

III.2-EMPLAZAMIENTO DE DIQUES MAGMÁTICOS Y SU INTERPRETACIÓN TECTÓNICA: EJEMPLOS EN ROCAS TERCIARIAS DE LA SIERRA DE PACHUCA

José Cruz Escamilla-Casas^{a*}, L. E. Ortiz-Hernández^a, E. Cruz-Chávez^a, J. C. Castro-Mora^a

^aÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo

* Autor de correspondencia: jocesca@uaeh.edu.mx

RESUMEN

Los diques de origen magmático son intrusiones que penetran y desplazan la roca encajonante, forman conductos desde la profundidad de la cámara alimentadora y fluyen ascendentemente a través de la parte superior de la corteza terrestre, hasta emplazarse. En este estudio, se considera que los diques son fracturas de tensión hidráulica en la roca encajonante, que están rellenas de magma y orientadas perpendicularmente al menor de los esfuerzos compresivos, σ_3 , de acuerdo a la teoría Andersoniana. Consecuentemente, los diques de una misma generación definirían el mapa del campo de esfuerzos asociados al régimen tectónico. A partir de la actitud estructural de diques en la Sierra de Pachuca se sugiere la geometría de los mismos y la orientación del campo de esfuerzos en la corteza (σ_1 , σ_2 , σ_3). A pesar de no contar con edades radiométricas para las diferentes unidades rocosas de la Sierra de Pachuca, se considera que estas rocas se instauraron durante el Oligoceno hasta el Pleistoceno. Sin embargo, las relaciones de corte entre la roca encajonante, la deformación frágil y el emplazamiento de diques, permiten establecer una secuencia relativa de eventos geológicos. Los resultados sugieren la asociación tectónica entre el emplazamiento de diques y la deformación frágil.

Palabras Clave: diques, tectónica, Oligoceno, Pleistoceno, Sierra de Pachuca.

ABSTRACT

Magmatic dikes are intrusions that penetrate and displace the host rock, form conduits connecting with the magmatic chamber, and get emplaced into the upper crust through ascending flows. In this work, dikes are considered hydraulic tension fractures in the host rock, infilled with magma, and oriented perpendicularly to the minimum compressive stresses, σ_3 , following Anderson's theory. Consequently, a dike swarm of a single generation defines the stress field map associated with the tectonic regime that prevailed at the time of emplacement. Based on the structural attitude of outcropping diabase and granitoid dikes in Sierra de Pachuca, its geometry and the orientation of the stress field in the upper crust are inferred (σ_1 , σ_2 , σ_3). Despite the lack of radiometric ages for the different lithologic units of the Sierra de Pachuca, it is widely considered that these rocks were formed during Oligocene to Pleistocene times. Nevertheless, crosscutting relations among the host rock, the brittle structures, and

dike emplacement, allow the establishment of the relative sequence of geologic events. Results indicate that the emplacement of dikes and brittle deformation are tectonically associated.

Keywords: dikes, tectonics, Oligocene, Pleistocene, Sierra de Pachuca.

1. INTRODUCCIÓN

Un dique es una fractura hidráulica que transporta magma proveniente de una zona donde ocurre una fusión parcial de roca o de una cámara magmática, la cual puede almacenar el material de una erupción volcánica o de una intrusión mayor. Por definición, un dique es una intrusión ígnea tabular que atraviesa los planos de sedimentación o la foliación de la roca encajonante. La geometría de los diques puede ser inspeccionada directamente en la superficie del terreno solo cuando estos han sido expuestos a través de procesos erosivos [1]. Los diques comúnmente tienen espesores del orden de centímetros a unos cuantos metros. El largo y ancho de los diques (extensiones vertical y horizontal, respectivamente) son dimensiones variables, pero siempre son significativamente mayores a los espesores. En consecuencia, es muy común que se haga la aproximación de un dique en el espacio como un cuerpo tabular bidimensional.

