

**CARACTERÍSTICAS DEL ELIPSOIDE DE DEFORMACIÓN FINITA
LIGADO A LA SEGUNDA FASE HERCÍNICA EN AREAS
MESO Y CATAZONALES DEL SUR DE
LA PROVINCIA DE SALAMANCA**

M^a ANTONIA DIEZ BALDA *

RESUMEN.— Con el fin de conocer las características del elipsoide de deformación finita ligado a la segunda fase hercínica, se han estudiado muestras de conglomerados desde áreas epizonales (poco o nada deformadas durante la segunda fase) hasta áreas meso y catazonales intensamente deformadas durante la misma.

A efectos comparativos, se han calculado los caminos teóricos de la deformación que seguiría un elipsoide de partida (generado por la Fase 1) al superponerle unos elipsoides de Fase 2 con diferentes valores de k y orientación determinada por evidencias estructurales.

El camino de la deformación obtenido con los conglomerados medidos se aproxima al camino teórico calculado para un elipsoide de Fase 2 con un valor de k próximo a 1. Este resultado es coherente con una deformación por cizallamiento simple durante la segunda fase.

SUMMARY.— In order to know the characteristics (shape, k value) of the finite strain ellipsoid associated to the second hercynian phase, conglomerate samples have been studied from epizonal areas (very little or non deformed along this phase) to meso-katazonal areas highly strained along this deformation.

For comparative purposes, the theoretical strain paths, that would follow an initial strain ellipsoid (generated by the first phase) when a second deformation is superposed, have been calculated. For this superposition we consider second phase strain ellipsoids with different k values (which orientation is given by structural evidences).

The strain path shown by these conglomerates is about the same to the theoretical one for an ellipsoid of second phase with an approximate k value of 1. These results are consistent with a simple shear deformation along the second phase.

* Departamento de Geotectónica. Universidad de Salamanca.

INTRODUCCIÓN

Las rocas del Complejo esquistograuváquico y del Paleozoico que afloran en el cuadrante SE de la provincia de Salamanca, han sufrido una deformación polifásica durante la orogénesis hercínica. Las estructuras generadas durante las tres fases hercínicas principales se han descrito en trabajos anteriores (DIEZ BALDA, 1981, 1982). a y b).

La deformación debida a la segunda fase se superpuso a la que ya existía en las rocas que sufrieron la primera deformación, observándose una evolución en la fábrica y en la forma del elipsoide de deformación finita desde las áreas epizonales (poco o nada afectadas por la Fase 2) hasta las áreas meso y catazonales (muy deformadas durante la misma). Esta evolución, que va desde fábricas planilineares y elipsoides aplastados, con plano XY subvertical, (en pizarras de la epizona), a fábricas preferentemente lineares ($L > S$) y elipsoides prolatos, con plano de aplastamiento horizontal, (en conglomerados de la mesozona), se expuso esquemáticamente en DIEZ BALDA (1981).

En el trabajo citado concluíamos que la deformación ligada a la Fase 2 debía incluir un fuerte acortamiento vertical, y se apuntaba la intervención de un cizallamiento simple heterogéneo para explicar las estructuras generadas durante la segunda fase.

Con el fin de investigar el tipo de elipsoide de la segunda fase y obtener información de los mecanismos que están ligados a ella, estudiamos, en el presente trabajo, el camino de la deformación que puede deducirse de las muestras deformadas conforme aumenta la intensidad de la Fase 2, y lo comparamos con caminos de la deformación teóricos calculados al superponer al elipsoide generado por la Fase 1 elipsoides de Fase 2 de diferentes tipos y formas y orientación determinada por evidencias estructurales.

Se han utilizado muestras de conglomerados, disponibles desde zonas no afectadas por la Fase 2 hasta zonas muy deformadas por ella y en los estadios intermedios. El camino de la deformación partirá desde el elipsoide calculado para la primera fase (en localidades sin evidencias de deformación de Fase 2) y consideramos que nuestras distintas medidas representan los sucesivos pasos resultantes de la superposición de una deformación D 2, cada vez más intensa, a la D 1 preexistente.

METODOLOGIA UTILIZADA PARA CALCULAR EL ELIPSOIDE DE DEFORMACIÓN FINITA

Se ha aplicado el método descrito por RAMSAY (1967, pag. 202-209) y desarrollado por DUNNET (1969) para calcular el elipsoide de deformación finita a partir de objetos de forma inicial elipsoidal deformados homogéneamente con la matriz.

Este método se basa en el hecho de que cuando se somete a un agregado de partículas elipsoidales a una deformación finita homogénea, la forma final (relación axial) y la orientación de cada partícula, dependen de cinco variables independientes: la forma inicial de la partícula, su orientación inicial, la intensidad de la deformación, la orientación del elipsoide de deformación y el contraste de ductilidades. Si asumimos que el contraste de ductilidades es despreciable se pueden relacionar las otras cuatro variables (Eq. 5,22 y 5,27; RAMSAY 1967) y calcular el elipsoide de deformación y el estado inicial a partir del estado deformado.

Para aplicar el método se consideran secciones de la roca que coincidan con los planos principales del elipsoide de deformación finita. No es necesario que se realicen las medidas en los planos principales ya que puede calcularse el elipsoide finito a partir de medidas en un plano cualquiera (que no coincida con los principales), si se conoce la orientación de los ejes del elipsoide (RAMSAY, op. cit., 148-149). Sin embargo, el realizar las medidas en estos planos es lo más cómodo porque evita correcciones y cálculos posteriores y conlleva menos error. En los planos principales se realizan medidas de las relaciones axiales de las partículas y se proyectan en función de su orientación. Las gráficas así realizadas se conocen como diagramas R_f/Φ . En ellas cada elipse queda representada como un punto. Estudiando la nube de puntos, se obtiene información acerca del estado inicial y del elipsoide de deformación (valor de sus relaciones axiales y orientación espacial de sus ejes). Si los diagramas R_f/Φ en los planos YZ y XZ son simétricos con respecto a la traza de la esquistosidad, en esos planos, no existía orientación preferente de las partículas antes de la deformación. La nube de puntos es tanto más estrecha cuanto mayor es la deformación.

