

# La cinemática del plegamiento: algunas claves geométricas para su interpretación

F. BASTIDA<sup>1</sup>, J. ALLER<sup>1</sup>, N. C. TOIMIL<sup>1</sup> y N. C. BOBILLO-ARES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Departamento de Geología, Universidad de Oviedo. c/ Jesús Arias de Velasco s/n. 33005 Oviedo.*

<sup>2</sup> *Departamento de Matemáticas. Universidad de Oviedo. Avda. de Calvo Sotelo s/n. 33007 Oviedo.*

*Correspondencia: bastida@geol.uniovi.es*

---

**Resumen:** La modelización por ordenador de perfiles de pliegues formados por un determinado mecanismo de plegamiento es posible cuando se conocen las ecuaciones que permiten encontrar las relaciones de transformación de puntos de la configuración inicial de la capa en puntos de la configuración plegada. De este modo, se han modelizado pliegues formados mediante la superposición sucesiva o simultánea de deformación longitudinal tangencial, “flexural-flow” y diversos tipos de deformación homogénea (acortamiento de la capa, compactación, y aplastamiento y achatamiento de pliegues). La geometría y distribución de la deformación interna en los pliegues teóricos así obtenidos permiten predecir las características de pliegues naturales formados por los citados mecanismos de plegamiento. El estado de deformación de la capa plegada es típico de cada mecanismo o superposición de mecanismos y puede describirse mediante dos tipos de curvas, que muestran la variación de la inclinación del eje mayor de la elipse de deformación y la variación del cociente entre las longitudes de los ejes de dicha elipse en función del buzamiento de la capa plegada. La deformación longitudinal tangencial es el único de los mecanismos analizados que, cuando interviene en el plegamiento, da lugar a curvas distintas para los dos límites de la capa plegada. La clasificación de Ramsay o las clasificaciones basadas en parámetros derivados de ella dan lugar también a resultados específicos para cada mecanismo o superposición de mecanismos de plegamiento. El análisis de los mecanismos que formaron un pliegue natural dado puede hacerse por tanteo mediante la modelización de un pliegue con las mismas características geométricas que el pliegue natural. Los rasgos geométricos a analizar en este último son los implicados en la modelización. En pliegues naturales con clivaje, puede obtenerse una aproximación a la curva de la inclinación del eje mayor de la elipse de deformación en función del buzamiento, midiendo la variación del buzamiento del clivaje en función del buzamiento de la capa. El mayor problema en el análisis cinemático de pliegues estriba en la dificultad de realizar medidas de deformación interna en las rocas plegadas.

**Palabras clave:** pliegues, modelización, clasificación, deformación, clivaje.

**Abstract:** Computer modelling of fold profiles formed by a specific folding mechanism is possible when the equations to find transformation relationships from points of the initial configuration to points of the folded configuration of the layer are known. From these equations, folds formed by the successive or simultaneous superposition of tangential longitudinal strain, flexural flow and several types of homogeneous strain (layer shortening, compaction, and fold flattening parallel or perpendicular to the axial trace) have been modelled. The geometry and strain pattern of the theoretical folds allow predictions about the characteristics of natural folds formed by the above mechanisms. The strain state in the folded layer is a typical feature of every mechanism or mechanism superposition and it can be described by two types of curves, which show the variation of the major axis plunge of the strain ellipse and the variation of the aspect ratio of this ellipse with the layer dip. Tangential longitudinal strain is the only mechanism analysed that produces different curves for the two boundaries of the folded layer. Ramsay’s classification or classifications based on parameters derived from it also give results specific for

every folding mechanism or mechanism superposition. Analysis of folding mechanisms that operated in a specific natural fold can be made by trial and error modelling a fold with the same geometrical characteristics as the natural fold. The geometrical features to be analysed in the latter are those involved in the modelling. In natural folds with cleavage, an approach to the curve of the major axis plunge of the strain ellipse against the layer dip can be obtained by measuring the dip variation of the cleavage as a function of the layer dip. The greatest problem in the kinematical analysis of folding is posed by the difficulty of obtaining strain measurements in folded rocks.

**Key words:** folds, modelling, classification, strain, cleavage.

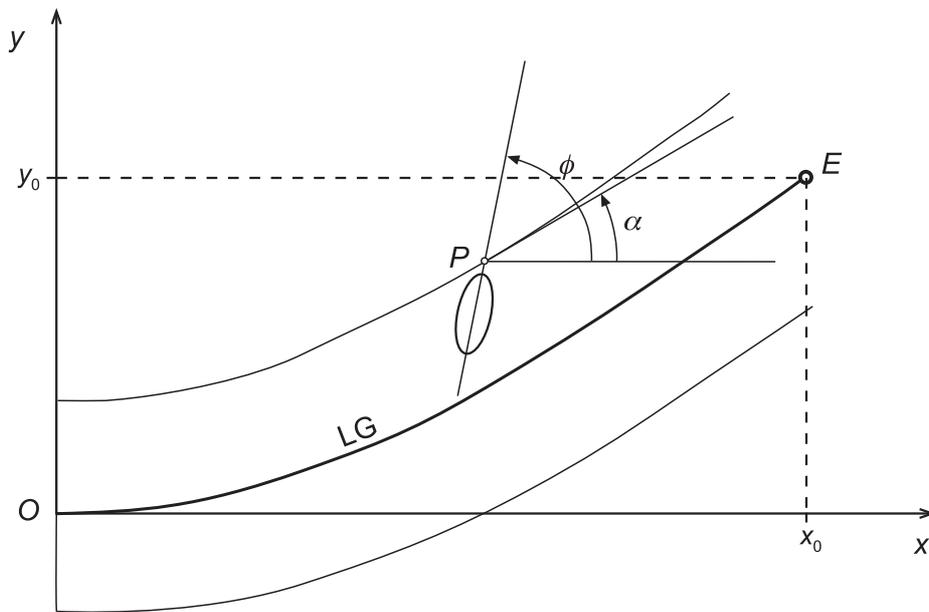
Los pliegues son estructuras frecuentes cuya geometría es un buen reflejo de la deformación sufrida por las rocas, por lo que su estudio puede facilitar una aproximación muy útil al conocimiento de ésta. El primer paso en este estudio suele consistir en un análisis de los pliegues mediante la observación y la adquisición de datos en el campo. Sin embargo, no resulta obvio "a priori" conocer los aspectos geométricos precisos que son relevantes para entender el origen y desarrollo de los pliegues, por lo que el estudio de la geometría de éstos precisa también de su conocimiento cinemático, estando ambos aspectos, geometría y cinemática, íntimamente relacionados. Los mecanismos cinemáticos de plegamiento representan formas teóricas de producirse o transformarse los pliegues, definidas mediante unas leyes geométricas que determinan los desplazamientos que se van a producir, así como el patrón de deformación interna final dentro de la capa o capas plegadas. Para establecer los mecanismos básicos es conveniente producir pliegues en diversos tipos de materiales mediante experimentos físicos sencillos y conocer la deformación asociada a ellos, así como su desarrollo progresivo. A partir de estos experimentos es posible establecer los mecanismos como idealizaciones teóricas susceptibles de ser analizadas matemáticamente. De este modo, aplicando las condiciones requeridas para cada mecanismo, debe ser posible modelizar teóricamente la geometría de la capa plegada y la distribución de la deformación dentro de ella a partir de la configuración inicial de la capa. Aunque el plegamiento implica necesariamente una deformación heterogénea, la intervención de una deformación homogénea durante el plegamiento puede modificar profundamente la geometría de los pliegues o la distribución de la deformación interna en ellos, por lo cual este tipo de modificaciones serán también incluidas dentro de los mecanismos de plegamiento.

El análisis teórico de la cinemática del plegamiento permite conocer cuáles deben ser los aspectos a considerar en el análisis geométrico de los pliegues naturales. En este sentido, una manera de abordar el conocimiento de los mecanismos que han dado lugar a un pliegue natural determinado consiste en aprovechar toda la información

posible que aporta la estructura para modelizar mediante ordenador, combinando adecuadamente mecanismos de plegamiento, un pliegue con la misma geometría. Como consecuencia, los rasgos geométricos a considerar en el campo son los requeridos para realizar la modelización teórica y para poder comparar adecuadamente los pliegues modelizados con los pliegues reales.

Aunque un análisis geométrico detallado de los pliegues naturales puede permitir una aproximación muy valiosa al conocimiento de la cinemática de plegamiento, el grado de incertidumbre de los resultados disminuye enormemente cuando se disponen además de medidas de la deformación en puntos de la capa plegada. En este sentido, las medidas pertinentes, a realizar sobre el perfil del pliegue, se refieren al cociente entre los ejes de la elipse de la deformación, a las orientaciones de dichos ejes y al cambio de área con la deformación. Desgraciadamente, el primero y sobre todo el tercero de los aspectos citados son difíciles de determinar. Sin embargo, no es tan difícil en muchos casos realizar medidas aproximadas de las direcciones principales de la deformación en la configuración plegada de la roca. Esto puede hacerse cuando existe una foliación tectónica primaria cuyas superficies, de acuerdo con los resultados de numerosas medidas de deformación, son aproximadamente perpendiculares a la dirección de máxima deformación finita. Esta información es esencial para poder comparar los pliegues naturales con los obtenidos experimentalmente.

El objetivo del presente trabajo consiste en elaborar una revisión teórica de los principales mecanismos de plegamiento y de los métodos geométricos que hay que utilizar para el análisis cinemático del plegamiento. A partir de la modelización teórica de los pliegues originados mediante estos mecanismos se intentarán predecir las características geométricas y cinemáticas de los pliegues resultantes (problema directo), y mediante el ajuste y la comparación de pliegues naturales concretos bien caracterizados geométricamente, con pliegues modelizados teóricamente, se intentará exponer una metodología para aproximarnos al conocimiento cinemático de aquéllos (problema inverso).



**Figura 1.** Sistema de referencia general usado para analizar la deformación en las capas plegadas y ángulos utilizados para describir la distribución de la deformación interna;  $\alpha$  es el buzamiento de la capa en  $P$  y  $\phi$  define la inclinación del eje mayor de la elipse de la deformación en dicho punto. LG es la línea guía y  $E$  el punto de enlace con el flanco adyacente. El origen de coordenadas  $O$  está situado en el punto de charnela de la línea guía.

### Mecanismos básicos de plegamiento

El análisis de los mecanismos que se realizará a lo largo del presente trabajo será bidimensional, considerando la deformación asociada al plegamiento en el plano perpendicular al eje del pliegue. Esto es una práctica general en el estudio cinemático del plegamiento, aunque restringe la aplicación de los resultados a los pliegues cilíndricos, en los cuales todas las secciones perpendiculares al eje presentan la misma geometría. Con esta simplificación, las superficies plegadas se convierten en líneas plegadas, definiendo el perfil del pliegue.

Para el estudio teórico de los mecanismos de plegamiento es conveniente utilizar una línea auxiliar, denominada “línea guía”, que facilita el seguimiento de la geometría de la capa durante el plegamiento y que habitualmente es la línea inicialmente equidistante de los límites de la capa, aunque no tiene que ser necesariamente así. La parte del pliegue que se utiliza como unidad en el estudio cinemático del plegamiento es el flanco, definido como la parte del perfil entre el origen de coordenadas (generalmente el punto de charnela) y el punto de la línea guía donde la curvatura cambia de signo (punto de inflexión; Fig. 1); esta definición plantea algunos problemas que se analizarán más adelante. Un parámetro necesario para la modelización de diversos mecanismos de plegamiento es la relación de aspecto (o amplitud normalizada) de un flanco, definida como el cociente ( $h = y_0/x_0$ ) entre su altura (o amplitud) y anchura medidas en su línea guía (Fig. 1).

El método general para la descripción de un mecanismo de plegamiento consiste en formular unas ecuaciones para encontrar las relaciones de transformación que, cumpliendo los requisitos geométricos que caracterizan el mecanismo, permitan determinar la posición de los puntos de la capa plegada en función de la posición de los correspondientes puntos de la configuración original de ésta. Una vez conseguido esto, es necesario determinar el estado de deformación en los puntos de la capa plegada. Para ello se dibuja en el perfil de la capa original un retículo de cuadrados o rectángulos y se aplican las relaciones de transformación a los nodos del retículo, con lo cual se obtiene el retículo deformado y, por consiguiente, la forma de la capa plegada. Si los cuadriláteros del retículo son suficientemente pequeños, la deformación en cualquier punto de cada cuadrilátero puede obtenerse con tanta precisión como se desee analizando la relación entre los vértices de la configuración inicial y los de la configuración plegada (Bastida et al., 2003; Bobillo-Ares et al., 2004). De este modo, la deformación en cada punto de la capa plegada puede ser obtenida con la ayuda de un ordenador.

Dos tipos de gráficos son útiles para ilustrar el estado de deformación en la capa plegada producido por los distintos mecanismos de plegamiento. Ambos se refieren habitualmente a datos obtenidos en los límites de la capa plegada. Uno de estos gráficos describe la variación de la inclinación del eje mayor de la elipse de la deformación, dada por el ángulo  $\phi$  (medido entre 0 y 180°),

en función del buzamiento  $\alpha$  (Fig. 1). Cuando la curva resultante presenta  $\phi = 90^\circ$  para cualquier valor de  $\alpha$ , la disposición de los ejes mayores de la elipse de deformación se mantiene paralela a la traza axial; cuando en la curva  $\phi > 90^\circ$  en todos sus puntos, los ejes mayores describen un abanico convergente hacia el núcleo del pliegue; y cuando  $\phi < 90^\circ$  en todos los puntos, los ejes mayores describen un abanico divergente.

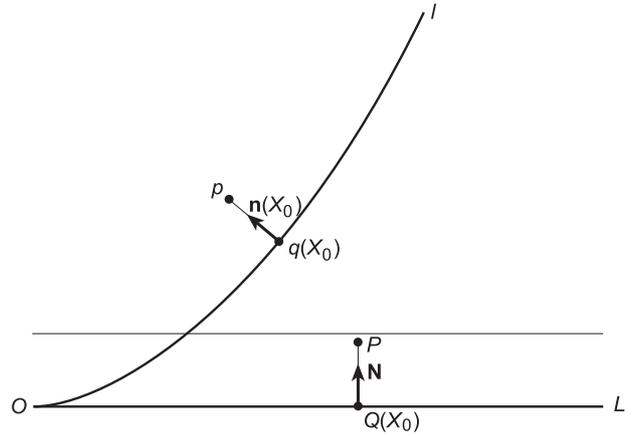
El otro gráfico describe la variación de la relación de aspecto de la elipse de la deformación (o relación entre ejes,  $R = \sqrt{\lambda_1/\lambda_2}$ ) en función del buzamiento  $\alpha$ . Con el objeto de indicar el área en la que el desarrollo de clivaje es probable dentro de la capa plegada para un mecanismo determinado, la parte del gráfico con  $R > 2$  (corresponde a un acortamiento máximo del orden del 30% cuando no hay cambio de área) se ha representado tramada. Es claro, no obstante, que el desarrollo de clivaje depende de otros factores, además del valor del acortamiento, como por ejemplo, del comportamiento reológico de las rocas, pero la experiencia sugiere que el clivaje es una estructura común para  $R > 2$ .

#### Deformación longitudinal tangencial

La definición de este mecanismo se basa en el hecho bien conocido de que cuando se pliega experimentalmente una capa muy competente, las líneas próximas al arco externo, originalmente paralelas a los límites de capa, sufren un alargamiento final mientras que las próximas al arco interno sufren acortamiento final (por ejemplo, Kuenen y de Sitter, 1938). Separando estas zonas de alargamiento y acortamiento tangencial existe una superficie que no sufre deformación longitudinal final, y que recibe el nombre de “superficie neutra” (“línea neutra” en dos dimensiones). Estos hechos pueden comprobarse fácilmente si se dibuja un retículo de cuadrados sobre el perfil original de la capa, observándose además cómo las líneas originalmente perpendiculares a los límites de capa se mantienen aproximadamente rectas y normales a dichos límites durante el plegamiento. Estos sencillos resultados permiten definir la deformación longitudinal tangencial.

Supongamos, para definir este mecanismo, que la línea guía es originalmente horizontal y equidistante de los límites de la capa (Fig. 2). Después de la deformación, dicha línea ( $L$ ) se transforma en la curva  $l$ , descrita matemáticamente por la función  $f(X)$ . En estas condiciones, la deformación longitudinal tangencial es un mecanismo de plegamiento que cumple las siguientes condiciones (Bobillo-Ares et al., 2000):

- Existencia de una línea dentro de la capa plegada, denominada “línea neutra”, definida por puntos sin deformación final. Esta línea separa un área externa (o



**Figura 2.** Imágenes  $q(X_0)$  y  $p$  de dos puntos  $Q(X_0)$  y  $P$  plegados por deformación longitudinal tangencial y situados en la línea guía y fuera de ella respectivamente.  $L$  y  $l$  describen la posición de la línea guía antes y después del plegamiento respectivamente.

parte convexa de la capa plegada) con alargamiento tangencial, de un área interna (o parte cóncava) con acortamiento tangencial, y coincide con la línea guía. Una consecuencia de esta condición es que las líneas originalmente normales a la línea neutra permanecen normales a ella durante el desarrollo del plegamiento. De acuerdo con esta condición, la imagen  $q(X_0)$  del punto  $Q(X_0)$  de  $L$ , a una distancia  $X_0$  de  $O$ , puede determinarse asumiendo que la longitud del arco  $Oq$  es también  $X_0$  (Fig. 2).

- Las líneas rectas originalmente normales a la línea neutra permanecen rectas después del plegamiento. En consecuencia, los puntos de la capa no situados en la línea guía permanecen siempre durante el plegamiento en la misma línea normal a la línea guía. Por tanto, las imágenes de los puntos extremos del segmento  $PQ$ , normal a  $L$  en  $Q$ , son los puntos extremos del segmento  $pq$ , normal a  $l$  en  $q$  (Fig. 2).

- El área permanece constante durante el plegamiento en todas las partes del perfil de la capa plegada.

Si  $Y$  es la longitud del segmento  $PQ$ , se cumplirá que:

$$P = Q + YN, \quad (1)$$

donde  $N$  es el vector unitario normal a  $L$  en  $Q$ . En esta ecuación y en lo que sigue se utilizará la notación habitual en geometría afín, según la cual, dado un punto  $A$  y un vector  $\mathbf{v}$ , la “suma”  $A + \mathbf{v}$  da el punto  $B$ , tal que  $\mathbf{v} = \overrightarrow{AB}$ .

La imagen  $p$  de  $P$  está a la distancia  $d$  del punto  $q$ , de forma que:

$$p = q + d\mathbf{n}(X), \quad (2)$$

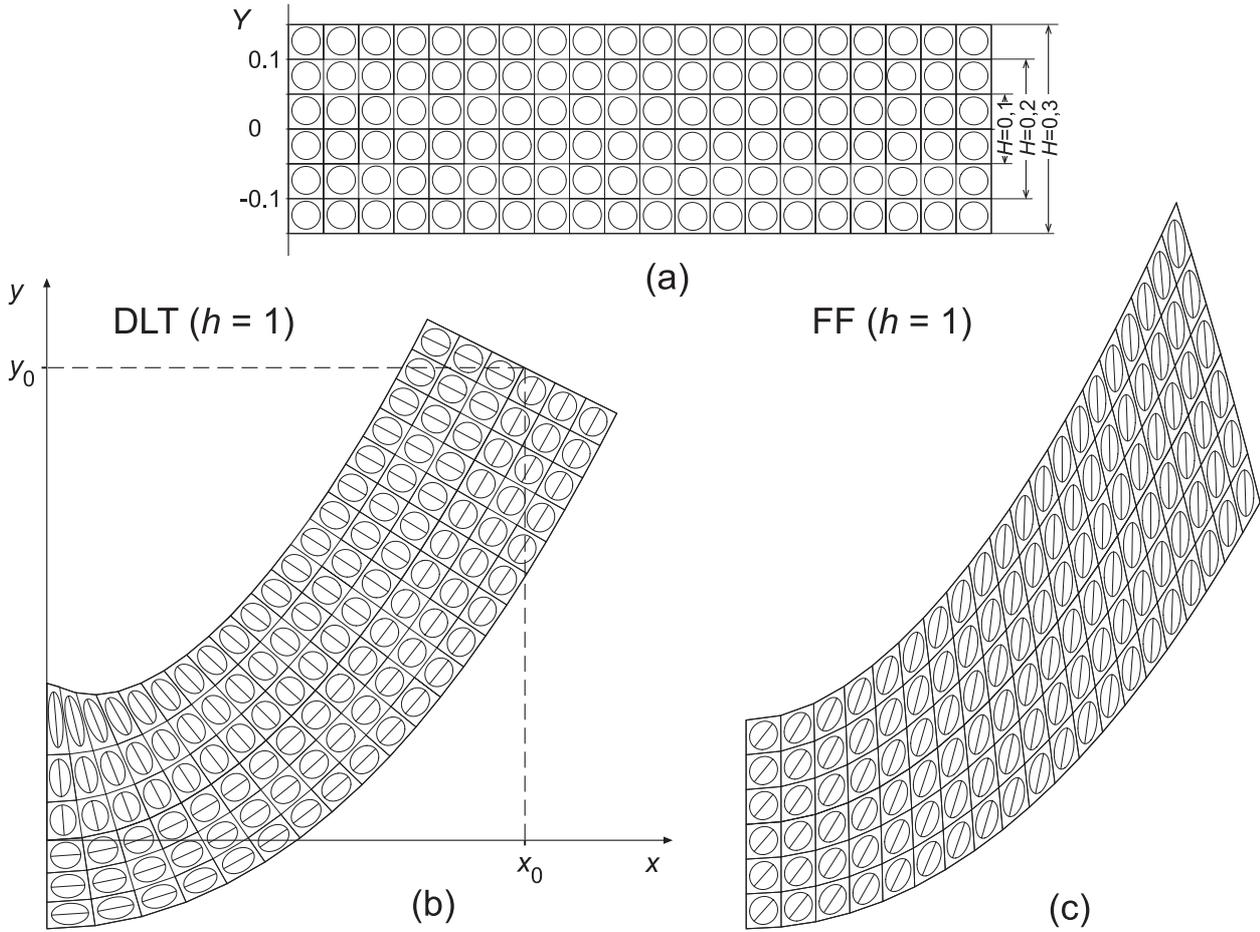


Figura 3. Plegamiento de una capa (a) por deformación longitudinal tangencial (DLT) (b) y por “flexural flow” (FF) (c). En los pliegues se ilustra la distribución de la deformación dentro de la capa;  $h = y_0/x_0$  es la relación de aspecto de los pliegues.

donde  $\mathbf{n}(X)$  es el vector unitario normal a  $l$  en  $q(X)$ . Asumiendo la condición de conservación de área, el valor de  $d$  viene dado por (Bobillo-Ares et al., 2000):

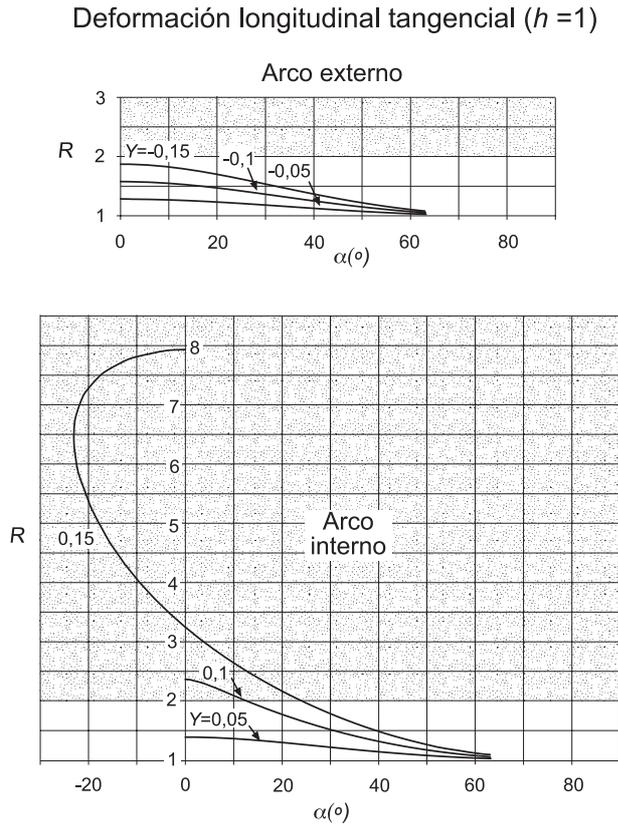
$$d = \frac{\sqrt{1 + 2Y \kappa(X)} - 1}{\kappa(X)} \quad (3)$$

donde  $\kappa$  es la curvatura de la línea guía  $l$  en el punto  $q$ .

