

Problemas de Geología Estructural

8. Fallas

Rosa Blanca Babín Vich¹. David Gómez Ortiz².

¹Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas.
Universidad Complutense de Madrid. José Antonio Novais, s/n. 28040-Madrid.

rosbabin@geo.ucm.es

²Área de Geología-ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. Tulipán, s/n. 28933-Móstoles.

david.gomez@urjc.es

Resumen: Las fallas constituyen la deformación frágil más frecuente en Geología, y por tanto, al igual que en el caso de los pliegues, se trata de uno de los elementos más representados en Geología Estructural. La proyección estereográfica resulta muy útil a la hora de resolver los numerosos problemas asociados al estudio de las fallas, especialmente en el caso de determinar la orientación de los ejes principales de esfuerzos, así como de obtener el ángulo de rotación asociado a una falla de tipo rotacional. Se muestran numerosos ejemplos de resolución de problemas de fallas mediante el uso de la proyección estereográfica.

Palabras clave: Falla. Ejes de esfuerzos. Deslizamiento neto. Separación. Plano de falla.

DEFINICIONES

Se pueden definir las **fallas** como discontinuidades en rocas a lo largo de las cuales existe un desplazamiento diferencial significativo. Aunque generalmente se han formado durante etapas de deformación frágil, existen todas las transiciones entre fallas frágiles características de rocas situadas en niveles superiores de la corteza, donde el desplazamiento ha tenido lugar a lo largo de un plano de falla bien definido, y zonas de cizalla dúctil, caracterizadas por una deformación importante y rodeadas por rocas que muestran un estado deformativo menos intenso que el presentado por la zona de cizalla propiamente dicha.

Estas discontinuidades cortan y desplazan distintas litologías y la intersección entre la superficie cortada y el plano de falla se conoce como **línea cutoff**. Fallas expuestas en el afloramiento son más visibles en regiones de relieve topográfico acusado, en zonas donde la erosión es especialmente activa y en aquellas áreas donde existe en el presente inestabilidad tectónica. La exposición de un plano de falla es importante para el geólogo estructural, ya que puede contener mucha información acerca de las condiciones de formación de la falla, de su sentido de movimiento y de las orientaciones de los esfuerzos principales responsables de su génesis.

Para orientar en el espacio un plano de falla, lo haremos mediante dirección y buzamiento, sentido de buzamiento y buzamiento o con dos buzamientos aparentes. Si queremos conocer la historia de esta falla, deberemos calcular siempre que sea posible, el **valor del desplazamiento neto**.

Se entiende por **desplazamiento neto (net slip)**, el vector que mide la distancia en la superficie de la falla entre dos puntos originariamente adyacentes, situados en labios opuestos de la falla (Fig. 1) y por tanto nos define el movimiento verdadero de la falla. Esta magnitud no se puede conocer directamente a partir de la proyección estereográfica, necesariamente ha de ser obtenida por geometría descriptiva, pero la construcción se simplifica mucho si las relaciones angulares entre varios planos y líneas se obtienen estereográficamente, así como las rotaciones necesarias en el caso de fallas rotacionales. Con la información obtenida, resolvemos el resto del problema mediante planos acotados o geometría descriptiva.

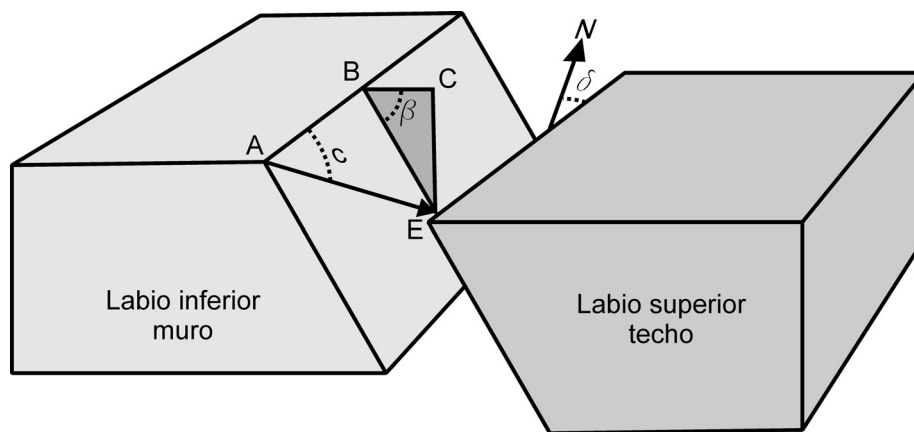


Figura 1. Desplazamiento neto de una falla (AE), orientado en función de su ángulo de cabeceo (c) medido en el plano de falla. β : Buzamiento del plano de falla. AB: Separación medida según la dirección de la falla. BE: Separación medida según el buzamiento de la falla. BC: Componente horizontal de la separación de buzamiento. CE: Componente vertical de la separación de buzamiento.

El **desplazamiento** (deslizamiento, salto) neto es un vector, por tanto desde el punto de vista de la Geología Estructural se considera una línea y como tal se orientará en el espacio mediante sentido de inmersión e inmersión, o bien cabeceo sobre el plano de falla o sobre cualquiera de los planos conocidos desplazados por ella. Su magnitud se definirá con una escala adecuada. Conocidos estos datos, sabemos perfectamente cómo y cuánto se ha movido esta falla:

En ocasiones no es posible observar, y por tanto medir, el desplazamiento neto. En este caso, se puede medir la separación entendiendo por **separación (offset)** la distancia entre las partes desplazadas de una superficie geológica reconocible, medida según una dirección determinada (Fig. 2). Esta medida no permite conocer el verdadero movimiento de la falla, ya que la separación únicamente informa acerca del movimiento aparente según una dirección escogida. En la figura 2 están representadas las separaciones más utilizadas. Una vez conocidas las dos definiciones anteriores, es

importante no confundir deslizamiento con separación en una falla y saber en cada caso cual es la medida que estamos efectuando en relación con el plano de falla.

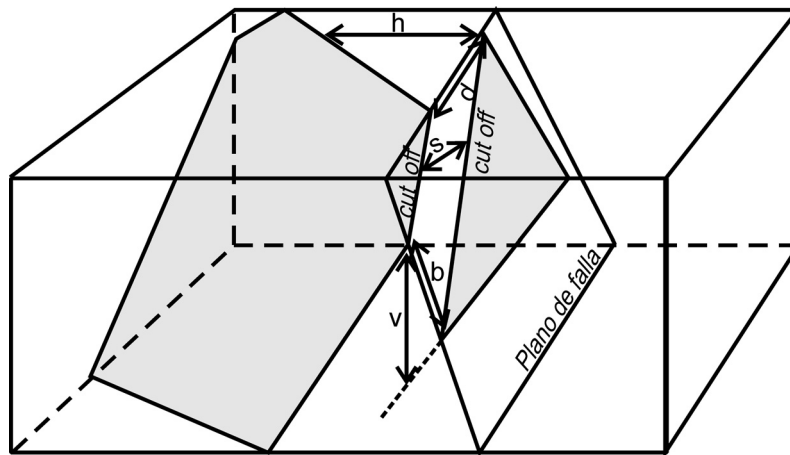


Figura 2. Distintas separaciones que se pueden medir en relación con el plano de falla y/o con el elemento desplazado por ella. V: separación vertical; h: separación horizontal; d: separación en dirección; b: separación en buzamiento.

CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO NETO EN UNA FALLA TRASLACIONAL (NO ROTACIONAL)

En cualquier libro de Geología Estructural el alumno puede repasar como se resuelve este problema mediante geometría descriptiva. La ayuda que proporciona la proyección estereográfica se aprecia en el ejemplo siguiente.

Ejemplo 1. Una falla de dirección 270° y buzamiento $40^\circ S$ corta a una serie sedimentaria y a un dique según aparece en el esquema de la figura 3. La estratificación está orientada $N30^\circ E-60^\circ O$ y el dique, $120^\circ-35^\circ NE$. Determinar la magnitud y orientación del deslizamiento neto, su cabeceo medido en el plano de falla y el movimiento relativo de la falla.

Visualizar el problema construyendo un bloque diagrama con la disposición de falla, estrato y dique, y sus respectivas *cut off* (Fig. 3 A). En la figura 3 B, se observa la disposición de los tres planos en proyección esférica, en el hemisferio inferior de la esfera.

Construimos el estereograma proyectando la falla, el dique y el estrato (Fig. 3 C). El punto de intersección de los círculos mayores que corresponden a la falla y el dique, representa la traza del dique en el plano de falla (línea de corte del dique y la falla, vista en el plano de falla). El punto de intersección de falla y estrato representa igualmente la traza del estrato en el plano de falla.