DUNNET (op. cit.) desarrolló matemáticamente el método y, al igual que RAMSAY (op. cit.) considerando nulo el contraste de ductilidades, obtuvo unas fórmulas que le permitieron dibujar unas curvas para distintos valores de la deformación finita y de la forma inicial de las partículas. Hemos comparado los diagramas R_f/Φ obtenidos en nuestro caso con las curvas de DUNNET y de esta manera hemos calculado las relaciones de los ejes del elipsoide de deformación finita y la forma inicial de las partículas (Fig. 1).

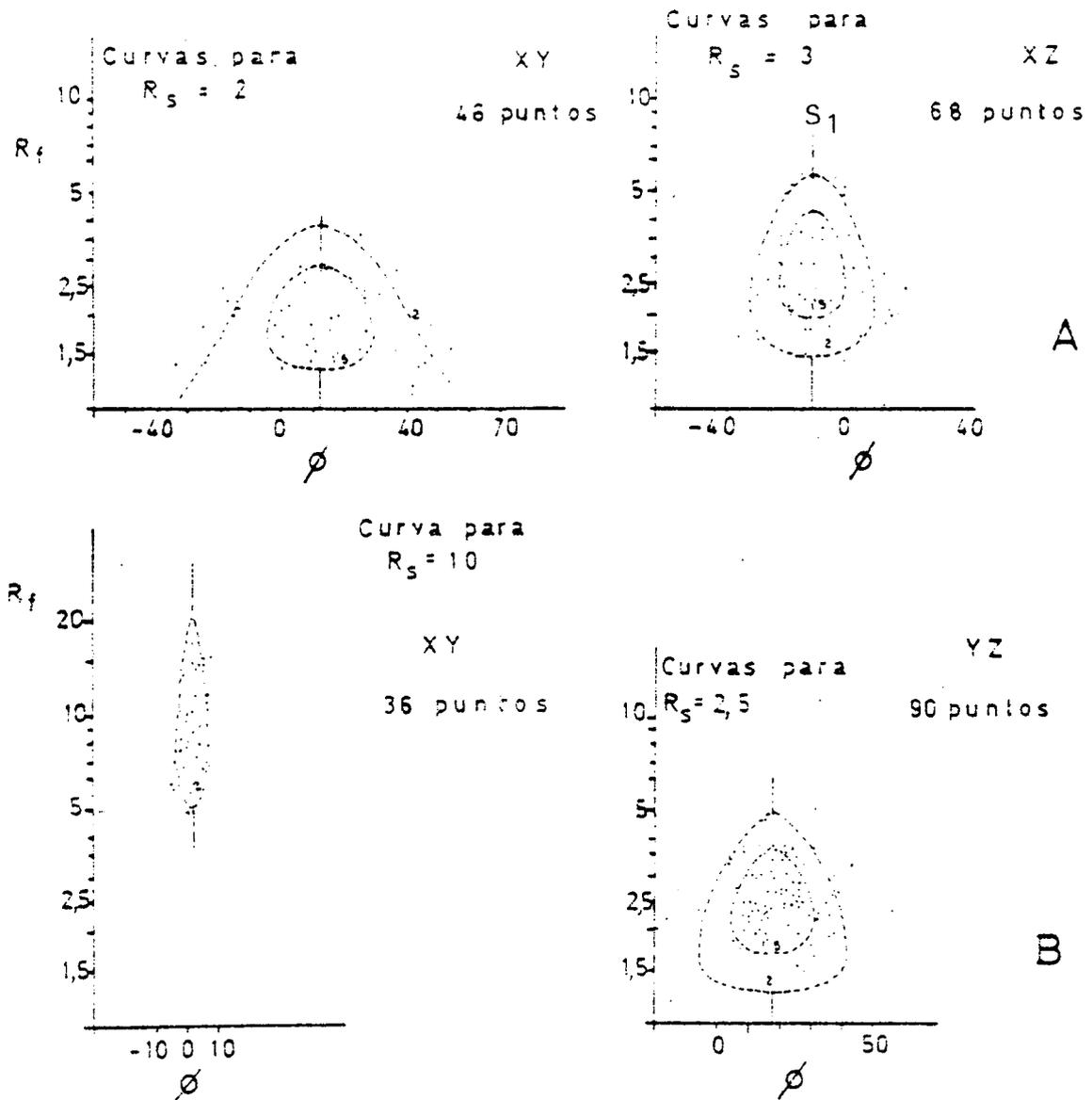


Fig. 1.- A- Diagramas R_f/ϕ para los planos XY y XZ del elipsoide de deformación finita medido en conglomerados de la Formación Monterrubio de Frades de la Sierra (FR 1 en la Fig. 2). S_1 es la traza de la esquistosidad en el plano XZ.

B.- Diagramas R_f/ϕ correspondientes a la muestra medida en conglomerados de Beleña (Be 2 de las Figs. 2 y 3). R_s es la relación entre los ejes del elipsoide de deformación en el plano medido. Se han dibujado curvas para $R_i = 1,5$ y $R_i = 2$ (números señalados sobre las curvas), R_i es la relación inicial —antes de la deformación— entre los ejes de las partículas.