De este modo, es posible conocer la posición de la imagen  $p$  de cualquier punto  $P$  de la capa original. Para ello, se determina primero la imagen  $q$  de un punto  $Q$  de la línea guía situado en la normal por  $P$  a dicha línea (sabiendo que la distancia  $OQ$  es igual a la longitud del arco  $Oq$ ) (Fig. 2). A continuación se obtiene el valor de  $d$  mediante la ecuación (3), y se lleva desde  $q$  en la dirección de la normal para determinar la posición de  $p$ . Con ello se puede determinar la forma de la capa plegada y la deformación en todos sus puntos. Un ejemplo, obtenido mediante ordenador, de la configuración final de una capa plegada por deformación longitudinal tangencial y

de la distribución de la deformación dentro de ella se muestra en la Fig. 3b.

La Fig. 4 muestra las gráficas  $R-\alpha$  para los arcos externo e interno de capas con distinto espesor plegadas por deformación longitudinal tangencial con una línea neutra parabólica y una relación altura/anchura del flanco igual a la unidad. Como puede observarse, para un buzamiento dado,  $R$  aumenta en los límites de la capa con el espesor de ésta, o lo que es lo mismo, con la distancia del punto considerado a la superficie neutra. Este aumento es mucho más acusado en el arco interno. Se observa también que el valor máximo de  $R$  se presenta en el punto de charnela, que es donde la curvatura es máxima. La zona con  $R > 2$  en una capa con un espesor determinado depende del valor de  $h$  alcanzado mediante deformación longitudinal tangencial, aunque se sitúa siempre en la zona de charnela del arco interno; en el caso de la Fig. 4, el clivaje sólo parece probable cuando el semiespesor de la capa es aproximadamente 0,1.



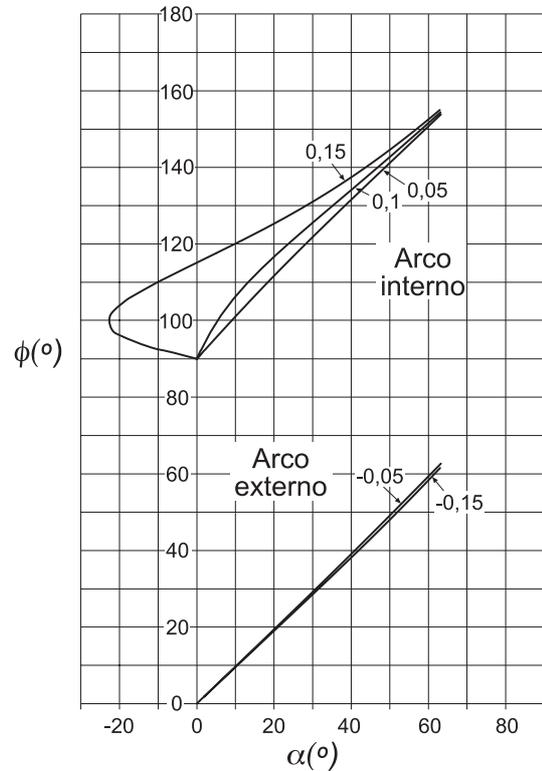
**Figura 4.** Curvas  $R$ - $\alpha$  para los arcos externos e internos de una capa plegada por deformación longitudinal tangencial. El significado de  $Y$  puede verse en la Fig. 3. El campo con  $R = 2$  aparece tramado.

La Fig. 5 muestra las gráficas  $\phi$ - $\alpha$  para los arcos externo e interno de capas con destinto espesor plegadas por deformación longitudinal tangencial con una línea neutra parabólica y una relación altura/anchura del flanco igual a la unidad. De la observación de las curvas se deduce que las direcciones del eje mayor de la elipse de deformación en el arco externo y del eje menor en el arco interno no son perfectamente tangenciales al correspondiente límite de capa. Esta desviación aumenta con el espesor y se hace particularmente grande en el arco interno de capas gruesas. Para un espesor dado, la desviación aumenta al aumentar la variación de curvatura de la línea neutra (Bobillo-Ares et al., 2000). Cuando la capa es muy gruesa, la desviación es máxima en las inmediaciones de la zona de charnela del arco interno. Esto se debe a que en esta zona la curvatura es grande y  $R$  aumenta mucho, a la vez que la deformación se hace fuertemente heterogénea para conservar el área, con lo cual la capa se hace más gruesa en la zona de charnela y aparece una protuberancia, desviándose mucho las direcciones principales de la deformación de las direcciones radial y tangencial (Fig. 3b). No es raro encontrar esta protuberancia en pliegues naturales y sugiere la ac-

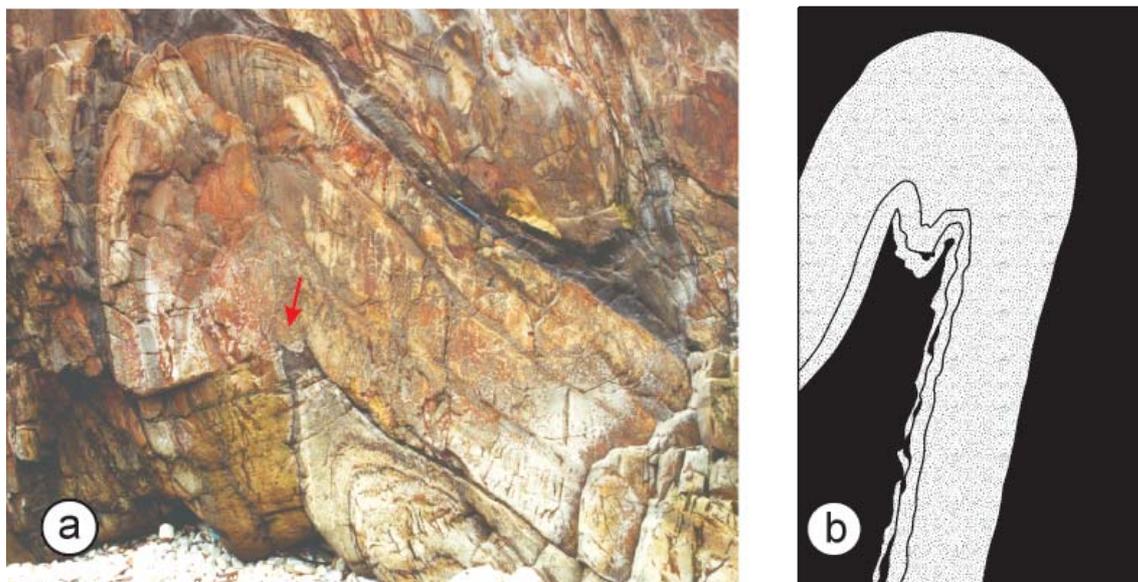
tuación de deformación longitudinal tangencial (Fig. 6). Desde un punto de vista mecánico, esta protuberancia puede aumentar la resistencia a la flexión en la zona de charnela, de forma que ello puede hacer que la progresión posterior del plegamiento se produzca por rotación de los flancos alrededor de los límites laterales de la protuberancia, lo que puede dar lugar a pliegues con la charnela muy redondeada en el arco externo de la capa competente o a pliegues con doble charnela. En este último caso, la charnela original desaparecería para convertirse en una línea de cresta o seno y aparecerían lateralmente dos nuevas charnelas.

Además de clivaje y protuberancias en la zona de charnela del arco interno de la capa plegada, no es raro encontrar en la zona de charnela del arco externo de capas plegadas naturales grietas de tensión con forma de cuña y abiertas hacia el arco externo de la capa (Fig. 7) o fallas inversas en el arco interno (Stočes y White, 1935, Fig. 227; Billings, 1954, p. 89, Fig. 76; de Sitter, 1965, p. 187, Fig. 123; Ramsay, 1967, p. 401, Fig. 7.65; Mattauer, 1973, p. 232, Fig. 11.2; Ramsay y Huber, 1987, pp. 458-459, Figs. 21.18 y 21.19; Price y Cosgrove, 1990, p. 251, Fig. 10.26; Hatcher, 1995, p. 308, Fig.

#### Deformación longitudinal tangencial ( $h = 1$ )



**Figura 5.** Curvas  $\phi$ - $\alpha$  para los arcos externos e internos de una capa plegada por deformación longitudinal tangencial.



**Figura 6.** Protuberancias desarrolladas por deformación longitudinal tangencial en el arco interno de la zona de charnela de una capa competente plegada. (a) Pliegue desarrollado en rocas cambro-ordovícicas predominantemente arenosas (Tapia de Casariego, Asturias); la protuberancia (o pliegue festoneado) se encuentra situada en la zona indicada por la flecha. (b) Dibujo realizado a partir de una fotografía de J. G. Ramsay (en Fleuty, 1987; fig. 4).

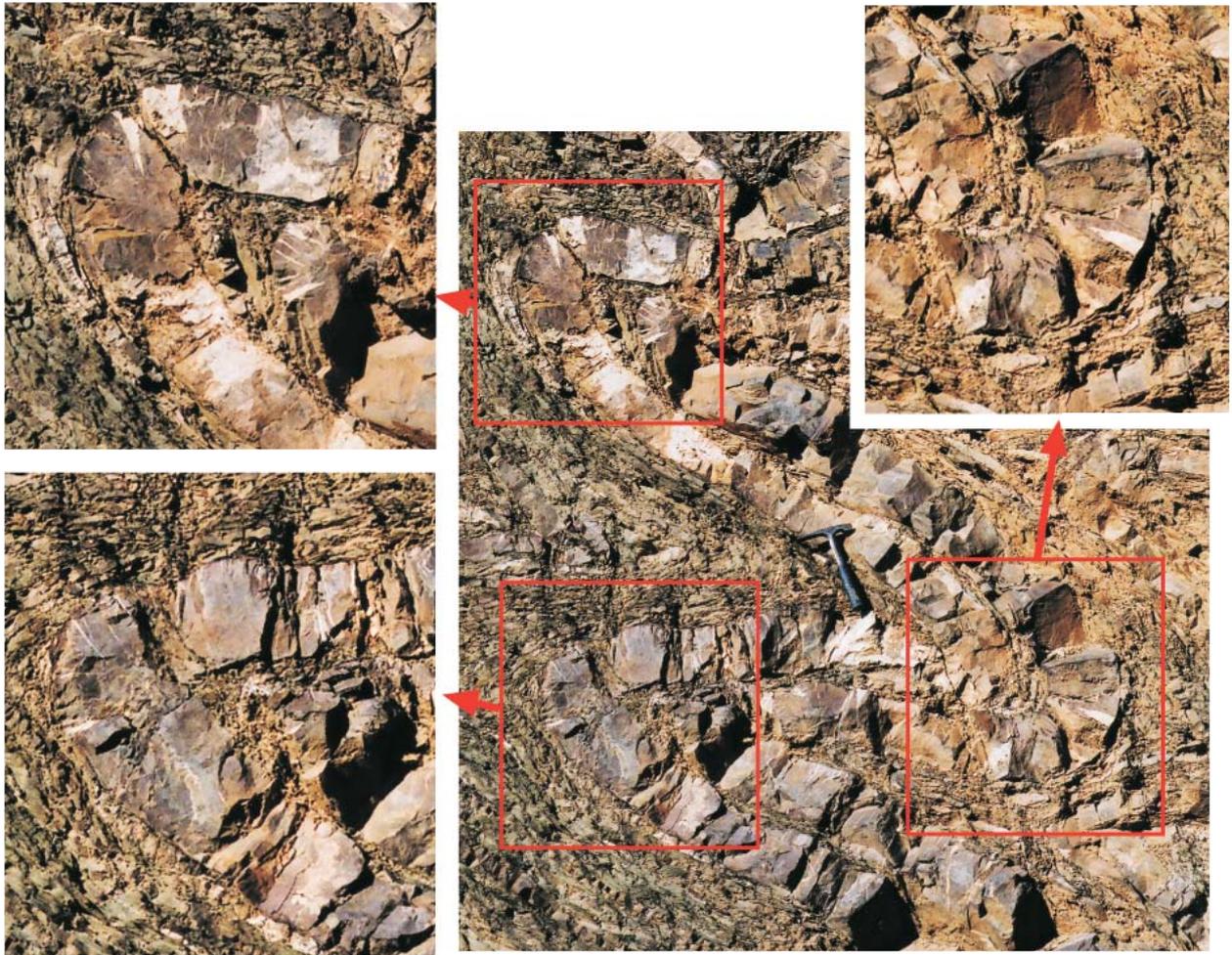
15.15; entre otros). Estas estructuras, producidas por estiramiento o acortamiento tangencial, son indicativas de la actuación de deformación longitudinal tangencial.

Como resultado del plegamiento mediante el mecanismo descrito hasta ahora, la línea neutra cambia de posición con relación a los límites de capa, aproximándose al arco externo, pero aparece siempre ligada a las mismas partículas durante el plegamiento. La actuación de este mecanismo genera problemas de compatibilidad de deformación en el arco interno a medida que la curvatura de la capa aumenta, de forma que cuando el radio de curvatura de la línea neutra es en algún punto menor o igual que el espesor de la capa, el plegamiento se hace imposible. Incluso en algunos casos particulares en los que el radio de curvatura es mayor que el espesor de la capa, el comportamiento reológico de las rocas puede hacer muy difícil acomodar la enorme deformación dúctil requerida por este mecanismo en la zona de charnela del arco interno. Un cambio en el mecanismo de plegamiento o en la distribución de la curvatura a través de la capa plegada, desarrollo de estructuras de acomodación tales como fracturas, o migración de la línea neutra hacia el arco interno son algunas de las soluciones propuestas para facilitar el desarrollo del plegamiento en estos casos (Ramsay, 1967, pp. 400-401; Ramsay y Huber, 1987, pp. 460-461). Otra posibilidad es el desarrollo de un clivaje en el que la actuación de disolución por presión conduzca a una disminución de área cerca del arco interno. Un cambio en la distribución de curvatura tendente a uniformizarla a lo largo del pliegue podría

dar lugar a problemas de compatibilidad de la deformación en los puntos de enlace entre flancos. En consecuencia, una solución probable es la migración de la línea neutra, de forma que la deformación interna en los dos límites de capa se mantenga similar.

Un modelo implicando migración de línea neutra ha sido desarrollado por Bobillo-Ares et al. (2000). En él, la línea neutra se sitúa equidistante de los límites de capa en la iniciación del plegamiento y luego migra, haciendo que la relación  $R$  se mantenga la misma en los dos puntos de los límites de capa situados en la misma normal a la línea neutra, es decir,  $R_{\text{interno}} = R_{\text{externo}}$ . Como consecuencia, la línea neutra final no está ligada a las mismas partículas que la línea neutra inicial, y no deriva del plegamiento de la línea inicialmente equidistante de los límites de capa. La migración de la línea neutra surge como un mecanismo para balancear la deformación interna en los arcos interno y externo. Por tanto, la suposición de que en ambos arcos existe una misma relación  $R$  corresponde al caso en el que el balance ha sido completado. Como consecuencia, los pliegues reales en los que ha tenido lugar migración de línea neutra representan probablemente una situación intermedia entre el caso sin migración analizado anteriormente y el modelo analizado por Bobillo-Ares et al. (2000). Uno de los resultados de este último modelo es que el desarrollo del plegamiento da lugar a un adelgazamiento de la capa en la zona de charnela.

La experiencia sugiere que el mecanismo de deformación longitudinal tangencial presenta una mayor parti-



**Figura 7.** Grietas en forma de cuña, rellenas de cuarzo, abriéndose hacia el arco externo de la zona de charnela en capas competentes (pliegues desarrollados en una alternancia de areniscas y pizarras carboníferas; Santo Toribio de Liébana, Potes, Cantabria).

cipación en el desarrollo del plegamiento cuanto mayor es la competencia de las capas plegadas. Estudios experimentales o del elemento finito parecen indicar que la zona de alargamiento tangencial está muy restringida a la vecindad de la zona de charnela del arco externo en capas muy competentes (Dieterich, 1969; Shimamoto y Hara, 1976; Gairola, 1978). En estos trabajos, aparecen evidencias de otros mecanismos que actúan en combinación con la deformación longitudinal tangencial, y que pueden contribuir a que los problemas de compatibilidad de deformación que plantea éste mecanismo se resuelvan.

Cuando existen rocas incompetentes intercaladas entre capas de rocas competentes, las primeras, al fluir de manera dúctil con facilidad, tienden a acomodar su geometría a la impuesta por las capas competentes. Como consecuencia, cuando se pliegan por deformación tangencial dos capas competentes separadas por una capa in-

competente, el arco externo de la capa competente coincide con el interno de la competente y sufrirá acortamiento tangencial, mientras el arco interno de la capa competente coincide con el externo de la competente y sufrirá alargamiento tangencial. Este mecanismo ha sido descrito por Ramsay y Huber (1987, pp. 448 y 462) y denominado “deformación longitudinal tangencial inversa”. Sin embargo, aún no se han establecido las condiciones precisas para que se puedan deducir las ecuaciones de transformación de puntos para este mecanismo y para poder conocer la correspondiente distribución de la deformación en el interior de la capa plegada.

*Deformación por cizalla simple heterogénea a lo largo de los límites de la capa: “flexural flow” y “flexural slip”*

Si se lleva a cabo un experimento sencillo plegando una pila de cartulinas, se observa que el plegamiento se desarrolla con facilidad gracias a que las hojas deslizan



**Figura 8.** Sencillo experimento realizado en un conjunto de cartulinas para ilustrar la distribución de la deformación interna en pliegues formados mediante cizalla simple heterogénea a lo largo de los límites de las capas. Obsérvese cómo la deformación es prácticamente nula en la zona de charnela y la relación  $R$  entre los ejes de la elipse de deformación aumenta con el buzamiento de las capas.

entre sí. Resulta intuitivo imaginar que si se intentara plegar una sola cartulina del mismo material y con el mismo espesor que la pila, el material ofrecería mucha mayor resistencia al plegamiento que en el primer caso descrito y los pliegues se desarrollarían con mayor dificultad. Por otro lado, si dibujamos un conjunto de círculos a lo largo del perfil original de las capas (Fig. 8), es decir, en la superficie definida por los bordes largos de las cartulinas, su configuración después del plegamiento nos describe, sobre el perfil del pliegue, una distribución de la deformación completamente diferente que en el caso de la deformación longitudinal tangencial, ya que se observa que la relación de aspecto  $R$  de la elipse de la deformación es prácticamente nula en la zona de charnela y crece progresivamente hasta alcanzar un valor máximo en las zonas de los flancos con mayor buzamiento. Si nos imaginamos que las cartulinas son muy gruesas, los desplazamientos entre ellas serán apreciables y el mecanismo de plegamiento recibe el nombre de “flexural slip”; en tal caso, la deformación del conjunto de las capas en el perfil del pliegue no podrá ser analizada como si fuera un medio continuo. Si, por el contrario, nos imaginamos que se trata de un conjunto de hojas finísimas de papel, el carácter discreto de los desplazamientos puede ser despreciado y la deformación puede ser analizada como si se tratase de un campo continuo de desplazamientos desarrollado en una sola capa mecánicamente anisótropa; en este caso, el mecanismo de plegamiento se denomina “flexural flow”. Sobre el perfil de la capa, se puede considerar que ésta está constituida por infinitas fibras paralelas a los límites de

capa que facilitan los desplazamientos en su dirección y los inhiben en cualquier otra.