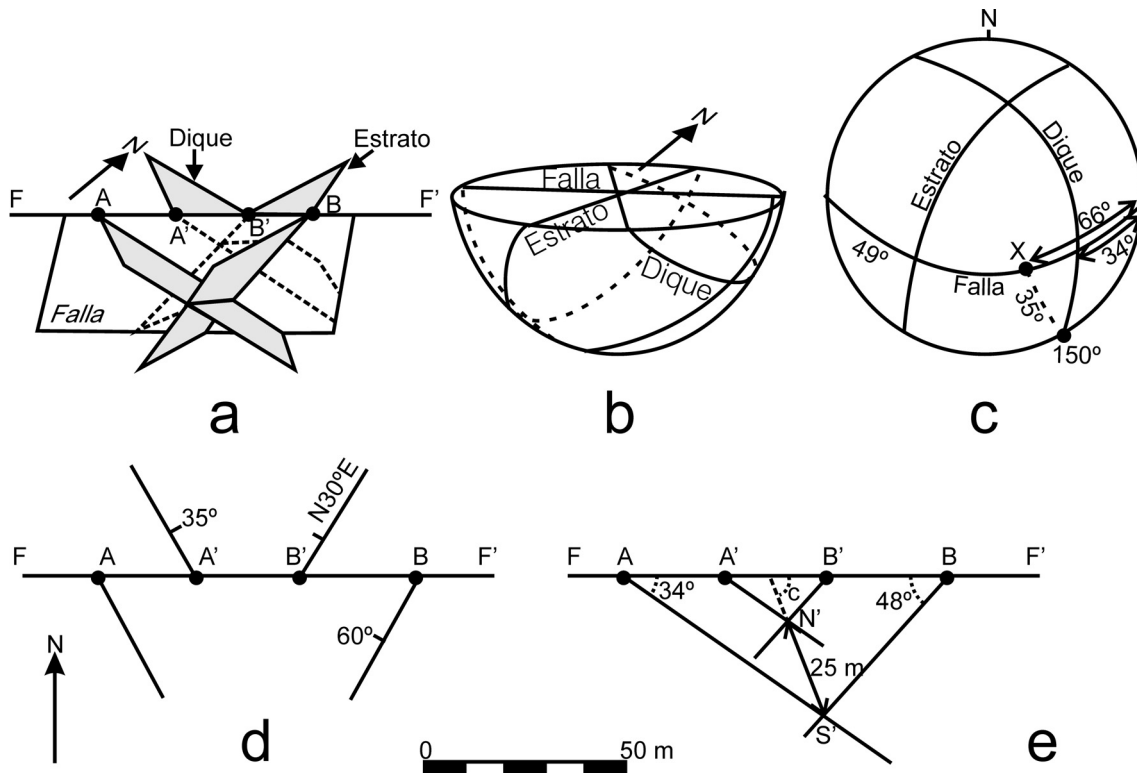


Figura 3. Cálculo del desplazamiento neto en una falla traslacional. Resolución del ejemplo nº 1 del texto. Ver el mismo para su explicación.

Para determinar la magnitud del desplazamiento neto, necesitamos construir una sección paralela al plano de falla. En esta sección, todas las líneas contenidas en el plano de falla (incluidas las trazas anteriores) se pueden representar mediante los ángulos de cabeceo medidos respecto a la línea de dirección de la falla. Estos ángulos para el dique y el estrato, se miden directamente en el estereograma (Fig. 3 C), llevando el círculo mayor que representa el plano de falla al diámetro N-S de la falsilla y contando el ángulo correspondiente ayudándonos de los círculos menores. Los valores de los cabeceos son: 34° E para el dique y 48° O para el estrato.

En la figura 3 D se aprecia la disposición en dos dimensiones de los tres planos, falla, dique y estrato. Dibujamos una sección paralela al plano de falla (Fig. 3 E) con las trazas del dique y el estrato con sus orientaciones, usando los ángulos de cabeceo medidos en el estereograma. Las trazas que pasan por los puntos A y B correspondientes al labio sur de la falla (labio inferior o muro), se cortan en el punto S'. Las que pasan por A' y B', correspondientes al labio norte (labio superior o techo), se cortan en el punto N'. Observar que las trazas correspondientes al dique son paralelas en ambos labios de la falla, ya que esta no es rotacional. Lo mismo sucede en el caso del estrato.

La línea N'-S' define la magnitud del desplazamiento neto, medido a la escala utilizada en el problema. En este caso es de 25 m. Observamos que el punto N', correspondiente al labio norte, está por encima (tiene mayor cota) del

correspondiente al labio sur, S'. Como la falla buza hacia el sur, su movimiento en la vertical es de falla normal (el labio superior o techo, descende). Asimismo, S' está situado a la derecha de N', lo que indica que el labio sur se ha movido hacia la derecha con respecto al labio norte, por tanto y respecto al movimiento en la horizontal de la falla, es de tipo sinistral.

Medimos el cabeceo del deslizamiento neto en el plano de falla con un transportador, midiendo el ángulo agudo entre la línea de dirección de la falla y la línea correspondiente al desplazamiento neto, que resulta ser de 66°E. Llevamos este valor al estereograma (Fig. 3 C) y colocamos el punto que representa el desplazamiento neto (X). La dirección e inmersión de esta línea nos da la orientación del desplazamiento neto en el espacio: 150°/35°.

CÁLCULO DEL DESPLAZAMIENTO NETO EN UNA FALLA ROTACIONAL

En los extremos o partes finales de las fallas es frecuente la existencia de áreas en las que el desplazamiento de la falla decrece y llega a ser nulo en una distancia pequeña. En estas zonas puede existir una componente de desplazamiento rotacional.

Para una falla con movimiento rotacional, la magnitud del desplazamiento se puede conocer si previamente se conoce el polo de rotación. Suponiendo que a lo largo de la falla no existen **gaps (vacíos)** u **overlaps (solapes)**, **el polo de rotación de una falla rotacional es la línea perpendicular al plano de falla**. Con esta premisa, podemos resolver problemas de fallas rotacionales directamente con la proyección estereográfica, en función de rotaciones alrededor de ejes horizontales, verticales o inclinados, como ya se ha explicado en Babín y Gómez (2010).

Ejemplo 2. Una falla de orientación 150°-40°E corta a un estrato y a un dique. La orientación del estrato es N20°E-30°O en el labio oeste de la falla. Si la falla ha sufrido una rotación de 40° en sentido contrario a las agujas del reloj ¿cuál será la orientación del estrato en el labio este?

En esta primera parte del problema proyectamos los círculos mayores correspondientes a la falla y el estrato en el labio oeste de la falla, así como sus polos F y E (Fig. 4 A). Recordar que el polo de rotación en una falla rotacional es la perpendicular al plano de falla, o sea, su polar.

Colocar la dirección de la falla sobre el diámetro norte-sur de la falsilla. Rotamos la falla 40° hasta la horizontal (llevamos el plano de falla a la horizontal) y su polo pasa a la posición F', en el centro de la falsilla. El polo del estrato se mueve a lo largo de su círculo menor los mismos grados y en el mismo sentido, hasta E' (Fig. 4 B). El plano de falla está ahora horizontal y su polo, vertical, por tanto podemos aplicar una rotación alrededor de un eje vertical, de 40° en sentido contrario a las agujas del reloj y obtenemos el punto E''.

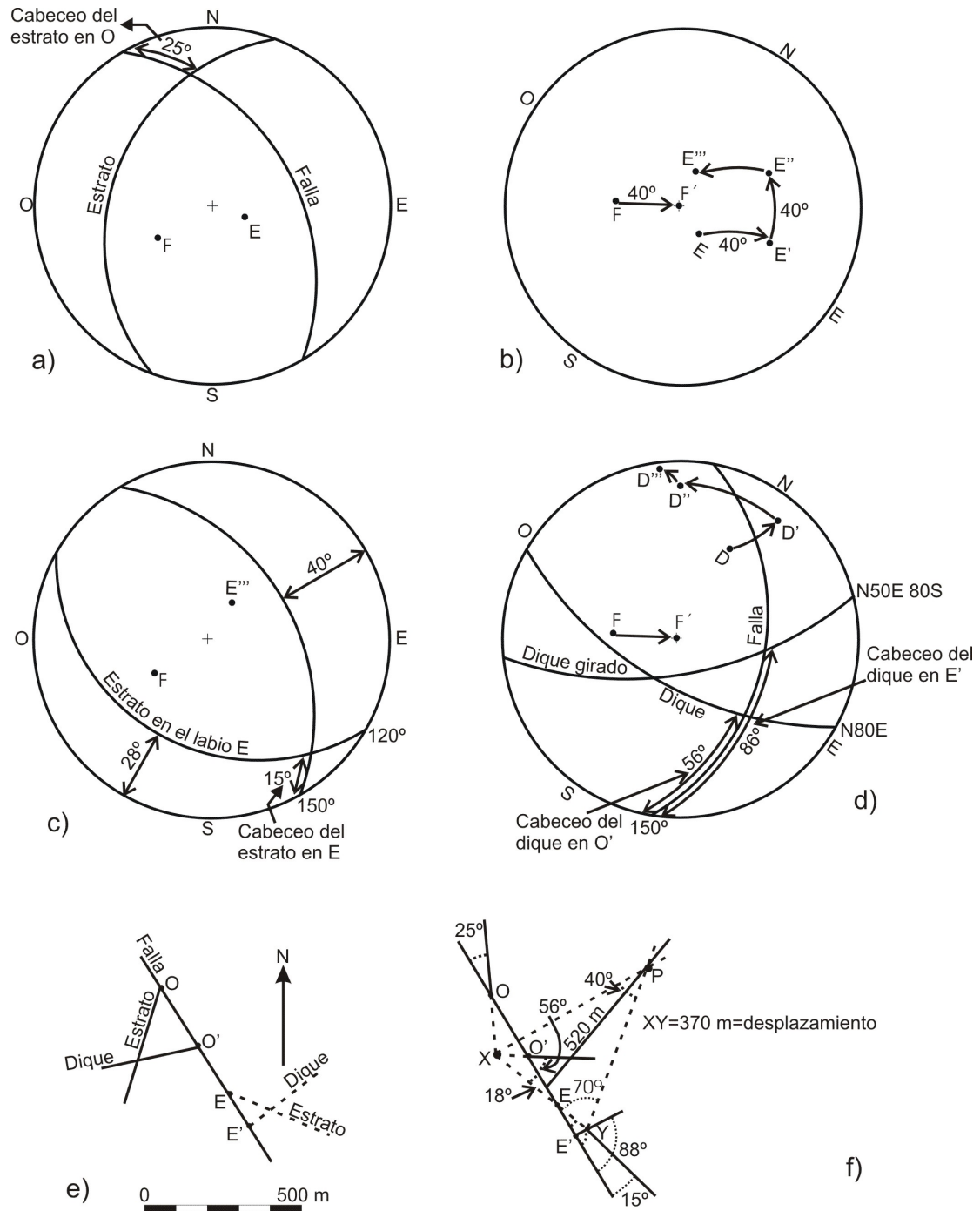


Figura 4. Cálculo del desplazamiento neto en una falla rotacional. Resolución del ejemplo nº 2 del texto. Ver el mismo para su explicación.