Las rocas que hemos utilizado para calcular el elipsoide de deformación finita han sido conglomerados cuarcíticos y cuarzofeldespáticos de la Formación Monterrubio, pobres en matriz, (para poder despreciar el contraste de ductilidades). Cuando estas rocas tienen una fábrica preferentemente linear cortamos primeramente una sección perpendicular a la lineación de estiramiento y en ese plano (YZ) realizamos las primeras medidas para determinar la dirección de Y; una vez conocida esta dirección la cortamos en los planos XY y XZ. Si el elipsoide es prolato (con $k = \infty$, FLINN, 1962) el diagrama en el plano YZ es una distribución al azar (la nube de puntos ocupa un área rectangular y la fluctuación es de 180°), en este caso cualquier corte que contenga a la lineación de estiramiento nos sirve para calcular las relaciones $X/Y = X/Z$. En las muestras donde se observa bien el plano de esquistosidad, medimos primeramente en ese plano obtenemos la dirección de X y posteriormente cortamos la roca según los planos XZ e YZ. No es necesario realizar los diagramas R_i/Φ para los tres planos principales, ya que con dos es suficiente, sin embargo, es conveniente medir en el tercer plano para comprobar los resultados.

RESULTADOS:

EL ELIPSOIDE DE DEFORMACIÓN FINITA DE FASE 1

Consideramos que los elipsoides medidos en pizarras con nódulos dolomíticos de las localidades de Azud de Villagonzalo y Arapiles (Az 1, Az 2 y AP de la Fig. 2) representan el elipsoide finito debido a la primera fase para este tipo de roca, ya que, en esas localidades, hay evidencias de que la deformación de Fase 2 es despreciable. Este elipsoide es del tipo aplastado con valores de k de 0,32 a 0,36. Los elipsoides medidos en conglomerados, en localidades sin deformación de Fase 2 (Frades de la Sierra y Berrocal de Salvatierra: FR 1, FR 2, BS1 y BS 2 de las Fgs. 2 y 3), son intermedios entre los aplastados y los constreñidos con valores de k próximos a 1 (varían de $k = 0,85$ a $k = 1,68$).

La orientación de los ejes principales del elipsoide de Fase 1 es prácticamente constante en una amplia región del SE de la provincia de Salamanca; el plano de esquistosidad es subvertical, de dirección N 100° a N 130° E y el eje X es subhorizontal (DIEZ BALDA 1981 y 1982).

Se puede afirmar que el elipsoide finito de la primera fase se caracteriza por tanto por un plano de aplastamiento subvertical y un estiramiento subhorizontal, y que las capas de pizarra sufrieron un aplastamiento mayor que las de conglomerados durante la primera fase.

LA DEFORMACIÓN INTERNA DEBIDA A LA SEGUNDA FASE: EL ELIPSOIDE DE FASE 2

Para obtener información acerca del tipo de elipsoide que está ligado a la segunda fase, hemos medido conglomerados procedentes de zonas con diferente deformación de Fase 2, desde nula a muy importante. Una vez proyectados estos resultados en un diagrama de FLINN (1962), comparamos la distribución de los elipsoides medidos con los caminos de la deformación teóricos que seguiría una muestra de partida (que consideramos deformada únicamente por la primera fase), si le superponemos elipsoides de Fase 2 con valores de k' determinados (Figs. 2 y 3); llamamos k' al parámetro k de FLINN del elipsoide de Fase 2. Consideramos por un lado los caminos a partir del elipsoide de Fase 1 medido en Frades de la Sierra (FR 1) y por otro a partir del medido en Berrocal de Salvatierra (BS 1) ya que son los más extremos de los medidos en zonas sin deformación de Fase 2 (Figs. 2 y 3).

Para calcular estos caminos de la deformación prefijamos las orientaciones de los ejes de los elipsoides de cada fase, consideramos que el elipsoide superpuesto (de Fase 2) no varía el valor de su parámetro k' en el transcurso de la deformación progresiva y que ésta se realiza sin cambio de volumen.

Este método es evidentemente una simplificación por las siguientes razones:

1°.- Porque el elipsoide de partida (de Fase 1) no tenía por qué ser el mismo para todas las muestras analizadas. Esto no tenemos manera de controlarlo.

2°.- Porque el elipsoide superpuesto (de Fase 2) no tiene por qué ser del mismo tipo (igual valor de k') para todas las muestras.

3°.- Porque a lo largo de la deformación progresiva de Fase 2 el valor k' del elipsoide, para una misma muestra, ha podido sufrir variaciones.

4°.- Porque para nuestros cálculos hemos supuesto que no ha existido cambio de volumen.

Con todas estas limitaciones y a la luz de los datos que nos suministra la geología, hemos calculado los caminos de la deformación que seguirían los elipsoides de la Fase 1 si se les superponen otros (debidos a la D 2), de orientación y relaciones dadas, en un régimen de cizallamiento puro («pure shear») o de cizallamiento simple («simple shear»); ver apéndice.

Para cizallamiento puro hemos considerado que los ejes del 1° y 2° elipsoide coinciden respectivamente de la siguiente manera: X con X'; Y con Z'; Z con Y' (X, Y, Z son los ejes del elipsoide de primera fase; X', Y', Z' son los ejes del elipsoide de segunda fase). Esto se basa en que el plano de S_2 es subhorizontal y en que el estiramiento observado es tan intenso que debe ser producto de la coincidencia en orientación de los ejes X y X'.