*Flexural flow:* De acuerdo con el experimento descrito anteriormente, y asumiendo un campo continuo de desplazamientos sobre el perfil del pliegue, el “flexural flow” puede ser definido como un mecanismo de plegamiento en el que los desplazamientos se producen exclusivamente a lo largo de líneas paralelas a los límites de la capa. En este mecanismo, puede considerarse que cualquier porción elemental del perfil de la capa sufre una deformación por cizalla simple en la dirección de las fibras que pasan por el elemento y con intensidad caracterizada por un valor de  $\gamma$  igual al buzamiento de las fibras (en radianes), más una rotación de un ángulo igual al buzamiento (se considera como buzamiento nulo de referencia el de la capa en el punto charnela). Esto significa que la intensidad de la cizalla disminuye progresivamente hacia la charnela, donde se anula; además, la deformación por cizalla cambia de signo al pasar de un flanco a otro del pliegue. En consecuencia, la deformación dentro de la capa plegada puede ser considerada una cizalla simple heterogénea con una dirección de cizalla variable y paralela a los límites de capa. De la anterior definición se deducen las siguientes propiedades básicas para el “flexural flow”:

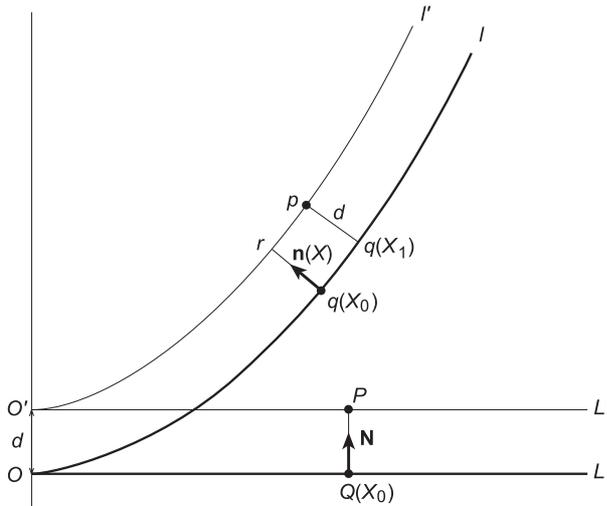
- la longitud del arco medida a lo largo de los límites de capa o a lo largo de las líneas paralelas a ellos se mantiene constante durante el plegamiento;
- el espesor ortogonal de la capa se mantiene constante a lo largo de la capa plegada y es igual al espesor original de ésta; y
- el área se mantiene constante durante el plegamiento en cualquier parte del perfil de la capa plegada.

Las anteriores condiciones son suficientes para determinar la imagen de cualquier punto de la configuración inicial. Consideremos el punto  $P$  de la Fig. 9; su imagen se obtiene encontrando el punto  $q(X_1)$  para el cual la longitud del arco  $O'p$  a lo largo de  $l'$  es  $X_0$ . En consecuencia,

$$p = q(X_1) + d\mathbf{n}(X_1). \quad (4)$$

Detalles sobre el cálculo de  $X_1$  pueden encontrarse en Bastida et al. (2003) y Bobillo-Ares et al. (2004). Un ejemplo de la forma de una capa plegada mediante este mecanismo y de la distribución de la deformación dentro de ella, obtenido mediante un ordenador, puede verse en la Fig. 3c.

La curva  $\phi$ - $\alpha$  para “flexural-flow” se muestra en la Fig. 10a. En este caso, la forma de la gráfica no depende del espesor ni de la curvatura de las fibras, y por tanto es independiente de la forma que presenten las funciones que



**Figura 9.** Imágenes  $q(X_0)$  y  $p$  de dos puntos  $Q(X_0)$  y  $P$  plegados por “flexural flow” y localizados en la línea guía y fuera de ella respectivamente.  $L$  y  $l$ , líneas guía original y deformada;  $L'$  y  $l'$ , líneas paralelas a la línea guía en la configuración inicial y en la deformada.

describen las fibras de la capa plegada. Únicamente debe cumplirse, para que sea posible el plegamiento, que el centro de curvatura de las fibras se sitúe siempre fuera de la capa plegada. La curva  $\phi$ - $\alpha$  muestra que los ejes mayores de la elipse de la deformación dibujan un abanico que es divergente para buzamientos inferiores a unos  $58^\circ$ , pasando a ser convergente para buzamientos mayores.

La gráfica  $R$ - $\alpha$  se muestra en la Fig. 10b, y es una curva creciente desde la charnela ( $R = 1$ ; deformación nula) hasta los flancos. La zona con desarrollo probable de clivaje ( $R = 2$ ) se presenta en las partes de los flancos con buzamiento superior a unos  $40^\circ$ .

**Flexural slip:** En este mecanismo los desplazamientos se concentran a lo largo de los límites entre las capas plegadas, por lo cual no puede ser analizado desde el punto de vista de la cinemática del medio continuo. Un cálculo sencillo del desplazamiento a lo largo de las capas plegadas por “flexural slip” ha sido llevado a cabo por Ramsay (1967, pp. 392-393). De acuerdo con este autor, si se tiene un conjunto de capas del mismo espesor, el valor del deslizamiento entre ellas viene dado por el producto del buzamiento (en radianes) por el espesor de la capa. Por consiguiente, para una capa dada, la distancia desplazada debe ser nula en la charnela y aumentará a medida que nos alejamos de ella y crece el buzamiento de los flancos. De acuerdo con esto, los límites entre capas actuarían como fallas inversas de estratificación con un desplazamiento decreciente hacia la charnela. La frecuencia con que se observan fibras de minerales sobre la estratificación en pliegues naturales, así co-

mo venas desplazadas por la estratificación, sugieren que el “flexural slip” debe ser un mecanismo frecuente.

Observado en detalle, el “flexural slip” es la consecuencia de la superposición de capas competentes sufriendo individualmente deformación longitudinal tangencial. El deslizamiento es entonces el resultado de la coincidencia espacial del arco externo alargado de una capa con el arco interno acortado de la capa adyacente, lo cual se producirá siempre que el rozamiento entre capas adyacentes permita el movimiento relativo entre capas. En estas condiciones, el deslizamiento entre capas depende principalmente de los espesores entre capas adyacentes.

#### Deformación homogénea

Este mecanismo no produce por sí solo pliegues y requiere la actuación de otro mecanismo capaz de producir plegamiento. No obstante, la deformación homogénea puede dar lugar a importantes modificaciones en la geometría de los pliegues (Ramsay, 1962, 1967; Mukhopadhyay, 1965). Además, en la mayoría de los casos, la aparición de una deformación de este tipo durante el plegamiento parece ser el resultado normal de la evolución progresiva de éste. Así, por ejemplo, un aumento excesivo de la curvatura de la línea guía o de la amplitud del pliegue puede hacer inviable la continuación del plegamiento por deformación longitudinal tangencial o por “flexural flow”, en cuyo caso, la deformación homogénea o casi homogénea puede ser el mecanismo más viable para proseguir el plegamiento. La deformación homogénea que puede operar durante el plegamiento puede ser muy variada, siendo útil hacer una primera distinción entre deformación irrotacional o deformación rotacional.

En el caso de deformación irrotacional, pueden destacarse varios tipos que difieren en la orientación de las direcciones principales de la deformación homogénea o en el momento en que ésta se produjo durante el plegamiento. En todos estos tipos, una vez fijadas las direcciones principales, la definición de la deformación homogénea requiere especificar en cada caso los dos valores principales de la deformación implicada ( $\sqrt{\lambda_1}$  y  $\sqrt{\lambda_2}$ ), o bien uno de estos valores y el cambio de área con la deformación. A continuación describiremos brevemente los tipos de deformación homogénea más destacables como mecanismos cinemáticos en el desarrollo del plegamiento.

**Acortamiento de la capa:** Tiene lugar en los estadios tempranos del plegamiento; su dirección de máximo acortamiento es perpendicular a la superficie axial. Combinando este mecanismo con los ya descritos, para que puedan producirse pliegues, tenemos los dos tipos siguientes:

Flexural flow ( $h=1$ )

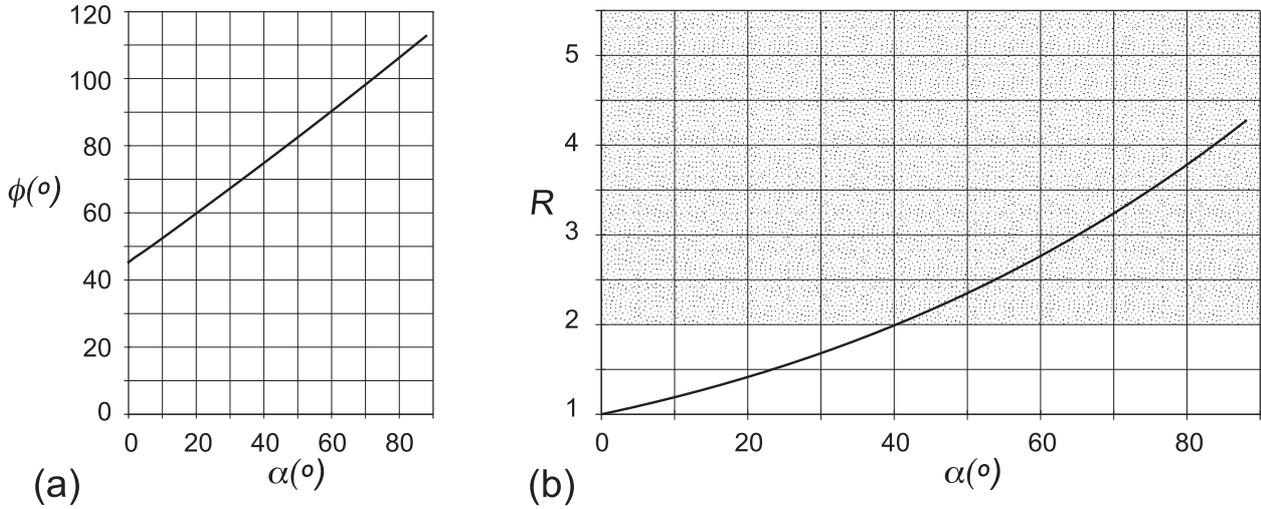


Figura 10. Curvas que muestran la variación del ángulo la inclinación  $\phi$  del eje mayor de la elipse de la deformación (a) y de la relación  $R$  de aspecto de la elipse de la deformación (b) en función del buzamiento  $\alpha$  de una capa plegada por “flexural flow”. El campo del diagrama  $R-\alpha$  con  $R > 2$  aparece tramado.

a) Acortamiento de la capa seguido de deformación longitudinal tangencial (Fig. 11): En el ejemplo de la Fig. 11a, las curvas  $\phi-\alpha$  del arco interno indican un modelo de distribución de la dirección del eje mayor de la elipse de la deformación convergente y aproximadamente radial. Sin embargo, en el arco externo las curvas presentan, para valores relativamente altos de  $|Y|$ , una importante discontinuidad, de modo que las direcciones de  $\lambda_1$  pasan de una distribución casi concéntrica a una en abanico convergente. Esta discontinuidad refleja el cambio en las direcciones de los ejes donde la relación  $R = 1$ . El buzamiento de la capa donde se produce la discontinuidad y el área donde se produce alargamiento tangencial aumentan con el progreso del plegamiento. Este resultado es similar al obtenido experimentalmente por Gairola (1978, Fig. 9) mediante el plegamiento de una capa de plastilina embebida en masilla. Este tipo de distribución de la deformación puede verse en la Fig. 11c. Con altos valores de  $R_{AC}$  (relación entre los ejes de la elipse de deformación asociada el acortamiento de la capa), mayores que los mostrados en la Fig. 11, la distribución de las direcciones del eje largo de la elipse de la deformación tiende a ser convergente y radial, tanto en el arco externo como en el interno; el valor concreto de  $R_{AC}$  para el que esto ocurre depende del valor de  $h$ .

Las curvas  $R-\alpha$  muestran diferentes modelos en los arcos interno y externo (Fig. 11b). En los arcos internos,  $R$  aumenta con la distancia original a la línea neutra y desde los flancos a la charnela. Construyendo curvas con distintos valores del acortamiento de la capa, puede

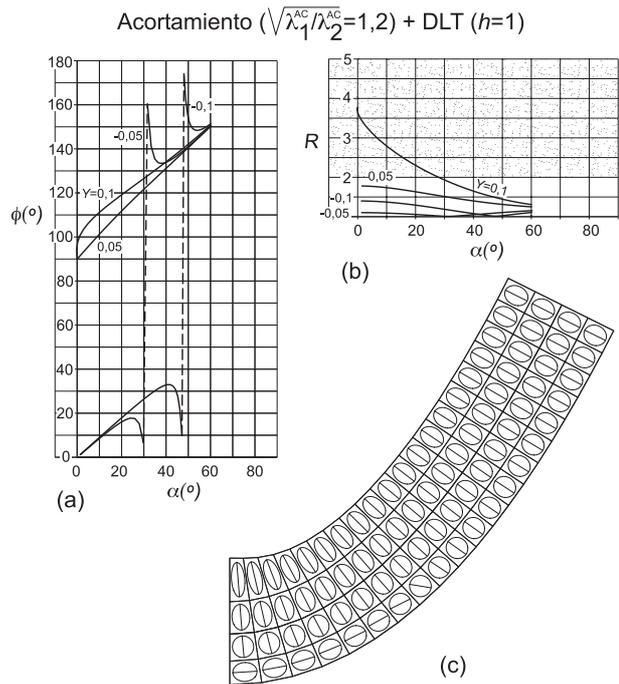
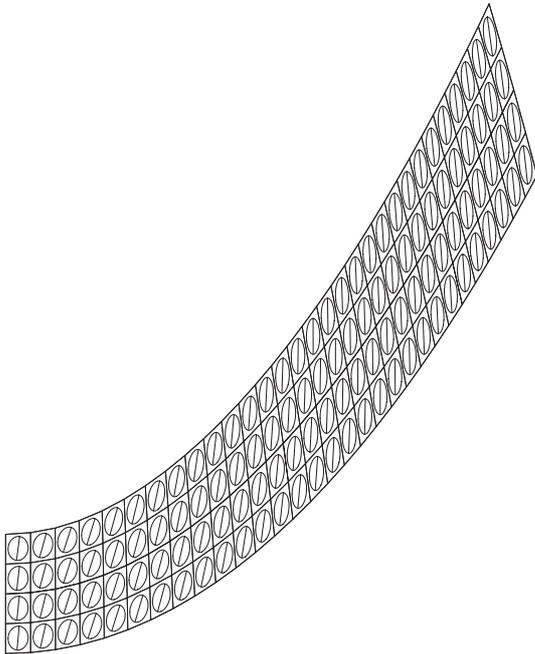


Figura 11. Características de la distribución de la deformación en una capa plegada por acortamiento homogéneo de la capa seguido de deformación longitudinal tangencial (DLT). Curvas  $\phi-\alpha$  (a) y  $R-\alpha$  (b) para los arcos externos e internos de la capa plegada. (c) Distribución de la deformación dentro de la capa plegada.

Acortamiento ( $\sqrt{\lambda_1^{AC}/\lambda_2^{AC}}=1,2$ ) + FF ( $h=1$ )



**Figura 12.** Forma de una capa y distribución de la deformación en ella después de un plegamiento, con línea guía parabólica, por acortamiento homogéneo seguido de "flexural flow" (FF).

comprobarse que el campo con  $R \geq 2$  aumenta al aumentar la intensidad del acortamiento de la capa. En el arco externo, las curvas exhiben un mínimo suave, que representa la transición del campo de estiramiento tangencial al campo de acortamiento tangencial. Cuando el valor del máximo acortamiento es mayor que el consi-

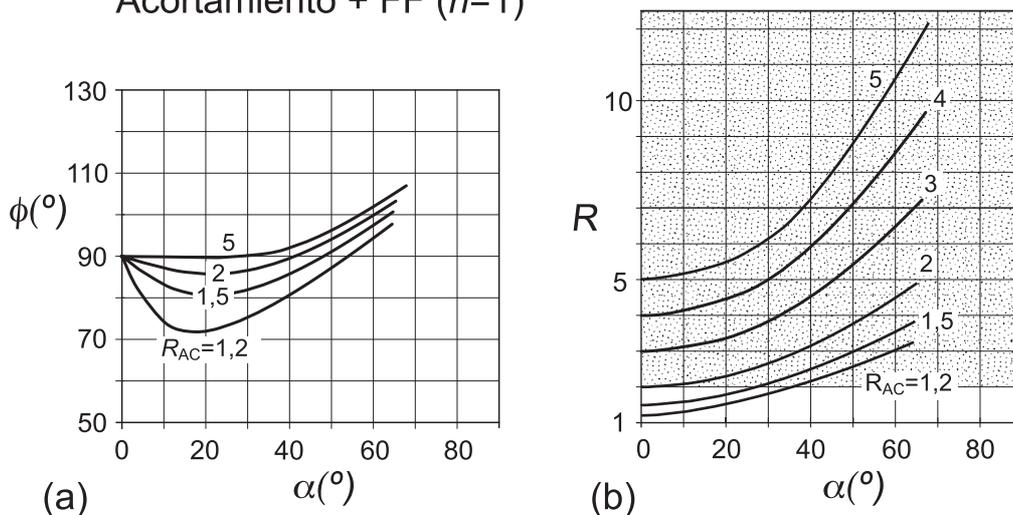
derado en la Fig. 11b, las curvas son ligeramente crecientes en el arco interno, y sólo aparece un campo con  $R \geq 2$  cuando la relación  $R_{AC} \geq 2$ .

b) Acortamiento de la capa seguido de "flexural flow": La geometría y distribución de la deformación en la capa plegada se muestran en la Fig. 12. Este caso ha sido analizado previamente por Ramsay y Huber (1987, p. 470, Fig. 21.34). De acuerdo con este autor y con la Fig. 13a, las curvas  $\phi-\alpha$ , correspondientes a diferentes relaciones entre los ejes de la elipse de acortamiento de la capa ( $R_{AC} = \sqrt{\lambda_1^{AC}/\lambda_2^{AC}}$ ), muestran un mínimo que tiende a desaparecer a medida que  $R_{AC}$  aumenta. Por otro lado, el diagrama  $R-\alpha$  para varios valores de  $R_{AC}$  (Fig. 13b) presenta curvas crecientes; además para un valor determinado de  $\alpha$ ,  $R$  aumenta al aumentar  $R_{AC}$ .

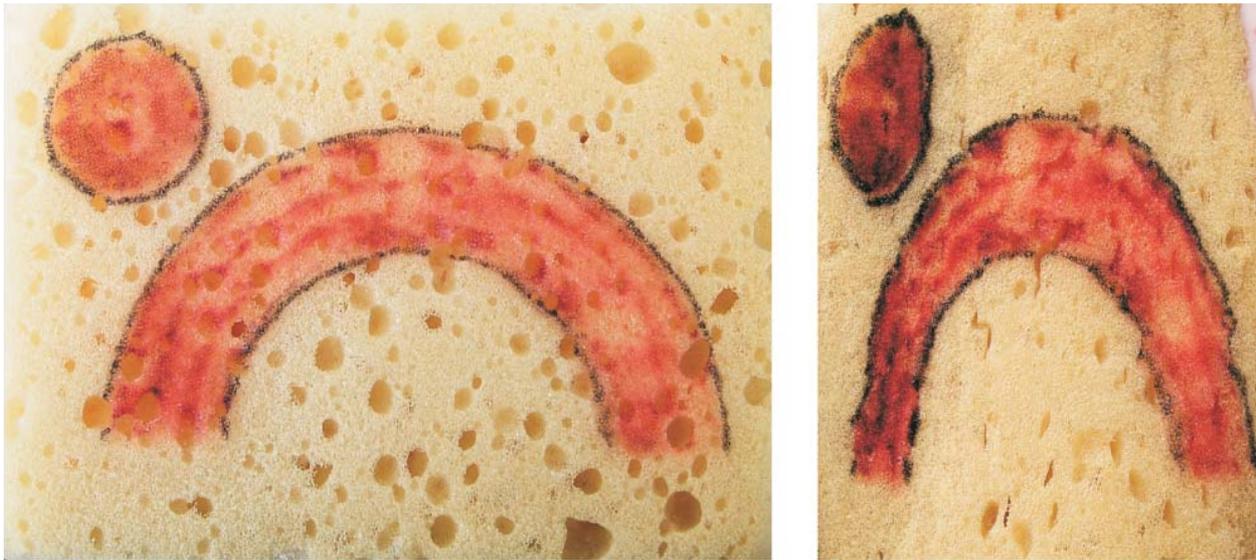
*Aplastamiento de pliegues:* Tiene lugar en los estadios finales del plegamiento; su dirección de máximo acortamiento es perpendicular a la superficie axial. Una sencilla experiencia que ilustra este mecanismo se muestra en la Fig. 14. Igualmente que en el caso del acortamiento de la capa pueden definirse dos modalidades:

a) Deformación longitudinal tangencial más aplastamiento (Fig. 15): Las curvas  $\phi-\alpha$  (Fig. 16a) para dos valores de la intensidad del aplastamiento ( $R_{AC} = \sqrt{\lambda_1^{AC}/\lambda_2^{AC}}$ ) muestran que en el arco externo la distribución de ejes mayores de la elipse de deformación se transforma con el aplastamiento en una distribución divergente, que pasa a ser muy próxima a una de plano axial cuando el aplastamiento es grande. En el arco interno la distribución es convergente, aunque para alta intensidad del aplastamiento, pasa a ser muy próxima a la de plano axial. Las curvas  $R-\alpha$  (Fig. 16b) son crecientes para el arco externo y decrecientes para el interno. En el arco

Acortamiento + FF ( $h=1$ )



**Figura 13.** Curvas  $\phi-\alpha$  (a) y  $R-\alpha$  (b) para pliegues formados por acortamiento homogéneo seguido de "flexural flow" (FF).



