

Significado de las estructuras plumosas en adoquines de la ciudad de Guanajuato, México: huellas de fractura mecánica en las rocas

The meaning of plumose structures in cobblestones in the city of Guanajuato, México: footprints of mechanical fracture in the rocks

Angeles-Moreno, E.¹, Salazar-Pedroza, H.G.¹, Anguiano-Guillén, J.M.¹, Veloz-Pasos, J.G.¹, Arreguín-Palafox, L.A.¹, Herrera-Bermúdez, M.A.², Loza-Aguirre, I.¹, Cabadas-Báez, H.V.³

¹Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato

²Laboratorio de Mecánica de Rocas del Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato.

³Laboratorio de Geología, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México
e.angeles@ugto.mx¹

Resumen

En los adoquines de algunas calles de la ciudad de Guanajuato se presentan patrones de fractura con geometría de pluma que se forman en condiciones mecánicas específicas que involucran una concentración de esfuerzo en un punto para luego la energía de deformación propagarse a través del material del adoquín. Los patrones de pluma que se han descrito en la literatura se presentan en distintos materiales como vidrio, metales, y roca. Estas estructuras plumosas presentan distintas características como un origen, marcas de pluma, marcas de costilla, plumas curvadas y otras morfologías. El establecimiento de las relaciones geométricas de estos patrones de fractura (patrones fractográficos) con las propiedades físicas de las rocas, sus discontinuidades y un acercamiento a su modelado fisicomatemático puede ayudar a entender los factores físicos y las propiedades geológicas de las rocas que influyeron en la propagación de la energía mecánica. Las metodologías empleadas para lograr los objetivos involucraron la caracterización y análisis geométrico, la caracterización de algunas propiedades geológicas, relaciones matemáticas y la estimación de la resistencia mecánica de la roca del adoquín. Los resultados de este trabajo muestran que los patrones geométricos resultantes de las estructuras plumosas reconocidas puede ser modelados matemáticamente con funciones de un círculo, elipse y superelipse; a su vez, estos patrones fueron influidos por las características texturales de la roca del adoquín, así como de otras características geológicas como inclusiones, tipo de roca, otras discontinuidades, el grado de resistencia mecánica y la intensidad de la energía mecánica originada por el cantero.

Palabras clave: fractura; plumosa; mecánica; adoquín; geometría.

1. Introducción

En algunas de las calles de la ciudad de Guanajuato se pueden ver diferentes marcas y patrones geométricos sobre la superficie de los adoquines. Estos patrones son estructuras de geometría de plumas que a su vez se consideran rasgos fosilizados de una energía mecánica que estuvo activa en la roca debido a su fracturamiento. La formación y geometría de estos patrones de fractografía de las rocas fueron el resultado de una interacción de la energía mecánica con las propiedades texturales (Kulander & Dean, 1995), el arreglo de los componentes (fábrica) y las discontinuidades presentes en cada tipo de roca. La energía mecánica es generada de una concentración de esfuerzo que vence la resistencia de la roca (Atkinson, 1987; Bahat & Rabinovitch 1988) provocando la formación de los patrones de fractura. En las canteras y talleres de piedra, en donde se prepararon estos adoquines, los canteros generaron parte de esta energía mecánica. Algunas de estas losas pertenecen a la formación geológica Loseros, que toma el nombre de los canteros que han trabajado esta piedra desde la época colonial y de la cual existen varias canteras en los alrededores de la ciudad de Guanajuato (Puy-Alquiza y Tosca-Gómez, 2016). Los terremotos, que son fracturas en las rocas a escalas de tamaño mayor en la corteza, generan patrones similares en las rocas y la geometría de la propagación de la energía sísmica también muestra patrones similares (Müller & Dahm, 2000). El establecimiento de las relaciones geométricas de estos patrones morfológicos de la superficie de fractura (patrones fractográficos) con las propiedades físicas de las rocas, sus discontinuidades y un acercamiento a

su modelado fisicomatemático puede ayudar a entender los factores físicos y las propiedades geológicas de las rocas que influyen en la propagación de la energía mecánica. Esto tiene implicaciones para áreas de investigación en la mecánica de rocas, la sismología, la industria de la construcción, la arqueología y la arquitectura. En este proyecto, los profesores y estudiantes realizaron investigación documental relacionada al proyecto, así como la aplicación de conocimientos cartográficos, geológicos, de la mecánica de rocas y algunos principios matemáticos para caracterizar los patrones fractográficos de las fracturas plumosas en adoquines de algunas de las construcciones de la ciudad de Guanajuato.

En el presente estudio se presentan las relaciones de las propiedades geométricas de los patrones fractográficos de los adoquines de la ciudad de Guanajuato mediante relaciones con las propiedades físicas de las rocas, sus discontinuidades y modelado fisicomatemático para entender los factores físicos y propiedades geológicas de las rocas que influyeron en la propagación de la energía mecánica durante su fracturamiento. Este trabajo partió de la suposición de que la formación y geometría de los patrones de fractografía en los adoquines de las construcciones de la ciudad de Guanajuato fueron el resultado de una interacción de la energía mecánica con las propiedades texturales, de la fábrica y las discontinuidades presentes en cada tipo de roca. El modelado fisicomatemático puede ayudar a entender parte de estos factores físicos y propiedades geológicas de las rocas que influyen en la propagación de la energía mecánica. Los objetivos específicos de este trabajo fueron: Realizar investigación documental referente a la problemática planteada, con referencia a los estudios de la fractografía en rocas; la realización de trabajo de campo y colecta de fotografías de patrones de fractura en adoquines de la ciudad de Guanajuato; procesamiento de la información colectada y el análisis de la misma; para por último establecer las variantes de las características fractográficas, geométricas y matemáticas y los factores físicos y geológicos que influyen en la variación de la geometría de la estructura plumosa. Los resultados muestran que el patrón geométrico resultante de la estructura plumosa fue influido por las características texturales de la roca del adoquín, así como de otras características geológicas como inclusiones, tipo de roca, otras discontinuidades, el grado de resistencia mecánica y la intensidad de la energía mecánica originada por el cantero, aunque en esta última parte aún falta mayor investigación cualitativa y cuantitativa.