Rotar la falla nuevamente 40° alrededor del eje horizontal N-S para colocarla en su posición inclinada original. El polo de la estratificación se mueve los mismos 40° y en el mismo sentido a lo largo de su círculo menor, hasta la posición E'''. Al mismo tiempo el polo de la falla vuelve a su posición original F. Se coloca E''' sobre el

diámetro E-O de la falsilla y se lee la orientación correspondiente del estrato en el labio este de la falla, que resulta ser de 120° - 28° SO (Fig. 4 B y C).

El dique, de orientación $N80^{\circ}E-60^{\circ}S$, está expuesto como indica el dibujo en W' en el lado oeste de la falla y en E' en el lado este (Fig. 4 E). ¿Cuál será la orientación y magnitud del deslizamiento neto y la posición del polo de rotación de la falla?

Seguimos el mismo método anterior para determinar la orientación del dique en el labio este de la falla. Esta orientación es $N50^{\circ}E-80^{\circ}S$ (Fig. 4 D).

Para resolver esta segunda parte del problema, partimos del dibujo anterior que muestra las posiciones relativas de dique y estrato en ambos labios de la falla (Fig. 4 E).

Los ángulos de cabeceo de las trazas de estrato y dique en ambos labios este y oeste de la falla, se calculan a partir del estereograma. Pasamos esta información a un plano paralelo al plano de falla, colocando cada uno de los elementos en su posición apropiada (Fig. 4 F). La línea XY resulta de la unión de las intersecciones de estrato y dique en ambos labios de la falla, por tanto representa el desplazamiento neto de la falla, cuya magnitud medida a escala es de 370 m. La orientación de este desplazamiento neto viene dada por el cabeceo de la línea medido en el plano de falla, que resulta ser de $18^{\circ}S$.

El polo de rotación de la falla (P) está situado en el bisector perpendicular al deslizamiento neto, y debe tener un ángulo de rotación de 40° en este polo. Los otros dos ángulos del triángulo son iguales, cada uno de valor 70° . Construimos esos ángulos en X y en Y, y hallamos la posición de P, que está a una distancia de 520 m sobre el bisector perpendicular a la línea de deslizamiento neto.

En este caso, la magnitud y orientación de la rotación está perfectamente definida. En el supuesto de que esto no sea así, habrá dos posiciones posibles para el polo de rotación y sería necesario disponer de información adicional para resolver el problema, como estrías u otros marcadores desplazados.

CÁLCULO DE LAS DIRECCIONES PRINCIPALES DE ESFUERZOS EN SISTEMAS DE FALLAS CONJUGADAS

Conceptos teóricos

Se entiende por **fallas conjugadas** aquellas fallas contemporáneas que se han formado en condiciones de esfuerzos similares. Estas fallas se disponen de forma simétrica en relación con los ejes principales de los esfuerzos aplicados (Fig. 5). La dirección de deslizamiento en cada falla del sistema conjugado, suele ser normal a la línea de intersección de las dos fallas.

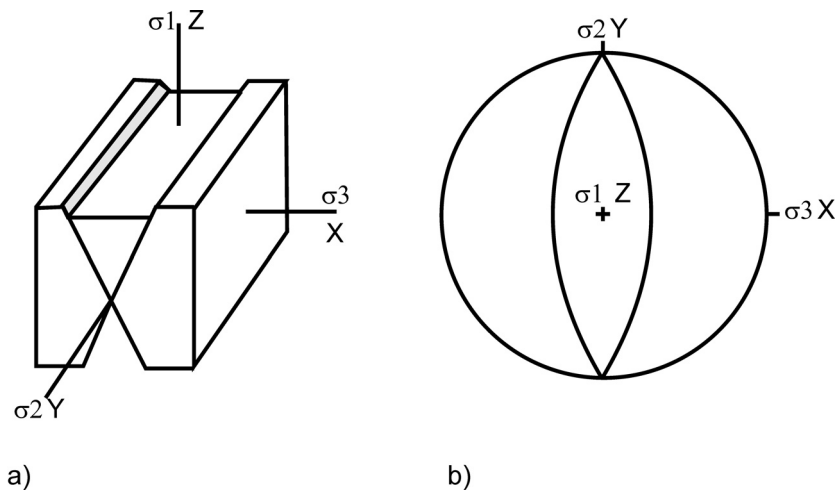


Figura 5. Disposición de los ejes de esfuerzo en un sistema de fallas conjugadas, según el modelo de Anderson, para el caso de fallas normales. Los ejes principales de la deformación son X, Y y Z. El eje de esfuerzos máximo es vertical.

Anderson (1951) reconoció que las propiedades de las direcciones de esfuerzos principales en combinación con la ley de Mohr-Coulomb, requieren que cerca de la superficie de la tierra solo se puedan formar fallas de deslizamiento según la dirección (desgarres), y fallas de deslizamiento según el buzamiento (normales e inversas).

Considerando que la tierra es una esfera perfecta, este autor supone que la discontinuidad entre aire y suelo en cualquier punto de la superficie de la tierra, es un plano a lo largo del cual el esfuerzo de cizalla es cero. Si las direcciones principales de esfuerzos cumplen que la componente de cizalla es cero, se puede considerar la superficie de la tierra como un plano principal que contiene dos de las tres direcciones principales de esfuerzos. La tercera, sería perpendicular a este plano principal, y en cualquier punto, es perpendicular a la superficie de una tierra teóricamente esférica. Si las direcciones principales de esfuerzos son verticales u horizontales cerca o en la superficie de la tierra, y si el ángulo de fricción interna para muchas rocas es cercano a 30° , solo se pueden formar cerca de la superficie fallas normales, inversas y desgarres. Fallas inversas cuando σ_3 es vertical, desgarres cuando σ_2 es vertical y fallas normales cuando es vertical σ_1 .

- **Modelo de deslizamiento (Modelo de Rechés)**

Los trabajos de Rechés (1983) muestran que, en el caso más general, las fallas en una región se disponen en cuatro familias con dos direcciones y buzamientos contrarios, como resultado natural de un campo de deformación tridimensional (Fig. 6). Las relaciones entre fallas formadas de esta manera dependen no solo del ángulo de fricción interna de la roca, sino del radio de deformación a lo largo de los ejes principales de la deformación, X, Y y Z. Este modelo intenta explicar el hecho de que en condiciones triaxiales de deformación frágil, las fracturas se disponen según una simetría ortorrómbica con respecto a los ejes fundamentales del elipsoide de deformación. Incluye

como caso particular (deformación plana) el modelo de fracturación de Anderson, que presenta una simetría de los planos de falla de tipo monoclinico.

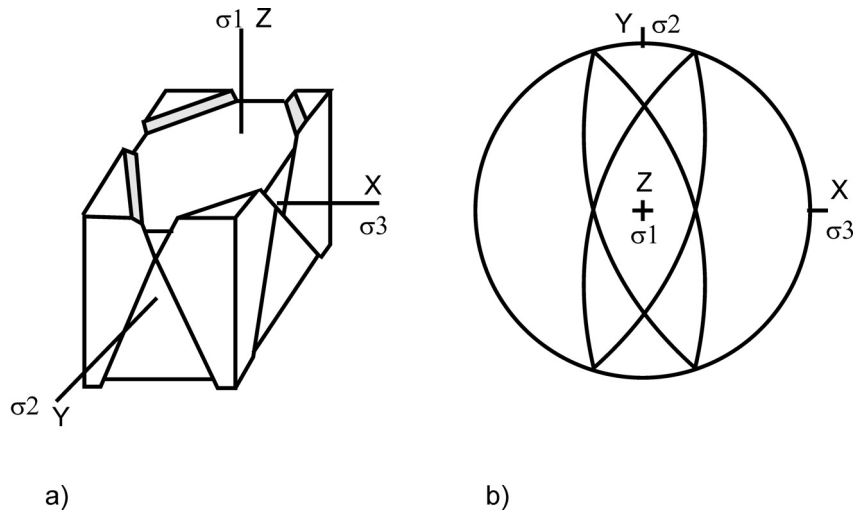


Figura 6. Modelo de deslizamiento de Rectas para fallas conjugadas, utilizado para obtener la orientación del máximo acortamiento horizontal. Ver texto para su explicación.

El modelo de deslizamiento se utiliza para obtener de forma directa, la orientación del máximo acortamiento horizontal y la forma del elipsoide de deformación.