(a)

(b)

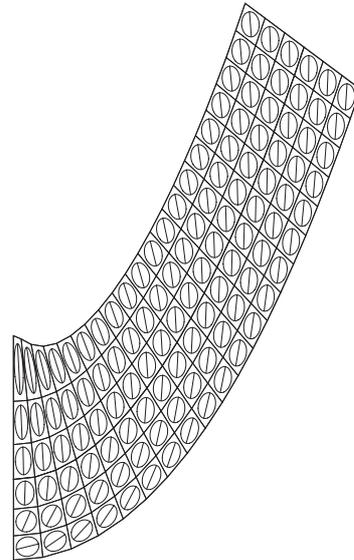
**Figura 14.** Sencillo experimento realizado en una esponja sintética que ilustra el mecanismo de aplastamiento (b) de pliegues previos paralelos (a). Debido a la naturaleza del material, que presenta una gran porosidad, el aplastamiento se ha producido en este caso mediante una importante reducción de volumen.

interno, el campo con  $R > 2$  aumenta con el aumento del aplastamiento hasta que todo el arco se sitúa dentro de dicho campo. En el arco externo, la deformación interna es mucho menor. En este caso, el arco completo queda dentro del campo con  $R > 2$  cuando la intensidad del aplastamiento es muy grande, penetrando progresivamente el arco en dicho campo desde el flanco hacia la charnela y desde la línea neutra hacia el límite de la capa, al revés de lo que ocurre en el arco interno.

b) “Flexural flow” más aplastamiento (Fig. 17): Este caso corresponde exactamente al modelo de pliegues paralelos aplastados descrito por Ramsay (1962, 1967, pp. 411-415). En la Fig. 18a se muestra un conjunto de curvas  $\phi-\alpha$  que corresponden a diversos valores de  $R_{AP}$ . Cada curva está caracterizada por la presencia de un mínimo que se hace más suave y aparece más a la derecha a medida que aumenta el valor de  $R_{AP}$ . En consecuencia, el patrón de direcciones de los ejes mayores de la elipse de la deformación es en abanico divergente para buzamientos bajos o medios de la capa y convergente para buzamientos elevados; además, a medida que  $R_{AP}$  aumenta, el patrón de ejes mayores se aproxima al de plano axial. Por otro lado, las curvas  $R-\alpha$  (Fig. 18b) son crecientes y presentan los mayores incrementos de  $R$  en la parte de buzamientos más elevados.

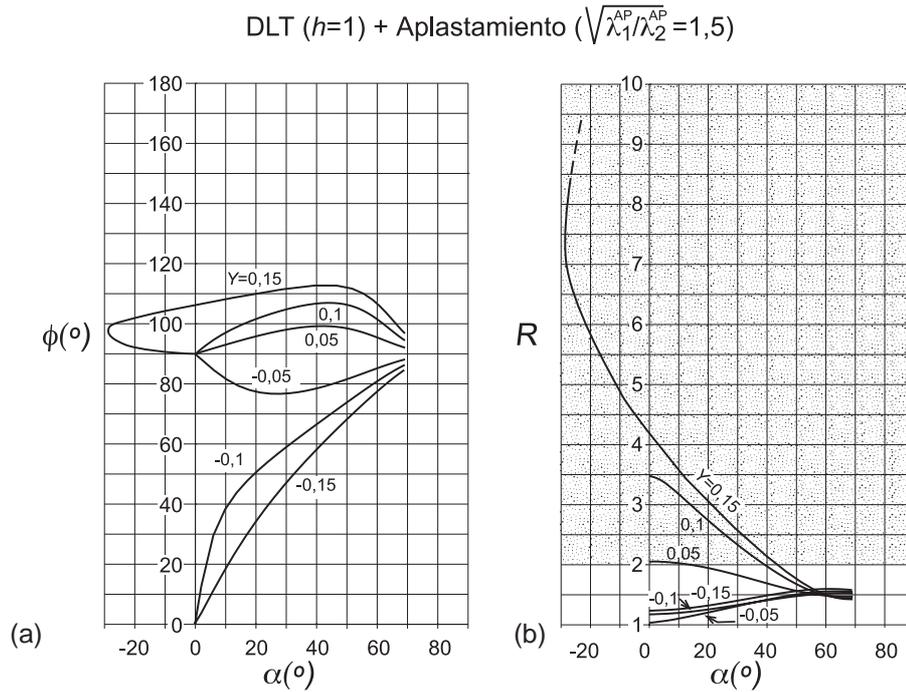
Aunque la distinción entre acortamiento de la capa y aplastamiento de pliegues se hace evidente en los casos anteriores, en casos reales en los que la superposición de la deformación homogénea es más complicada y puede

DLT ( $h=1$ ) + Aplastamiento ( $\sqrt{\lambda_1^{AP}/\lambda_2^{AP}}=1,5$ )

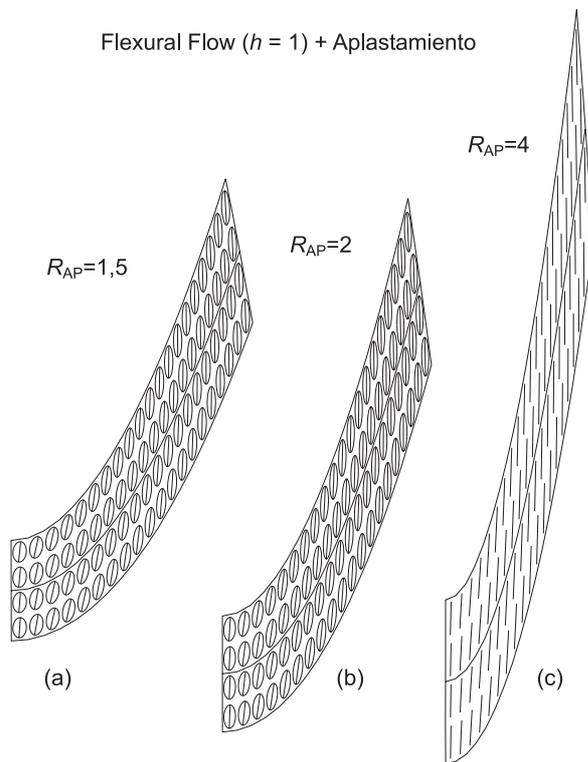


**Figura 15.** Distribución de la deformación interna en un pliegue formado por deformación longitudinal tangencial (DLT) más aplastamiento.

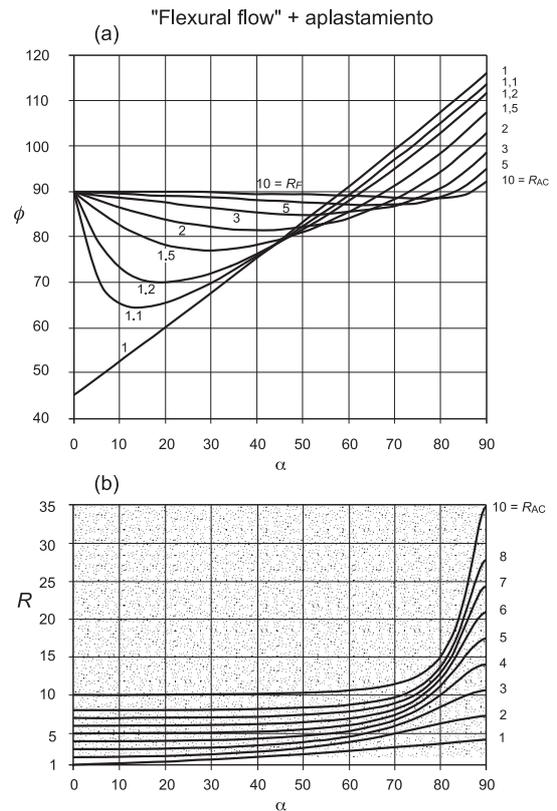
tener lugar en estadios intermedios del desarrollo del plegamiento, la distinción entre acortamiento y aplastamiento puede ser muy difícil de realizar y carecer por ello de sentido. Asimismo, en los apartados anteriores, se ha asumido que la dirección de máximo acortamiento es perpendicular o longitudinal a la traza axial del plie-



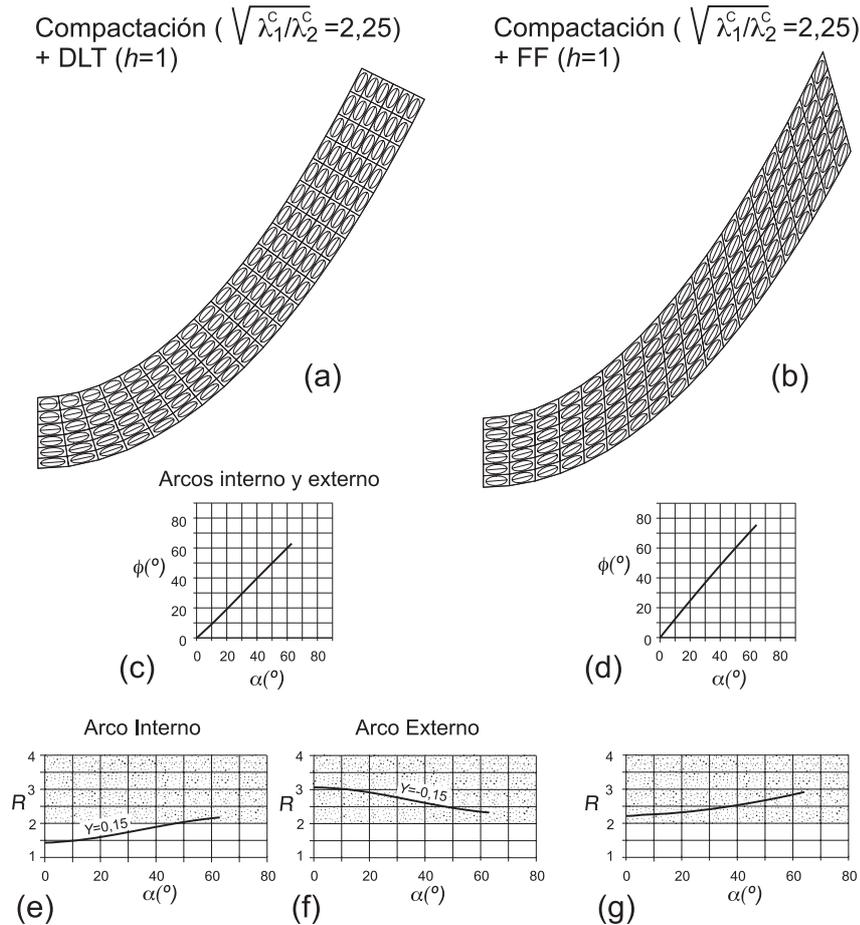
**Figura 16.** Curvas  $\phi$ - $\alpha$  (a) y  $R$ - $\alpha$  (b) para los arcos externos e internos de una capa plegada por deformación longitudinal tangencial (DLT) más aplastamiento. El campo del diagrama  $R$ - $\alpha$  con  $R \geq 2$  aparece tramado.



**Figura 17.** Forma de la capa plegada y distribución de la deformación en tres flancos con línea guía parabólica y plegados por flexural flow (FF) y aplastamiento. En (a) y (b) se ha dibujado la forma y la orientación de las elipses de deformación, mientras que en (c) solamente se ha dibujado, por problemas de espacio, la orientación y la longitud de los ejes mayores de dichas elipses.



**Figura 18.** Curvas  $\phi$ - $\alpha$  (a) y  $R$ - $\alpha$  (b) para pliegues formados por "flexural flow" y aplastados con diferentes intensidades. El campo del diagrama  $R$ - $\alpha$  con  $R \geq 2$  aparece tramado.



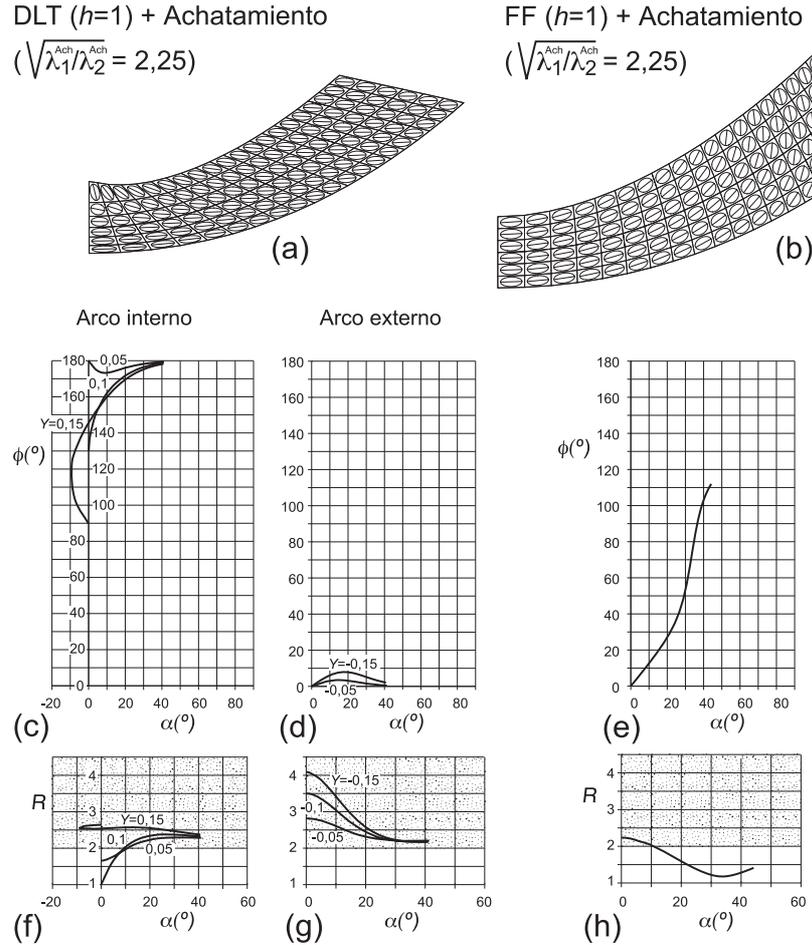
**Figura 19.** Distribución de la deformación interna en pliegues formados por compactación seguida por deformación longitudinal tangencial (DLT) [(a), (c), (e) y (f)], y por compactación seguida por “flexural-flow” (FF) [(b), (d) y (g)]. El campo del diagrama  $R$ - $\alpha$  con  $R \geq 2$  aparece tramado.

gue. Pueden considerarse también casos con la dirección de máximo acortamiento oblicua a la traza axial; así, por ejemplo, Hudleston (1973) ha considerado el caso de un aplastamiento oblicuo, el cual conduce al desarrollo de pliegues asimétricos.

**Compactación de la capa:** En este caso, la deformación homogénea no se encuentra generalmente asociada con el plegamiento progresivo, siendo una respuesta a un proceso diferente, generalmente asociado a la diagénesis de la roca. La compactación implica un adelgazamiento de la capa previo al plegamiento. La superposición de deformación longitudinal tangencial o “flexural flow” sobre la capa compactada da lugar a pliegues con la misma forma de la capa que cuando estos dos mecanismos actúan sin compactación previa (Fig. 19a y b). No obstante, la compactación influye notablemente en el patrón de distribución de la deformación interna final en la capa plegada (Fig. 19). Así, para deformación longitudinal tangencial superpuesta a compactación, las curvas  $\phi$ - $\alpha$  son crecientes y, si la compactación es suficientemente grande, se alcanza

una distribución de los ejes mayores de las elipses de deformación tangencial a los dos límites de la capa plegada (Figs. 19a y c). En el caso de “flexural flow” superpuesto, la curva  $\phi$ - $\alpha$  es también creciente, pero el patrón de los ejes mayores, aunque fuertemente divergente, no es tangencial, desviándose progresivamente de este patrón a medida que aumenta el buzamiento del flanco (Fig. 19b y d). En el caso de deformación longitudinal tangencial superpuesta, la curva  $R$ - $\alpha$  es creciente para el arco interno (Fig. 19e) y decreciente para el arco externo (Fig. 19f), alcanzándose valores de  $R$  notablemente mayores en éste que en aquél. En el caso de “flexural flow” superpuesto, la curva  $R$ - $\alpha$  es creciente (Fig. 19g), presentando una forma similar a la del arco interno de la deformación longitudinal tangencial, aunque se distingue de ella por corresponderle valores notablemente mayores de  $R$  para una misma intensidad de la compactación previa.

**Achatamiento de pliegues:** Consiste en una deformación homogénea irrotacional posterior al plegamiento y con un acortamiento máximo en la dirección de la traza

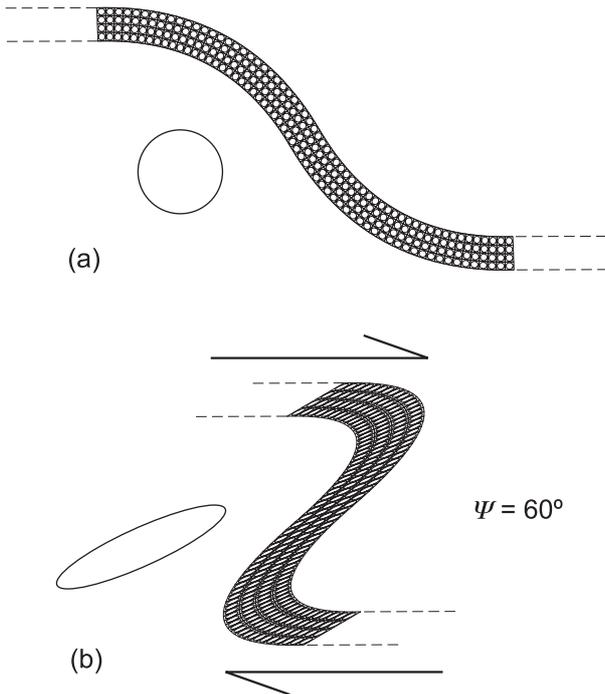


**Figura 20.** Distribución de la deformación interna en pliegues formados deformación longitudinal tangencial (DLT) más achatamiento [(a), (c), (d), (f) y (g)], y “flexural-flow” (FF) más achatamiento [(b), (e) y (h)]. El campo del diagrama  $R$ - $\alpha$  con  $R \geq 2$  aparece tramado.

axial. En este caso, la capa plegada muestra un adelgazamiento en la zona de charnela con relación a los flancos (Fig. 19a y b), tanto en el caso de deformación longitudinal tangencial como en el caso de “flexural flow”. No obstante, en el primer caso puede aparecer un engrosamiento local en la zona de charnela si la capa es suficientemente gruesa (Fig. 20a). Las curvas  $\phi$ - $\alpha$  para pliegues formados por deformación longitudinal y achatados presentan un patrón de distribución de ejes mayores de la elipse en la capa plegada fuertemente convergente para el arco interno (Fig. 20c) y fuertemente divergente para el arco externo (Fig. 20d), si bien en este último caso los ejes no se desvían mucho de la perpendicularidad a la traza axial. En pliegues por “flexural flow” achatados, la curva  $\phi$ - $\alpha$  es fuertemente creciente (Fig. 20e), dominando un patrón divergente de ejes mayores. Para una misma intensidad del achatamiento, las curvas  $R$ - $\alpha$  (Fig. 20f, g y h) muestran en general un mayor nivel de valores de  $R$  en los pliegues por deformación longitudinal achatados que en los pliegues por “flexural flow”

achatados; en aquéllos los mayores valores de  $R$  se dan en la zona de charnela del arco externo.

*Deformación homogénea rotacional:* Aunque a veces puede suponerse como una buena aproximación que la modificación en la geometría de pliegues es el resultado de la superposición de una deformación homogénea irrotacional sobre pliegues previos, en la mayoría de los casos la deformación que se superpone es probablemente rotacional. En este caso, las direcciones principales de la deformación en la configuración deformada final no coinciden con los de la configuración inicial y la evolución progresiva del plegamiento es más complicada que la de los casos descritos hasta el momento. Este tipo de deformación es probablemente una de las principales fuentes de asimetría de los pliegues. La especificación de este tipo de deformación, supuesta bidimensional, requiere conocer la orientación de los ejes de referencia y los cuatro componentes del correspondiente gradiente de deformación (los coeficientes de las ecuaciones de transformación). El modo más sencillo de deformación



**Figura 21.** Distribución de la deformación en un pliegue formado por deformación longitudinal tangencial (a) seguida de una deformación por cizalla simple (b) con cizalla angular  $\psi$  de  $60^\circ$  actuando en la dirección indicada.

homogénea rotacional es la cizalla simple, que es un tipo de deformación que se ha supuesto muy importante en muchos medios geológicos, como, por ejemplo, en zonas de cizalla dúctiles, por ser el que menos problemas de compatibilidad de deformación conlleva (véase, por ejemplo, Ramsay y Huber, 1987, pp. 610-613). En este caso, la deformación queda completamente definida por dos parámetros: la dirección de cizalla y la deformación por cizalla  $\gamma$  en dicha dirección. La deformación por cizalla simple homogénea ha sido considerada por Hudleston (1977) para explicar los pliegues que a menudo se desarrollan en los glaciares y por Ramsay *et al.* (1983) para explicar la geometría de algunos Mantos Helvéticos. Modelos algo más complicados, implicando una deformación rotacional resultante de la superposición de un cizalla pura sobre una cizalla simple, han sido también aplicados en algunos casos (por ejemplo, Dietrich y Casey, 1989, en los Mantos Helvéticos). Un ejemplo de pliegue formado por deformación longitudinal tangencial seguida por la superposición de cizalla simple homogénea se muestra en la Fig. 21.