2. Marco Histórico

La ciudad de Guanajuato se funda legalmente en el año de 1570, aunque sus yacimientos minerales eran conocidos por los españoles desde el año de 1546, cuando este territorio fue otorgado a Rodrigo Vázquez, como merced para estancia de cría de ganado. Entre 1554 y 1557, a la mitad del territorio de Zacatecas, se encontró plata en abundancia, era el centro del camino hacia la conquista de plata y nació Guanajuato, lo que aceleró aún más el flujo de aventureros en busca de riquezas. Para 1825 se establecen en Guanajuato dos compañías de capitales ingleses para trabajar las minas, las que dieron un giro a la industria regional, trayendo como consecuencia el aumento de la población. Con ello la ciudad comenzó a tener más infraestructura (Trueba, 1985).

Sus calles han cambiado a través de la historia (Figura 1), sus orígenes tienen en los desastres que ocasionaba el río que atraviesa la ciudad, el cauce llevaba aguas pluviales y era evidente, un foco de infecciones, mal oliente y antihigiénico (Trueba, 1985). También la proyección de las calles se pensó porque a finales de los 40, el tránsito vehicular y peatonal había aumentado para ir al centro de la ciudad (Trueba, 1985).

El aprovechamiento de las canteras en las montañas de los alrededores ha sido fundamental, por tanto, la arquitectura en la ciudad de Guanajuato (centro) es de estilo neoclásico, siendo el material más empleado la cantera. Dicho material fue usado en muros, pavimentos, enlosados, escaleras, monumentos, iglesias, columnas, pilares, balcones, etc. (Tosca-Gómez y Puy-Alquiza, 2016). Por ejemplo, la Universidad de Guanajuato, mesón de San Antonio, el Museo Alhóndiga de Granaditas, el teatro Juárez, el mercado Hidalgo, entre otros.

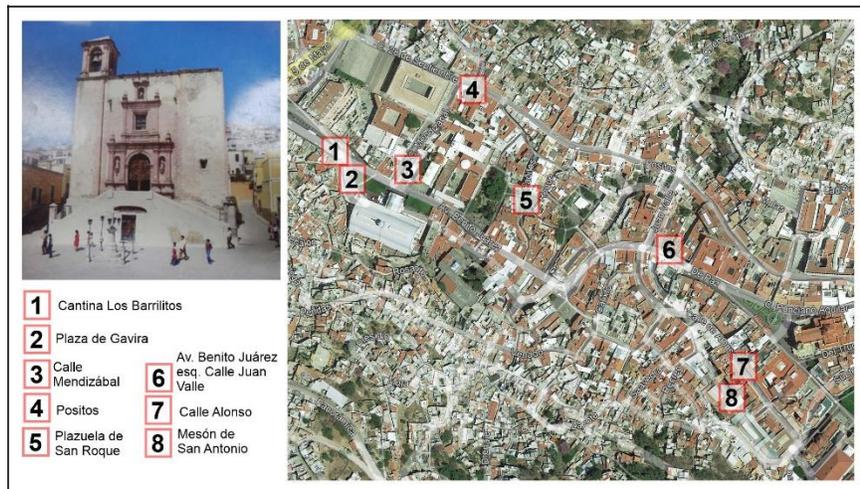


Figura 1. Calles y lugares de la ciudad de Guanajuato en donde se realizó el estudio.

2.1 Fractografía en rocas

La fractografía en los materiales es definida como la ciencia que se encarga del análisis sobre superficies de fractura para intentar relacionar la topografía de estas superficies y sus rasgos característicos, con los mecanismos básicos y posibles causas de fractura. Se puede considerar estudiar la fractografía de los materiales a tres diferentes escalas de tamaño desde macroscópica a microscópica. Las técnicas se basan en inspección visual, fotografía, microscopía óptica, hasta microscopía electrónica.

A través de la historia, las superficies de fractura en materiales han sido estudiadas y analizadas en busca de información con múltiples propósitos; sin embargo, aún es poca la información que se tiene respecto a estos estudios. Desde siglos atrás la topografía de las superficies generadas tras la fractura de un material, han sido asociadas a diversos factores. El término fractografía fue utilizado por primera vez por el metalúrgico Carl A. Zapffe (Zapffe y Clogg 1944) posteriormente Byron Kulander lo introdujo en la geología en la década de 1970 (Kulander et al. 1979). La etapa de investigación de fracturas en rocas comenzó en 1896 con estudios de J. B. Woodworth. Ameen en 1995 propone una clasificación de estructuras superficiales en las caras de las juntas.

Casi durante la mitad de un siglo no se registraron estudios sobre las características de la superficie de fracturas en rocas. Hasta a principios de 1940 comenzaron estudios sobre las superficies de fractura por J. M. Parker en 1942 y culminando con la publicación de dos artículos el de Hodgson (1961) y Roberts en 1961. A partir de esto, Hodgson revisa las definiciones e implicaciones de las características de la fractura que fueron identificadas por Woodworth en 1896.

