm 0,03$	-0,4 $\pm 0,26$	MC	RT
SM14(F1)	2149	125,17	2,08	$\pm 0,03$	-0,96 $\pm 0,19$	VC	RT
SM14(F2)	1251	56,24	2,88	$\pm 0,03$	-0,44 $\pm 0,23$	VC	RT
SM17	1773	38,78	3,25	$\pm 0,04$	0,05 $\pm 0,23$	VC	RT
SM18	2143	34,95	3,35	$\pm 0,03$	0,11 $\pm 0,22$	MC	RT
SM19a(F1)	2409	83,75	2,48	$\pm 0,03$	0,32 $\pm 0,21$	VC	RT
SM19a(F2)	2607	58,71	2,84	$\pm 0,02$	0,22 $\pm 0,24$	VC	RT
SM19b(F1)	2462	76,02	2,58	$\pm 0,03$	-0,31 $\pm 0,22$	VC	RT
SM19b(F2)	2079	45,12	3,1	$\pm 0,02$	-0,21 $\pm 0,2$	VC	RT
NF34-B10	1055	26,26	3,64	$\pm 0,04$	-1,18 $\pm 0,35$	M	RT
NF35-B11	1482	40,37	3,21	$\pm 0,04$	0,09 $\pm 0,38$	MC	RT
NF37-B4	2507	36,46	3,31	$\pm 0,03$	0,3 $\pm 0,31$	MC	RT
NF38-B5	1702	65,98	2,72	$\pm 0,04$	-0,13 $\pm 0,28$	MC	RT
Banda S							
Muestra	Nº de granos	D( $\mu\text{m}$ )	log(D)	Asimetría		Tipo	RD
SM2 (?FF)	1184	75,51	2,58	$\pm 0,04$	-0,38 $\pm 0,31$	VC	RT
SM2 (?FF)	1852	47,59	3,05	$\pm 0,03$	-0,25 $\pm 0,31$	VC	RT
SM11	1473	36,6	3,31	$\pm 0,02$	-0,11 $\pm 0,39$	PM	RP
SM15	2629	25	3,69	$\pm 0,03$	-0,31 $\pm 0,24$	DS	BG
SM16	2945	34,86	3,36	$\pm 0,03$	-0,15 $\pm 0,19$	DS	BG
NF16-C11	2083	34,82	3,36	$\pm 0,03$	-0,17 $\pm 0,34$	MC	RT
NF28-B14	971	26,71	3,62	$\pm 0,04$	-0,42 $\pm 0,37$	M	RT
NF18-F701	1931	38,5	3,26	$\pm 0,04$	-0,19 $\pm 0,34$	M	RT

TABLA 2. Esfuerzos diferenciales en MPa y errores estadísticos, según distintas calibraciones. Las muestras que presentan dos modas en el tamaño de los granos de recristalización se notaron F1 (primera familia). En Sm2 se escogió la media aritmética entre las mediciones paralela y perpendicular a la foliación de forma.