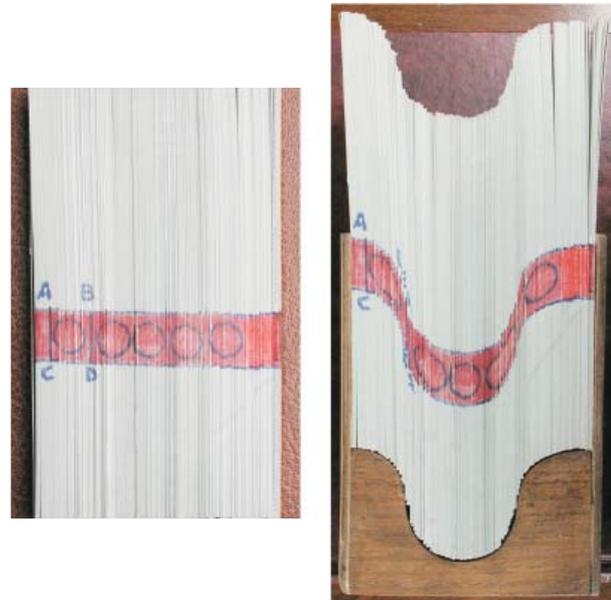
*Deformación por cizalla simple heterogénea a través de las capas*

La idea de este mecanismo surge de una experiencia muy sencilla. Supongamos una pila de cartulinas y dibujemos sobre sus cantos largos, y perpendicularmente a

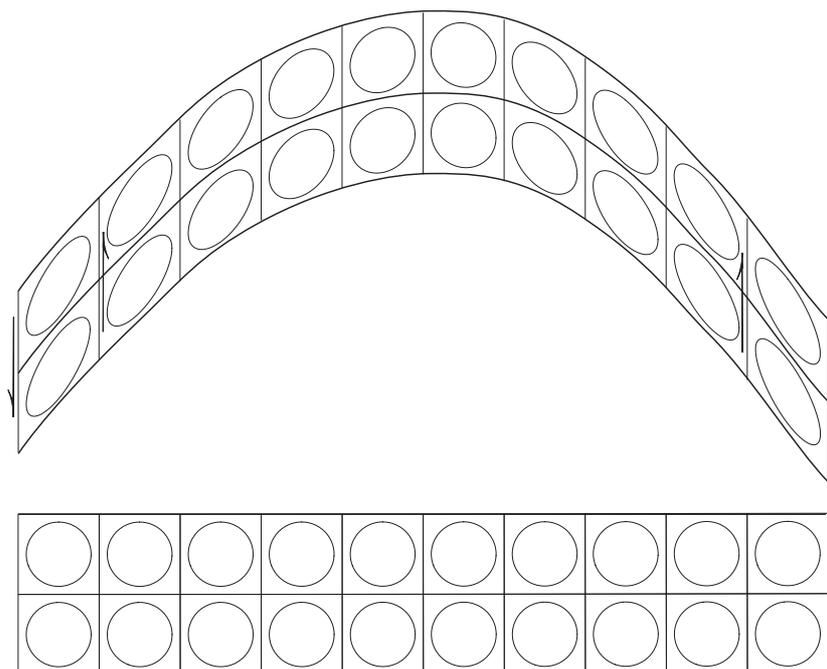
los planos de las cartulinas, el perfil de una capa plana. Introduzcamos a continuación las cartulinas en un molde de madera o de hierro con dos paredes laterales planas verticales y una base formada por una superficie cilíndrica (Fig. 22), de forma que los planos de las cartulinas sean paralelos a las paredes del molde y sus cantos cortos tengan la dirección axial de la superficie cilíndrica. Como consecuencia, el perfil de la capa dibujada previamente adquirirá una forma plegada. Los desplazamientos implicados en este plegamiento se producen únicamente en la dirección vertical, de forma que un punto, cuyas coordenadas originales son  $(X, Y)$ , se transforma con la deformación en un punto, cuyas coordenadas  $(x, y)$  vienen dadas por:

$$\begin{aligned} x &= X \\ y &= f(X) + Y \end{aligned} \quad (5)$$

donde  $f(X)$  es una función continua dentro del intervalo en el que se define el plegamiento, que determina la forma de las superficies plegadas. La deformación implicada en el plegamiento es una cizalla simple heterogénea paralela al eje  $Y$  con una deformación por cizalla  $\gamma$  variable. En la Fig. 23 se muestra un ejemplo de plegamiento por este mecanismo. Los pliegues así formados presentan las siguientes propiedades:



**Figura 22.** Sencillo experimento realizado introduciendo un conjunto de tarjetas en una carcasa de madera con fondo cilíndrico, para simular un pliegue formado mediante deformación por cizalla simple heterogénea a través de las capas.



**Figura 23.** Pliegue formado mediante deformación por cizalla simple heterogénea a través de las capas. La dirección de cizalla es perpendicular a los límites de la capa inicial.

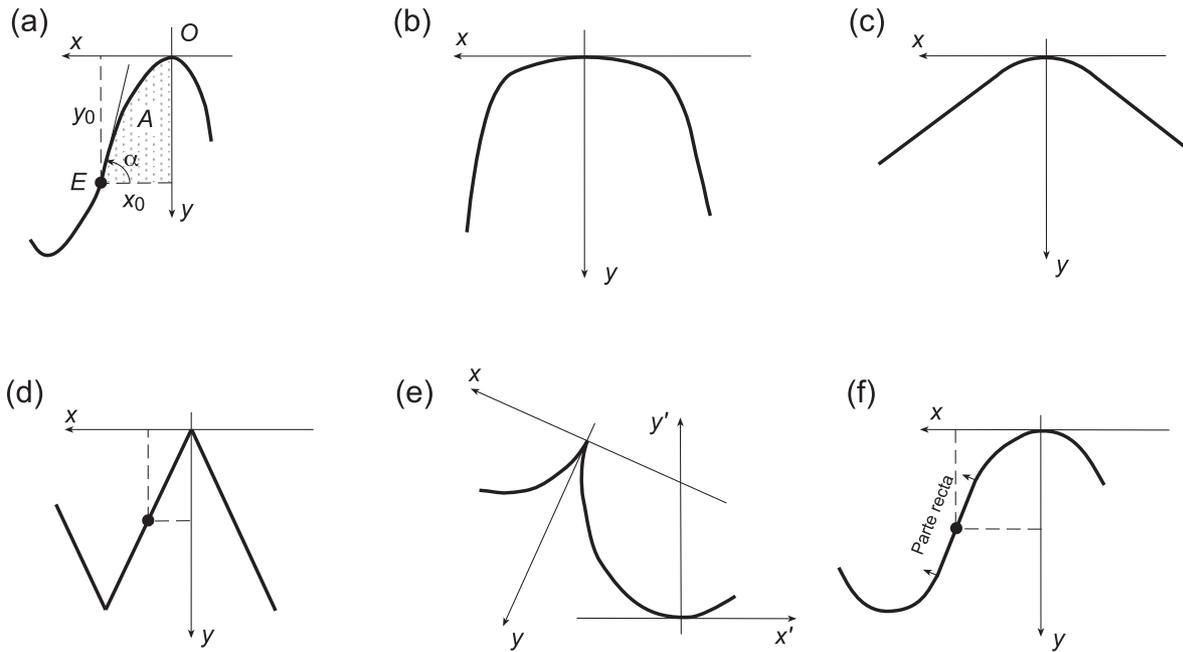
– El desplazamiento para puntos con el mismo valor de  $X$  es constante, lo cual significa que las curvas que definen los límites de la capa plegada son iguales, de forma que una puede obtenerse por una traslación de la otra en la dirección  $Y$ . El espesor  $T$  de la capa plegada medido paralelamente a la superficie axial es constante a través de toda la capa plegada e igual al espesor original de la capa. Esto es así porque la dirección  $Y$  es la de cizalla y por tanto es una línea sin deformación longitudinal final. Un pliegue con estas características se denomina “pliegue similar”.

– Los segmentos paralelos al eje  $Y$  mantienen invariable la distancia entre ellos, lo cual significa que no existe acortamiento final en la dirección del eje  $x$ , es decir, en la dirección perpendicular al plano axial.

Este mecanismo, aunque posible geoméricamente, ha sido fuertemente objetado desde el punto de vista mecánico. En el pasado se pensó que los desplazamientos en la dirección de cizalla se producían a lo largo del clivaje de plano axial, lo que hacía posible este mecanismo. Sin embargo, después de numerosas medidas de deformación interna en rocas con clivaje pizarroso (véase, por ejemplo, Wood, 1974), se admite que los planos de clivaje son aproximadamente perpendiculares a la dirección de máximo acortamiento final. Esto implica que los pliegues con clivaje de plano axial presentan una distribución de orientaciones de los ejes de la elipse de la deformación que es incompatible con este mecanismo de

cizalla simple heterogénea a través de las capas. En este mismo sentido, la presencia de un clivaje de plano axial es incompatible con una ausencia de acortamiento en la dirección perpendicular al plano axial. Ramsay (1967, pp. 422-423) superpuso un aplastamiento a la deformación por cizalla heterogénea a través de las capas; no obstante, la distribución de la deformación interna obtenida de este modo no está tampoco de acuerdo con la que cabe esperar a partir de un clivaje de plano axial asociado al plegamiento.

El cambio de sentido de la deformación por cizalla, implicado por la deformación por cizalla simple heterogénea a través de las capas, al pasar de un flanco a otro del pliegue es también difícil de explicar mecánicamente. Para resolver este problema, Ragan (1969) supuso una dirección de cizalla originalmente oblicua a los límites de la capa; no obstante, la distribución de la deformación interna a través de la capa plegada tampoco es acorde con los modelos de clivaje comúnmente frecuentes en los pliegues naturales. De acuerdo con lo expuesto, puede afirmarse que la deformación por cizalla simple heterogénea a través de las capas es un mecanismo de plegamiento geoméricamente posible, pero mecánicamente improbable. Deformación por cizalla simple con una cierta heterogeneidad actúa probablemente en muchos casos a través de las capas durante el desarrollo del plegamiento, pero es improbable que pueda explicar por sí sola la geometría del plegamiento, requiriendo la



**Figura 24.** Sistema de referencia y elementos geométricos utilizados para el análisis geométrico de las capas plegadas. (a) caso general:  $O$ , punto de charnela;  $E$ , punto de enlace;  $A$ , área encerrada bajo el perfil del flanco. (b) pliegue de doble charnela. (c) pliegue con un arco circular. (d) pliegue chevron. (e) pliegue festoneado. (f) pliegue con un segmento recto en el flanco.

existencia de pliegues previos, aunque estos puedan presentar una amplitud pequeña; así lo han supuesto, por ejemplo, Ramsay *et al.* (1983) para explicar la geometría del manto de Morcles (Suiza).

### Mecanismos de plegamiento y geometría de los pliegues

El estudio teórico y experimental de los mecanismos de plegamiento permite conocer las características estructurales de los pliegues formados por cada mecanismo y aplicar este conocimiento, mediante análisis geométrico comparativo, al estudio cinemático de pliegues naturales. Para llevar a cabo este análisis, interesa considerar aquellos rasgos, relacionados con los “inputs” y los “outputs” de los modelos, que pueden ser obtenidos mediante medidas en pliegues naturales. En dos dimensiones, estos rasgos pueden ser divididos en tres categorías, según estén referidos al perfil de las superficies plegadas aisladas, a la geometría del perfil de las capas plegadas, o a la posición de los pliegues.

#### *Análisis del perfil de superficies plegadas aisladas*

Para caracterizar y clasificar superficies plegadas se han utilizado diversos parámetros. A modo de ejemplo, uno muy usado es el ángulo entre flancos (Fleuty, 1964). Sin embargo, desde el punto de vista del análisis cinemático del plegamiento interesa describir las

superficies plegadas, y en particular las líneas guía, mediante una función matemática que ajuste adecuadamente en cada caso el perfil de la superficie plegada. Esto se debe a que las ecuaciones de transformación de puntos implicadas en los mecanismos de plegamiento requieren el uso de una función para describir la línea guía. Las funciones usadas deben reunir algunas condiciones, ya que el perfil de una superficie plegada debe poder ser usado como un objeto matemático para que su análisis cinemático sea posible. Dado que un parámetro básico en la deformación longitudinal tangencial es la curvatura ( $\kappa$ ) de la línea guía [ecuación (3)], es necesario que las funciones usadas sean al menos dos veces derivables. Es conveniente también que las funciones usadas para ajustar pliegues con un solo punto de charnela presenten un aumento de curvatura continuo hasta alcanzar un máximo en el punto de charnela. Finalmente, dado que el análisis cinemático teórico implica el cambio, durante el plegamiento, de los parámetros que definen la función que define la línea guía, es conveniente que las funciones a usar estén definidas por un número pequeño de parámetros, ya que de otro modo el análisis puede ser inviable.

Para el análisis de perfiles de superficies plegadas es necesario definir un sistema de referencia. El sistema elegido está constituido por la tangente al perfil en el punto de charnela (eje  $x$ ) y su normal por dicho punto (eje  $y$ ) (Fig. 24a). En el caso de pliegues de doble charnela, el

origen de coordenadas es el punto de la superficie plegada que equidista de ambas charnelas (punto de cierre de Twiss, 1988) (Fig. 24b), mientras que en el caso de un pliegue con un arco de curvatura constante, el origen de coordenadas se sitúa en el punto medio de dicho arco (Fig. 24c). En pliegues chevron y festoneados, el eje  $y$  es la bisectriz del ángulo entre flancos y el eje  $x$  es perpendicular al eje  $y$  y por el vértice de la superficie plegada (Fig. 24d y e).

La unidad considerada para el análisis de las superficies plegadas es generalmente el perfil de un flanco del pliegue. La definición de flanco dada al comienzo de este trabajo es problemática en los casos en los que el punto de inflexión no está bien definido, tales como en los pliegues con un segmento recto en el flanco, pliegues chevron y pliegues festoneados. En los dos primeros casos, el punto de enlace entre pliegues adyacentes es definido por el punto medio del segmento recto (Fig. 24d y f), mientras que en el tercer caso, el arco entre el vértice y la charnela adyacente puede ser considerado como un flanco para los dos pliegues adyacentes. En este caso, un mismo flanco puede ser analizado con dos sistemas de referencia diferentes, uno para cada pliegue (Fig. 24e).

Dado que es difícil encontrar una familia única de funciones que permita aproximar adecuadamente todas las morfologías de pliegues comunes, es útil dividir los pliegues en dos categorías: pliegues aloclinales (ángulo entre flancos  $> 0$ ) y pliegues isoclinales (ángulo entre flancos  $= 0$ ). Los pliegues con ángulo entre flancos  $< 0$  son raros y no serán considerados aquí.

Se han utilizado varias familias diferentes de funciones para describir los pliegues. Diversos autores han utilizado series de Fourier para describir flancos aislados de pliegues (Chapple, 1968; Stabler, 1968; Hudleston 1973; Ramsay y Huber, 1987, pp.314-316; Stowe, 1988). No obstante, cuando se usan pocos coeficientes, estas series dan una aproximación muy grosera a los perfiles de superficies plegadas, y cuando se usan muchos, aunque permiten una buena aproximación global, no ajustan bien importantes propiedades locales del perfil, tales como la curvatura y la pendiente. Además, los frecuentes puntos de inflexión y valores extremos que suele presentar este tipo de curvas dentro del intervalo de ajuste hacen inviable el análisis cinemático.

Bastida et al. (1999, 2003) y Bobillo-Ares et al. (2004) han utilizado funciones de la forma  $y = y_0 f(x)^n$  ( $n > 0$ ). Entre ellas, la más sencilla es aquella en la que  $f(x) = x/x_0$ , es decir,

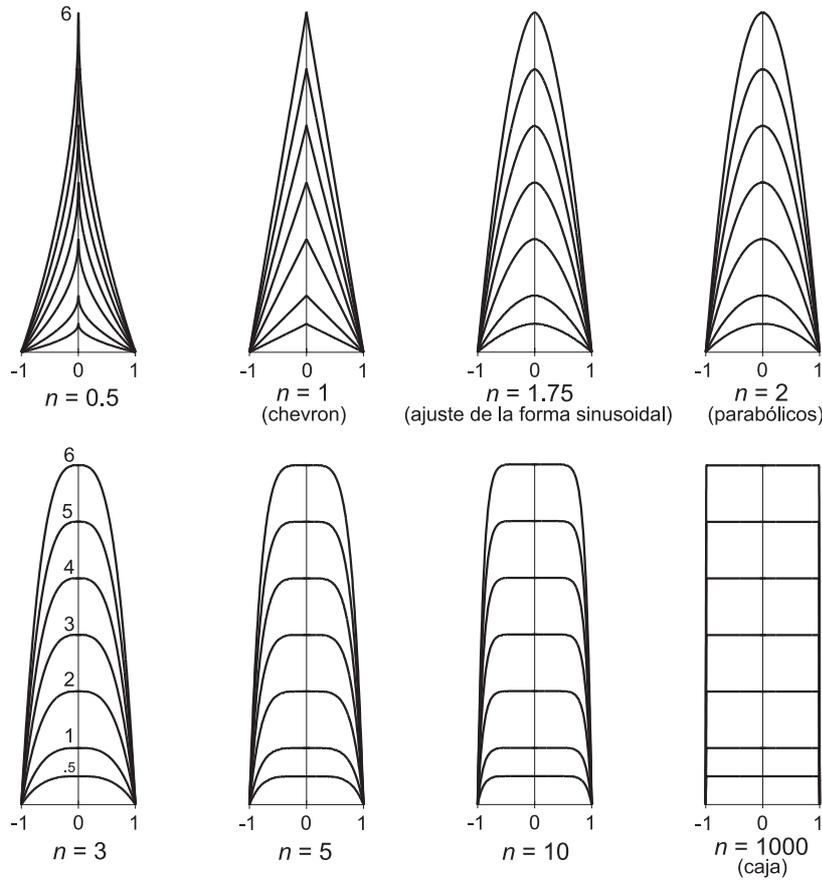
$$y = y_0 \left( \frac{x}{x_0} \right)^n \quad (6)$$

en el intervalo  $[0, x_0]$ . El significado de  $x_0$  e  $y_0$  se muestra en la Fig. 24a;  $x_0$  ha sido introducida en (6) para eliminar el efecto del tamaño en la clasificación. Mediante esta familia de funciones, un flanco de un pliegue puede describirse mediante dos parámetros: la relación de aspecto (o amplitud normalizada,  $h = y_0/x_0$ ), y el exponente ( $n$ ) de la función, que describe la forma del flanco. La Fig. 25 ilustra algunas morfologías de pliegues obtenidas para diversos valores de  $n$  y  $h$ . El valor de  $n$  caracteriza las principales formas de pliegues:  $n < 1$ , pliegues festoneados;  $n = 1$ , pliegues chevron;  $n = 2/(-2) = -1,75$ , ajuste de pliegues sinusoidales;  $n = 2$ , pliegues parabólicos;  $n > 2$ , pliegues con doble charnela (para valores de  $n$  próximos a 2, esta morfología es visualmente imperceptible);  $n \rightarrow \infty$ , pliegues caja. En consecuencia, esta familia de funciones ofrece una buena descripción de los pliegues aloclinales, de tal modo que cada flanco puede aproximarse mediante una función explícita.

La familia de funciones (6) facilita un buen método gráfico para clasificación de perfiles de superficies plegadas sobre un diagrama en el que se represente la relación de aspecto ( $h$ ) frente al exponente ( $n$ ). Sin embargo, esta familia presenta algunos inconvenientes matemáticos cuando se aplica al análisis de los mecanismos de plegamientos. Así, las funciones (6) sólo tienen curvatura finita en  $x = 0$  cuando  $n = 2$  (pliegues parabólicos); cuando  $n < 2$  la curvatura es infinita en ese punto, y cuando  $n > 2$  la curvatura es allí nula. Esta característica hace que dichas funciones no sirvan para el análisis de la distribución de la deformación interna en perfiles de pliegues.

Otro tipo de funciones que han sido usadas para aproximar perfiles de flancos son las curvas cónicas (Aller et al. 2004). Estas curvas resultan de la intersección de un cono por un plano en diferentes posiciones y tienen la propiedad común de que la distancia desde un punto cualquiera ( $P$ ) de la curva a un punto fijo (foco,  $O$ ), dividida por la distancia desde  $P$  a una línea recta determinada (directriz) es una cantidad constante, denominada "excentricidad" ( $e$ ). Si  $0 < e < 1$ , la cónica es una elipse; si  $e = 1$ , es una parábola, y si  $e > 1$ , es una hipérbola. La gama de formas disponibles para representar pliegues puede aumentarse mediante el uso de la relación de aspecto  $h$ , que permite representar un pliegue mediante un trozo de la cónica dentro de un intervalo determinado  $[0, x_0]$ . La Fig. 26 ilustra como el parámetro  $h$  hace posible que una sola cónica pueda ser usada para caracterizar diversas morfologías de pliegues. El parámetro  $h$  puede tomar cualquier valor positivo en el caso de la parábola, pero en el caso de la elipse y de la hipérbola,  $h$  tiene un valor positivo condicionado por las siguientes expresiones:

$$h \leq \frac{1}{\sqrt{1-e^2}} \quad \text{para elipses,} \quad (7)$$



**Figura 25.** Morfología de perfiles de pliegues correspondientes a funciones dadas por la expresión (6) con diferentes valores de la relación de  $h$  y del exponente  $n$ . Para una mejor visualización de las formas, el origen de coordenadas se ha situado en el núcleo de los pliegues.

donde la igualdad corresponde a un cuarto de elipse, y

$$h < \frac{1}{\sqrt{e^2 - 1}} \text{ para hipérbolas.} \quad (8)$$

En estas últimas, el límite superior de  $h$  es alcanzado cuando  $x_0$  tiende a infinito:

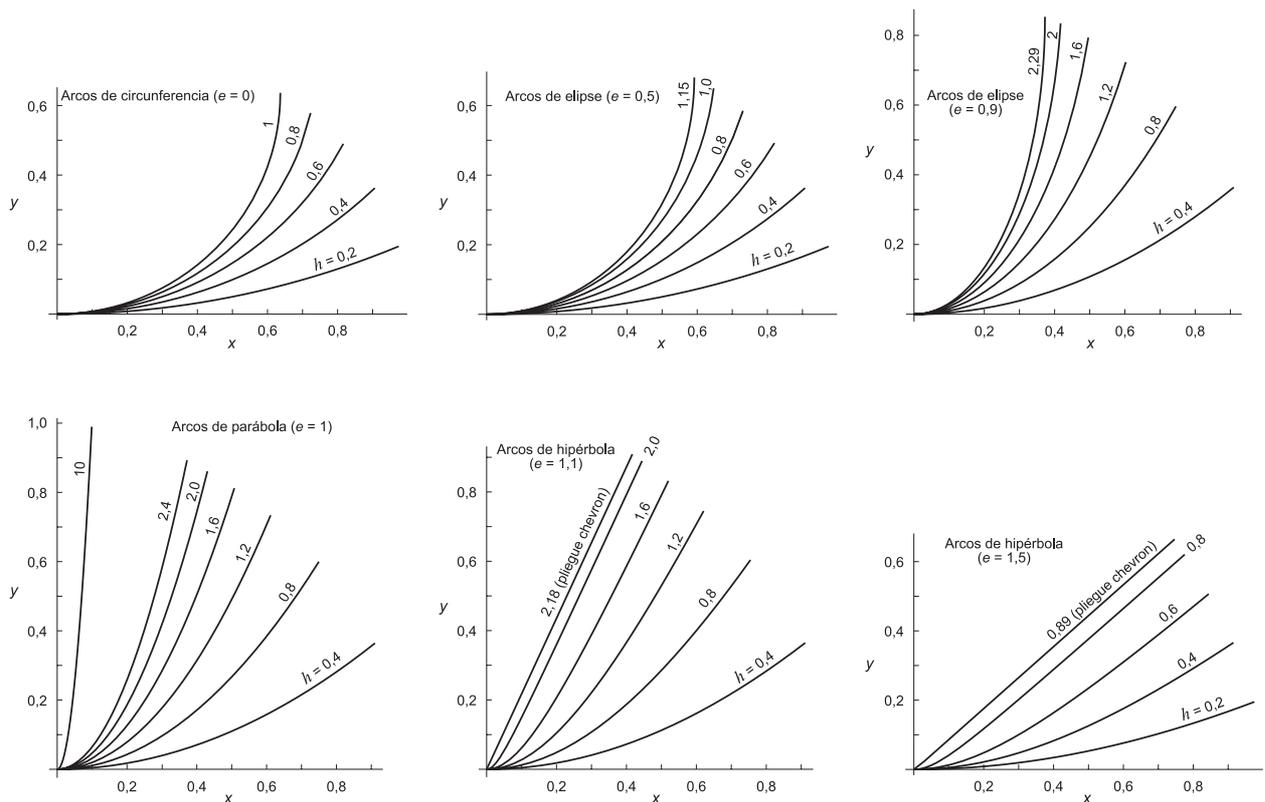
$$\lim_{x_0 \rightarrow \infty} h = \frac{1}{\sqrt{e^2 - 1}} \quad (9)$$

y corresponde al pliegue chevron.