En 1979 se introdujo el término fractografía por Kulander (1979) a partir de los estudios de las características superficiales de las rocas y comenzó a utilizarse en estudios de metalurgia, conduciendo a una descripción y explicación detallada de las características macrofractográficas en los estudios de campo mencionando los trabajos de (Zapffe y Clogg, 1944) aplicado a la metalurgia (figura 2). Así fue desarrollado lo que se conoce como microfotografía y los detalles microscópicos de las superficies. El principal autor de este aporte fue Zapffe, debido a que integró la microscopía óptica y en sus primeros trabajos describió en detalle la apariencia de la cristalografía y el mecanismo de fractura conocido como clivaje.

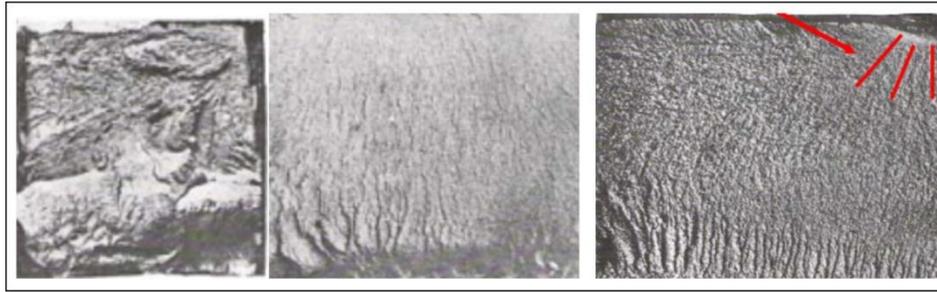


Figura 2. Imágenes de macrofractografías en aleaciones metálicas (Ramírez-Garzón, 2009).

Las fracturas plumosas presentan varias partes morfológicas (figura 3), las cuales son: origen, eje de la pluma, área del espejo, zona de neblina (*mist*), línea o zona de borde (*tip line*), marcas de costilla (*arrest lines*), estrías o marcas de pluma y zona de hombro o de borde (*fringe zone*). En la zona del hombro se encuentran las plumas curvadas (*twist hackle*) o esclavina (*hackle*) que forman varios escalones. Estos escalones se pueden describir con una inclinación desde el plano de la fractura (*tilt*) y con un ángulo de torsión (*twist*) pluma curvada (*twist hackle*). El término “esclavina” es asignado en este trabajo a las plumas localizadas en la zona de borde u hombro, esto debido al parecido que tienen estas fracturas plumosas con las plumas alargadas del cuello de un gallo, que terminan en punta.

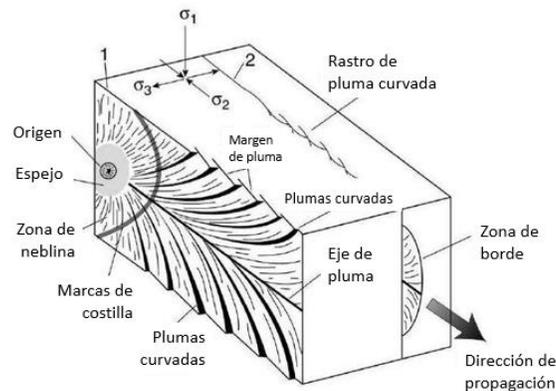


Figura 3. Partes morfológicas reconocidas en la fractura plumosa en las rocas.

2.2 Las calles de Guanajuato y sus losas

Las calles de Guanajuato han pasado por varias transformaciones en sus aceras y pisos. A grandes rasgos, el pavimento original que tuvieron las vías de tráfico rodado era en su mayoría de piedra bola de corrientes fluviales. A mediados del siglo XX, este pavimento fue cubierto con losas cuadradas de roca volcánica de andesita y basalto. Durante la primera década del siglo XXI, estas losas fueron sustituidas por losas y adoquines de dacita, riódacita y riolita en algunas calles del centro de la ciudad.

En la zona centro de la ciudad de Guanajuato abundan callejones y calles pavimentados con diversos materiales, pero este estudio se enfocó en algunas calles cuyas losas presentaban fracturas plumosas de interés. Las calles visitadas del centro de la ciudad fueron las siguientes: Alonso, Avenida Benito Juárez (esquina con Juan Valle y plaza de Gavira), Mendizábal, plazuela de San Roque, Positos y el interior del Mesón de San Antonio.

De acuerdo con las imágenes proporcionadas por la herramienta Street View de la aplicación Google Maps, por lo menos desde el año de 2009, las calles Alonso, Mendizábal, Positos y Av. Juárez (esq. Juan Valle) ya presentaban los adoquines actuales.

En la figura 4B se aprecia una placa localizada en la plazuela de San Roque que data del año 1987. En 4A se muestra una presentación de los entremeses cervantinos, que comenzaron a presentarse en 1953. Además, podemos notar que no se encuentra tal placa y que el piso es parcialmente empedrado con piedra bola, distinto al actual. Por lo tanto, inferimos que el piso actual fue colocado en una fecha posterior a 1953.

La acera de la cantina “Los Barrilitos” (al lado de la plaza de Gavira) tenía piso del mismo tipo que la plazuela San Roque y se sustituyeron por adoquines de riodacita y riolita después de 2017.

Entre 2019 y 2022 se añadieron adoquines de andesita y dacita en el descanso de la casa de las artesanías localizada en la calle Mendizábal.