Sin embargo, los diques expuestos en el terreno y que permiten ser examinados individualmente a lo largo de grandes extensiones, tanto verticales y horizontales, son muy raras y escasas. Consecuentemente, llevar a cabo la caracterización geométrica de los diques es una tarea difícil. Por otra parte, durante el emplazamiento de un dique la presión del magma cambia y los esfuerzos en la roca encajonante también cambian, causando variaciones progresivas con el tiempo en la geometría del mismo. Adicionalmente, al enfriarse el material del dique y solidificarse, también provoca cambios en su espesor. Sin embargo, a pesar de estas complicaciones, las observaciones en el campo proporcionan un estimado de primer orden en cuanto a la geometría de un dique. La forma tabular de un dique se debe a que son fracturas generadas por la presión interna del magma, ya que, al momento de emplazarse, van generando una grieta en la roca de la corteza terrestre superior, donde las rocas se comportan como un material mecánicamente frágil.

Por otro lado, si se considera que los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 , y σ_3 ; ortogonales entre sí) actúan sobre la parte superior de la corteza, es posible considerar que los diques desarrollen su espesor en contra del mínimo esfuerzo compresivo σ_3 , y que se propaguen a lo largo de un plano perpendicular a σ_3 [2].

Lo anterior puede explicar por qué las orientaciones de los campos de esfuerzos en la corteza se mantienen homogéneos a escala regional. De hecho, se pueden inferir los patrones de esfuerzos en el interior de las placas tectónicas continentales que alojan enjambres de diques. Ejemplos de lo anterior se encuentran en el Escudo Canadiense, en donde ocurren enjambres de diques de diabasa del Precámbrico. Un segundo ejemplo se ubica en la costa este de los Estados Unidos, donde una serie de enjambres de diques mesozoicos se extienden desde Alabama hasta la región de Nueva Inglaterra a lo largo del cinturón montañoso de los Apalaches [3].

Finalmente, en el presente trabajo se pretende investigar si es que el emplazamiento de los diques que afloran en la Sierra de Pachuca está asociado a un evento de deformación. Para ello, se hace una comparación entre la orientación de los esfuerzos principales, inferida a partir de datos en planos de

fallas, con la orientación de los diques de diorita y granitoides. Los resultados sugieren que la orientación del campo de esfuerzos responsable de la deformación frágil, y que originaron las fallas, está subsecuentemente asociada con la orientación de los esfuerzos que controlaron la intrusión de los diques. Sin embargo, ambos eventos geológicos ocurrieron durante el Oligoceno - Pleistoceno de la Sierra de Pachuca.

1.1 Consideraciones teóricas

A pesar de que en la naturaleza los diques no son intrusiones perfectamente planas, estos adoptan una forma esencialmente tabular debido a que son fracturas generadas por la presión interna de un fluido ascendente (magma), al atravesar y emplazarse en materiales mecánicamente frágiles (roca). Considerando lo anterior, geoméricamente se puede establecer que el espesor de los diques es una dimensión mucho menor en comparación con el ancho y el largo (Figura 1). En la naturaleza, el espesor comúnmente es del orden de centímetros a metros, mientras que el largo (considerado aquí como la dimensión vertical paralela a la dirección de propagación) oscila entre unos cientos de metros hasta kilómetros. La tercera dimensión en los diques es el ancho, la cual es de un orden de magnitud similar al largo, pero un tanto menor. Ocasionalmente, existen diques anómalamente grandes, con decenas de metros de espesor y miles de kilómetros de longitud, en otras ocasiones, los diques ocurren en grupo y se denominan enjambres (Figura 2).