Muestra	Twiss (1977)			Mercier <i>et al.</i> (1977)			White (1979)			Etheridge y Wilkie (1981)			Ord y Christie (1984)		
SM2	36,61	+1,50	-1,50	20,44	+0,88	-0,88	44,40	+1,88	-1,88	40,62	+1,67	-1,67	42,23	+2,87	-2,87
SM7a	59,64	+1,29	-1,26	34,02	+0,77	-0,75	73,36	+1,63	-1,59	66,16	+1,43	-1,40	93,65	+3,32	-3,21
SM11	52,14	+0,78	-0,77	29,57	+0,46	-0,45	63,89	+0,98	-0,97	57,85	+0,87	-0,85	75,22	+1,85	-1,80
SM12	53,31	+1,49	-1,45	30,27	+0,88	-0,86	65,37	+1,88	-1,83	59,15	+1,65	-1,61	78,00	+3,59	-3,43
SM13	46,40	+0,86	-0,85	26,18	+0,51	-0,50	56,66	+1,09	-1,06	51,48	+0,96	-0,94	62,18	+1,90	-1,84
SM14 (F1)	22,60	+0,49	-0,48	12,35	+0,28	-0,28	27,01	+0,61	-0,59	25,07	+0,55	-0,54	19,21	+0,69	-0,67
SM14 (F2)	38,93	+0,79	-0,77	21,80	+0,46	-0,45	47,29	+0,98	-0,96	43,19	+0,87	-0,85	46,68	+1,55	-1,50
SM15	67,57	+1,50	-1,47	38,76	+0,90	-0,88	83,42	+1,91	-1,86	74,96	+1,66	-1,63	114,82	+4,19	-4,04
SM16	53,89	+1,03	-1,01	30,61	+0,61	-0,60	66,10	+1,30	-1,28	59,79	+1,14	-1,12	79,39	+2,49	-2,42
SM17	50,13	+1,24	-1,21	28,38	+0,73	-0,71	61,35	+1,56	-1,52	55,61	+1,37	-1,34	70,53	+2,86	-2,75
SM18	53,80	+0,94	-0,93	30,56	+0,56	-0,55	65,98	+1,19	-1,17	59,69	+1,04	-1,03	79,17	+2,27	-2,21
SM19a (F1)	29,70	+0,52	-0,51	16,43	+0,30	-0,30	35,79	+0,65	-0,64	32,95	+0,58	-0,57	30,01	+0,87	-0,84
SM19a (F2)	37,81	+0,64	-0,63	21,14	+0,37	-0,37	45,89	+0,80	-0,78	41,95	+0,71	-0,69	44,51	+1,23	-1,20
SM19b (F1)	31,72	+0,64	-0,62	17,60	+0,37	-0,36	38,30	+0,79	-0,78	35,19	+0,71	-0,69	33,41	+1,10	-1,07
SM19b (F2)	45,22	+0,60	-0,59	25,49	+0,35	-0,35	55,17	+0,76	-0,75	50,17	+0,67	-0,66	59,61	+1,30	-1,28
NF16-C11	53,93	+1,01	-1,00	30,63	+0,60	-0,59	66,15	+1,28	-1,26	59,83	+1,13	-1,10	79,48	+2,46	-2,38
NF28-B14	64,58	+1,70	-1,65	36,98	+1,02	-0,99	79,63	+2,16	-2,10	71,65	+1,88	-1,84	106,67	+4,62	-4,42
NF18-F701	50,37	+1,49	-1,45	28,53	+0,88	-0,86	61,66	+1,88	-1,82	55,89	+1,65	-1,61	71,10	+3,47	-3,30
NF34-B10	65,34	+1,61	-1,57	37,43	+0,96	-0,94	80,59	+2,04	-1,99	72,49	+1,78	-1,74	108,71	+4,40	-4,23
NF35-B11	48,78	+1,38	-1,34	27,58	+0,82	-0,79	59,65	+1,74	-1,69	54,12	+1,53	-1,49	67,46	+3,15	-3,01
NF37-B4	52,27	+1,05	-1,03	29,65	+0,62	-0,61	64,05	+1,32	-1,30	57,99	+1,16	-1,14	75,52	+2,49	-2,41
NF38-B5	34,92	+0,90	-0,88	19,46	+0,52	-0,51	42,29	+1,12	-1,09	38,75	+1,00	-0,97	39,10	+1,66	-1,59

coeficiente de corrección de forma (para el cual se adoptó 1,5). En la tabla 1 se presenta el tipo de muestras así como las características estadísticas de las distribuciones lognormales obtenidas para los tamaños de granos de recristalización dinámica.

El tamaño de los granos de recristalización dinámica es inversamente proporcional al valor del esfuerzo tectónico bajo el que se produjo la deformación. Para la determinación de los esfuerzos se utilizó la siguiente expresión:

$$\sigma \text{ (MPa)} = k D^{-u}$$

donde " $\sigma$ " representa los esfuerzos diferenciales en MPa, " $D$ " es el tamaño medio de los granos nuevos obtenidos por recristalización dinámica en micras, y " $k$ " y " $u$ " son dos constantes experimentales calibradas por los diversos autores (Twiss, 1977; Mercier *et al.*, 1977; White, 1979; Etheridge y Wilkie, 1981; Ord y Christie, 1984). La tabla 2 expresa los esfuerzos obtenidos mediante este método.

Para estimar la tasa de deformación ( $\epsilon$ ) empleamos la ley de flujo para creep de dislocaciones:

$$\epsilon = A \cdot \sigma^n \cdot e^{(-H/RT)}$$

donde " $\epsilon$ " la tasa de deformación en  $s^{-1}$ , " $\sigma$ " es el esfuerzo en MPa, " $T$ " la temperatura en  $^{\circ}K$ , " $A$ " es una constante pre-exponencial particular de cada material y

TABLA 3. Valores de  $A$ ,  $H$  y  $n$ , calibrados por diversos autores.