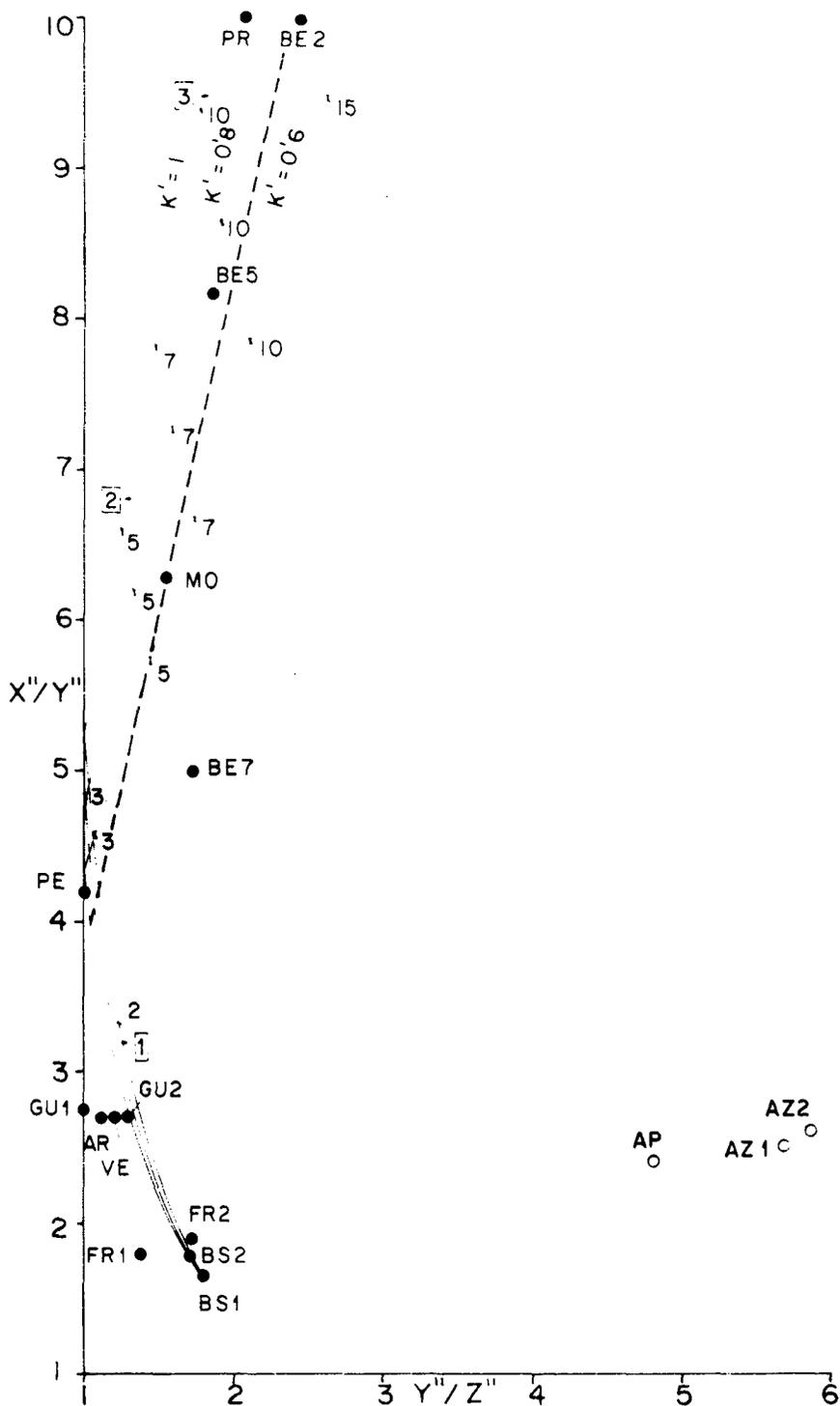


Fig. 2.- Proyección, en un diagrama de F1 INN, del elipsoide de deformación calculado a partir de conglomerados cuarcíticos deformados (puntos) y de nódulos dolomíticos en pizarras (círculos), y caminos de la deformación que seguiría un elipsoide determinado (FR 1-Frades) al superponerle un elipsoide de Fase 2 con diferentes valores de k' y de X'/Z' . Los números sobre los caminos de la deformación expresan el valor de X'/Z' del elipsoide superpuesto suponiendo una deformación coaxial, y los que están recuadrados en el camino de la deformación para $k' = 1$, expresan el valor de la cizalla (γ) del elipsoide superpuesto, suponiendo que la deformación superpuesta sea un cizallamiento simple cuya dirección de flujo y plano de flujo coincidan respectivamente con el eje X y el plano XZ del elipsoide original.