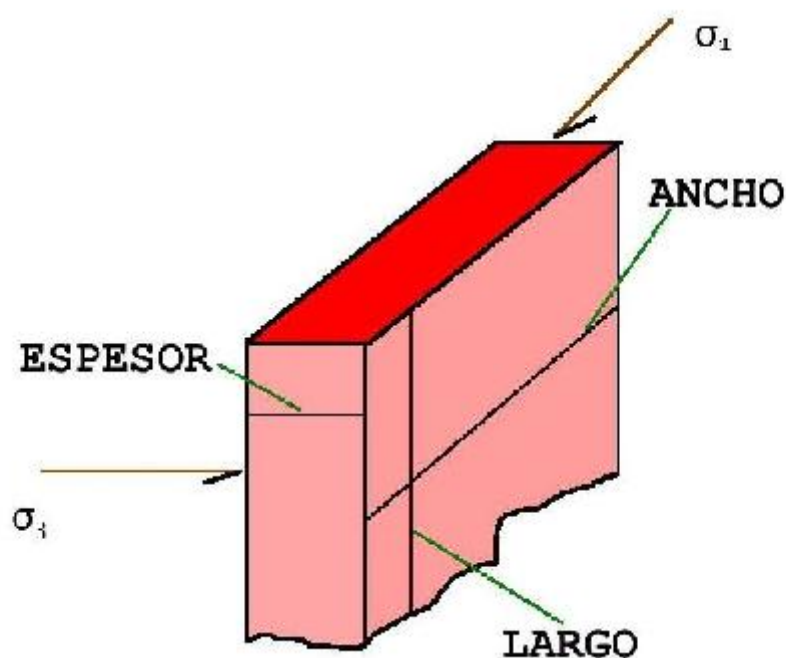


Figura 1. Diagrama esquemático mostrando las dimensiones que se consideran en este estudio y su relación con la orientación de los esfuerzos principales en un plano.

Teóricamente, se han formulado modelos que explican la propagación de diques en la corteza terrestre enfocados al ascenso del magma, e.g. la aproximación de Weertman [4]. Tal aproximación fue

introducida en un principio para modelar “crevasses” llenas de agua en los glaciares. Más tarde, se aplicó de manera efectiva en los estudios de los diques magmáticos en las dorsales oceánicas. La aproximación de Weertman establece que si el volumen inyectado, V , es menor que el valor crítico, V_c , la fractura será estática porque la configuración indica que el factor de intensidad del esfuerzo en los bordes de la intrusión no es suficiente para vencer la resistencia a la fractura de la roca, K_c . Si el volumen inyectado aumenta, la fractura se agranda. Si $V = V_c$, el factor de intensidad en el borde superior (para una fractura boyante que se propaga verticalmente hacia arriba), K^+ , iguala exactamente a K_c , entonces la fractura tenderá a abrirse dentro de la roca encajonante y ascender. Tan pronto como la propagación se inicia, el factor de intensidad del esfuerzo en el borde inferior, K^- , se aproxima a cero: se asume que la fractura se cierra hacia el borde inferior, forzando al magma al ascenso cuando el factor de intensidad del esfuerzo iguala al del medio fracturado, $K_c = 0$. La longitud crítica de la fractura, puede ser obtenida a partir de las ecuaciones (1) y (2), para el factor de intensidad del esfuerzo en los bordes de la abertura de la fractura debido al gradiente de presión linear [4].

$$(1) K^+ = \sqrt{\pi a} \left(P_o + \frac{a}{2} \frac{dp}{dz_{tot}} \right) = K_c$$

$$(2) K^- = \sqrt{\pi a} \left(P_o + \frac{a}{2} \frac{dp}{dz_{tot}} \right) = 0$$

Donde P_o es la sobrepresión en el punto medio de la fractura, a es la longitud media de la fractura y dp/dz_{tot} es el gradiente de presión total con respecto a la profundidad. Por lo tanto, para una fractura rellena de material fundido ascendente en un campo de esfuerzos litostático/hidrostatico se explica mediante la ecuación (3), como sigue:

$$(3) dp/dz_{tot} = \Delta\rho g$$

En donde g es la constante de la gravedad, $\Delta\rho$ es la diferencia de densidad entre sólido y líquido. Si el campo de esfuerzos es más complicado, entonces el gradiente tectónico total debe ser tomado en consideración.