Figura 4. Las transformaciones en los materiales empleados en los pisos de calles de la ciudad de Guanajuato. A, Plazuela de San Roque en donde se observa el cambio de empedrado a un piso de adoquines. B, placa conmemorativa de entremeses que se realizan en la plazuela con la ubicación actual. C. Línea de tiempo de la construcción de algunas calles de la ciudad de Guanajuato.

3. Metodología

Para lograr los objetivos propuestos en este proyecto se aplicaron las metodologías y técnicas de análisis e integración de información antecedente, trabajo de campo, análisis de imágenes, descripciones básicas petrológicas, relaciones matemáticas y análisis de resultados. Las etapas involucradas en la metodología comprendieron trabajo de campo, la elaboración de cédulas de información, fotografías de los patrones de fractura, determinación de la resistencia mecánica de la roca de la losa y el procesamiento de datos (Figuras 5 y 6).

Dentro del trabajo de campo, se realizó un primer reconocimiento en varias de las calles de la ciudad de Guanajuato, que permitió detectar zonas de interés, debido a la presencia de estructuras plumosas o rasgos geométricos; una vez ubicadas estas zonas, se realizó un trabajo formal de campo, en donde se levantaron distintos datos para cada losa en cédulas de información, tales como: ubicación en coordenadas UTM-WGS84, clave numérica, tamaño del adoquín, orientación, registro fotográfico, tipo de roca y textura de la roca. En el registro fotográfico de los patrones geométricos de la fractura se utilizó una cámara fotográfica de una tablet. Se controló la horizontalidad al tomar la fotografía y cada adoquín se controló con una numeración consecuente, así como su escala y medidas. Una vez realizado el trabajo de campo mediante el registro de los datos de las cédulas de información y la colecta de fotografías se programó una última salida a campo para la estimación de la resistencia mecánica de la roca de los adoquines con ayuda de un esclerómetro (martillo Schmidt marca Controls).



Figura 5. Recolección de los distintos datos de campo. A) Recolección de datos en la plaza San Roque. B) Toma de medidas y orientación de las losas en la calle Mendizábal. C) Llenado de formato en prueba de resistencia realizada con el martillo Schmidt. D) Marcado de plantilla (retícula de 6X8 cm a cada 2 cm) de puntos en los que se aplicaron veinte impactos con el martillo Schmidt.

Para determinar la resistencia mecánica, se empleó el martillo Schmidt marca Controls. Se eligieron las losas o adoquines representativos en función de las primeras observaciones de campo. Se siguió el siguiente procedimiento:

1. Pulir la superficie con la piedra porosa de grano medio realizando movimientos circulares en un área de aproximadamente 8X10 cm. Los puntos en los que se aplicarán los impactos con el martillo deben estar alejados de los extremos del adoquín por lo menos la mitad de su espesor.
2. Limpiar el polvo generado en el paso anterior utilizando una brocha.
3. Marcar con la plantilla (retícula de 6X8 cm a cada 2 cm) los puntos en los que se aplicarán los veinte impactos con el martillo.
4. Aplicar los veinte impactos manteniendo el martillo perpendicular a la superficie a ensayar y registrar los correspondientes índices de rebote.
5. Determinar el índice de rebote representativo de cada zona con el criterio de ISRM (ordenar las veinte lecturas de menor a mayor y determinar un promedio de las diez lecturas mayores).
6. Con el índice de rebote representativo y la densidad de la roca aplicar la siguiente ecuación para estimar la resistencia a la compresión simple de la roca. En la ecuación σ_c es la resistencia a la compresión simple de la roca, γ es el peso específico de la roca y R_L el valor de rebote que representa la dureza Schmidt.

$$\sigma_c = 10^{(0.00088 \gamma R_L + 1.01)}$$

7. Con el uso de trazadores (*splines*) cúbicos aplicados a datos digitalizados del gráfico de Miller, determinar la dispersión media de las resistencias estimadas.
8. Clasificar la roca de cada zona en base a su resistencia a compresión simple estimada y su dispersión media (González de Vallejo, 2002).

Una vez realizadas las anteriores etapas, el siguiente paso fue realizar un análisis detallado de los patrones geométricos de las estructuras plumosas registradas en las fotografías con ayuda de los softwares de diseño InkSpace y COREL DRAW X9. Se realizó la digitalización de estos patrones para poder verlos de una manera más detallada y asimismo poder ver las diferentes tendencias en cuanto a dirección de propagación, rugosidades y asimetrías de rasgos morfológicos sobre la superficie de los adoquines. Se realizó en las últimas etapas un análisis de las características geométricas, físicas, discontinuidades y geológicas básicas en gabinete para poder hacer las interpretaciones necesarias de los resultados. En el análisis geométrico se

buscó establecer algún parecido a alguna función matemática que describiera los distintos patrones geométricos de las estructuras plumosas. Las características mencionadas se emplearon para poder deducir el origen y los procesos involucrados para la generación de la morfología de estas estructuras presentes en algunos de los adoquines.