	Hansen (1982)	Jaoul <i>et al.</i> (1984)	Gleason y Tullis (1995)
$A$ ( $MPa^{-n} s^{-1}$ )	$3,16 \cdot 10^{-1}$	$5,30 \cdot 10^{-3}$	$1,80 \cdot 10^{-8}$
$H$ (kJ/mol)	174	$146 \pm 4$	$137 \pm 34$
$n$	1,9	$1,5 \pm 0,5$	$4 \pm 0,9$

mecanismo de deformación en  $MPa^{-n} s^{-1}$ , " $n$ " es el exponente del esfuerzo, para el que se tomaron valores entre 1,5 y 4,  $H$  es la entalpía de activación de los procesos de creep que controlan la deformación con unidades  $kJ mol^{-1}$ ,  $R$  es la constante de los gases ( $8,314 JK^{-1}$ ). Las constantes " $A$ " y " $n$ " así como la entalpía de activación " $H$ ", han sido calibradas por diversos autores para cuarcitas hidratadas (Hansen, 1982; Jaoul *et al.*, 1984; Gleason y Tullis, 1995) (ver tabla 3). La tabla 4 expresa las tasas de deformación calculadas sobre el paleopiezómetro de Twiss (1977).

TABLA 4. Logaritmos negativos de las tasas de deformación ( $s^{-1}$ ), para un rango de temperaturas entre  $300^{\circ}C$  ( $T_{min}$ ) y  $350^{\circ}C$  ( $T_{max}$ ), calibrados por diversos autores.

MUESTRA	Hansen (1982)		Jaoul <i>et al.</i> (1984)		Gleason y Tullis (1995)	
	T(max)	T(min)	T(max)	T(min)	T(max)	T(min)
SM2	12,12	13,39	12,17	13,24	12,98	13,98
SM7a	11,72	12,99	11,85	12,92	12,13	13,13
SM11	11,83	13,10	11,94	13,01	12,36	13,37
SM12	11,81	13,08	11,93	13,00	12,32	13,33
SM13	11,92	13,20	12,02	13,09	12,57	13,57
SM14 (F1)	12,52	13,79	12,49	13,55	13,82	14,82
SM14 (F2)	12,07	13,34	12,13	13,20	12,87	13,87
SM15	11,61	12,89	11,77	12,84	11,91	12,92
SM16	11,80	13,07	11,92	12,99	12,31	13,31
SM17	11,86	13,13	11,97	13,04	12,43	13,43
SM18	11,80	13,07	11,92	12,99	12,31	13,31
SM19a (F1)	12,29	13,56	12,31	13,38	13,34	14,34
SM19a (F2)	12,09	13,37	12,15	13,22	12,92	13,92
SM19b (F1)	12,24	13,51	12,27	13,33	13,23	14,23
SM19b (F2)	11,94	13,22	12,03	13,10	12,61	13,61
NF16-C11	11,80	13,07	11,92	12,99	12,30	13,31
NF18-F701	11,86	13,13	11,96	13,03	12,42	13,43
NF28-B14	11,65	12,92	11,80	12,87	11,99	12,99
NF34-B10	11,64	12,91	11,79	12,86	11,97	12,97
NF35-B11	11,88	13,16	11,99	13,05	12,48	13,48
NF37-B4	11,82	13,10	11,94	13,01	12,36	13,36
NF38-B5	12,16	13,43	12,20	13,27	13,06	14,06

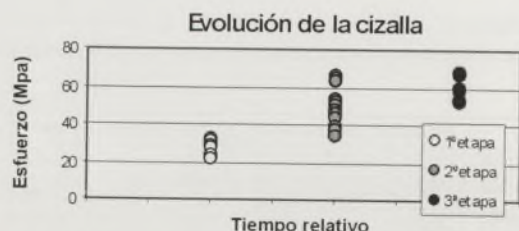


FIGURA 2. Esfuerzos diferenciales en MPa obtenidos con la calibración de Twiss (1977) para las distintas etapas descritas en la cizalla.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En la cizalla de Santa María de la Alameda se pueden distinguir tres etapas conforme se concentra la deformación (Fig. 2):

- 1ª etapa. Se desarrolla cuando el volumen de roca que se deforma es grande y los esfuerzos necesarios para el movimiento de la cizalla son bajos por estar más distribuidos. Las fábricas de recristalización dinámica del cuarzo características de esta etapa aparecen actualmente de forma relicta en las muestras SM14, SM19a, SM19b (familia 1: F1) y los esfuerzos obtenidos oscilan entre 22 y 31 MPa (según la calibración de Twiss, 1977).

- 2ª etapa. Esta etapa corresponde con el estadio principal de la cizalla, es decir el que genera la deformación observada en la mayoría de las muestras, y puede relacionarse con la focalización de la deformación a favor de las dos bandas de cizalla principales. Esta reducción del volumen de roca que se deforma da lugar a un incremento en los esfuerzos, estimados en un intervalo entre 34 y 65 MPa. La medición de los esfuerzos se ha llevado a cabo en la familia 2 (F2) de las muestras SM14, SM19a, SM19b, y en la única familia de granos desarrollada en las muestras SM12, SM13, SM17, SM18, NF34-B10, NF35-B11, NF37-B4, NF38-B5, SM11, NF16-C11, NF28-B14 y NF18-F701.