Las cónicas no tienen los inconvenientes de la familia de funciones (6), ya que permiten un buen ajuste para las formas más comunes de pliegues y tienen curvatura finita en todos sus puntos, con un valor extremo de ésta en su vértice y al menos un eje de simetría. Una importante ventaja adicional es que las cónicas se transforman mediante una deformación homogénea en cónicas del mismo tipo, es decir, las elipses en elipses, las parábolas en parábolas, y las hipérbolas en hipérbolas (Brannan et al., 1999, p. 85). Esta es una propiedad característica de las cónicas que hace posible analizar casos en los que la deformación homogénea superpuesta a pliegues modifi-

ca el perfil de éstos para dar lugar al desarrollo de pliegues asimétricos. En estos casos, si las curvas que describen el perfil del pliegue antes y después de la deformación homogénea pertenecen a distintas familias, el cambio de forma es muy difícil de describir, lo que da lugar a un problema grave en el análisis de la cinemática del plegamiento. Las cónicas son las curvas más sencillas que no presentan dicho problema, lo cual representa una razón poderosa para que sean idóneas en dicho análisis cinemático.

Una vez escogida la familia de funciones para describir la geometría del perfil del pliegue, es necesario utilizar un método de ajuste para aproximar cada flanco de un pliegue natural a una ecuación de dicha familia. Para ello es conveniente utilizar fotografías del perfil del pliegue, a partir de las cuales puede dibujarse el perfil y el sistema de coordenadas. A continuación se determina la relación de aspecto  $h = y_0/x_0$ , y dado que ésta es un parámetro característico de los pliegues, deberemos buscar una función para la curva de ajuste que tenga el mismo valor de  $h$  que el perfil del pliegue natural. El método llamado “del punto medio”, descrito por Aller et al.



**Figura 26.** Conjuntos de trozos de cónicas con distintos valores de la excentricidad  $e$  (un valor para cada conjunto de curvas) y de la relación de aspecto  $h$  (números sobre las curvas).

(2004), consiste en encontrar una cónica que pase por el punto del perfil del pliegue natural con abscisa  $x = x_0/2$ . Este método requiere diversos cálculos para obtener la excentricidad  $e$  de la cónica, que pueden encontrarse en Aller et al. (2004, apéndice A).

Si, aparte del análisis cinemático de los pliegues ajustados por cónicas, se desean clasificar de una manera gráfica los flancos ajustados, es fácil construir para ello un diagrama de  $h$  frente a  $e$  en el que cada flanco quede representado por un punto. Sin embargo, este diagrama presenta algunas desventajas. Así, el campo disponible para representar flancos es pequeño, y los puntos que representan los pliegues chevron y elípticos definen lugares geométricos representados por curvas. En consecuencia, la trayectoria correspondiente al desarrollo de un pliegue puede ser difícil de interpretar; por ejemplo, el aplastamiento del perfil de una superficie plegada seguiría una curva en el diagrama. Para evitar estos inconvenientes, es útil usar un área normalizada, definida por:

$$A = 2A/(x_0y_0), \quad (10)$$

donde  $A$  es el área encerrada en la parte cóncava de la cónica dentro del intervalo del flanco (Fig. 27a). El parámetro  $A$  depende de  $e$  y  $h$ , viniendo dado por:

$$A = 2 - \frac{2}{X_0 f(e; X_0)} \int_0^{X_0} f(e; X) dX, \quad (11)$$

donde  $X_0 = \frac{2h}{1 + h^2(1 - e^2)}$ . El resultado del cálculo de la integral de la expresión (11) puede encontrarse en Aller et al. (2004).

Una vez conocido  $A$  puede construirse un diagrama de  $h$  frente a  $A$  en el que las formas típicas de pliegues (chevron, sinusoidal, parabólica y elíptica) están representadas por rectas paralelas al eje de ordenadas (Fig. 27). Para incluir en este diagrama los pliegues isoclinales, no representados adecuadamente por cónicas, éstos se han ajustado mediante funciones compuestas por un segmento de longitud  $c$ , paralelo al eje  $y$ , y un cuarto de elipse con vértice en el origen de coordenadas. En este caso, la función está definida por la relación de aspecto  $h$  y el parámetro de forma  $c/y_0$ , que aparece también representado en el diagrama de la Fig. 27. Estas formas para ajustar pliegues isoclinales estarían representadas en el diagrama por puntos situados en el campo que aparece a la derecha de la recta vertical correspondiente a los pliegues elípticos. La manera de encontrar  $c$  mediante el método del punto medio para ajuste de pliegues naturales isoclinales puede encontrarse en Aller et al. (2004).

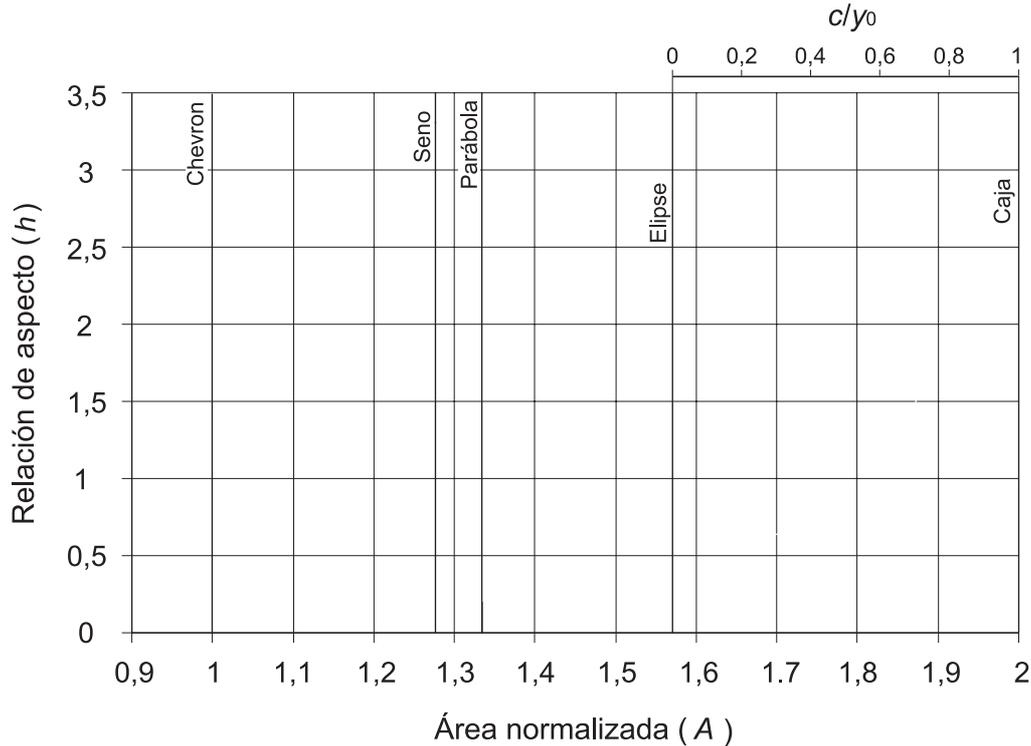


Figura 27. Diagrama de la relación de aspecto ( $h$ ) frente al área normalizada ( $A$ ) mostrando la localización de las principales formas de pliegues.

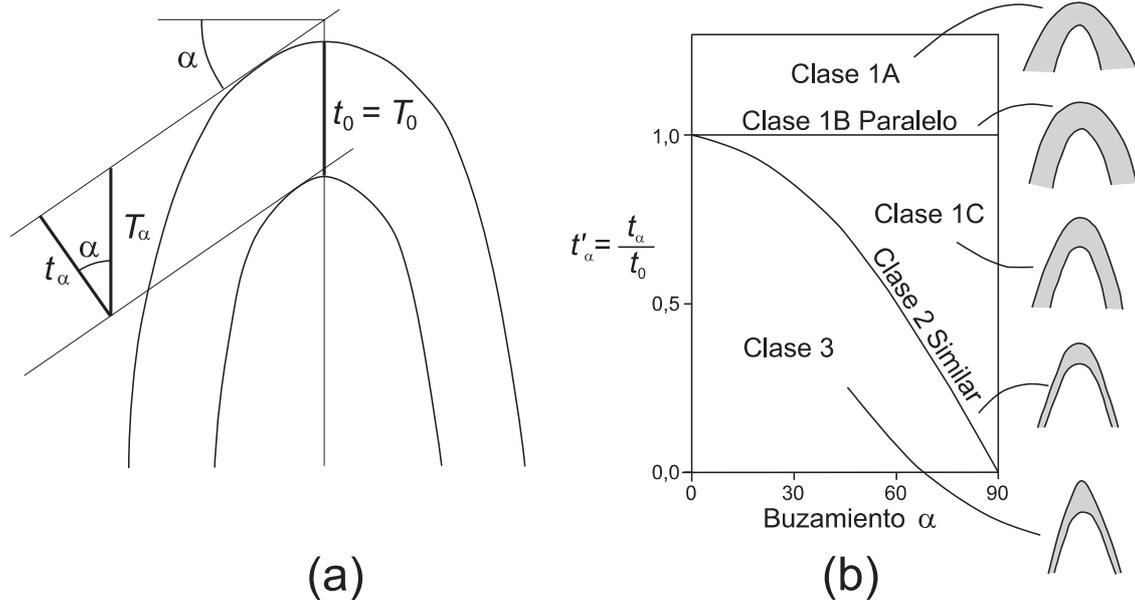
El diagrama  $h$  vs  $A$  permite introducir en él diferentes familias de funciones que pueden ser relacionadas entre sí mediante el área normalizada, puesto que este parámetro puede también determinarse para la familia de funciones dada por la expresión (6) o para cualquier otra familia usada para describir los perfiles de las superficies plegadas. Así, por ejemplo, la integración de la función (6) permite obtener que  $A = 2n/(1+n)$  para dichas funciones, lo cual hace que el diagrama de la Fig. 27 pueda ser utilizado para obtener un valor de  $n$  para ajustar los pliegues mediante las funciones (6), ya que  $n = A/(2-A)$ . En consecuencia,  $A$  permite obtener todos los tipos de funciones particulares que pueden ser usados para describir el perfil de un flanco de una superficie plegada, o inversamente, permite clasificar en un mismo diagrama pliegues ajustados mediante diferentes familias de funciones. Los pliegues festoneados no pueden ser ajustados por cónicas, pero pueden ser introducidos en el diagrama  $h$  vs  $A$  ajustándolos mediante la familia (6) con un  $n < 1$ . Los tipos básicos de pliegues estarán definidos por los siguientes valores de  $A$ :  $A < 1$ , pliegues festoneados;  $A = 1$ , pliegues chevron;  $A = 4/3 = 1,2732\dots$ , pliegues sinusoidales;  $A = 4/3$ , pliegues parabólicos;  $A = \sqrt{2} = 1,5708\dots$ , pliegues elípticos;  $A = 2$ , pliegues caja.

Si elegimos las cónicas para ajustar pliegues aloclinales naturales, la clasificación del perfil de un flanco en el

diagrama  $h$  vs  $A$  (Fig. 27) puede hacerse siguiendo los siguientes pasos:

- 1) calcar el perfil del pliegue en un transparente a partir de una fotografía;
- 2) localizar los puntos de charnela y de enlace en el perfil y dibujar el sistema de coordenadas;
- 3) determinar  $x_0$  e  $y_0$  sobre el dibujo, y obtener  $h = y_0/x_0$ ;
- 4) usar el método del punto medio para encontrar  $e$ , midiendo para ello en el perfil dibujado el valor  $y_M$  para  $x = x_0/2$  (véase Aller et al., 2004 para detalles del cálculo);
- 5) obtener  $A$  a partir de  $e$  y  $h$  mediante la expresión (11) (véase Aller et al., 2004 para detalles del cálculo); y
- 6) proyectar el área normalizada  $A$  y la relación de aspecto  $h$  sobre el diagrama de la Fig. 27 para obtener el punto representativo del perfil del flanco de la superficie plegada.

*Análisis conjunto de los dos flancos de un pliegue: simetría de las superficies plegadas:* Cuando se dibujan conjuntamente los dos flancos de un pliegue, se observa habitualmente que el perfil es asimétrico respecto al eje  $y$ . Esta propiedad de los pliegues es un resultado de los mecanismos que los produjeron y debe ser tomada en cuenta en el estudio cinemático. Para evaluar esta asimetría pueden usarse los dos parámetros siguientes:



**Figura 28.** (a) Definición de espesor ortogonal  $t_\alpha$  y de espesor paralelo a la superficie axial  $T_\alpha$  de una capa plegada (según Ramsay, 1967, p. 361). (b) Clases de pliegues definidas en el diagrama  $t_\alpha$ - $\alpha$  (según Ramsay y Huber, 1987, p. 349).

Asimetría en forma:  $S_a = A_l / A_c$  (12)

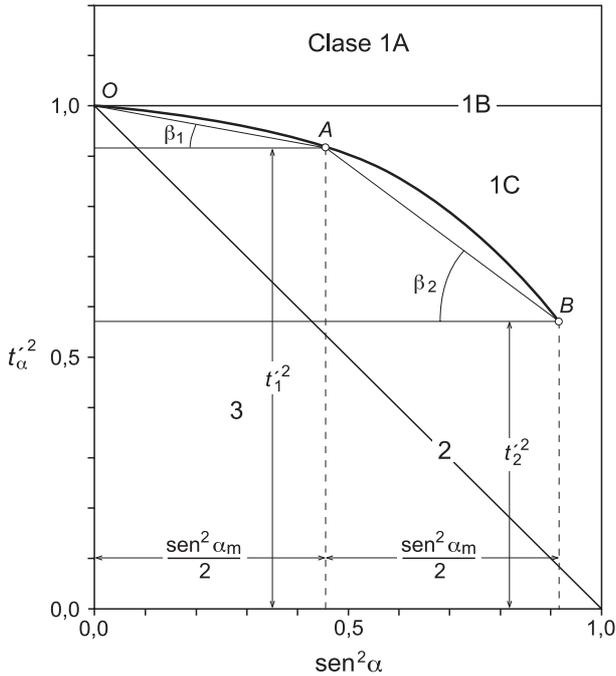
Asimetría en amplitud:  $A_a = y_{0l} / y_{0c}$  (13)

donde  $A_l$  y  $A_c$  son las áreas normalizadas de los flancos largo y corto respectivamente, e  $y_{0l}$  e  $y_{0c}$  son los parámetros  $y_0$  de los flancos largo y corto respectivamente. La proyección de estos parámetros en un diagrama de  $S_a$  frente a  $A_a$  para un conjunto determinado de pliegues, permite visualizar la variación en asimetría de éstos.

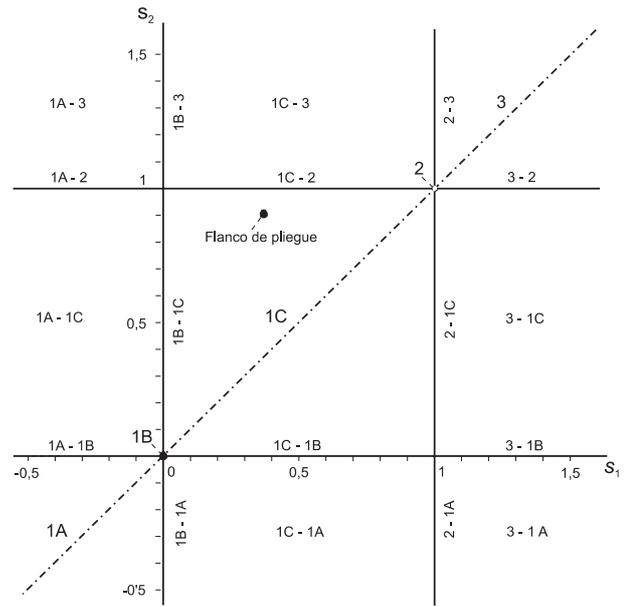
El desarrollo de pliegues asimétricos formados por la superposición de una deformación homogénea oblicua o rotacional sobre pliegues previos puede implicar una migración del punto de charnela. Esto hace difícil el estudio cinemático de los dos flancos por separado, ya que en el punto de charnela, donde ambos flancos enlazan, aparecerá una discontinuidad en curvatura que puede hacer inviable el análisis. Por esta razón, en los pliegues asimétricos es conveniente buscar una función única que ajuste los dos flancos. Las curvas cónicas son nuevamente las más adecuadas para el ajuste, el cual puede ser llevado a cabo en estos casos mediante el método de mínimos cuadrados. Para llevar a cabo el ajuste, se dibujan los dos flancos del perfil de la superficie plegada; luego se localiza el punto de charnela y se dibuja el sistema de coordenadas (Fig. 24), y después se elige un conjunto de puntos del perfil y se determinan sus respectivas coordenadas. El método para obtener la cónica que mejor se ajusta a los puntos consiste en elegir los valores de  $e$  y  $h$  que hagan que el error cuadrático asociado al ajuste sea mínimo.

#### *Análisis geométrico de las capas plegadas: comparación de resultados para los diferentes mecanismos*

Si se compara la geometría de pliegues obtenidos por distintos mecanismos, resulta evidente que la variación de espesor de la capa plegada es diferente en muchos casos. Así, por ejemplo, en los pliegues formados por “flexural flow” el espesor se mantiene constante (Fig. 3c), en los formados por “flexural flow” más aplastamiento la capa plegada aparece engrosada en la charnela respecto a los flancos (Fig. 17), y en los formados por “flexural flow” más achatamiento sucede lo contrario (Fig. 20b). En consecuencia, parece razonable suponer que el análisis de la variación del espesor de la capa plegada a lo largo del flanco puede ser un criterio relevante para discriminar mecanismos de plegamiento. En esta idea se basa la clasificación clásica de Ramsay (1962, 1967), quien definió el espesor ortogonal de la capa ( $t_\alpha$ ) y el espesor paralelo al plano axial ( $T_\alpha$ ) en la forma ilustrada en la Fig. 28a. Para medir ambos espesores se toma como unidad de medida el espesor en la zona de charnela ( $t_0 = T_0$ ), es decir,  $t'_\alpha = t_\alpha / t_0$  y  $T'_\alpha = T_\alpha / T_0$ . Para llevar a cabo la clasificación se proyecta uno de los espesores (habitualmente se usa el espesor ortogonal) en función del buzamiento (Fig. 28b), de manera que cada flanco es representado por una curva en el diagrama. De acuerdo con la posición y la pendiente de dicha curva, Ramsay (1967) distinguió tres clases de pliegues: clase 1, clase 2 (pliegues similares) y clase 3, con tres subclases para los pliegues de clase 1: 1A, 1B (pliegues paralelos) y 1C. Como puede verse en la Fig. 28b, los plie-



**Figura 29.** Diagrama de  $t'_{\alpha^2}$  frente a  $\text{sen}^2 \alpha$  y definición de los ángulos  $\beta_1$  y  $\beta_2$  a partir de la curva representativa de un pliegue.



**Figura 30.** Campos y líneas definidas sobre el diagrama  $s_1$ - $s_2$ , y sus correspondientes clases de pliegues.

gues paralelos y similares corresponden a geometrías que están representadas en el diagrama por curvas específicas, mientras que dentro de los pliegues de las clases 1A, 1C y 3 se incluyen una amplia gama de formas que están representadas en los campos separados por las citadas líneas.

Una ligera modificación al diagrama de Ramsay (1967), basada en la propuesta por Hudleston (1973), consiste en proyectar  $t'_{\alpha^2}$  en función de  $\text{sen}^2 \alpha$ , con lo cual la curva de los pliegues similares del diagrama  $t'_{\alpha}$ - $\alpha$  pasa a ser una recta. Este diagrama tiene algunas ventajas sobre el diagrama de Ramsay, ya que, como se verá más adelante, hace más sencillo el uso de la clasificación y facilita la interpretación de los resultados.