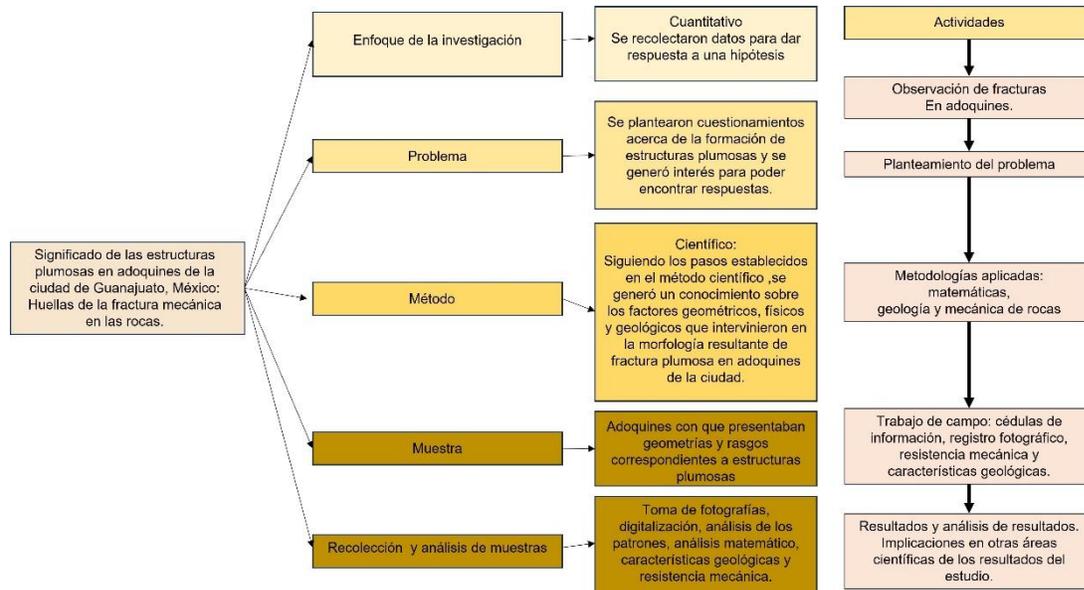


Figura 6. Esquema metodológico general seguido durante de la investigación.

4. Resultados

En esta parte del trabajo se presentan los resultados obtenidos de la investigación, que son patrones morfológicos de estructuras plumosas, la aproximación de los patrones de fractura a alguna función matemática, algunas características geológicas y resultados de la estimación de la resistencia mecánica de los adoquines. Estos resultados permiten establecer las relaciones entre los factores geométricos, físicos y geológicos que determinaron la morfológica de la fractura en el adoquín; así también establecer posibles caminos en la propagación de la energía mecánica.

4.1 Inventario de patrones geométricos

Los patrones de fractura observados en general en las calles Mendizábal, Plaza de Gavira, Avenida Benito Juárez, calle Positos, y calle Alonso, muestran las partes del origen de la fractura, marcas de pluma, marcas de costilla y zonas de borde del patrón. El origen de la fractura se observó en distintas posiciones en los adoquines. La zona de espejo no se observó claramente y los patrones de plumas curvadas eran muy frecuentes. A continuación, se describen las características morfológicas de los adoquines.

En la figura 7A, en el adoquín de roca riocacita se observan líneas de pluma radiales que parten de una imperfección y no se observan marcas de costilla; esto parece sugerir un proceso diferente en la formación de este patrón, a diferencia de los patrones de fractura en la calle Mendizábal. En la figura 7B se observa una geometría en abanico para las líneas de pluma que parte de un origen y tampoco se observan marcas de costilla. En la figura 7C aparece una pluma asimétrica que parece que es sólo una parte de un patrón de pluma más grande en tamaño. En la figura 7D se presenta un patrón de pluma simétrico con forma de un penacho en donde en el borde se observan las plumas curvadas y el origen del patrón se encuentra en una esquina del adoquín. En la figura 7E el patrón de fractura en el adoquín parece que fue parte de un patrón de mayor tamaño y muestra fuertemente marcadas las marcas de costilla con cierta asimetría en el área definida entre las marcas; en este patrón pudiera haber variado la energía mecánica de impacto y otras imperfecciones en la roca pudieron determinar el patrón resultante. En la figura 7F el patrón de pluma es simétrico y las

marcas de costilla están muy débiles en su apariencia, pero están presentes, el origen es claro determinado por la geometría de las marcas de pluma.



Figura 7. Algunos de los patrones morfológicos reconocidos en los adoquines de las zonas la cantina Los Barrilitos, Plaza de Gavira y Plazuela de San Roque.

En la figura 8 se muestran los resultados de los patrones geométricos para varios adoquines de la calle Mendizábal. La figura 8A muestra patrones de estrías (líneas de pluma) radiales que parten de un origen, las marcas de costilla están muy cercanas a otras con arreglo concéntrico, y hay una pequeña inclinación de cada plano entre costilla y costilla que es el ángulo de inclinación (tilt) pero que no se percibe en la fotografía. En la figura 8B las líneas de pluma son muy cerradas y se observó que estas líneas en realidad eran pequeñas depresiones alineadas, las marcas costillas son más abundantes en número en comparación con el adoquín de la figura 8A, lo que sugiere una variación en las velocidades de propagación de la fractura durante la formación del patrón de pluma. En la figura 8C se observa una morfología diferente del patrón es un poco menos simétrico en comparación con los anteriores patrones (8A y 8B), presenta un borde final de la pluma muy resaltado, no es claro si este patrón haya sido parte de un patrón más grande en tamaño; este patrón del adoquín también muestra el desarrollo de otro patrón de pluma más pequeño superpuesto al patrón mayor, lo que indica que se dio un golpe a la roca para alguna necesidad que se desconoce. En la figura 8D se puede ver un patrón de pluma con menor desarrollo de líneas o estrías de pluma, así como también poco desarrollo de marcas de costilla, y se ve una superficie más rugosa del adoquín, esto puede sugerir que la rugosidad original o imperfecciones en el adoquín durante la formación de la fractura pueden influir en la formación de estrías y de marcas de costilla.