- 3ª etapa. En las muestras SM7a, SM15 y SM16 (diques sincinemáticos) se han registrado los últimos estadios de la deformación con los máximos esfuerzos (53 y 67 MPa). El aumento de los esfuerzos puede ser explicado por una reducción aun mayor del volumen de roca que se deforma, relacionado con el enfriamiento paulatino posterior al pico metamórfico. En estas muestras los granos de recristalización dinámica se restringen a bandas estrechas (<1mm) entre granos de cuarzo del protolito ígneo por lo que no podemos considerar que los esfuerzos obtenidos sean indicativos de toda la roca, sino que corresponden a dichas bandas.

Las tasas de deformación obtenidas para el rango de temperaturas entre 300 y 350°C oscilan entre  $10^{-11}$  a  $10^{-13}$  s<sup>-1</sup> siendo aproximadamente  $10^{-12.5}$  el valor medio de los datos.

Conociendo la potencia de las bandas miloníticas (280 m) podemos especular en cuanto sería el desplazamiento producido en la cizalla para las tasas de deformación medias obtenidas ( $10^{-11}$  y  $10^{-13}$  s<sup>-1</sup>) y periodos de tiempo variables. El periodo de tiempo en que ha funcionado la cizalla será siempre menor que los 34 ma. de intervalo máximo que obtenemos entre las edades del pico metamórfico y del plutón tardicinemático de las Navas del Marqués que corta la cizalla. Por otro lado hay evidencias

de que el salto de falla no es excesivo, ya que aparentemente no existe un salto en el metamorfismo, apareciendo a un lado y a otro de la cizalla facies metamórficas de alto grado.

Considerando un salto menor de 5 km, lo que implica un desplazamiento máximo en el plano de cizalla de 7,07 km (para un buzamiento medio de la cizalla de 45°), el máximo periodo que ha podido funcionar la cizalla es de aproximadamente 1,6 ma. para una tasa de deformación de  $10^{-12}$  s<sup>-1</sup>, mientras que para las tasas más lentas ( $10^{-13}$  s<sup>-1</sup>) la duración máxima de la cizalla que acomodaría dicho desplazamiento sería de 16 Ma. En caso de haberse movido a tasas más rápidas ( $10^{-11}$  s<sup>-1</sup>) serían necesarias duraciones de la deformación mucho menores (160.000 años), siendo este periodo de tiempo poco realista para generar una banda de milonitas con 270 m de potencia, por lo que se puede descartar que la Zona de Cizalla de Santa María de la Alameda se haya generado con tasas tan altas como  $10^{-11}$  s<sup>-1</sup>.

## REFERENCIAS

- Capote, R., Martín González, F., y Tsige, M. (2000): Tectónica extensional en el Sistema Central: La Zona de Cizalla Dúctil de Santa María de la Alameda (Madrid). *Geogaceta*, 28: 27-30.
- Etheridge, M.A. y Wilkie, J.C. (1981): An assessment of dynamically recrystallized grain size as a palaeopiezometer in quartz-bearing mylonite zones. *Tectonophysics*, 78: 475-508.
- Gleason, G.C. y Tullis, J. (1995): A flow law for dislocation creep of quartz aggregates determined with the molten salt cell. *Tectonophysics*, 247: 1-23.
- Hansen, F. (1982): Semibrittle creep of selected crustal rocks at 100 MPa. PhD Diss Texas A&M University, College, Station.
- Jaoul, O., Tullis, J., y Kronenberg, A.K. (1984): The effect of varying water contents on the creep behavior of Heavitree Quartzite. *Journal Geophysical Research*, B, 89 (6): 4298-4312.
- Martín González, F., Capote, R., y Tsige, M. (2001): La geometría fractal de los bordes de grano del cuarzo como geotermómetro: Aplicación a la Zona de Cizalla Dúctil Extensional de Santa María de la Alameda (Sistema Central). *Geogaceta*, 30: 83-86.
- Mercier, J.C., Anderson, D.A., y Carter, N.L. (1977): Stress in the lithosphere; inferences from steady state flow of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 115 (1-2, Stress in the Earth): 199-226.
- Ord, A. y Christie, J.M. (1984): Flow stresses from microstructures in mylonitic quartzites of the Moine thrust zone, Assynt area, Scotland.: *Journal of Structural Geology*, 6 (6): 639-654.
- Twiss, R.J. (1977): Theory and applicability of a recrystallized grain size paleopiezometer. *Pure and Applied Geophysics*, 115 (1-2): 227-244.
- White, S. (1979): Grain and sub-grain size variations across a mylonite zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70 (2): 193-202.