

## MÉTODOS Y CRITERIOS PARA EVALUAR LA CINEMÁTICA EN FALLAS FRÁGILES A PARTIR DE DATOS ESTRUCTURALES

José Cruz Escamilla Casas <sup>a</sup>, Evodio Pedro Castañeda Ovando <sup>a</sup>, Isaac Villamil Torres <sup>a</sup>, Enrique Cruz Chávez <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo  
[jocesca@uaeh.edu.mx](mailto:jocesca@uaeh.edu.mx)

### RESUMEN:

Para el estudio de las fallas frágiles, son fundamentales la determinación de la dirección, sentido de movimiento y desplazamiento neto entre los bloques de roca deformados; así como inferir el estado de los esfuerzos principales durante la deformación. En el presente estudio, se hace una revisión de las estructuras asociadas con el fallamiento frágil, examinándose los criterios para seleccionar el método adecuado que permita analizar y determinar el estado de esfuerzos principales a escala regional.

Si se cuenta con un punto de referencia o marcador entre los bloques fallados, es posible medir sin error alguno su desplazamiento neto. Sin embargo, en rocas metamórficas y volcánicas donde es más escasa la distribución plana, es necesario recurrir a métodos alternos para cuantificar la cinemática de las fallas. De acuerdo a la Geología Estructural moderna, existen los métodos inversos (dinámicos) que utilizan técnicas numéricas y gráficas para determinar los esfuerzos principales. Por otro lado, existe el análisis cinemático que implica la rotación, muestreo y homogeneidad espacial. En este último se genera un gráfico bidimensional de aproximación de deformación finita. Para determinar la dirección y sentido de desplazamiento en cualquier tipo de roca, la manera más útil y definitiva es la observación directa de los planos de falla.

Finalmente, se ilustra lo siguiente: a) las estructuras menores observables en los planos de falla que definen el sentido de movimiento entre los bloques, y la toma de datos estructurales en campo; b) los criterios de selección entre los métodos dinámicos y cinemáticos y c) los estados de los esfuerzos prevalecientes durante la deformación frágil. Para lo anterior, se utilizan ejemplos de fallas frágiles del sureste de la Sierra de Pachuca.

### 1. INTRODUCCIÓN

Independientemente del objetivo que tenga cualquier estudio geológico, es fundamental entender la evolución geológica del área de interés. Para lo cual, el establecimiento de la secuencia de la deformación en las rocas tiene una gran importancia. Por otro lado, la Geología Estructural contempla la deformación frágil y la deformación dúctil como los dos miembros extremos de la deformación en las rocas. El presente estudio, se enfoca en la obtención e interpretación de la información en fallas geológicas frágiles, particularmente en las estructuras que se presentan en los planos de falla y, por otro lado, en las maneras y métodos de cuantificar los datos estructurales colectados en campo. Particularmente se hace énfasis en la identificación e interpretación de las estructuras asociadas a un plano de falla, haciendo, simultáneamente una síntesis del estado del arte en esta materia. Finalmente, a partir de tales datos estructurales, se analizan los criterios basados en los principios de la mecánica del medio continuo para proponer una solución viable, misma que defina la posible orientación de los

esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ), responsables de la deformación. El conjunto de datos y estructuras han sido colectados directamente en el campo. Todo esto con la finalidad de presentar los aspectos prácticos y teóricos del manejo de información, síntesis y análisis estructural de la deformación frágil.

### 2. ACTIVACIÓN DE LOS PLANOS DE DEBILIDAD EN LAS ROCAS PARA FORMAR FALLAS

De acuerdo con la hipótesis de Wallace-Bott [1, 2], se establece que el deslizamiento entre los bloques de falla, debe ocurrir paralelo a y en el mismo sentido del esfuerzo cortante. Tal hipótesis ha sido criticada debido a la evidencia de la interacción entre las fallas en la roca y la desviación del esfuerzo en rocas frágiles. En consecuencia, surge la siguiente pregunta: ¿Se acepta el concepto de que un esfuerzo único induce deslizamientos con orientaciones diversas a lo largo de planos de debilidad? El mejor argumento para soportar la respuesta consiste en disminuir el desajuste entre los deslizamientos observados y los esfuerzos cortantes computados en los planos de falla.