Figura 8. Algunos de los patrones morfológicos reconocidos en los adoquines en la calle Mendizábal.

En la figura 9A se observa un patrón radial simétrico con zonas de costilla concéntricas. Las zonas de costilla varían en su separación desde el origen. La terminación del patrón de la fractura no se percibe ya que fue cortado por la forma del adoquín. En la figura 9B se observa se observa un patrón simétrico de pluma con las líneas de pluma divergiendo en abanico, se puede apreciar al alejarse del origen que es menos definidas las estrías de la pluma y se vuelven más difusas y poco perceptibles, apareciendo una zona de rugosidad en el extremo o borde de la estructura de pluma. En la figura 9C se observa un patrón de pluma un poco más complejo en la parte central del adoquín con líneas de pluma simétricas radiando de la parte central, las costillas muy tenues apenas perceptibles. En las partes laterales se pueden apreciar líneas de plumas de posiblemente otras fracturas plumosas, esto porque no están completas, pero hace surgir la duda en la manera de interacción mecánica de estas plumas como ocurrió. En la figura 9D se observa un patrón radial simétrico en la morfología de la pluma, se pueden apreciar depresiones y altos irregulares en la superficie del adoquín, es posible que el cambio de tipo de roca y la textura de la roca del adoquín hayan influido en la morfología y geometría de esta estructura plumosa.

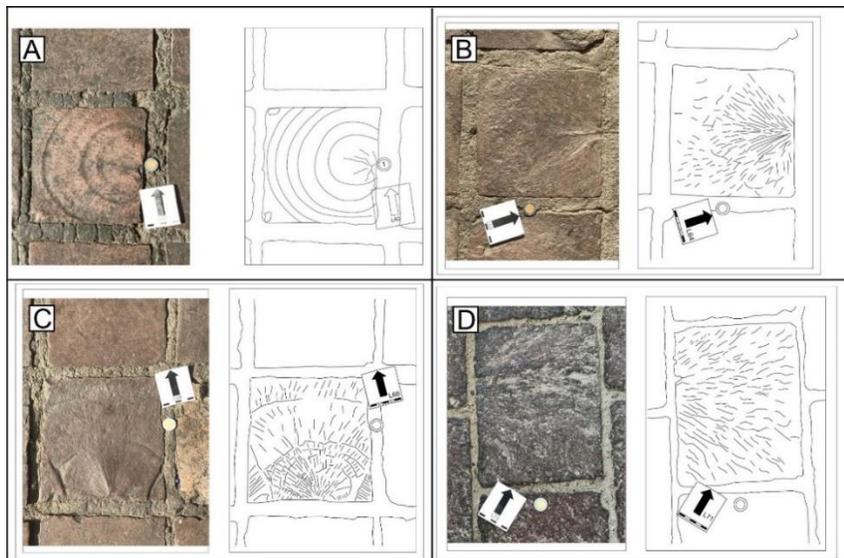


Figura 9. Algunos de los patrones morfológicos reconocidos en los adoquines en la Avenida Benito Juárez esquina con calle Juan Valle.

En la figura 10 se muestran que algunos patrones geométricos no corresponden con verdaderas estructuras plumosas, lo que da pie a confusión en su reconocimiento. En algunos casos se reconocieron marcas de sierra de disco de corte de diamante en el caso de adoquines de la arenisca volcánica verde (Formación Loseros) (Figura 10A). En el caso de la Figura 10B del adoquín de arenisca volcánica con laminación sedimentaria se puede observar que los patrones geométricos son irregulares que son controlados por la meteorización y erosión de la superficie expuesta al caminar de las personas y la intemperie. En la figura 10C se muestran trazas de líneas que se confunden con las estrías de las estructuras plumosas, y se entra en duda si es parte de un patrón más grande o son líneas de flujo de la estructura volcánica de donde se extrajo el adoquín. En la Figura 10D se observan líneas de trabajo con cinceles de la arenisca volcánica en el Mesón de Antonio que muestra patrones lineales pero que también pueden confundirse con una parte de estrías de la estructura plumosa.

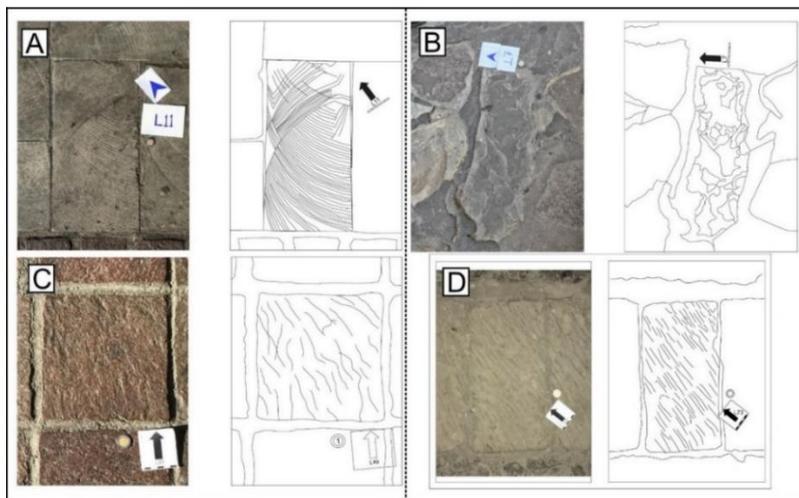


Figura 10. Algunos de los patrones morfológicos de falsas estructuras plumosas y patrones que se confunden con estas estructuras de calles de la ciudad de Guanajuato.