Por otro lado, de acuerdo a la teoría Andersoniana [2], se considera que la superficie de la Tierra es una esfera perfecta y que la discontinuidad entre el aire y la tierra, en cualquier punto de la superficie terrestre, es un plano a lo largo del cual los esfuerzos cortantes son igual a cero. A partir de que las direcciones de los esfuerzos principales el esfuerzo cortante es cero, en consecuencia, la superficie de la tierra debe ser un plano que contiene dos de las tres direcciones de los esfuerzos principales. Esto permite establecer que, en general, los diques se abren en sentido contrario al mínimo esfuerzo principal compresivo, σ_3 , y que la propagación ocurre a lo largo de un plano perpendicular a σ_3 . En 2D la propagación de los diques ocurre en la dirección del máximo esfuerzo compresivo, σ_1 .



Figura 2. Diques félsicos que cortan a un pórfido del Mioceno, expuesto en las inmediaciones de la mina Cubilete, San Miguel Tilquiapan, Oaxaca (Fotografía cortesía de J. Castro-Mora).

Finalmente, y siguiendo ahora con los conceptos de la teoría Andersoniana [2] aplicada a fallas, se tiene que si se conocen las orientaciones e inclinaciones de los planos de fallas y las direcciones del desplazamiento entre los bloques, se puede inferir la orientación de los esfuerzos principales (σ_1 , σ_2 y σ_3). Los conceptos relacionados a diques en combinación con los conceptos relacionados la deformación frágil, dan soporte a la interpretación que motiva a esta investigación.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la aplicación e interpretación geológica de los conceptos descritos en la sección anterior, es necesario obtener datos de orientación del ancho de los diques y los correspondientes a las fallas. En este estudio, se colectaron los datos necesarios en rocas terciarias de la Sierra de Pachuca.

Una vez identificado el afloramiento de un dique en el área de trabajo, se procede a la localización del afloramiento mediante un navegador portátil, GPS. Posteriormente, se registró la descripción litológica, el espesor y a la toma de muestra de roca. La colección de datos estructurales en diques se efectuó mediante la lectura del rumbo del largo y del espesor, utilizando una brújula tipo Brunton. Los datos registrados se agregan a una base de datos geo referenciada con el objetivo de configurar y enriquecer, paulatinamente, el nivel de información cartográfica correspondiente a “Diques”, utilizando el Sistema de Información Geográfica, ArcMap v. 10.1.

Para los fines de este trabajo, los datos de orientación son los únicos que se presentan aquí. Para la interpretación y determinación de la dirección preferencial y rangos de orientación, se utilizó la proyección de tipo roseta de direcciones, generada a través del software Georient®. Así mismo, para dar mayor énfasis a la hipótesis de trabajo de que la orientación de los esfuerzos responsables de la

deformación frágil, y que originaron las fallas, está asociada con la orientación de los esfuerzos que controlaron la intrusión de los diques, se presentan los datos de orientación de diques, que ya no están accesibles en el campo, y que fueron publicados en trabajos anteriores [6].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el propósito de establecer una comparación que con claridad soporte a los argumentos de la discusión, en la Tabla 1 se concentran los datos de orientaciones de los diques publicados anteriormente y los que corresponden a la presente investigación.

Tabla 1. Resultados de las orientaciones del largo de diques e intrusiones menores. La orientación preferencial obtenida en ambos trabajos es hacia el NW. Las diferencias son mínimas.

Rango de variación de la Orientación del Largo del Dique	Orientación Preferencial del Largo del Dique	Autor
315 – 285°	290°	Geyne et al. [6]
320 – 290°	295°	Presente trabajo

En la Tabla 2, se muestran los promedios de los resultados de las orientaciones del campo de esfuerzos obtenidas a partir de los datos de orientación de 38 planos de falla y de las direcciones de desplazamiento de los bloques [7]. Cabe señalar, que la mayoría de las fallas registradas, son de tipo normal. Es decir, corresponden a un régimen distensivo de la corteza.

Tabla 2. Resultados promedio de los análisis de la cinemática de fallas a partir de datos estructurales en los planos de 28 fallas. Las abreviaturas empleadas son como sigue: Direc. = dirección; Incl. = inclinación; R = rumbo; E = echado; D = dirección; I = inclinación. Exceptuando las columnas Eje y Falla, las unidades están expresadas en grados de circunferencia.