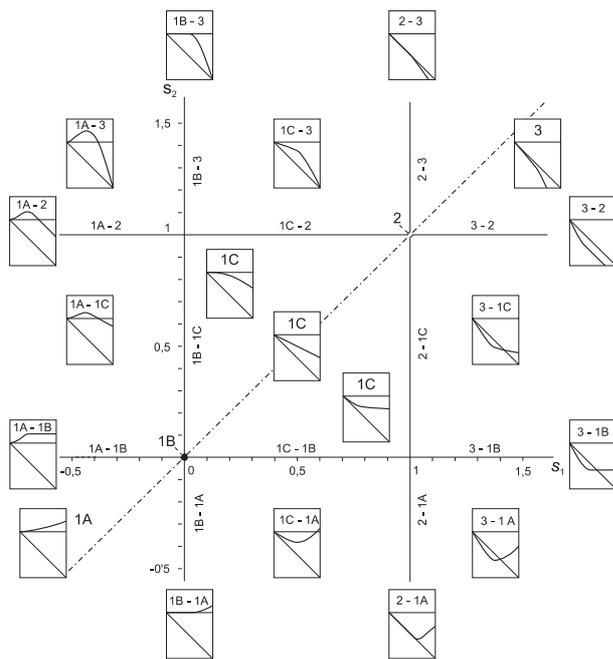
El uso de la clasificación de Ramsay (1967), o de la modificación indicada en el párrafo anterior, es laboriosa pero aporta una excelente herramienta para el análisis de la geometría de pliegues individuales, y es indispensable para hacer estudios de mecanismos cinemáticos en pliegues específicos, puesto que aporta una descripción funcional precisa de la geometría de la capa plegada. Sin embargo, cuando dicha clasificación se aplica a un conjunto numeroso de pliegues, se obtiene un enjambre de curvas que hace difícil obtener conclusiones basadas en un análisis realmente cuantitativo. En tales casos, esta clasificación no parece adecuada y se hace conveniente una clasificación en la que cada flanco esté representado por un punto en vez de por una curva. Para lograr esto,

consideremos la curva del flanco de un pliegue en el diagrama de  $t'_{\alpha^2}$  frente a  $\text{sen}^2 \alpha$ , y dos puntos de ella (Fig. 29): A (de abscisa  $(\text{sen}^2 \alpha_m)/2$ ;  $\alpha_m$  es el buzamiento máximo de la capa plegada) y B (de abscisa  $\text{sen}^2 \alpha_m$ ). Dibujemos a continuación los segmentos OA y AB, y definamos los parámetros  $s_1$  y  $s_2$  por (Fig. 29):

$$s_1 = \text{tg } \beta_1 = \frac{2(1-t_1'^2)}{\text{sen}^2 \alpha_m} \quad (14)$$

$$s_2 = \text{tg } \beta_2 = \frac{2(t_1'^2 - t_2'^2)}{\text{sen}^2 \alpha_m} \quad (15)$$

donde  $\beta_1$  y  $\beta_2$  pueden tomar valores entre 0 y 180°. Un sencillo gráfico de  $s_1$  frente a  $s_2$  (Fig. 30) permite realizar una clasificación de las capas plegadas en las que cada flanco está representado por un punto. La recta del diagrama  $\text{sen}^2 \alpha$  vs  $t'_{\alpha^2}$  que representa el pliegue paralelo estará representada por el origen del diagrama  $s_1$  vs  $s_2$ , y la curva que representa el pliegue similar estará representada en el diagrama  $s_1$  vs  $s_2$  por el punto 2, con coordenadas (1, 1). El diagrama  $s_1$  vs  $s_2$  (Fig. 30) contiene varios campos y líneas sobre los que se proyectan puntos que representan pliegues de una clase o combinación de clases determinada. Los pliegues de las clases 1A, 1C y 3 se sitúan sobre tres de estos campos. Los otros campos y todas las líneas corresponden a pliegues compuestos de dos clases de la clasificación de Ramsay, una clase definida por el parámetro  $s_1$  y otra por el parámetro  $s_2$ . La recta  $s_1 = s_2$  es el lugar geo-



**Figura 31.** Curvas  $t'_{\alpha^2}$  vs  $\text{sen}^2\alpha$  representativas de los pliegues que corresponden a diversos campos y líneas del diagrama  $s_1$ - $s_2$ .

métrico de los puntos cuyas gráficas en el diagrama  $t'_{\alpha^2}$  vs  $\text{sen}^2\alpha$  son líneas rectas.

La Fig. 31 muestra curvas  $t'_{\alpha^2}$  vs  $\text{sen}^2\alpha$  para diferentes campos y líneas del diagrama  $s_1$  vs  $s_2$ . En el diagrama  $t'_{\alpha^2}$  vs  $\text{sen}^2\alpha$ , la clase a la que pertenece un pliegue está determinada por la pendiente de la curva y no estrictamente por el campo en el que la curva está situada. En este sentido, el diagrama  $s_1$  vs  $s_2$  representa mejor a menudo la clase de pliegue que la curva  $t'_{\alpha^2}$  vs  $\text{sen}^2\alpha$ , o que la curva de Ramsay  $t'_{\alpha}$  vs  $\alpha$ , puesto que  $s_1$  y  $s_2$  definen la pendiente media de las partes correspondientes de la curva. Además el método permite una subdivisión natural de las clases de Ramsay en los tipos compuestos mostrados en las Figs. 30 y 31.

La representación del flanco de un pliegue en el diagrama  $s_1$  vs  $s_2$  requiere la medida de tres espesores ortogonales ( $t_0$ ,  $t'_1$  y  $t'_2$ ) en cada flanco, a partir de los cuales pueden obtenerse  $s_1$  y  $s_2$  mediante las expresiones (14) y (15). El ángulo de buzamiento  $\alpha_1$ , correspondiente a la abscisa  $(\text{sen}^2\alpha_m)/2$ , para el cual debe medirse  $t'_1$  viene dado por:

$$\alpha_1 = \text{arc sen}\left(\frac{\text{sen } \alpha_m}{\sqrt{2}}\right) \quad (16)$$

El uso de este diagrama implica una pérdida de información del valor de  $\alpha_m$  de los flancos. Este problema puede ser mitigado usando diferentes símbolos para diferentes

intervalos de  $\alpha_m$ . En la Fig. 32 se muestra la representación de pliegues formados por diversos mecanismos de plegamiento en el diagrama  $s_1$  vs  $s_2$ . La observación de esta figura nos permite concluir lo siguiente:

- Los pliegues formados por “flexural flow” se sitúan en el origen de coordenadas (pliegues de clase 1B –o paralelos–). El acortamiento o la compactación previos al plegamiento por este mecanismo alteran el espesor de la capa que se va a plegar pero no la forma final de la capa plegada, que sigue siendo de la clase 1B.

- Los pliegues formados mediante deformación por cizalla simple heterogénea a través de las capas se proyectan en el punto (1, 1) (pliegues similares).

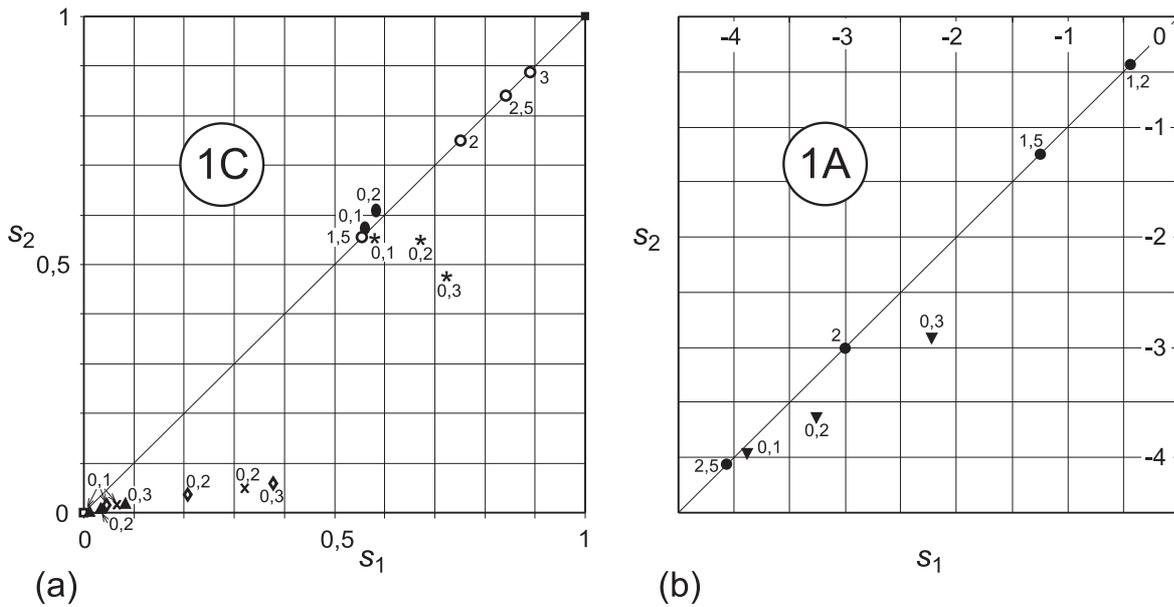
- Los pliegues formados por deformación longitudinal tangencial se sitúan en el campo de la clase 1C, aunque muy cerca de la línea que representa los pliegues 1C-1B (pliegues de clase 1C para buzamientos bajos y de clase 1B para buzamientos altos). Su situación en el diagrama depende del espesor de la capa plegada. En este sentido, la existencia de acortamiento o compactación previos al plegamiento por este mecanismo alteran únicamente el espesor de la capa que se va a plegar. A medida que aumenta dicho espesor, aumenta la distancia del punto representativo del flanco al punto que representa el pliegue paralelo. En conjunto, los puntos que representan estos pliegues describen una trayectoria curva suavemente creciente.

- Los pliegues formados por “flexural flow” más aplastamiento se sitúan en el campo 1C sobre la recta  $s_1 = s_2$ . Los puntos representativos se acercan al punto (1, 1) del pliegue similar a medida que aumenta la relación de aspecto de la elipse de deformación asociada al aplastamiento.

- Los pliegues formados por deformación longitudinal tangencial más aplastamiento se sitúan en el campo 1C, alejándose de la recta  $s_1 = s_2$  a medida que aumenta el espesor de la capa plegada.

- Los pliegues formados por “flexural flow” más achatamiento se sitúan en el campo 1A sobre la recta  $s_1 = s_2$ , alejándose del punto (0, 0) del pliegue paralelo a medida que aumenta la relación de aspecto de la elipse de deformación asociada al achatamiento.

Los anteriores resultados muestran que ninguno de los mecanismos descritos da lugar a pliegues de clase 3. Sin embargo, la experiencia geológica indica que estos pliegues son frecuentes en capas incompetentes cuando están intercaladas entre capas competentes plegadas de clase 1. En estos casos, la geometría y la distribución de deformación interna en las capas incompetentes están condicionadas por las de las capas competentes. Uno de los mecanismos implicados en la formación de pliegues de clase 3 es la deformación longitudinal tangencial inversa



- ▣ FF, compactación + FF, y acortamiento + FF.
- ◆ DLT (el número indica el espesor inicial de la capa).
- ▲ Compactación ( $R_C = 2,25$ ) + DLT (el número indica el espesor inicial de la capa).
- × Acortamiento ( $R_{AC} = 1,2$ ) + DLT (el número indica el espesor inicial de la capa).
- FF + aplastamiento (el número indica el valor de  $R_{AP}$ ).
- \* DLT + aplastamiento ( $R_{AP} = 0,2$ ) (el número indica el espesor inicial de la capa).
- FF + achatamiento ( $R_{Ach} = 2,25$ ).
- ▼ DLT + achatamiento ( $R_{Ach} = 2,25$ ) (el número indica el espesor inicial de la capa).
- Acortamiento ( $R_{AC} = 1,5$ ) + DLT ( $h = 0,7$ ) + FF ( $\Delta h = 0,3$ ) + aplastamiento ( $R_{AP} = 1,5$ ) (el número indica el espesor inicial de la capa).

**Figura 32.** Representación en un diagrama  $s_1$ - $s_2$  de flancos de pliegues modelizados teóricamente mediante la aplicación de diversos mecanismos de plegamiento. Por problemas de espacio, los campos de la proyección correspondientes a los campos de las clases 1C (a) y 1A (b) se muestran separadamente.

anteriormente citada. Un mecanismo comparable sería el “flexural flow inverso”, que puede definirse como el mecanismo que actúa en una capa incompetente cuando las capas competentes adyacentes se pliegan por “flexural flow”. Sin embargo las ecuaciones de transformación para estos mecanismos no han sido aún desarrolladas.

#### Posición de los pliegues

El conocimiento de algunos aspectos relativos a la posición de un pliegue es necesario para abordar su análisis cinemático, ya que, por ejemplo, los mecanismos implicados en pliegues con distinto buzamiento de su plano axial son diferentes. Los aspectos relevantes de la posición de los pliegues desde un punto de vista cinemático quedan perfectamente especificados si se conocen las orientaciones de la superficie axial y de la charnela del pliegue, que suelen ser descritas utilizando diagramas de proyección estereográfica. No obstante, en la mayoría de los casos basta con considerar el buzamiento de la superficie axial y la inmersión de la charnela (Fleuty, 1964). En el caso de un análisis cinemático bidimensio-

nal, es suficiente conocer la inclinación de la traza axial en el plano de perfil del pliegue, considerando este plano como vertical.

#### Distribución del clivaje en pliegues

Un rasgo relevante para discriminar mecanismos de plegamiento es la distribución de los ejes mayores de la elipse de la deformación a través del perfil de la capa plegada, y ha sido descrito mediante las curvas  $\phi$ - $\alpha$ , que son características de cada mecanismo de plegamiento. Cuando los pliegues naturales presentan un clivaje asociado, su distribución a través de las capas plegadas es un rasgo esencial para poder conocer los mecanismos que dieron lugar al pliegue. Esto es así si se acepta que el clivaje pizarroso, o en general las foliaciones tectónicas desarrolladas directamente sobre una fábrica sedimentaria, definen planos que coinciden aproximadamente con el plano XY del elipsoide de deformación finita ( $X > Y > Z$ ). Por tanto, el conocimiento del buzamiento del clivaje en función del buzamiento de la capa, medidos sobre el perfil del pliegue (tomando como buzamiento nulo el de

capa en el punto de charnela), permite construir curvas  $\phi$ - $\alpha$  a partir de pliegues naturales y analizar los mecanismos de plegamiento de los pliegues implicados mediante comparación de tales curvas con las obtenidas a partir de modelos teóricos de perfiles de pliegues construidos mediante la aplicación de las ecuaciones de transformación de los distintos mecanismos.

### Pliegues originados por una combinación de mecanismos de plegamiento

Los mecanismos básicos de plegamiento descritos son sin duda simplificaciones razonables de los que realmente operan en la naturaleza. Probablemente, los pliegues reales pueden ser explicados como el resultado de combinaciones complejas de diversos mecanismos básicos. Una modelización teórica bidimensional de combinación de mecanismos puede llevarse a cabo por adición de sucesivos pasos de plegamiento a partir de una configuración inicial del perfil de la capa. Para llevar a cabo dicha modelización se ha elaborado el programa “FoldModeler” que permite desarrollar pliegues simétricos y que ha sido desarrollado en el entorno de MATHEMATICA™ (Bobillo-Ares et al., 2004). En dicho programa, pueden combinarse deformación longitudinal tangencial, “flexural flow” y diversas modalidades de deformación homogénea (compactación, acortamiento de la capa, y aplastamiento y achatamiento de pliegues). El primer paso en la modelización consiste en definir la configuración inicial del perfil de la capa que se va a plegar para transformarse en el flanco de un pliegue. Para ello, el perfil se divide en una red de cuadrados o rectángulos que son lo suficientemente pequeños como para poder asumir que su deformación va a ser prácticamente homogénea dentro de ellos. Los nodos de la red definen los puntos que se transformarán por los diferentes mecanismos de plegamiento, y que permitirán analizar la deformación de la capa plegada. La configuración inicial del perfil de la capa se define por los parámetros de la línea guía ( $x_0$ ,  $e$  y  $h$ ), el espesor de la capa por encima y por debajo de la línea guía, el número de cuadriláteros de cada fila y el número de filas por encima y por debajo de la línea guía.

Una vez definida la capa con su línea guía, ésta se deforma aplicando pasos de plegamiento. Cada paso corresponde a un mecanismo específico e implica la aplicación de sus ecuaciones de transformación a los nodos de la configuración de partida del paso, con el fin de obtener las correspondientes imágenes en la nueva configuración. Por tanto, para definir un paso de plegamiento es necesario especificar el mecanismo de plegamiento a aplicar y los cambios que dicho paso producirá en los parámetros de la línea guía (variación en la forma y la

relación de aspecto). Como resultado de la superposición de un número finito de pasos, podemos obtener pliegues teóricos originados por una combinación de varios mecanismos de plegamiento.

Para organizar la información, los pasos de plegamiento se agrupan en bloques, de forma que cada bloque está constituido por una secuencia de pasos de plegamiento y un número natural que indica las veces que la secuencia debe ser ejecutada. Un programa completo para formar pliegues teóricos está definido por una secuencia de bloques que se ejecutarán en el orden indicado. Mediante este método se puede modelizar la formación de pliegues por mecanismos que se aplican sucesivamente unos detrás de otros, o por superposición simultánea de varios mecanismos; esta última puede simularse realizando la superposición sucesiva en un bloque de varios pasos de plegamiento, uno de cada mecanismo, de tal forma que cada uno de ellos produce un incremento muy pequeño en la relación de aspecto del pliegue, y repitiendo estos pasos un número grande de veces en el bloque hasta conseguir la amplitud deseada.

Entre la información que el programa “FoldModeler” aporta de los pliegues modelizados, podemos destacar la siguiente:

- El dibujo de la capa plegada, mostrando la red de cuadriláteros deformada, la distribución de las elipses de deformación y sus ejes, y una variación en el nivel de gris dependiendo del valor de  $R$  de la elipse.
- Las curvas que muestran la variación de la inclinación del eje mayor de la elipse de la deformación en función del buzamiento de la capa para los arcos externo e interno de la capa plegada (curvas  $\phi$ - $\alpha$ ).
- Las curvas que describen la variación del cociente entre los ejes de la elipse de la deformación en función del buzamiento de la capa para los arcos externo e interno de la capa plegada (curvas  $R$ - $\alpha$ ).
- La clasificación de Ramsay (1967) y curva  $t'_{\alpha^2}$  vs  $\sin^2\alpha$ .
- Los parámetros  $s_1$  y  $s_2$ .
- El acortamiento global debido al plegamiento.
- Los parámetros que definen la cónica final que describe la línea guía: anchura y altura del flanco, y excentricidad.
- La gráfica que describe la curvatura de la línea guía a lo largo de la capa plegada.
- El cociente entre el espesor de la capa en el punto de buzamiento nulo y la amplitud del arco externo de la capa plegada.

Este método de modelización presenta dos tipos principales de aplicación desde un punto de vista geológico: a) predecir las características geométricas y cinemáticas

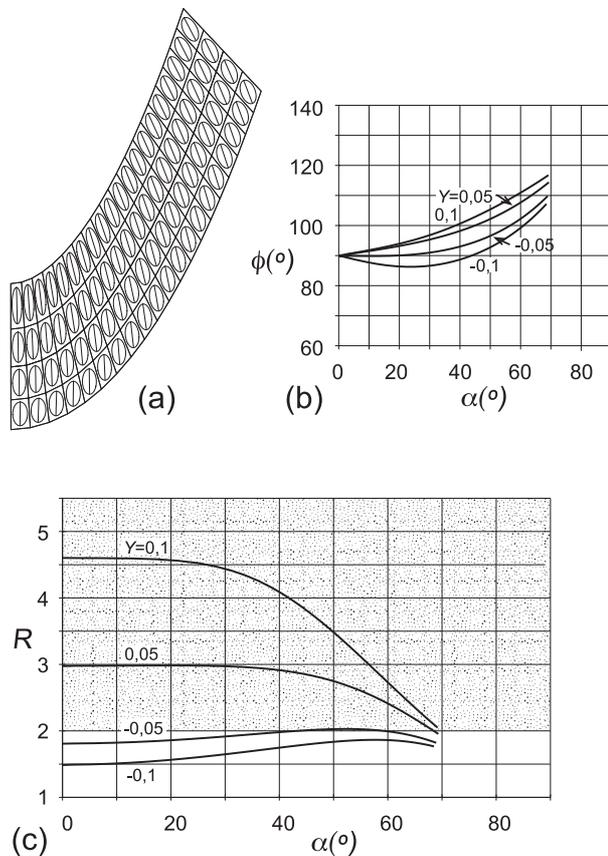
de pliegues originados mediante una determinada combinación de mecanismos (problema directo), y b) estudiar el estado de deformación en el perfil de una determinada capa plegada de roca y la posible combinación de mecanismos que pudieron haber dado lugar al pliegue (problema inverso).

Los pliegues modelizados ilustrados en figuras anteriores representan ejemplos de aplicación del problema directo al conocimiento de pliegues formados por los mecanismos básicos. Un ejemplo de pliegue formado por una superposición sucesiva de mecanismos se muestra en la Fig. 33a. En este caso, la secuencia de mecanismos esta constituida por acortamiento de la capa, deformación longitudinal tangencial, “flexural flow” y aplastamiento (la intensidad con que se aplica cada mecanismo está indicada en la citada figura). Las curvas de  $\phi$  vs  $\alpha$  (Fig. 33b) indican una distribución predominantemente convergente de los ejes largos de las elipses de la deformación que refleja la mayor intensidad de la deformación longitudinal tangencial respecto al “flexural flow” en este modelo; no obstante, la distribución divergente para buzamientos menores de  $50^\circ$  en el arco externo de la capa más delgada ( $Y = -0,1$ ) y la forma cóncava hacia arriba de la curva es principalmente un reflejo del “flexural flow”. Las curvas de  $R$  vs  $\alpha$  (Fig. 33c) indican valores mucho mayores de  $R$  para la zona del arco interno que para la del externo, sugiriendo que se podría original clivaje exclusivamente en el arco interno, en el cual los valores mayores de  $R$  se concentran en la zona de charnela. La forma de la capa plegada corresponde a la clase 1C (Fig. 32), estando sus puntos representativos ligeramente desviados de la recta  $s_1 = s_2$  en el diagrama de  $s_1$  vs  $s_2$ .