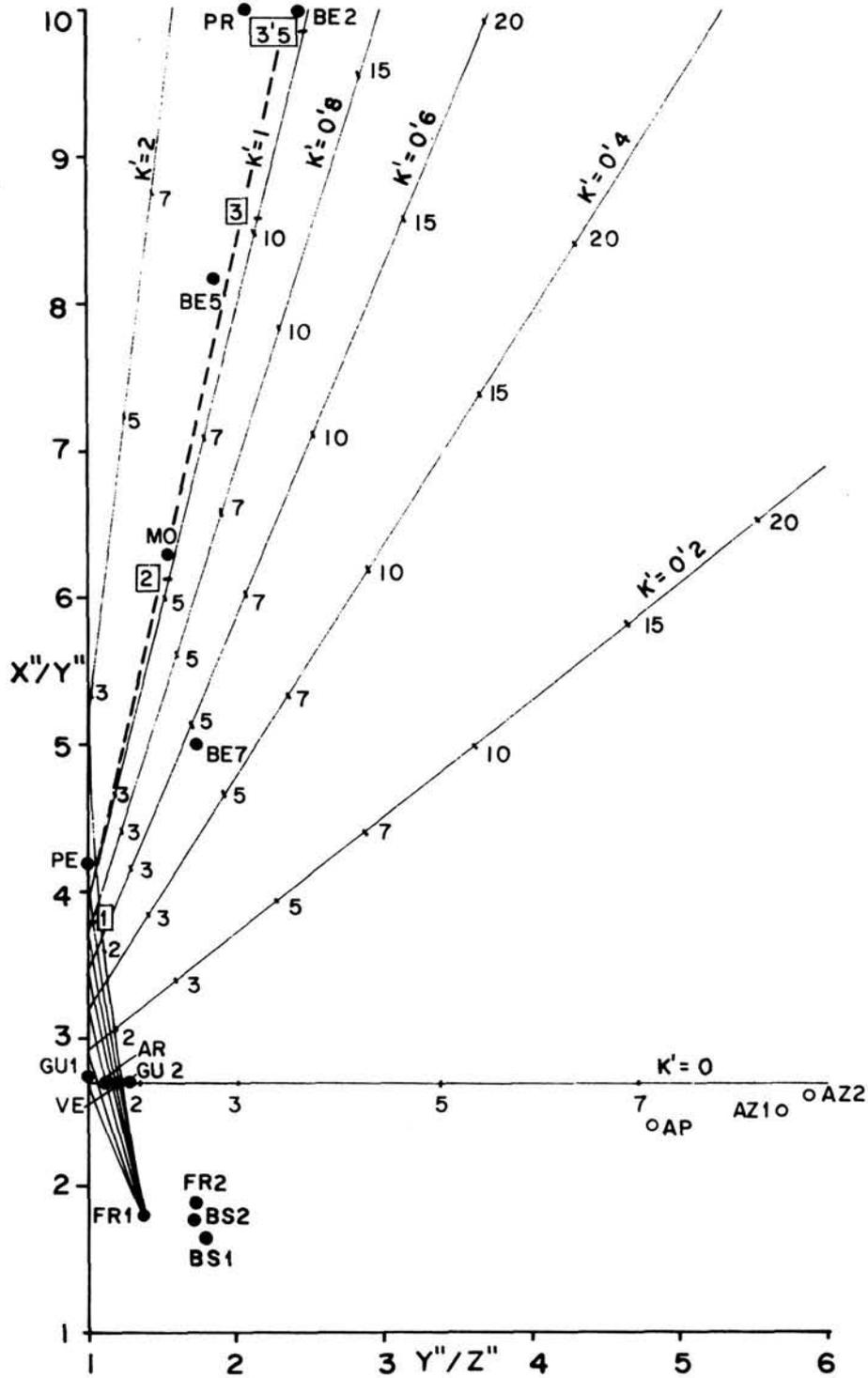


Fig. 3.- Proyección, en un diagrama de FLINN, del elipsoide de deformación finita calculado a partir de las mismas muestras que en la figura anterior, y caminos de la deformación calculados cuando consideramos otro elipsoide de partida, en este caso el medido en Berrocal de Salvatierra (BS 1). Los distintos valores de k' , X'/Z' y γ del elipsoide superpuesto se han señalado sobre los caminos de la deformación igual que en la figura anterior. La línea a trazos es la recta de regresión para las muestras que suministraron un elipsoide de deformación perfectamente prolato o casi prolato con el plano XY subhorizontal (esta recta se ha señalado también en la Fig. 2).

El camino de la deformación obtenido con estas condiciones primero sigue una curva muy abierta hasta tocar el eje de ordenadas (en ese momento el elipsoide resultante es perfectamente prolato con $k'' = \infty$) y después se separa de él siguiendo un camino recto cuya pendiente aumenta al aumentar el valor k' del elipsoide de Fase 2 (Figs. 2 y 3).

Para deformación no coaxial hemos supuesto que la deformación era por cizallamiento simple perfecto sin componente de cizallamiento puro, con el plano de flujo horizontal y con dirección de flujo N 120° E, deducida del estudio de los pliegues curvos de Fase 2 —método del «ángulo de separación» de HANSEN (1971)— y del estudio de las lineaciones dobladas (DIEZ BALDA, 1982). Esta dirección la consideramos paralela al eje X del elipsoide de partida y por tanto, en este caso, el eje Z del primer elipsoide coincide con el eje Y' del segundo y no sufre elongación durante la segunda fase de deformación.

Aplicando el método que da RAMSAY (op. cit., 3-11) para superponer dos deformaciones, y utilizando las fórmulas de cizallamiento simple de RAMSAY (1967, 3-10) y de RAMSAY y GRAHAM (1970), (ver apéndice), se obtiene un camino de la deformación igual al obtenido en deformación coaxial para $k' = 1$ y en él se han marcado (números recuadrados de las Figs- 2 y 3) los valores de la cizalla (γ) de Fase 2 necesarios para obtener un determinado elipsoide final.

Como puede apreciarse en la Fig. 2, considerando como elipsoide de partida (de Fase 1) el medido en Frades de la Sierra (FR 1), las distintas muestras medidas y concretamente las más deformadas —que son las más interesantes porque permiten diferenciar con mayor precisión el camino de la deformación seguido— se adaptan muy bien a un camino de la deformación para un elipsoide superpuesto con valor de k' próximo a 1.

Para establecer una comparación objetiva, se ha calculado la recta de regresión para las muestras que suministraron un elipsoide de deformación de tipo perfectamente prolato y las que pasaron por este estadio en el curso de la segunda fase de deformación y ahora tienen un elipsoide constreñido con plano de aplastamiento subhorizontal, es decir, aquellas que, si las consideraciones realizadas se hubieran cumplido estrictamente, deberían caer en una recta del gráfico de FLINN. Vemos que la recta de regresión así obtenida es muy próxima al camino de la deformación para $k' = 1$ (Fig. 2).

Si consideramos como elipsoide de partida (de Fase 1) el medido en Berrocal de Salvatierra (BS 1), vemos que las distintas muestras medidas se adaptan a un camino de la deformación para un elipsoide de Fase 2 con valores de k' entre 0,6 y 0,8 (Fig. 3). También la recta de regresión se aproxima a estos caminos.

El que el elipsoide ligado a la segunda fase tenga un valor de k próximo a 1 es perfectamente coherente con una deformación por cizallamiento simple durante

la segunda fase; aunque este resultado, en sí mismo, no prueba que el mecanismo de la deformación haya sido el cizallamiento simple, existen, en esta región, otras evidencias (geometría de los pliegues de Fase 2, gradiente en la deformación observada) que permiten invocar la intervención de este mecanismo (DIEZ BALDA, 1982). Si aceptamos esta conclusión, y suponiendo que toda la deformación haya sido por cizallamiento simple, los datos de la Fig. 2 indicarían un valor de la cizalla (γ) de 3,5 para las muestras más deformadas de las que se han medido. No se deshechan, sin embargo, valores aún mayores que éste.