- **Método de los diedros rectos**

La teoría de Mohr-Coulomb predice la formación de fallas en sistemas conjugados, con simetría ortorrómbica, corroborado por experimentos de deformación triaxial. La cartografía en zonas de intensa deformación, muestra la existencia de cuatro conjuntos de fallas, cada una de ellas con su par conjugado. ¿Es posible que todas ellas se hayan formado en un mismo evento deformativo?

En este método gráfico, uno de los más utilizados en Geología Estructural, se trabaja con cada uno de los planos de falla por separado. Se basa en limitar para cada falla las zonas del espacio compatibles en compresión y en extensión, superponiendo estos campos en proyección estereográfica. Construimos el estereograma con el plano de falla y un segundo plano, perpendicular a la falla y a su dirección de deslizamiento, llamado plano auxiliar. Estos dos planos dividen todas las posibles direcciones en la esfera en dos pares de cuadrantes (blancos y oscuros en la figura 7). Dependiendo del sentido de movimiento de la falla, un par de cuadrantes opuestos delimita la posible orientación de σ_1 (diedro en compresión), y el otro par, la de σ_3 (diedro en extensión).

Las condiciones impuestas para obtener mejores resultados son:

- ✓ Los ejes de máxima compresión y extensión, deben ser perpendiculares.

- ✓ Ambos ejes deben estar en parejas opuestas de diedros.

Si tomamos los datos para varias fallas desarrolladas bajo el mismo campo de esfuerzos, las direcciones de esfuerzos se pueden estimar con el siguiente método estereográfico:

- ✓ Para cada falla por separado, dibujar los círculos mayores que representan el plano de falla y el plano auxiliar. Usando el sentido de movimiento de la falla, decidimos cuales son los cuadrantes correspondientes a σ_1 y a σ_3 .
- ✓ Superponemos los distintos estereogramas de cada una de las fallas y obtenemos las zonas donde se sitúan los valores de estos dos ejes principales de esfuerzos (Fig. 7).

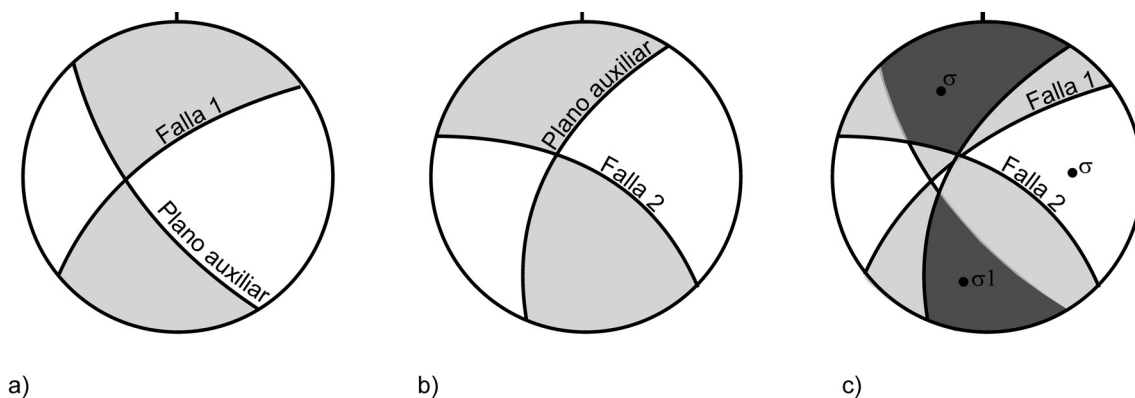


Figura 7. Método de los diedros rectos para fallas conjugadas. a) estereograma para la falla 1. b) estereograma para la falla 2. c) superposición de los estereogramas anteriores.

• **Modelo de Anderson**

A partir de las orientaciones de las fallas que se han formado en un campo de esfuerzos dado, se puede evaluar estereográficamente la orientación de los esfuerzos principales que han dado lugar a estas fallas, o bien, conocida la orientación de los esfuerzos y el valor del ángulo de fricción interna de la roca, deducir la orientación y características de las fallas resultantes.

Supongamos un campo de esfuerzos donde se cumple que: σ_1 : N20°E / 0°; σ_2 : N70°O / 0° y σ_3 es vertical. El ángulo de fricción interna es de 30°.

Como σ_3 es vertical, las fallas conjugadas resultantes serían inversas según Anderson. Sus orientaciones probables se pueden predecir teniendo en cuenta todo lo aprendido acerca de la formación de fallas conjugadas. Recordemos las principales premisas (Fig. 8):

- ✓ Los tres ejes principales de esfuerzos son perpendiculares entre sí.

- ✓ La línea de intersección de los círculos mayores que representan a las fallas conjugadas, es σ_2 .
- ✓ El plano perpendicular a σ_2 se denomina plano de movimiento, y contiene a σ_1 y σ_3 .

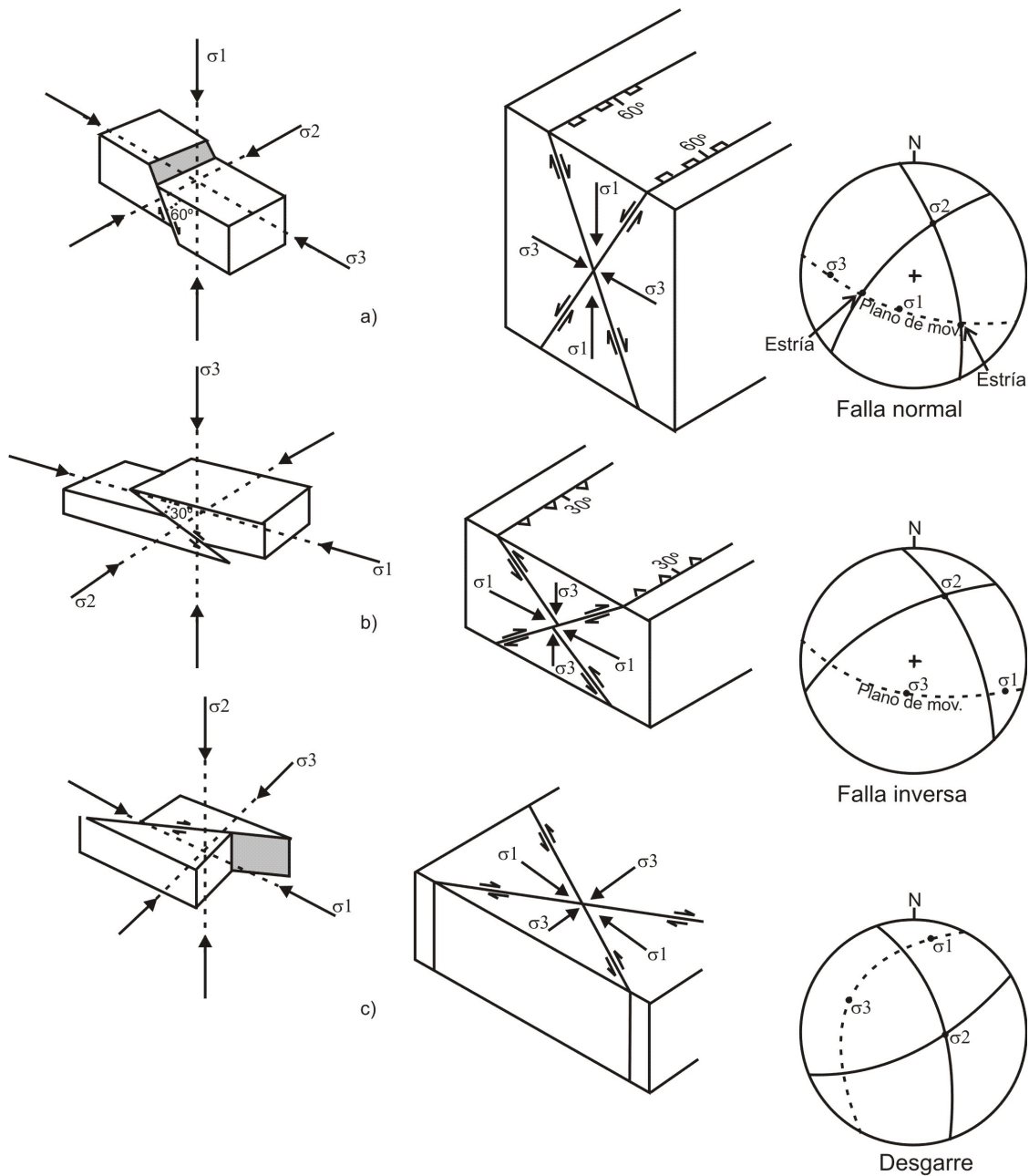


Figura 8. Modelo de Anderson para fallas conjugadas con movimiento normal, inverso o en dirección. Bloque diagrama y estereograma resultante para cada tipo de falla.

- ✓ σ_1 es la bisectriz del ángulo agudo formado por las dos fallas conjugadas y σ_3 , del ángulo obtuso.

- ✓ Las estrías correspondientes a cada una de las fallas están definidas por el punto de corte en la proyección esteroográfica, de la falla correspondiente con el plano de movimiento.

Teniendo en cuenta estas relaciones geométricas, vamos a proyectar los datos del ejemplo anterior, donde existen dos ejes principales de esfuerzo horizontales y el tercero, vertical (Fig. 9). Dibujamos el plano de movimiento colocando σ_1 y σ_3 en un círculo mayor que resulta ser un plano vertical. Contando 30° (ángulo de rozamiento interno) desde σ_1 en ambos sentidos sobre el plano de movimiento, obtenemos dos puntos de referencia (1 y 2) que representan la intersección de los planos de falla con el plano de movimiento σ_1/σ_3 .