El análisis de la distribución de la deformación y de los mecanismos de plegamiento en una capa plegada natural se puede llevar a cabo mediante comparación por tanteo del pliegue natural con pliegues modelizados teóricamente (problema inverso). Para llevar a cabo esta comparación es preciso adquirir toda la información posible del pliegue natural acerca de su geometría y de los mecanismos de plegamiento implicados en su desarrollo, y comparar los datos obtenidos con los “outputs” suministrados por “FoldModeler”. Específicamente, debemos obtener la siguiente información del pliegue natural:

- Relación de aspecto  $h$ .
- Clasificación del perfil de las superficies plegadas.
- Relación entre el espesor de la capa en el punto de charnela y la amplitud del límite convexo de la capa plegada.
- La orientación del eje y de la superficie axial del pliegue.
- Las curvas de  $\phi$  vs  $\alpha$  para los límites cóncavo y convexo de la capa plegada. Estas curvas pueden ser obtenidas

Acortamiento ( $\sqrt{\lambda_1^{AC}/\lambda_2^{AC}}=1,5$ ) + DLT ( $h=0,7$ ) + FF ( $\Delta h=0,3$ ) + Aplastamiento ( $\sqrt{\lambda_1^{AP}/\lambda_2^{AP}}=1,5$ )



**Figura 33.** Distribución de la deformación en un pliegue formado por acortamiento homogéneo de la capa, deformación longitudinal tangencial (DLT), “flexural flow” (FF) y aplastamiento (la intensidad con la que interviene cada mecanismo se encuentra indicada en la figura). (a) Forma de la capa plegada con la distribución de elipses de deformación; (b) curvas  $\phi$ - $\alpha$ ; (c) curvas  $R$ - $\alpha$ . El campo del diagrama  $R$ - $\alpha$  con  $R \geq 2$  aparece tramado.

aproximadamente midiendo los buzamientos de la estratificación y de las superficies de clivaje primario en tantos puntos de los límites de la capa plegada como sea posible. Dado que en los modelos teóricos se supone que el plano de perfil y la traza axial del pliegue son verticales, el eje y el plano axial deben ser rotados por métodos de proyección estereográfica hasta que el primero pase a ser horizontal y el segundo vertical. Esta rotación debe también ser aplicada a las superficies de estratificación y de clivaje usadas para obtener la curva  $\phi$  vs  $\alpha$ .

- Clasificación de Ramsay de la capa plegada.
- Si es posible, la relación  $R$  debe ser obtenida en algunos puntos de los límites de la capa plegada para construir las curvas  $R$  vs  $\alpha$ . Es interesante también conocer

el cambio de área con la deformación. Desgraciadamente esta información suele ser difícil de obtener.

Si todos los datos obtenidos en el pliegue natural, incluyendo medidas de la deformación interna y de cambio de área con la deformación, pueden ser ajustados mediante un pliegue modelizado teóricamente, puede razonablemente concluirse que el pliegue natural y el teórico presentan una distribución muy semejante de deformación y que ambos han sido originados por una combinación similar de mecanismos de plegamiento, con una estrecha gama de variación en la intensidad de cada mecanismo implicado. En tal caso, el espesor inicial de la capa plegada teóricamente representa una buena aproximación del espesor inicial de la capa de roca. Es evidente que, en un pliegue natural, no siempre es posible obtener toda la información anteriormente citada. Aún así, la información obtenida puede ser muy valiosa para estudiar la distribución de la deformación y los mecanismos que dieron lugar al pliegue natural analizado. Sin embargo, la ausencia total de medidas de deformación interna aumenta notablemente la incertidumbre de la interpretación, puesto que, en tales casos, puede obtenerse un número infinito de buenos ajustes con un espesor inicial que puede oscilar desde un valor tan pequeño como se quiera hasta un valor máximo. Todos estos ajustes difieren en la intensidad del acortamiento de la capa inicial y en el cambio de área con la deformación.

Un ejemplo de ajuste de un pliegue natural mediante un pliegue modelizado teóricamente se muestra en la Fig. 34. Para llevar a cabo el ajuste, es necesario realizar una primera estimación del espesor inicial de la capa. El valor estimado puede después modificarse para mejorar el ajuste durante la modelización por tanteo. En el caso analizado, la relación inicial espesor/longitud asignada es 0,111, que es el mayor espesor posible de la capa para obtener buenos ajustes. La Fig. 34 muestra una secuencia de tres bloques sencillos que permiten ajustar el pliegue natural y que está formada por: un acortamiento de la capa sin cambio de área y con  $\sqrt{\lambda_1^{AC} / \lambda_2^{AC}} = 1,35$ , un paso de plegamiento por deformación longitudinal tangencial para originar un pliegue con  $h = 0,73$ , un paso de plegamiento por "flexural flow" para incrementar  $h$  en un valor de 0,04, y un paso de aplastamiento del pliegue sin cambio de área y con  $\sqrt{\lambda_1^{AP} / \lambda_2^{AP}} = 2,30$ . Para la misma relación inicial espesor/longitud de la capa de 0,111, es posible encontrar otros buenos ajustes, pero todos ellos requieren intensidades similares de los mecanismos implicados. Si se considera una capa más delgada, las intensidades de los mecanismos siguen siendo parecidas excepto en el acortamiento inicial de la capa. Datos de deformación interna, incluyendo cambio de área, son necesarios para reducir el campo de posibles ajustes y establecer la relación inicial espesor/longitud correcta

de la capa. Con relación a la distribución temporal de los diferentes mecanismos, en todos los ajustes es necesario un paso inicial de acortamiento de la capa, aunque éste puede tener también lugar simultáneamente con algo de deformación longitudinal tangencial; a continuación, se requiere un estadio de deformación longitudinal tangencial, con una pequeña intensidad, no siempre necesaria, de "flexural flow"; finalmente se requiere un aplastamiento del pliegue.

## Conclusiones

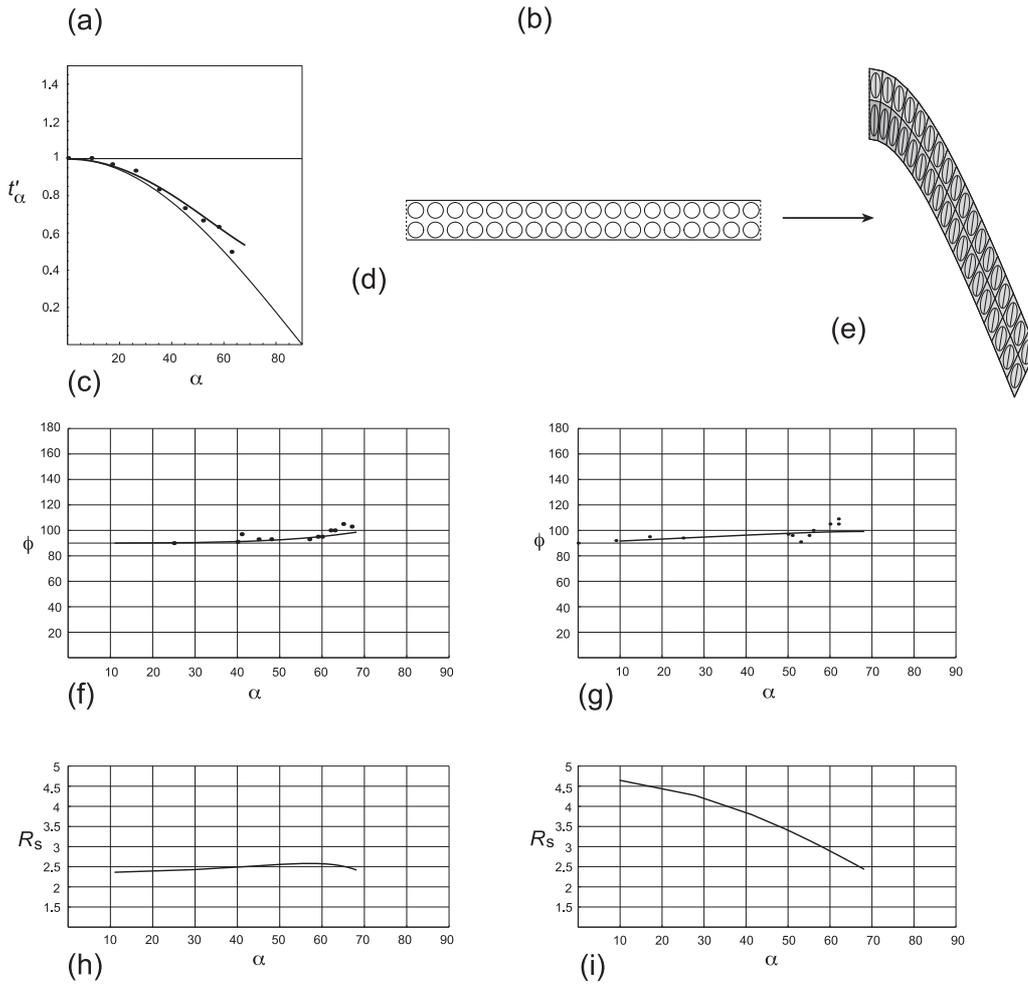
El análisis de la geometría de los pliegues es básico para conocer los mecanismos que originaron estas estructuras y aproximarnos al conocimiento de la deformación sufrida por las rocas en la naturaleza. No obstante, estos mecanismos pueden definirse independientemente a partir de experiencias sencillas que permiten realizar idealizaciones teóricas sobre las formas de producirse los pliegues, cuyo estudio puede ser abordado mediante métodos matemáticos. El conocimiento de los mecanismos determina a su vez qué rasgos geométricos de los pliegues deben ser analizados, de forma que geometría y cinemática del plegamiento son dos aspectos difíciles de separar.

Un mecanismo de plegamiento queda teóricamente bien definido cuando se conocen las ecuaciones de transformación que, cumpliendo los requisitos geométricos que caracterizan el mecanismo, permiten obtener los puntos de la capa plegada a partir de los correspondientes puntos de la configuración original de ésta. De este modo pueden conocerse, y por tanto predecirse, las características de las capas plegadas por un mecanismo determinado, incluyendo su patrón de deformación interna y sus estructuras asociadas (problema directo). La comparación de estas características con las de pliegues naturales puede facilitar el conocimiento de los mecanismos en estos últimos (problema inverso). Para realizar esta comparación se construyen mediante modelización teórica, para cada mecanismo o superposición de mecanismos considerado, dos tipos de curvas para datos obtenidos en los límites de las superficies plegadas. El primer tipo corresponde a curvas que describen la variación de la inclinación del eje mayor de la elipse de la deformación en función de buzamiento, y que pueden ser comparadas en pliegues naturales con la variación del buzamiento del clivaje en función del buzamiento de la capa. El otro tipo corresponde a curvas que describen la variación del cociente entre los ejes de la elipse de la deformación en función del buzamiento; en este caso, la comparación con pliegues naturales requiere la medida de la deformación en las rocas plegadas, que usualmente es la información más difícil de obtener.



|                               | Pliegue teórico | Pliegue natural |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| Rel. de aspecto ( $y_0/x_0$ ) | 1,768           | 1,766           |
| excentricidad ( $e$ )         | 1,063           | 1,090           |
| $t_0/y_{0a}$                  | 0,269           | 0,270           |

Acortamiento global teórico = 55,98%



**Figura 34.** Ejemplo de un buen ajuste de un pliegue natural mediante un pliegue teórico formado por la superposición de mecanismos de deformación usando el programa “FoldModeler”. (a) Anticlinal desarrollado en areniscas del Cámbrico Inferior cerca de Cudillero (Asturias) cuyo flanco derecho ha sido ajustado asumiendo una forma parabólica para la línea guía; (b) comparación de algunos datos de salida del programa para el pliegue teórico con los parámetros correspondientes del pliegue natural ( $t_0/y_{0a}$  es el cociente entre el espesor de la capa en la zona de charnela y la amplitud del arco externo); (c) clasificación de Ramsay de la capa plegada teórica (línea) y del pliegue natural (puntos); (d) configuración inicial de la capa teórica; (e) configuración plegada de la capa teórica mostrando la distribución de elipses de deformación y un sombreado con un nivel de gris proporcional a la relación de aspecto  $R$  de las elipses; (f) y (g) diagramas  $\phi$ - $\alpha$  para los arcos externo e interno respectivamente, mostrando los datos obtenidos para la capa teórica (línea) y del pliegue natural (puntos); (h) e (i) diagramas  $R$ - $\alpha$  para los arcos externo e interno respectivamente, mostrando el patrón de deformación interna predicho a partir del pliegue teórico.

Los mecanismos de plegamiento considerados han sido: deformación longitudinal tangencial, "flexural flow", "flexural slip", acortamiento de la capa, aplastamiento de pliegues, compactación de la capa, achatamiento de pliegues, deformación homogénea rotacional y deformación por cizalla simple heterogénea a través de las capas. Las ecuaciones de transformación de estos mecanismos son conocidas. No obstante, el "flexural slip" es un mecanismo que requiere un desplazamiento entre capas y no puede ser analizado desde el punto de vista de la cinemática de los medios continuos.

Los pliegues naturales se forman por una combinación de mecanismos de plegamiento. Tal combinación puede ser modelizada teóricamente mediante la aplicación de sucesivos pasos de plegamiento, cada uno de los cuales describe la actuación de un determinado mecanismo que produce un cambio en la geometría del pliegue. Para la programación, los pasos se estructuran en bloques, de forma que cada bloque representa una secuencia de pasos de plegamiento que puede repetirse el número de veces que se indique. Cuando cada uno de los pasos implicados en un bloque supone un incremento muy pequeño en la amplitud del pliegue modelizado, y la secuencia de pasos se repite un número grande de veces, se simula la actuación simultánea de los mecanismos implicados. La modelización de pliegues formados por una combinación de mecanismos requiere el encadenamiento de las ecuaciones de transformación de éstos, de forma que la posición de cada punto de la configuración inicial quede perfectamente determinada durante todo el desarrollo del pliegue. Como consecuencia, esta modelización sólo ha sido realizada hasta el momento para algunos mecanismos (deformación longitudinal tangencial, "flexural flow", acortamiento de la capa, aplastamiento de pliegues, compactación de la capa y achatamiento de pliegues) y sólo permite obtener flancos de pliegues simétricos.

Para el seguimiento de la geometría de la capa durante la modelización del plegamiento es útil usar una línea auxiliar, denominada "línea guía", que por lo general es la que equidista inicialmente de los límites de la capa. Con el plegamiento, esta línea adquiere una forma descrita por un trozo de cónica, definido por su amplitud normalizada y su excentricidad, la cual puede variar o no durante la amplificación.

Cada mecanismo o superposición de mecanismos produce unas curvas características de la inclinación del eje mayor de la elipse de deformación o de la relación entre ejes de ésta frente al buzamiento. Un aspecto destacable es que cuando el plegamiento se produce por deforma-

ción longitudinal tangencial o por una combinación de mecanismos en la que dicha deformación interviene, las curvas correspondientes al arco externo y al interno del flanco son diferentes. Además, el citado mecanismo es el único conocido en el que se produce tal diferencia entre curvas. Por tanto, cuando éstas se construyen a partir de datos obtenidos en pliegues naturales, la existencia de esta diferencia es una buena prueba de la actuación de deformación longitudinal tangencial.

La geometría de las capas plegadas es otro rasgo geométrico que depende de los mecanismos de plegamiento y que debe ser analizado en pliegues naturales para su comparación con pliegues modelizados teóricamente. Un aspecto a destacar en este sentido es que ninguno de los mecanismos considerados en la presente revisión da lugar a pliegues de la clase 3 de Ramsay. Este tipo de pliegues aparece con frecuencia en capas constituidas por material incompetente intercaladas entre material competente. Los mecanismos de plegamiento que operan en estas capas son mal conocidos en la actualidad.

El conocimiento preciso de la geometría del plegamiento y del patrón de la distribución de la deformación interna en las capas plegadas debe constituir en el futuro una base para el análisis dinámico del plegamiento. Los análisis llevados a cabo hasta el momento (Ramberg, 1960; Biot 1961, 1965; Johnson y Fletcher, 1994; entre otros) han dado lugar a conceptos muy interesantes (longitud de onda dominante, amplificación selectividad, etc.), que permiten conocer algunos aspectos mecánicos del desarrollo del plegamiento, pero se basan en modelos teóricos sencillos que generalmente son difíciles de aplicar al plegamiento natural, ya que la complejidad de este proceso y las deficiencias de los afloramientos lo impiden. El conocimiento de la distribución de la deformación interna en pliegues debe permitir obtener conclusiones acerca de la correspondiente distribución de esfuerzos y conocer, por ejemplo, cuáles son los pliegues más probables bajo unas condiciones geológicas específicas y por qué en un medio determinado se producen unos pliegues y no otros. Este análisis dinámico estará siempre limitado por el desconocimiento del comportamiento reológico de las rocas cuando se plegaron; los experimentos de la mecánica de rocas deberán contribuir en lo posible a suplir esta deficiencia.

#### Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto BTE2002-0187) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

**Bibliografía**

- ALLER, J., BASTIDA, F., TOIMIL, N. C. y BOBILLO-ARES, N. C. (2004): The use of conic sections for the geometrical analysis of folded surface profiles. *Tectonophysics*, 379:239-254.
- BASTIDA, F., ALLER, J. y BOBILLO-ARES, N. C. (1999): Geometrical analysis of folded surfaces using simple functions. *Journal of Structural Geology*, 21:729-742.
- BASTIDA, F., BOBILLO-ARES, N. C., ALLER, J. y TOIMIL, N. C. (2003): Analysis of folding by superposition of strain patterns. *Journal of Structural Geology*, 25:1121-1139.
- BILLINGS, M. P. (1954): *Structural Geology*, 2.<sup>a</sup> ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 514 pp.
- BIOT, M. A. (1961): Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. *Geological Society America Bulletin*, 72:1595-1620.
- BIOT, M. A. (1965): *Mechanics of the incremental deformations*. Wiley, Nueva York, 504 pp.
- BOBILLO-ARES, N. C., BASTIDA, F. y ALLER, J. (2000). On tangential longitudinal strain folding. *Tectonophysics*, 319:53-68.
- BOBILLO-ARES, N. C., TOIMIL, N. C., ALLER, J. y BASTIDA, F., (2004): 'FoldModeler': a tool for the geometrical and kinematical analysis of folds. *Computers & Geosciences*, 30:147-159.
- BRANNAN, D. A., ESPLEN, M. F. y GRAY, J. J. (1999): *Geometry*. Cambridge University Press, Cambridge, 514 pp.
- CHAPPLE, W. M. (1968): A mathematical theory of finite-amplitude rock-folding. *Geological Society America Bulletin*, 79:47-68.
- DE SITTER, L. U. (1965): *Structural Geology*, 2.<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 551 pp.
- DIETRICH, D. y CASEY, M. (1989): A new tectonic model for the Helvetic nappes. En: *Alpine Tectonics* (M.P. Coward, D. Dietrich, y R.G. Park, Eds.). *Geological Society Special Publication*, 45, Oxford, 47-63.
- DIETERICH, J. H. (1969): Origin of cleavage in folded rocks. *American Journal of Science*, 267:155-165.
- FLEUTY, M. J. (1964): The description of folds. *Proceedings Geological Association of London*, 75:461-492.
- FLEUTY, M. J. (1987): Folds and folding. In: Seyfert, C.K. (Ed.), *The Encyclopedia of Structural Geology and plate tectonics*. Van Nostrand Reinhold, New York, 249-270.
- GAIROLA, V. K. (1978): Three-dimensional strain in fold-hinge zone. *Tectonophysics*, 41:291-319.
- HATCHER, JR. R. D. (1995). *Structural Geology: principles, concepts and problems*. Prentice Hall (2nd ed.), New Jersey, 525 pp.
- HUDLESTON, P. J. (1973): Fold morphology and some geometrical implications of theories of fold development. *Tectonophysics* 16:1-46.
- HUDLESTON, P. J. (1977): Similar folds, recumbent folds and gravity tectonics in ice and rocks. *Journal of Geology*, 85:113-122.
- JOHNSON, A. M. y FLETCHER, R. C. (1994): *Folding of viscous layers*. Columbia University Press, Nueva York, 461 pp.
- KUENEN, P. U. y DE SITTER, L. U. (1938): Experimental investigation into the mechanism of folding. *Leidse Geologische Mededelingen*, 10:271-240.
- MATTAUER, M. (1973): *Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre*. Hermann, París, 493 pp.
- MUKHOPADHYAY, D. (1965): Effects of compression on concentric folds and mechanism of similar folding. *Journal of the Geological Society of India*, 6:27-41.
- PRICE, N. J. y COSGROVE, J. W. (1990): *Analysis of geological structures*. Cambridge University Press, Cambridge, 502 pp.
- RAGAN, D. M. (1969): Structures at the base of an ice fall. *Journal of Geology*, 77: 647-667.
- RAMBERG, H. (1960): Relationship between length of arc and thickness of pygmatically folded veins. *American Journal of Science*, 258:36-46.
- RAMSAY, J. G., (1962): The geometry and mechanics of formation of "similar" type folds. *Journal of Geology*, 70:309-327.
- RAMSAY, J. G. (1967): *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill Book, New York, 568 pp.
- RAMSAY, J. G. y HUBER, M. I. (1987): *Modern structural geology, Volume 2: Folds and Fractures*. Academic Press, London, 392 pp.
- RAMSAY, J. G., CASEY, M. y KLIFFIELD, R. (1983): Role of shear in development of Helvetic fold-thrust belt of Switzerland. *Geology*, 11:439-442.
- SHIMAMOTO, T. y HARA, Y. (1976): Geometry and strain distribution of single-layer fold. *Tectonophysics*, 30:1-34.
- STABLER, C. L. (1968): Simplified Fourier analysis of fold shapes. *Tectonophysics*, 6:343-350.
- STOČES, B. y WHITE, C. H. (1935): *Structural geology with special reference to economic deposits*. Macmillan and Co., Londres, 460 pp.
- STOWE, C. W. (1988): Application of Fourier analysis for computer representation of fold profiles. *Tectonophysics*, 156:303-311.
- TWISS, R. J. (1988): Description and classification of folds in single surfaces. *Journal of Structural Geology*, 10:607-626.
- WOOD, D. S. (1974): Current views of the development of slaty cleavage. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2:369-401.