El hecho de que con otra muestra de partida (BS 1, Fig. 3) obtengamos un elipsoide de Fase 2 con valores de k menores que 1, podría interpretarse admitiendo que la deformación tuvo una componente de cizallamiento puro acompañando al cizallamiento simple. Esto es además lo más probable por la razón siguiente:

El método de superposición de deformación utilizado (ver apéndice- B-9), permite calcular la inclinación del eje X'' del elipsoide final suponiendo que el plano de flujo del cizallamiento fuera horizontal. Así, hemos obtenido que para $\gamma = 1$, este eje cabecearía unos 22° W; con $\gamma = 2$ su inclinación sería 20° W y para $\gamma = 3,5$ sería e 14°W (suponiendo un sentido de cizallamiento de las partes superiores hacia el SE con respecto a las inferiores, tal como se deduce de las cizallas de los granitos de Cespedosa (DIEZ BALDA, 1981 y 1982); sin embargo, ni en Pedrosillo ni en Morille (PE y MO, Fig. 2), donde el elipsoide medido podría corresponderse con un elipsoide de Fase 2 con valores de γ de 1 y 2 respectivamente, se encuentran inclinaciones tan grandes del eje mayor del elipsoide final. Es por tanto probable la existencia de una componente de deformación coaxial y no rotacional acompañando al cizallamiento simple, que actuaría simultáneamente con éste durante la segunda fase de deformación, y cuya dirección de acortamiento fuera subvertical.

CONCLUSIONES

1.— La distribución relativamente bien alineada que adoptan las muestras más deformadas, en el gráfico de FLINN, y la proximidad entre sí de las menos deformadas, parecen indicar que las asunciones realizadas son válidas en términos generales, y que, por tanto, el considerar las diferentes muestras como diferentes estadios de una deformación progresiva superpuesta a una deformación inicial, aproximadamente homogénea, puede ser válido, si se hace para el mismo tipo de roca, conglomerados de cuarzo con muy poca matriz en nuestro caso.

2.— El elipsoide ligado a la segunda fase hercínica tendría un valor de k próximo a 1 lo cual es perfectamente coherente con una deformación por cizallamiento simple heterogéneo en la Fase 2, tal como se había concluido a partir del estudio de las estructuras generadas durante la misma. Este mecanismo, permite en efecto explicar: la geometría de los pliegues de esta fase, su distribución en la vertical, con diferentes características según el nivel tectónico, la diferente intensidad de la deformación de las rocas según la profundidad y la continuidad observada entre los niveles superiores (apenas estirados en dirección NW-SE, pues ni la deformación interna en las rocas evidencia elongación notable, ni existe un importante sistema de fallas normales perpendiculares a esa dirección) y los niveles profundos (muy intensamente estirados).

3.— El elipsoide de Fase 2 obtenido para las muestras más deformadas de las que se han medido tendría un valor de X'/Z' de 10 a 15; no deshechamos, sin embargo, que pueda haber deformaciones mayores. Suponiendo que toda la deformación haya sido por cizallamiento simple obtenemos un valor de $\gamma = 3,5$ para las muestras más deformadas de entre las medidas.

4.— Los elipsoides prolatos o constreñidos que evidencien una deformación de elevada intensidad, y las concomitantes fábricas lineares, se explican bien por superposición de fases con elipsoides de tipo intermedio (k entre 0,5 y 2) con tal de que los ejes mayores de los elipsoides de las distintas fases coincidan, pero no los demás. Este parece ser el caso al Sur de la provincia de Salamanca donde la superposición de fases es evidente en los metasedimentos.

APÉNDICE

Superposición de una deformación F_2 a un elipsoide original, producto de la F_1 . Se supone que toda la deformación se realiza a volumen constante ($\Delta = 0$)

X, Y, Z : ejes del elipsoide de F_1 ($X = \sqrt{\lambda} X$, etc.)

X', Y', Z' : ejes del elipsoide de F_2 .

X'', Y'', Z'' : ejes del elipsoide resultante ($F_1 + F_2$).

k : parámetro de FLINN del elipsoide de F_1 .

k' : parámetro de FLINN del elipsoide de F_2 .

k'' : parámetro de FLINN del elipsoide resultante.

A.— Caso de una deformación superpuesta por cizallamiento puro

1.— Dado que se supone que no ha habido pérdida de volumen durante la F_1 : $X.Y.Z. = 1$. Con esta ecuación y las relaciones conocidas de X/Y e Y/Z se calculan los valores de X, Y, Z .

2.— Se hace lo mismo para el elipsoide F_2 superpuesto, al que, arbitrariamente, asignamos un valor de X'/Z' y otro de k' :

$$\frac{X'}{Y'} = \frac{X'/Z'}{Y'/Z'} ; \quad k' = \frac{X'/Z'/Y'/Z' - 1}{Y'/Z' - 1}$$

Despejando se obtiene una ecuación de 2º grado cuya solución válida

$$\frac{Y'}{Z'} = \frac{(k'-1) + \sqrt{(k'-1)^2 + 4k'(X'/Z')}}{2k'}$$

nos da Y'/Z' en función de los valores X'/Z' y k' asignados.

Establecidos X'/Z' e Y'/Z' y teniendo en cuenta que

$X'.Y'.Z' = 1$ ($\Delta = 0$) se calculan X' , Y' , Z' .

3.— Dadas las coincidencias de ejes propuestas en el texto

X con X'

Y con Z'

Z con Y'

Se calculan: $X.X' = X''$; $Y.Z' = Y''$ ó Z'' ; $Z.Y' = Y''$ ó Z'' , teniendo en cuenta que, siempre, Y'' es mayor o igual a Z'' .