Geoméricamente, la relación esfuerzo-deslizamiento en los planos de debilidad es como sigue: El deslizamiento ocurre paralelo a la proyección ortogonal del eje de compresión en el plano de debilidad. De esa forma, la dirección del deslizamiento,  $s$ , la normal al plano de discontinuidad,  $n$  y el eje de compresión,  $\sigma_1$ , deben estar incluidos en un solo plano: el plano de movimiento.

### 3. MEDICIONES EN CAMPO

Los datos de deslizamiento en fallas deben ser medidos en una parte relativamente plana de la falla la cual debe ser megascópicamente paralela a la orientación de la misma. La colecta de los datos de campo para el análisis de deslizamiento en fallas debe incluir idealmente la medición de diversos parámetros para cada una de las fallas estudiadas:

1. La orientación del plano de falla
2. La dirección del desplazamiento
3. Sentido de desplazamiento
4. Orientación local de la estratificación
5. Desplazamiento medio
6. Área de la falla

Los tres primeros datos son los necesariamente requeridos para poder aplicar las técnicas de análisis dinámicos y para poder utilizar los métodos cinemáticos gráficos. Para obtener más información de los datos, sin embargo, los últimos tres datos de la lista deben ser medidos o estimados matemáticamente. Es comúnmente imposible medir con certeza el desplazamiento promedio y el área de la falla en el campo debido a que se puede tratar de un afloramiento inadecuado o por la imposibilidad de ver a través de las rocas. En lugar de estos parámetros, la zona de influencia de la falla, el espesor y/o ancho de la falla pueden ser utilizados para estimar el desplazamiento promedio y el área de influencia de la falla; consecuentemente se obtiene la magnitud de la deformación por el deslizamiento a lo largo de la falla.

La dirección de desplazamiento en una falla es comúnmente determinada mediante las estrías que se desarrollan en el plano de la falla. Generalmente, en el afloramiento de una falla debe excavar a lo largo de su rumbo para obtener más roca expuesta y escoger que estrías son las más representativas del movimiento. Las estrías comúnmente varían localmente de orientación entre 10 y 20 grados de circunferencia para un mismo afloramiento. Los conjuntos diferentes de estrías, con diferencias de ángulos mayores, pueden indicar la reactivación de la falla. La dirección del deslizamiento también se puede determinar mediante la dislocación de los clastos o la separación de dos puntos definidos por la intersección de marcadores planos.

Los escarpes de falla, relaciones estratigráficas, pliegues en gancho, vetas escalonadas y clastos dislocados son los indicadores más simples y confiables. Los indicadores en la superficie del plano de falla incluyen las estelas o surcos producidos por lo áspero de los granos de la roca y/o la superficie irregular [3], estriaciones [4], las marcas en creciente formadas por la intersección del plano de falla con las estructuras secundarias [5]. Diversas estructuras secundarias son útiles como indicadores cinemáticos, tales como las fracturas R, R', P y T [5], estructuras en puente [6] y la foliación de la arcilla en una cataclasita [7].

Sin embargo, la información que se obtiene de las estructuras secundarias depende de las propiedades mecánicas de las rocas fracturadas y de las condiciones físicas de la deformación, consecuentemente, pueden ser un tanto ambiguos. No obstante, el estudio minucioso de las estructuras secundarias en fallas con sentido de movimiento conocido e independiente pueden puntualizar los criterios útiles para observar otras fallas formadas bajo condiciones similares en la misma roca, Figuras 1 y 2. Asimismo, cada roca debe ser inspeccionada minuciosamente para identificar la mayor cantidad de indicadores posible, porque la interpretación de estas pequeñas estructuras puede ser complicada y la presencia de indicadores contradictorios es la evidencia en campo que indica la reactivación de una falla. También es recomendable elaborar una escala de confianza, similar en concepto a la que usan los sismólogos para calificar la calidad de las localizaciones de los terremotos, y poder aceptar o rechazar un dato.