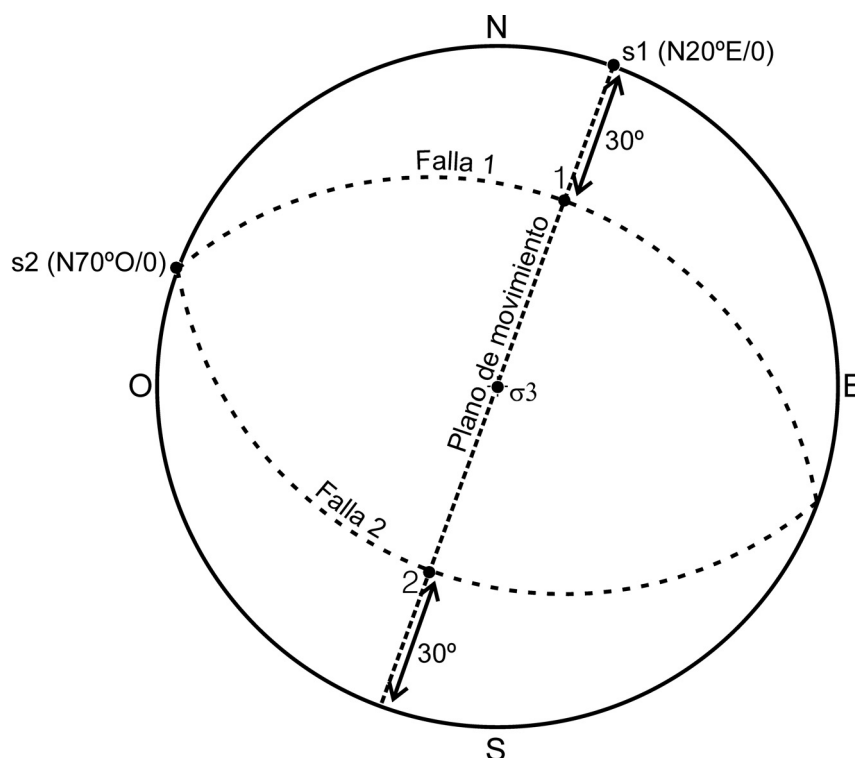


Figura 9. Aplicación del Modelo de Anderson conocidas las orientaciones de los ejes de esfuerzo. Ver texto para su explicación.

Dibujamos el plano que contiene el eje de esfuerzos intermedio σ_2 y el punto de referencia 1. Este plano corresponde a una de las fallas conjugadas. Hacemos lo mismo con el punto de referencia 2 y σ_2 , y obtenemos la segunda falla conjugada. Leemos directamente en la falsilla y las fallas tienen una dirección de $N70^\circ O$ con buzamientos de 30° al este y oeste respectivamente.

Las estrías están indicadas en la misma figura anterior, en los puntos de corte de cada una de las fallas con el plano de movimiento (puntos 1 y 2).

En el caso frecuente de que una o más de las direcciones principales de esfuerzos no sea horizontal ni vertical, sino inclinada, la resolución estereográfica es exactamente la misma. Considerar la situación general donde ninguno de los esfuerzos principales es vertical u horizontal, todos son inclinados. Definimos el plano σ_1/σ_3 y su polo, que corresponde a σ_2 . Buscamos dos puntos de referencia en función del valor del ángulo de rozamiento interno y trazamos los círculos mayores que corresponden a las fallas conjugadas.

Ejemplo 3. En una cantera se observa un sistema de fallas conjugadas, con orientaciones N54°O-78°E y N24°O-42°SO. Situar en el espacio las direcciones principales de esfuerzos tan aproximadamente como sea posible.

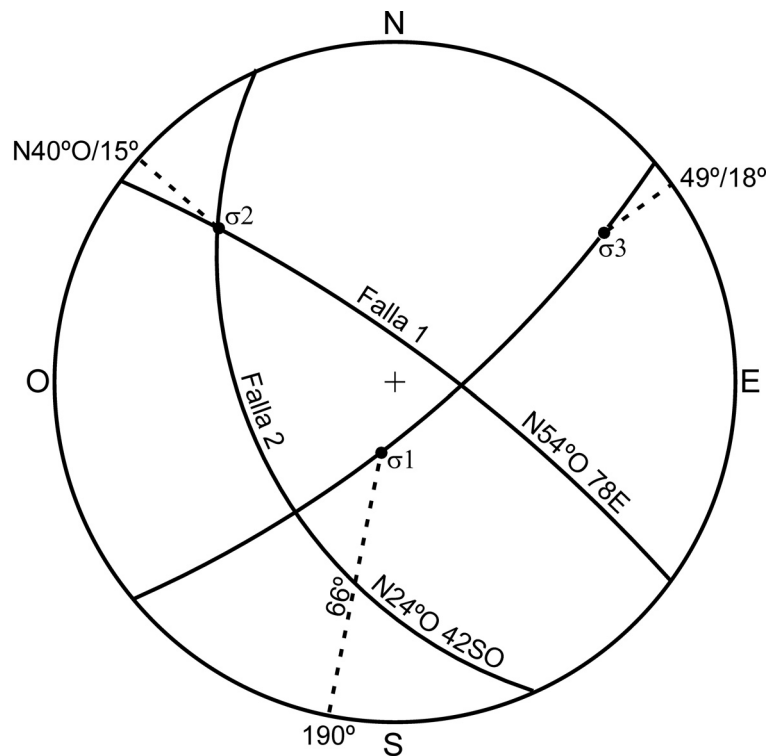


Figura 10. Resolución del ejemplo nº 3. Ver texto para su explicación.

En este caso, hemos medido en el campo la orientación del sistema conjugado y queremos saber cuáles son las orientaciones correspondientes a los ejes de esfuerzos principales. El procedimiento es el siguiente (Fig. 10):

- Proyectamos los círculos mayores correspondientes a las fallas. El punto de corte en el estereograma representa la línea de corte de las dos fallas, por tanto, el eje σ_2 . Leemos dirección e inmersión en la falsilla: N40°O/16°.
- Dibujamos el plano perpendicular a σ_2 (plano de movimiento). En este plano están situados σ_1 en el punto medio del ángulo agudo entre las fallas y σ_3 en la mitad del ángulo obtuso. El valor del ángulo agudo es de 64°, hallamos su

punto medio y colocamos el eje de esfuerzos máximo σ_1 que tiene una orientación de $188^\circ/65^\circ$.

- A 90° de σ_1 está situado σ_3 , cuya orientación es $N48^\circ E/19^\circ$. En este ejemplo, las fallas conjugadas se comportan como fallas normales, ya que σ_1 está situado cerca de la vertical.

CONCLUSIONES

Como hemos visto, la proyección estereográfica ayuda a resolver gran cantidad de problemas relacionados con fallas y con el conocimiento del campo de esfuerzos que ha dado lugar a esta deformación discontinua. En fallas rotacionales, es imprescindible este tipo de proyección, pero también ayuda en fallas traslacionales para el conocimiento rápido de muchos de los ángulos que intervienen en la resolución del problema.

PROBLEMAS

Problema 1

Un plano de falla con orientación $130^\circ-30^\circ N$ desplaza a un estrato orientado $118^\circ-70^\circ N$. ¿Cuál es la orientación de la línea *cut-off*?

Se trata simplemente de hallar la orientación de la línea de intersección entre dos planos, como ya se ha hecho en los primeros capítulos.

- Dibujar el estereograma con los círculos mayores correspondientes a los dos planos (Fig. 11).
- El punto de intersección de estos círculos corresponde a la línea *cut-off* pedida (L). Su orientación es $112^\circ/16^\circ$.

Problema 2

En un plano de falla se observan dos familias distintas de estrías. Sus orientaciones respectivas son: $22^\circ/325^\circ$ y $50^\circ/041^\circ$. Hallar la orientación del plano de falla.

Este problema es similar al cálculo de la orientación de un plano conocido, dos buzamientos aparentes del mismo, o bien dos líneas inscritas en el plano (Fig. 12).

Cada uno de ellos estará representado en la proyección por un punto, y el círculo mayor que contiene a los dos puntos será el plano buscado.

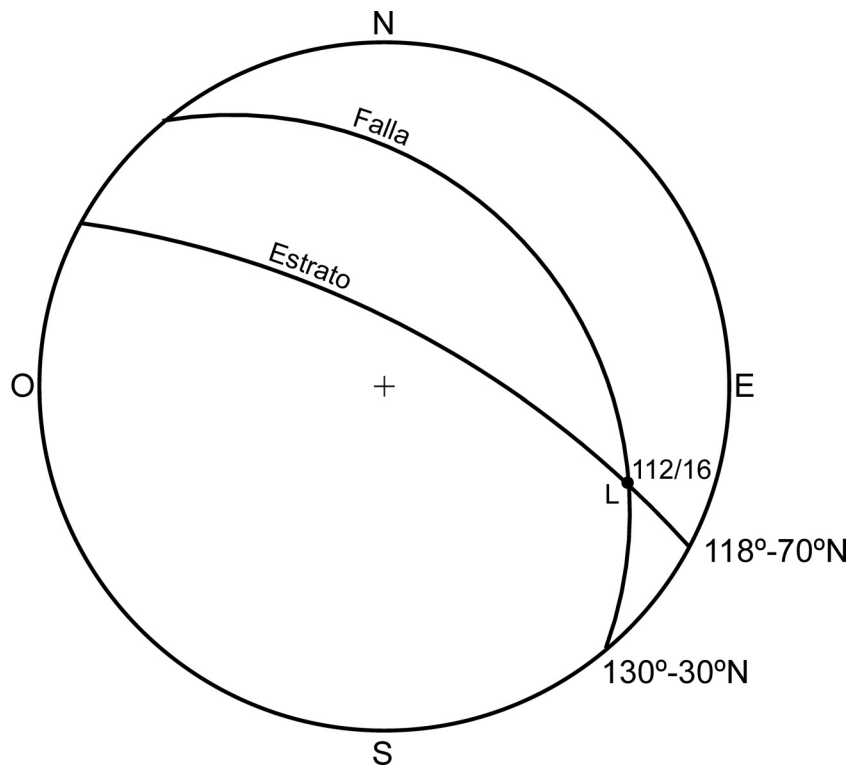


Figura 11. Resolución del problema 1. Ver texto para su explicación.