4.2 Análisis geométrico, propuesta geométrica y matemática

Las figuras geométricas más regulares presentes en los adoquines estudiados, particularmente aquellos localizados en la calle Mendizábal, parecen corresponder a las mitades de círculos, elipses y superelipses (véase figura 11). Las ecuaciones de estas figuras (completas) son las siguientes:

$$x^2 + y^2 = r^2 \text{ (círculos)}, \quad \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \text{ (elipses)}, \quad \left|\frac{x}{a}\right|^k + \left|\frac{y}{b}\right|^k = 1 \text{ (superelipses)}$$

donde $r, a, b, k \in \mathbb{R}$ son positivos, r representa la longitud del radio del círculo, a y b representan las medidas de los semiejes horizontal y vertical. Notemos que una elipse es una superelipse con $k = 2$. En los casos en que los patrones que aparecen en las losas y adoquines son más bien elípticos y no circulares, proponemos que $1.7 \leq k \leq 2.3$. Sería interesante determinar el valor exacto de k para algunos de estos adoquines en un trabajo subsiguiente.

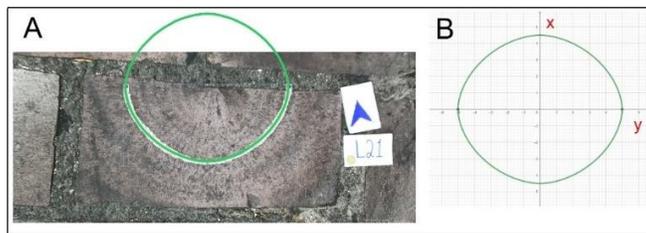


Figura 11. Modelo geométrico y función matemática que describe algunos patrones de fractura plumosa. En esta gráfica, $k = 1.8$.

4.3 Discontinuidades y otras características geológicas reconocidas en los adoquines

Las discontinuidades y otras características geológicas se reconocieron en varios de los adoquines en las calles estudiadas de la ciudad de Guanajuato. A continuación, se describen algunas de las discontinuidades encontradas en algunas de las zonas estudiadas.

Cantina Los Barrilitos y Plaza de Gavira. En la acera fuera de la cantina, la roca de estos adoquines es una riolita a riodacita. La roca de los adoquines presenta una variación textural en la roca con texturas afaníticas y porfídicas. Se observaron algunas inclusiones en la roca como líticos accidentales de otro tipo de roca en la matriz de la roca, esto puede deberse a que durante el flujo de lava del cual proviene el adoquín incorporó fragmentos de roca en su camino. Se pueden reconocer algunas líneas en los adoquines que se pueden confundir con estrías (líneas de pluma) de las fracturas plumosas.

Calle Mendizábal. En esta parte se reconocieron adoquines de roca riodacita y riolita con texturas porfídicas y afaníticas. Se observaron irregularidades como una rugosidad mayor que era determinada por la presencia de vesiculación de los flujos de la lava originales (Figura 12). Se observaron también inclusiones de algunos fragmentos de otra roca y también huecos debido a la vesiculación por el escape de gases de la lava volcánica de la cual el adoquín se extrajo. En una parte de la banqueta de Mendizábal se reconoció dacitas con variación a andesita que mostraban texturas porfídicas con fenocristales de plagioclasa y a veces cuarzo.

Plazuela de San Roque. En esta parte los adoquines o losas son de roca andesita, y algunas de dacita. Muestran una gran variedad de texturas y estructuras volcánicas. Se pueden ver trazas de planos de flujo de derrames lávicos (Figura 12), estas trazas se expresan como líneas ondulantes o rectas a veces pronunciadas y a veces suavizadas. Se pudieron reconocer algunos adoquines que son de un tipo de roca de una composición más máfica en andesita y basalto, estas rocas presentaban con mayor frecuencia vesiculación.

Callejón La Escondida. En este callejón se reconocieron algunos adoquines de arenisca volcánica de la Formación Loseros que presentan patrones de líneas muy irregulares pero que no son fracturas de tipo pluma, y muestran la desintegración de los planos y láminas de la estratificación (Figura 12F), esto último provocado por el caminar constante de personas por el callejón, la meteorización y erosión de tipo natural y antropogénica.

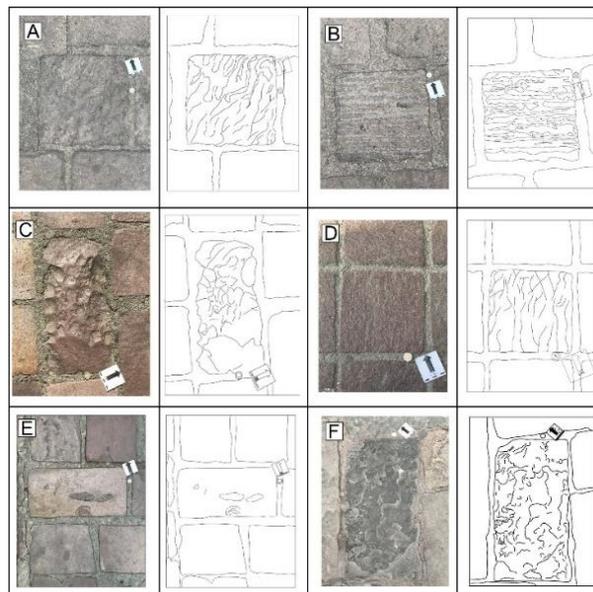


Figura 12. Algunas características geológicas reconocidas en adoquines estudiados. A) y B) Patrones de flujo en adoquines en la Plazuela de San Roque. C) Adoquín de la calle Mendizábal que muestra fracturas internas con estructuras de pluma y algunas irregularidades debido al flujo lávico original. D) Adoquín en la calle de Positos que muestra líneas que pueden interpretarse como líneas de flujo lávico. E) Adoquín de la calle Mendizábal que muestra una inclusión de roca y vesiculación.