B.— Caso de una deformación superpuesta por cizallamiento simple

Se supone que X coincide con a, que es la dirección de flujo del cizallamiento simple (ver Fig. 4), y que Z coincide con Y', que se mantiene constante a lo largo de la deformación superpuesta.

Operamos en el plano XY que coincide con el X'Z'. γ es el valor de la cizalla.

1.— Se calcula el ángulo θ que forman X' y X \equiv a.

$$\text{tg } 2\theta = 2/\gamma \quad (\text{RAMSAY \& GRAHAM, 1970, eq. 36})$$

2.— Se calcula el inverso de las elongaciones cuadráticas de dos líneas paralelas a los ejes del elipsoide superpuesto, pero en el elipsoide (en realidad una elipse, puesto que estamos trabajando en un plano) original:

$$\lambda'_x = \lambda'_x \cos^2 \theta + \lambda'_y \text{sen}^2 \theta$$

$$\lambda'_y = \lambda'_x \cos^2 (90 + \theta) + \lambda'_y \text{sen}^2 (90 + \theta) \quad (\text{RAMSAY, 1967, 3-31}).$$

Las longitudes de esas líneas son $\sqrt{\lambda_x}$ y $\sqrt{\lambda_y}$ respectivamente

$$\left(\sqrt{\lambda_x} = \frac{1}{\sqrt{\lambda'_x}} \right)$$

3.— Se calcula γ'_{xy} , que sirve para conocer la deformación por cizalla de una línea de dirección X' en la elipse original. No olvidar que $\gamma' = \gamma / \lambda$ (RAMSAY, 1967, p. 68)

$$\gamma'_{xy} = (\lambda'_y - \lambda'_x) \sin \theta \cos \theta \quad (\text{RAMSAY, 1967, 3-42})$$

4.— Se calcula el inverso de las elongaciones cuadráticas de los ejes del elipsoide superpuesto $\lambda'_{x'}$ $\lambda'_{z'}$:

$$\lambda'_{x'} = \frac{2}{\gamma^2 + 2 + \gamma \sqrt{\gamma^2 + 4}} \quad \lambda'_{z'} = \frac{2}{\gamma^2 + 2 - \gamma \sqrt{\gamma^2 + 4}}$$

(RAMSAY, 1967, 3-67).

5.— Se calculan las inversas de las elongaciones cuadráticas resultantes en las direcciones X' y Z' (λ'_{XR} y λ'_{ZR}) multiplicando entre sí las inversas de las elongaciones cuadráticas en las direcciones X' y Z' obtenidas en 2 (elipsoide de F₁) y 4 (elipsoide de F₂):

$$\lambda'_{XR} = \lambda'_x \cdot \lambda'_{x'}$$

$$\lambda'_{ZR} = \lambda'_z \cdot \lambda'_{z'} \quad (\text{RAMSAY, 1967, p. 93})$$

6.— Se calcula la deformación por cizalla de la línea de dirección X' al final de la deformación (γ'_R)

$$\gamma'_R = \gamma'_{xy} \cdot \sqrt{\lambda'_{x'} \cdot \lambda'_{z'}} \quad (\text{RAMSAY, 1967, p. 63})$$

7.— Aplicando las invariantes de la deformación J₁ y J₂ se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$J_1 = \lambda'_{x''} + \lambda'_{y''} = \lambda'_{XR} + \lambda'_{ZR}$$

$$J_2 = \lambda'_{x''} \cdot \lambda'_{y''} = \lambda'_{XR} \cdot \lambda'_{ZR} - \gamma'^2_R$$

(RAMSAY, 1967, 3-56, 3-57 y p.93)

De ellas se deducen X'' e Y'' (ó Z'', según que $\sqrt{\lambda'_{y''}}$ obtenido en la resolución de estas ecuaciones sea mayor o menor que Z respectivamente; no hay que olvidar que Z coincide con Y' y por tanto Z será igual a Y'' o a Z'' del elipsoide final, y que Y'' tiene que ser mayor o igual que Z'').