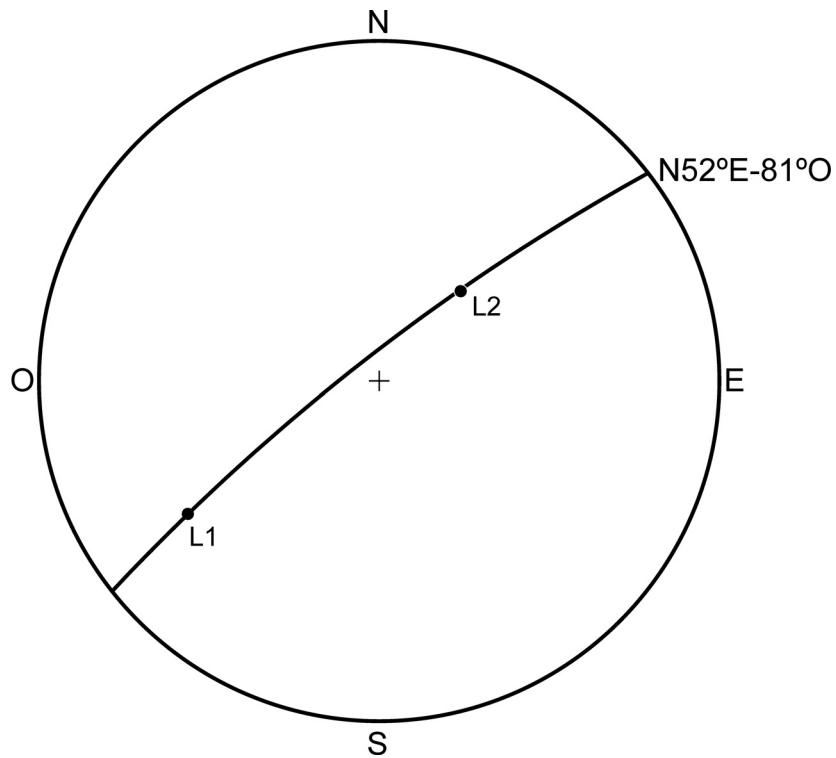


Figura 12. Resolución del problema 2. Ver texto para su explicación.

- Proyectar cada una de las estrías.
- Moviéndolo sobre la falsilla, dibujar el círculo mayor que las contiene.
- Leer la orientación del plano de falla, que es $N52^{\circ}E-81^{\circ}O$.

Problema 3

Dos fallas conjugadas tienen las siguientes orientaciones. $046^{\circ}-50^{\circ}SE$ y $147^{\circ}-40^{\circ}NE$. Calcular la orientación de los ejes principales de esfuerzos y de las estrías correspondientes a cada falla.

- Representar los dos planos de falla en la proyección (Fig. 13).

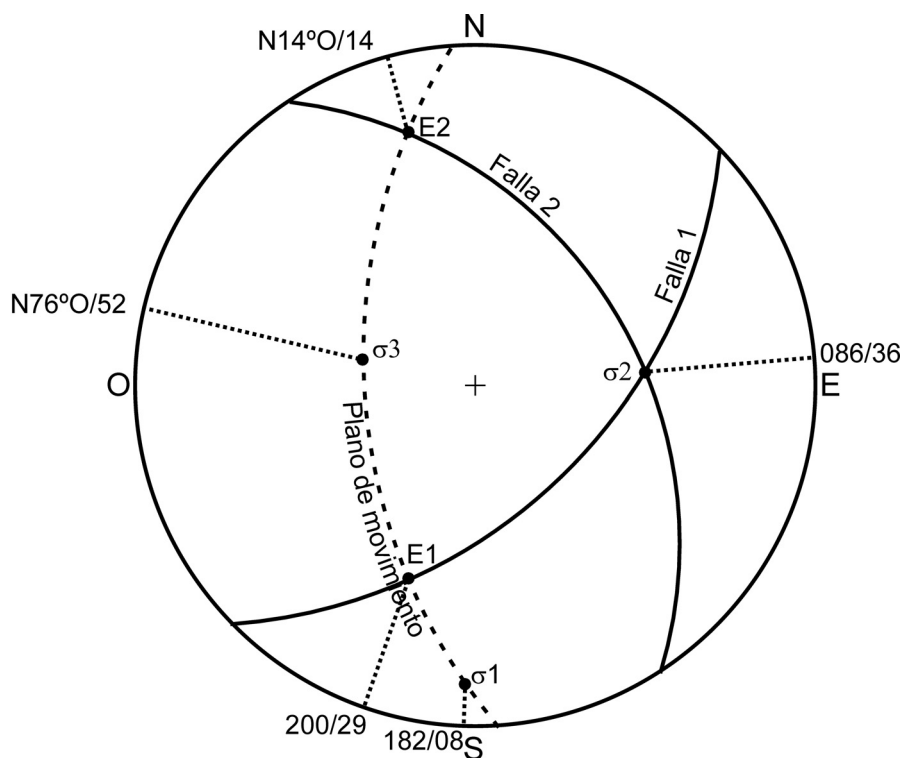


Figura 13. Resolución del problema 3. Ver texto para su explicación.

- El punto de corte de ambos planos, representa el eje de esfuerzos intermedio, σ_2 , cuya orientación es de $086^{\circ}/36^{\circ}$.
- Dibujamos el plano de movimiento, perpendicular a σ_2 , y situamos en él la posición de los dos ejes de esfuerzo restantes: σ_3 es la bisectriz del ángulo obtuso ($N76^{\circ}O/52^{\circ}$) y σ_1 ($182^{\circ}/08^{\circ}$), la del ángulo agudo.

- Las estrías estarán situadas en el plano de falla y en el plano de movimiento, así que corresponden a los puntos de corte de este plano con cada una de las fallas. En el estereograma están representadas por E1 y E2, siendo sus orientaciones $200^{\circ}/29^{\circ}$ y $N14^{\circ}O/14^{\circ}$.
- En este caso, se observa en el estereograma que el eje de esfuerzos σ_3 se sitúa cerca de la vertical, luego las fallas se van a comportar como inversas, según Anderson.

Problema 4

En una falla de deslizamiento sinistral orientada $N30^{\circ}E-70^{\circ}O$, se ha medido una dirección de deslizamiento (estría) con un cabeceo de $15^{\circ}N$. Localizar las direcciones principales de esfuerzos tan aproximadamente como sea posible, suponiendo que el ángulo de rozamiento interno tiene un valor de 30° (Fig. 14).

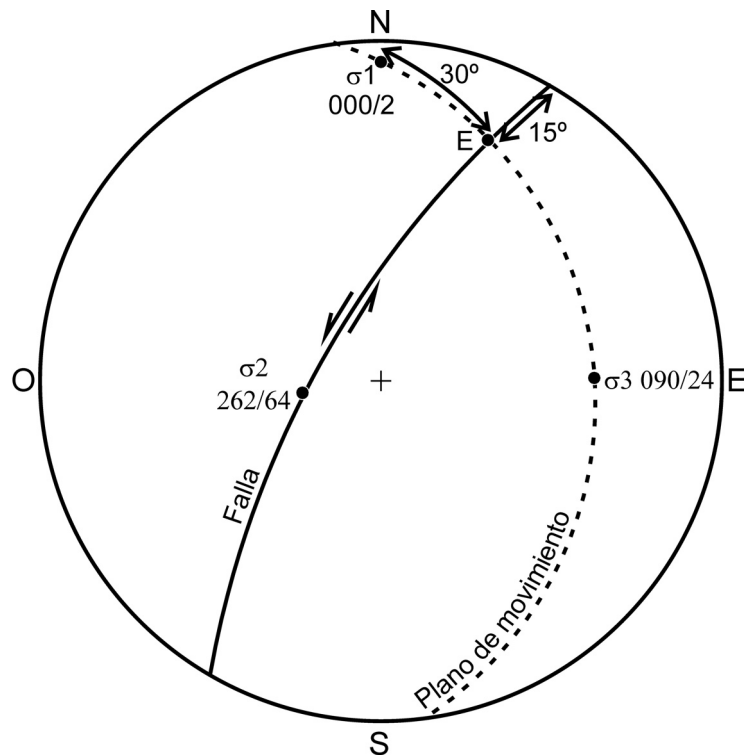


Figura 14. Resolución del problema 4. Ver texto para su explicación.