Figura 1. Fotografía mostrando un segmento de plano de falla que contiene estructuras secundarias en creciente. El movimiento que se infiere es que el desplazamiento del bloque superior (ausente) fue de izquierda a derecha



Figura 2. Fotografía de un plano que contiene estructuras secundarias de tipo R (Riedel sintético). El bloque ausente se desplazó de arriba hacia abajo, verticalmente

#### 4. ASPECTOS MATEMÁTICOS DE LAS RELACIONES ENTRE ESFUERZO-CIZALLA

El problema principal a resolver es: ¿Cómo influye el esfuerzo en el deslizamiento a lo largo de un plano de debilidad en las rocas? El tensor general de los esfuerzos (**T**, la primera matriz en la Ecuación 1) está relacionado con el tensor de esfuerzos en el sistema coordenado de los esfuerzos principales mediante la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} a & d & f \\ d & b & e \\ f & e & c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 \\ y1 & y2 & y3 \\ z1 & z2 & z3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x1 & y1 & z1 \\ x2 & y2 & z2 \\ x3 & y3 & z3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

La Ecuación 1 es la expresión matricial de un tensor de rotación, esto es, la transferencia del sistema de los ejes principales a un sistema general de coordenadas cartesianas. Las siguientes expresiones definen a los vectores unitarios a lo largo de los ejes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ .

$$\begin{bmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} y2 \\ y2 \\ y2 \end{bmatrix} \text{ y } \begin{bmatrix} x3 \\ y3 \\ z3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

El vector del esfuerzo  $\sigma$  actuando sobre el plano de falla caracterizado por su vector normal **n** está dado, en notación vectorial y matricial sucesivamente, por las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \mathbf{Tn} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma x \\ \sigma y \\ \sigma z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & d & f \\ d & b & e \\ f & e & c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

El módulo del esfuerzo normal  $v$  está dado por el producto escalar de vector de esfuerzo por el vector normal unitario:

$$|v| = \sigma \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

O

$$|v| = x\sigma_x + y\sigma_y + z\sigma_z \quad (6)$$

El vector normal de esfuerzo,  $v$ , es entonces:

$$v = |v|\mathbf{n} \quad (7)$$

O

$$\begin{bmatrix} \tau x \\ \tau y \\ \tau z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma x \\ \sigma y \\ \sigma z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} vx \\ vy \\ vz \end{bmatrix} \quad (8)$$

Conociendo el vector de los esfuerzos  $\sigma$  y el vector de esfuerzo normal  $v$ , el vector de esfuerzo cortante,  $\tau$ , por lo tanto es:

$$\sigma = \nu + \tau$$

(9)

En un régimen tectónico extensivo ( $\sigma_1$  es vertical) se inducen deslizamientos con componentes normales de movimiento, mientras que en un régimen tectónico compresivo, se induce una inversión de los componentes. Para un eje  $\sigma_2$  vertical, el sentido del componente lateral de movimiento también depende del rumbo de la falla, pero el sentido del componente transversal, inverso o normal, es variable como una función del ángulo entre el rumbo y, digamos, el eje de  $\sigma_3$ .

## 5. DISCUSIÓN

La aplicación de los métodos descritos para el análisis de fallas frágiles es relativamente fácil debido a la proliferación tanto de instrumentos de medición cada vez más precisos como de ordenadores con velocidades de procesamiento elevadas. Por otro lado, la deformación frágil es la más persistente y prominente en la superficie de la Tierra. Sin embargo, se hace la observación en cuanto a no hacer una aplicación ciega de las técnicas que aquí se presentan sin antes llevar a cabo las suposiciones pertinentes y sin evaluar previamente las aproximaciones de los métodos. El viejo adagio referente a las computadoras que dice: “si basura entra basura sale” se aplica claramente en este caso, independientemente de que le estadística de los datos se “vea bien”. Finalmente no podemos hacer el énfasis lo suficientemente fuerte respecto a la necesidad de hacer un buen trabajo de campo y tratar de abarcar toda la región de estudio. En particular, el establecimiento de las edades absolutas y relativas de las rocas deformadas es de importancia crítica. Asimismo, las relaciones de campo tienen las claves definitivas de y la justificación para la aplicación de estos métodos.

Para la representación de datos, es conveniente hacerlo en una red estereográfica para poder incluir los datos tanto de las soluciones de las fallas, los ejes, y los datos de campo. En la Figura 3 se muestra la información de un ejemplo compuesto de 8 planos de falla.