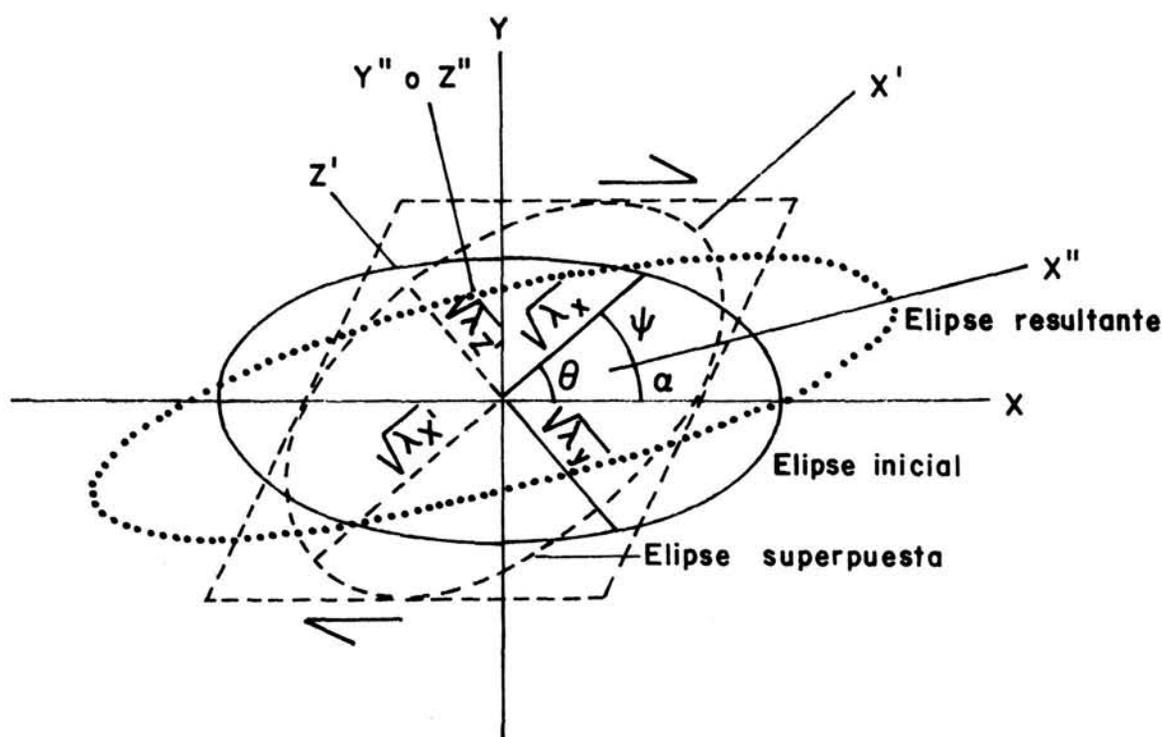


Fig. 4.- Esquema de la superposición de las elipses de deformación, cuando la deformación superpuesta es por cizallamiento simple en el cual la dirección de flujo coincide con la dirección X del elipsoide original y el plano de flujo coincide con el plano XZ del mismo.

8.- El ángulo Ψ entre X'' y X' se deduce de:

$$\text{sen } 2 \Psi = \frac{2 \gamma'_R}{(\lambda'_{Y''} - \lambda'_{X''})} \quad (\text{RAMSAY, 1967, 3-50})$$

9.— El ángulo α entre X'' y X , es decir, entre el eje mayor del elipsoide resultante y el eje mayor del de F_1 (horizontal en nuestro caso) es

$$\alpha = \theta - \Psi \quad (\text{ver Fig. 4})$$

AGRADECIMIENTO

Agradezco a J.R. Martínez Catalán la revisión y crítica del manuscrito y la realización del programa para superponer las deformaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- DIEZ BALDA, M.A. (1981): La estructura herciniana entre Salamanca y Sequeros (Zona Centro-Ibérica). La superposición de fases y su influencia en la fábrica de las rocas. Presentado en la VII Reunión del Oeste peninsular, Madrid Sep. 1981. *Cuadernos de Geología Ibérica*. Vol. 7
- DIEZ BALDA, M.A. (1982): El Complejo esquistos-grauváquico, las series paleozoicas y la estructura hercínica al Sur de Salamanca. Tesis Doctoral, Oct. 1982, Universidad de Salamanca.
- DUNNET, A. (1969): A technique of finite strain analysis using elliptical particles. *Tectonophysics*, 7, N° 2, 117-136.
- FLINN, D. (1962): On folding during three-dimensional progressive deformation. *Q.J. Geol. Soc. Lond.*, 118385-433.
- HANSEN, E. (1971): Strain facies. Springer-Verlag, Berlin. 207 p.
- RAMSAY, J.G. (1967): Folding and fracturing of rocks. Mc. Graw Hill Book Co, 568 p.
- RAMSAY, J.G. & GRAHAM, R.H. (1970): Strain variation in shear belts. *Canad. Journ. of Earth Sc.* 7, 786-813.

COLOQUIO

A. CASTRO: ¿Si la lineación de estiramiento es debida a un cizallamiento simple horizontal; no deberían aparecer de forma constante criterios de deformación rotacional (planos S y C) asociados a la fábrica horizontal? ¿No es raro que tales criterios no aparezcan en zonas muy extensas donde la deformación de F II es una constante regional, sobre todo en gneises y pegmatoides?.

A. DIEZ BALDA: Se encuentran algunas cizallas subhorizontales en granitos deformados, pero las evidencias de deformación rotacional más numerosas las encontramos estudiando pliegues de 2ª fase. Hay pliegues curvos, pliegues reorientados, etc. De todas formas es por bandas como dije y no me parece extraño hablar de cizallamiento ligado a la 2ª fase hercínica puesto que están citados en otras áreas próximas. Es posible que también en esta región existan cabalgamientos o al menos cizallamientos importantes ligados a esta fase.

E. HERNÁNDEZ ENRILE: ¿La extensión con que se manifiesta la esquistosidad S₂ hercínica de la 2ª fase es de carácter regional o se limita a fajas concretas de valor hectométrico o kilométrico?.

A. DIEZ BALDA: La esquistosidad S₂ aparece también en áreas epizonales pero es muy espaciada. Las evidencias de deformación rotacional se encuentran en efecto, en bandas de extensión kilométrica. En concreto en la de Morille y al SE de Guijo de Avila.

E. HERNÁNDEZ ENRILE: ¿La esquistosidad hercínica (S_2) de segunda fase imprime deformación interna en zonas epizonales al igual que en las zonas más profundas prescindiendo de su mayor grado o intensidad?

A. DIEZ BALDA: En las áreas epizonales la S_2 es una débil crenulación y no hay deformación interna importante ligada a la 2^a fase. No hay tampoco evidencias de deformación rotacional en esas áreas: los pliegues son poco apretados, angulares con un ángulo entre flancos de 90°-100°. Pensamos que la intervención del cizallamiento simple aumenta hacia las zonas profundas.

A. RIBEIRO: ¿Hay diferencia de densidades entre las rocas poco deformadas y muy deformadas por la F_2 ?

A. DIEZ BALDA: No, hemos considerado por tanto que no ha existido cambio de volumen.

A. RIBEIRO: Felicita a la autora por los resultados muy interesantes de su trabajo sobre deformación finita en la F_2 y pregunta si hay contraste de ductilidad entre los cantos y la matriz.

A. DIEZ BALDA: Hemos elegido siempre conglomerados muy pobres en matriz para poder despreciar el contraste de ductilidades.