- Representar el estereograma con la falla sinistral y la estría (E).
- Representar el eje de esfuerzos intermedio σ_2 , que estará situado sobre el plano de falla y a 90° de la estría. Su orientación es $262^{\circ}/64^{\circ}$.
- Dibujar el plano de movimiento que contiene a los otros dos ejes de esfuerzo. Será el plano que es perpendicular a σ_2 , o el plano cuyo polo es σ_2 .

- Sobre este plano de movimiento están situados σ_1 y σ_3 , a 90° uno del otro. Como el ángulo de rozamiento interno es de 30° , usando la fórmula que relaciona este ángulo (Φ) con el ángulo agudo formado por las fallas conjugadas (2μ), podemos conocer el ángulo entre la estría y el eje principal σ_1 que es (μ).

$$\Phi = 90^\circ - 2\mu$$

- El ángulo (μ) tiene un valor de 30° , luego a partir de la estría y sobre el plano de movimiento, debemos contar 30° , en este caso hacia el norte, ya que la falla es sinistral. Ese punto nos da la orientación de σ_1 , que es $000^\circ/02^\circ$.

Problema 5

Una falla rotacional orientada $N40^\circ E-50^\circ SE$, corta a una secuencia de capas horizontales. El labio SE, bloque superior de la falla (techo), ha girado hacia el SW un ángulo de 30° . La rotación ha tenido lugar alrededor de un eje que es la normal al plano de falla. Hallar la orientación de la secuencia sedimentaria en el labio inferior de la falla (muro).

- Dibujar el estereograma correspondiente en proyección ciclográfica o polar, con la falla y las capas horizontales (Fig. 15).

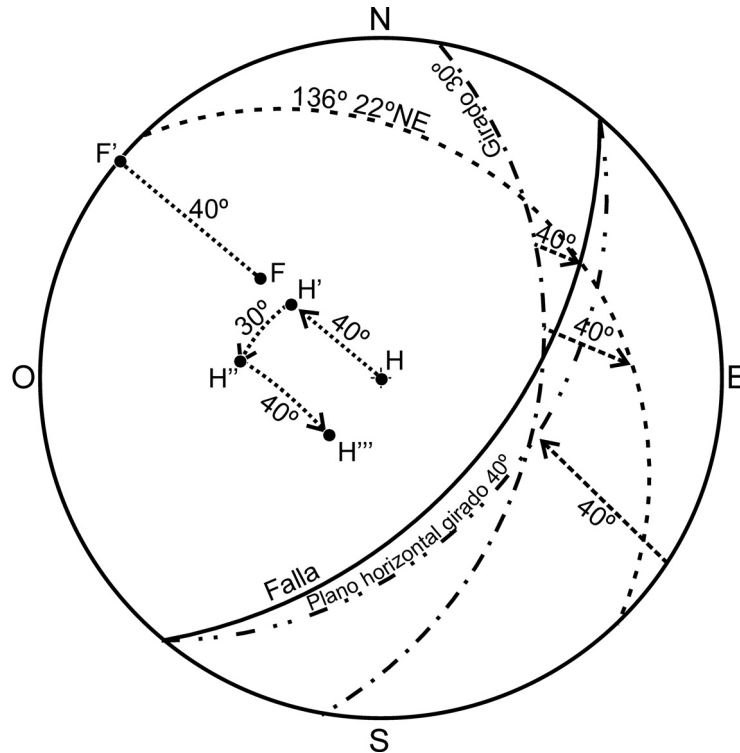


Figura 15. Resolución del problema 5. Ver texto para su explicación.

- La rotación que indica el problema, tiene como eje de giro la normal al plano de falla (F), por tanto el primer paso será poner el eje de giro horizontal llevando el polo de la falla sobre el diámetro E-O de la falsilla (F'). La serie sedimentaria horizontal se moverá los mismos 40° y en el mismo sentido, obteniendo el plano 040°- 40°SE.
- Con el eje de giro ya horizontal, efectuamos el giro que indica el problema.
- Volvemos a colocar el eje de giro en su posición inclinada original y la serie sedimentaria se moverá en el mismo sentido y los mismos grados.
- Leemos la nueva orientación de la serie una vez girada. La solución es 136°- 22°NE.

Problema 6

En el labio norte de una falla rotacional, cuyo plano tiene una orientación de 114°-65°N, aflora un estrato de orientación 37°-39°O. Sabiendo que el labio sur gira 52° en el sentido de las agujas del reloj visto desde el labio norte, hallar la orientación del estrato en el labio sur (Fig. 16).

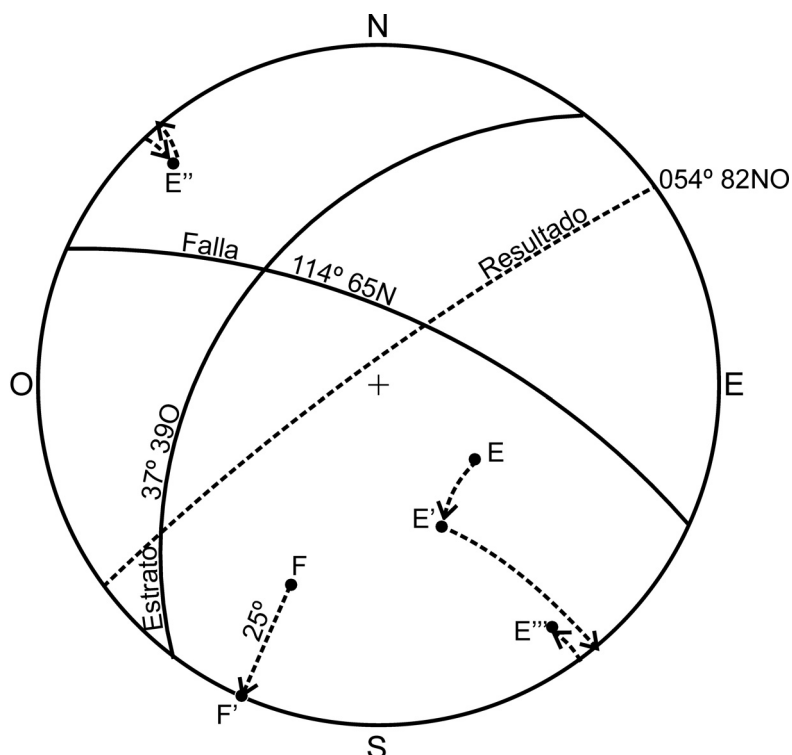


Figura 16. Resolución del problema 6. Ver texto para su explicación.

- Dibujar el estereograma correspondiente con la falla y el estrato, bien en proyección ciclográfica o polar.

- Colocar el eje de giro inclinado (polo de la falla) en la horizontal.
- Efectuar el giro indicado alrededor de un eje horizontal y dibujar el estrato girado.
- Llevar el eje de giro a su posición inclinada original.
- Leer nueva orientación del estrato: $054^{\circ}-82^{\circ}\text{NO}$.

Problema 7

En el labio este de una falla de orientación $145^{\circ}-40^{\circ}\text{SO}$, aflora un sinclinal simétrico. Su eje es horizontal con dirección 10° y el buzamiento de los flancos es de 50° .

En el labio oeste (hundido) esta estructura aparece como un pliegue asimétrico con inmersión, cuyo flanco oriental es $157^{\circ}-40^{\circ}\text{NE}$. Investigar la naturaleza del movimiento sobre el plano de falla y hallar la inmersión del eje del sinclinal en el bloque hundido (Fig. 17).

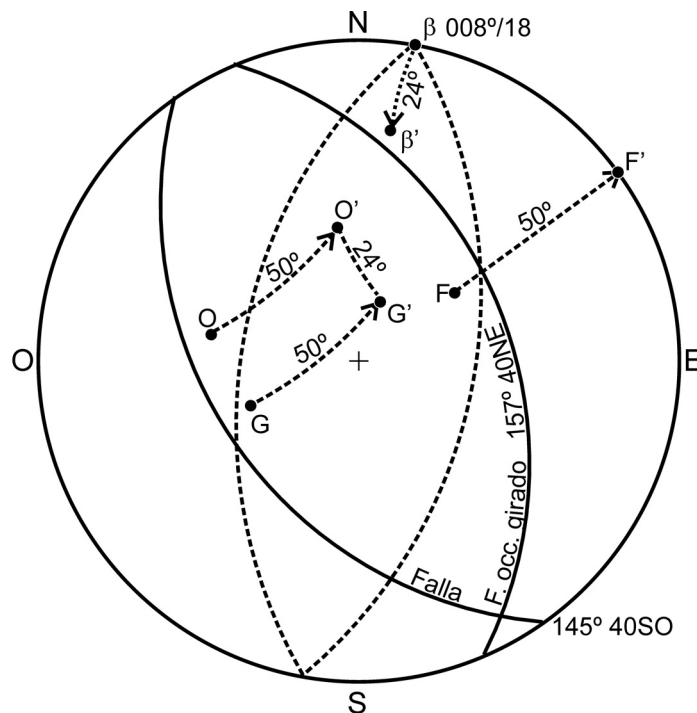


Figura 17. Resolución del problema 7. Ver texto para su explicación.

- Proyectar los planos correspondientes a la falla y los flancos del pliegue.