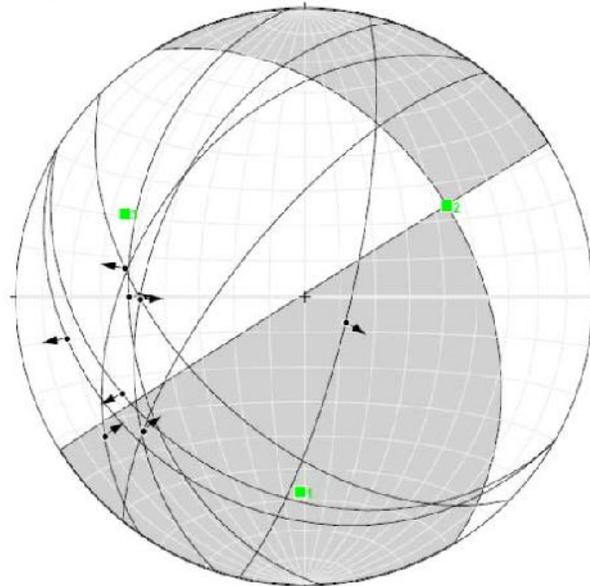


Figura 3. Proyección estereográfica mostrando los datos estructurales de ocho planos de falla. Leer texto para la información completa que contiene el gráfico

En el gráfico se representa el rumbo e inclinación del plano de cada falla, la inclinación y dirección de las estrías, el sentido de desplazamiento relativo de los bloques fallados, la zona de tensión T, zona de

compresión  $P$  y las inclinaciones y direcciones de sus ejes respectivos y las orientaciones (inclinación y dirección) de los tres esfuerzos principales ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ).

Adicionalmente, para tener un mejor control de los datos estructuras y de la cinemática de las fallas, es conveniente elaborar una base de datos que habrá de alimentarse a medida que el estudio se desarrolla y aumenta el número de afloramientos inspeccionados. Asimismo, la base de datos debe incluir la ubicación precisa de los afloramientos.

### CONCLUSIONES

1. Las mediciones en campo deben ser consistentes y ser llevadas a cabo con la mayor precisión posible.
2. La inspección y estudio minucioso de las estructuras secundarias en los planos de falla constituyen la parte fundamental del estudio de la cinemática de las fallas frágiles.
3. La correlación con las estructuras regionales es vital para la eliminación de una posible mal interpretación de los datos.
4. La calidad de los datos y del grado de preservación de las estructuras definirán si se desecha o no un dato.
5. La estadística debe ser robusta y se recomienda una colecta de datos que constituyan una muestra representativa de la cinemática de la deformación.
6. El registro consistente y minucioso de los datos, determina la efectividad del aspecto matemático del estudio.
7. Tener en cuenta que la generación de estructuras menores, depende de la composición, granulometría y comportamiento mecánico de la roca
8. Los datos deben ser acompañados de descripciones pormenorizadas de los afloramientos.
9. La toma de imágenes es definitivamente recomendable, tanto para fines de comparación como de ilustración y estudio subsecuente de las estructuras, que definen el estilo de deformación de la zona estudiada.

### BIBLIOGRAFÍA

1. R. E. Wallace, "Geometry of shearing stress and relation to faulting", J. Geol., Vol. 59, 1951, pp. 118-130.
2. M. H. P. Bott, "The mechanics of oblique slip faulting", Geol. Mag., Vol. 96, 1959, pp.109-117.
3. W. D. Means, "A newly recognized type of slickenside striation", J. Struc. Geol., Vol. 9, 1987, pp. 585-590.
4. R. Arthaud, M. Mattauer, "Sur l'origine tectonique de certains joints stylolitiques paralleles a la stratification; Leur relation avec une phase de distension (exemple du Languedoc): Bul. Soc. Geol. Fr., Vol. 14, pp. 12-17.
5. J. P. Petit, "Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks", J. Struc. Geol., Vol. 9, 1987, pp. 597-608.
6. J. F. Gamond, "Bridge structures as sense of displacement criteria in brittle fault zones", Jour. Struc. Geol. Vol. 9, 1987, pp. 609-620.
7. F. M. Chester, J. M. Logan, "Composite planar fabric of gouge from the Punchbowl Fault, California", J. Struc. Geol., Vol. 9, 1987, pp. 621-634.