Suma del Tensor de los Esfuerzos			Solución de los planos de falla			Eje Compresión		Eje Tensión	
Eje	Direc.	Incl.	Falla	Plano (R/E)	Sentido de desplazamiento (D/I)	Dirección	Inclinación	Dirección	Inclinación
σ_1	126.3	11.31	1	246.1/37.8	50.1/39.4	119	19.15	219.45	64
σ_2	196.3	5.8	2	141.6/50.6	217.1/49.9				
σ_3	203	78.7							

A partir de la teoría Andersoniana, se tiene que la dirección de propagación de los diques (ancho) es paralela al máximo esfuerzo principal, σ_1 , y que el espesor es paralelo al mínimo esfuerzo principal, σ_3 . En el caso de los diques registrados en campo y los publicados por autores previos, Tabla 1, la orientación del máximo esfuerzo principal ocurre en dirección 290-295°. Es decir, la orientación de los diques tiene un rumbo WNE-ESE. Si geoméricamente obtenemos la dirección de una perpendicular a 290-295° se obtiene una dirección 200-205°, que correspondería a la orientación del mínimo esfuerzo principal, σ_3 .

Ahora bien, los datos en los planos de falla que permiten la obtener una aproximación razonable de la orientación de los principales esfuerzos, se tiene que el máximo esfuerzo principal, σ_1 , tiene una dirección de 126.3° y que el esfuerzo principal mínimo, σ_3 , tiene una dirección de 203°.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan del presente estudio son:

1. Las orientaciones de los esfuerzos principales máximos, σ_1 , obtenidos a partir de orientaciones de los diques y las deducidas a partir de datos estructurales en fallas, son colineales entre sí.
2. Los argumentos anteriores soportan a la hipótesis de que los diques y las fallas en la Sierra de Pachuca, son eventos geológicos que están asociados al mismo campo de esfuerzos.
3. Por sus relaciones de corte ambos eventos, el emplazamiento de diques y el fallamiento, ocurrieron durante el Terciario, pero posteriores a la instauración de las rocas de la Sierra de Pachuca
4. A pesar de que los resultados derivados de este estudio son contundentes, las dataciones radiométricas son imprescindibles para el establecimiento de la sucesión cronológica de eventos geológicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los revisores anónimos por el tiempo dedicado a la lectura del presente trabajo. Asimismo, se extiende el agradecimiento a los estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental - UAEH que han participado activamente como ayudantes en el campo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. S. Tait and B. Taisne, The Dynamics of Dike Propagation en Modelling Volcanic Processes: The physics and Mathematics of Volcanism, First Edition, Edited by Sarah A. Fagents, Tracy K. P. Gregg, and Rosaly M. C. Lopes, Cambridge University Press, New York, 2013, pp. 32-54.
- [2]. E. Anderson: The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain, 1951, Oliver and Boyd, Edimburgh, 206 pp.1-8
- [3]. J. Gregory McHone, Mafic dikes suites within Mesozoic igneous provinces of New England and Atlantic Canada: Geological Society of America – Special Paper, 1992, 268, pp. 1-11.
- [4]. J. Weertman, The stopping of a rising, liquid-filled ceack inn the Earth´s crust by a freely slipping horizontal joint: Journal of Geophysical Research, 1980, 85, pp. 967-976.

- [5]. D. T. Secor, D. D. Pollard, On the Stability of open hydraulic fractures in the Earth's crust: *Geophysical Research Letters*, 1975, 2, pp. 510-513.
- [6]. A. R. Geyne, Carl Fries, Jr., Kenneth Segerstrom, R. F. Black, and I.F. Wilson: *Geology and Mineral Deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, Mexico*, 1963, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, Publication 5E, 205 pp.
- [7]. J.C. Escamilla-Casas, L.E. Ortiz-Henández, A. Blanco-Piñón, E. Cruz-Chávez, S.P. Ambrocio-Cruz, Interpretación de la Cinemática de las Fallas Neo-Tectónicas Frágiles del Sector Sureste de la Sierra de Pachuca: *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 2014, Vol. 1, Tópico II, pp. 67-75.