- El polo de la falla F (eje de giro) se lleva a la horizontal (rotación de 52°) se mueven los polos de los dos flancos orientales (el original O y el girado G), los mismos grados y en el mismo sentido que hemos movido el polo de la falla, hasta las posiciones O' y G'.
- Con el eje de giro sobre el diámetro N-S de la falsilla, comprobamos que los dos polos O' y G' están sobre el mismo círculo menor de la falsilla. Contamos a lo largo de ese círculo menor los grados que hemos girado para pasar de O' a G', en este caso, 24° en sentido de las agujas del reloj, visto desde el oeste.
- Este mismo giro, lo aplicamos a la charnela del pliegue, siempre con el eje de giro colocado sobre el N o el S. La orientación de la nueva línea de charnela es: $008^\circ/18^\circ$ (β').

Problema 8

En una planicie se localiza una falla de orientación $128^\circ-56^\circ$ SO. En el labio sur aflora un pliegue en el que se han podido medir las siguientes orientaciones de estratificación:

$006^\circ-80^\circ$ O; $015^\circ-71^\circ$ O; $043^\circ-50^\circ$ NO; $071^\circ-42^\circ$ N; $099^\circ-42^\circ$ N; $129^\circ-50^\circ$ NE; $150^\circ-63^\circ$ E; $168^\circ-80^\circ$ E

En el labio norte de la falla, el mismo pliegue muestra su charnela con una orientación de $015^\circ/66^\circ$. Determinar el movimiento provocado por la falla en el labio NE (Fig. 18).

- Proyectar el plano de falla y su polo (F).
- Proyectar los polos correspondientes a las medidas de estratificación. Comprobar que todos estos polos están dentro de un círculo mayor de la falsilla.
- Dibujar este círculo mayor y su polo. Este polo es la línea de charnela del pliegue, en el bloque sur de la falla (β_s).
- Proyectar la línea de charnela correspondiente al pliegue en el bloque norte de la falla (β_n). La orientación de las dos líneas de charnela no coincide, luego la falla es rotacional.
- El eje de giro de esta falla, será su normal, representada en el estereograma por (F).
- El problema se resuelve efectuando un giro alrededor de un eje inclinado. En este caso conocemos la posición inicial y final de un elemento, la línea de

charnela, ya que sabemos su orientación antes y después del giro. Únicamente queda saber cuál ha sido la cuantía de esta rotación.

- Llevamos el eje de giro (F) a la horizontal (F'). Las dos líneas de charnela β_s y β_n se mueven los mismos grados y en el mismo sentido a lo largo del círculo menor en el que estén contenidas y pasan a las posiciones β'_s y β'_n respectivamente.
- Con F' colocado sobre el N o el S de la falsilla, β'_s y β'_n deben estar situadas sobre un mismo círculo menor. A lo largo de ese círculo contamos el ángulo entre los dos, que es 42° .
- El movimiento provocado por la falla en el labio NE, es de 42° en sentido contrario a las agujas del reloj, visto desde el este.

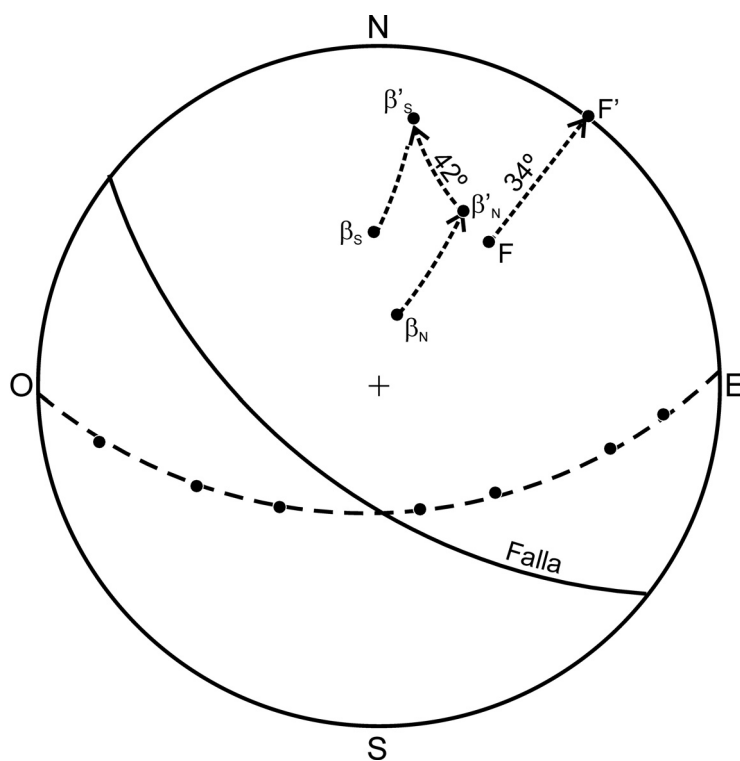


Figura 18. Resolución del problema 8. Ver texto para su explicación.

Problema 9

Una falla cuyo plano es $070^\circ-64^\circ N$ atraviesa un área plana. Al norte de la falla aflora un sinclinal cuyo flanco occidental tiene una orientación $144^\circ-27^\circ NE$ y el oriental $175^\circ-53^\circ E$.

Al sur de la falla, el flanco oriental muestra según una pared vertical de una galería de 113° de dirección un buzamiento aparente de 20° y según un desmonte

también vertical, en una carretera de 76° de dirección, un buzamiento aparente de 10° E. Hallar:

- Cuantía y sentido de giro del labio sur de la falla, visto desde el norte.
- Orientación de los flancos y eje del pliegue en el labio sur.
- Ángulo formado por los ejes de pliegue en ambos labios de la falla.
- Proyectar el plano de falla y su polo, así como los flancos del pliegue y sus polos (Fig. 19).
- El flanco oriental en el labio sur, viene dado a partir de dos buzamientos aparentes. Con ellos obtenemos la orientación real del flanco, que es: $N54^\circ E-22^\circ SE$.
- Para saber el sentido de giro y su cuantía, resolvemos un problema similar a los anteriores, tomando el flanco oriental como guía, ya que es el único elemento conocido en ambos bloques de la falla. El giro ha sido de 44° en sentido de las agujas del reloj, visto desde el labio norte.
- Una vez conocido el giro efectuado, aplicamos el mismo al flanco occidental y a la línea de charnela del pliegue. El flanco occidental en el bloque sur tiene una orientación: $N-S-12^\circ O$ y la línea de charnela β , pasa a la posición β' en el esterograma, con una orientación de $215^\circ/07^\circ$.

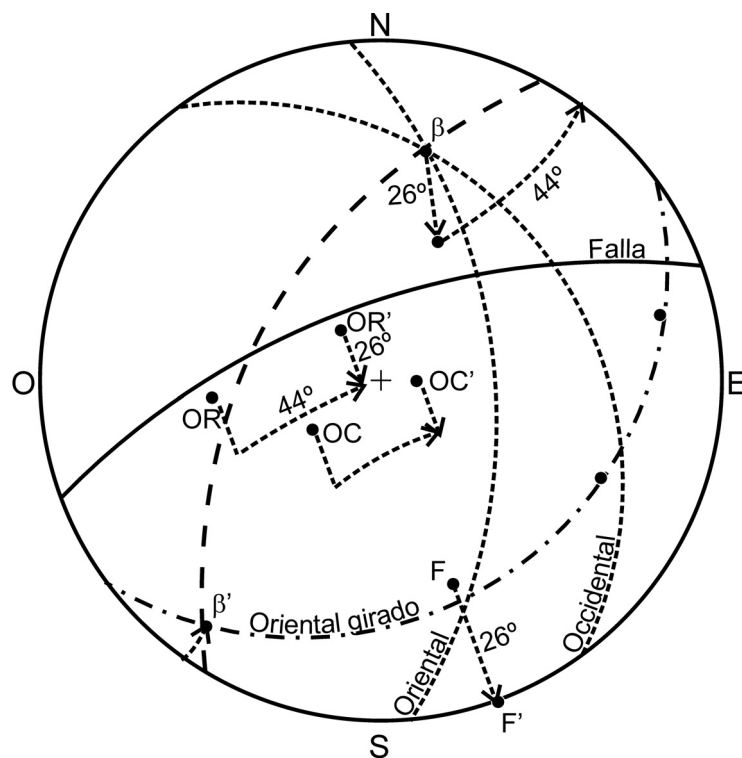


Figura 19. Resolución del problema 9. Ver texto para su explicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, E.M. 1951. The Dynamics of Faulting (2nd ed.). Oliver y Boyd, Edinburgh. 208 pp.
- Babín Vich, R. B. y Gómez Ortiz, D. 2010 d. Problemas de Geología Estructural. 5. Rotaciones *Reduca (Geología). Serie Geología Estructural*, 2 (1): 57-73.
- Reches, Z. 1983. Faulting of rocks in three-dimensional strain fields. II *Theoretical analysis. Tectonophysics*, 47, 109-129.

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

- Davis, G. H. 1984. Structural Geology of rocks and Regions. Wiley & Sons. 492 pp.
- Lheyson, P. R.; Lisle, R. J. 1996. Stereographic projection techniques in Structural Geology. Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford. 104 pp.
- Marshak, S & Mitra, G. 1982. Basic methods of structural geology. Prentice & Hall. 446 pp.
- Phillips, F. C. 1971. The use of stereographic projection in Structural Geology. Edward Arnol. London. 90 pp.
- Ragan, D. M. 1987. Geología Estructural. Ed. Omega. Barcelona. 210 pp.
- Turner, F. & Weiss, L.R. 1963. Structural analysis of metamorphic tectonites. McGraw Hill. New York. 545 pp.

Recibido: 18 noviembre 2009.

Aceptado: 22 diciembre 2009.