4.4 Resistencia mecánica en los adoquines

Las pruebas de resistencia mecánica en los adoquines son fundamentales para determinar la durabilidad ante el desgaste de pisos en las calles urbanas. Existen en la literatura varios trabajos de la fabricación de adoquines de concreto combinando diferentes materiales de construcción y materiales orgánicos que buscan propiedades físico-mecánicas adecuadas para su trabajo óptimo en calles y vías de tránsito urbanas (Arango-Londoño, 2006; Bahamondes et al., 2013; Varas-Ramírez y Areche-García, 2021); sin embargo, los estudios de resistencia mecánica en adoquines de roca con estructuras plumosas no son frecuentes, en esta parte se muestran los resultados de los adoquines estudiados para la ciudad de Guanajuato en relación con las fracturas plumosas.

La resistencia mecánica de la roca de los adoquines es un factor físico que se consideró podría influir en la morfología resultante de las estructuras plumosas. En la tabla de resultados (tabla 1) se puede observar que algunas losas presentaron variaciones en cuanto a su resistencia mecánica, a pesar de que las losas fueran del mismo tipo de roca, dichas variaciones se infiere se puedan deber a distintos factores: Grado de intemperismo o meteorización presente en la superficie de las losas, tipo de roca del adoquín, morfología de la estructura plumosa, variaciones entre el grosor de las losas, variaciones en las dimensiones de las losas, discontinuidades geológicas y posibles deficiencias en el concreto que las mantiene cementadas. La meteorización y desgaste en las superficies dependía de qué tanto las personas frecuentan el caminar por las aceras, ya que se observaron superficies de adoquines con rugosidad suavizada, superficie pulida y manchas de derrames de comida. Esto pudo influir en la variabilidad de la resistencia mecánica. El tipo de roca es un factor importante para considerar, ya que se observó que los adoquines de riolita, riocacita y dacita mostraban una mayor resistencia mecánica en general (Avenida Juárez, calle Mendizábal, calle Positos), a diferencia de los adoquines de la plazuela San Roque y Mesón de San Antonio. La morfología de la superficie de los adoquines que fue ensayada con el martillo Schmidt también pudo afectar a los resultados de la resistencia mecánica (aunque pudo ser un factor menor en comparación con el tipo de roca), ya que se observa una variación en los resultados entre adoquines del mismo tipo roca, esto se explica porque había patrones con mayor rugosidad o con desarrollo estructuras plumosas más protuberantes que otras. El espesor de los adoquines también es otro factor físico por considerar en la variación de la resistencia mecánica, ya que los espesores variaban de 3 cm, 3.5 cm, 4 cm y hasta 5 cm entre los adoquines; los espesores mayores es probable esperar que dieran un mayor valor en resistencia mecánica para los adoquines de riolita y riocacita esto por la estabilidad y el rebote mecánica del esclerómetro. Las dimensiones geométricas de los adoquines pudieron haber influido también ya que se observó que cuando se aplica cerca del borde de un adoquín hay variación en resistencia mecánica debido a la disipación de la energía mecánica del rebote del martillo Schmidt. Las discontinuidades geológicas detectadas como inclusiones de roca, vesículas u otro tipo de huecos por desprendimientos por erosión, textura de la roca, laminaciones y trazas de planos de flujo de la estructura fluidal para el caso de rocas ígneas, así planos de laminaciones sedimentarias en el caso de adoquines de roca sedimentaria también pudieron ser factores en la variación de la resistencia mecánica.

Zona	1	2	3	4	5	6	7
Descripción de la roca	Riolita porfídica	Riolita porfídica	Arenisca volcánica verde formación losero	Riocacita afanítica	Riocacita afanítica	Riocacita afanítica	Dacita porfídica
Orientación del martillo	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°
Condición de humedad	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco
Espesor de adoquín (cm)	-	-	-	3.5 a 4.5	3.5 a 4.5	3.5 a 4.5	5
R_L (representativo)	57.5	48.5	43.6	64.4	63.4	56.8	36.4
Densidad (kN/m^3)	24.7	24.7	20.8	24.7	24.7	24.7	24.7
Resistencia estimada (MPa)	181.9	115.9	64.3	256.9	244.4	175.6	63.3
Dispersión media (MPa)	± 79.4	± 44.7	± 29.9	± 135.3	± 125.4	± 75.5	± 29.6
Clasificación por resistencia	R5	R4 a R5	R3 a R4	R5 a R6	R5 a R6	R5	R3 a R4

Zona	8	9	10	11	12	13	14
Descripción de la roca	Riodacita porfídica	Andesita porfídica	Andesita porfídica	Riolita afanítica	Riolita afanítica	Andesita verde formación losero	Riodacita porfídica
Orientación del martillo	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°	-90°
Condición de humedad	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco	Seco
Espesor de adoquín (cm)	5	5	5	4	4	-	-
R _L (representativo)	59.4	53	52.2	58.2	54.3	40.3	57.2
Densidad (kN/m ³)	24.7	24.7	24.7	24.7	24.7	20.8	24.7
Resistencia estimada (MPa)	200	145.2	139.5	188.4	155	55.9	179.2
Dispersión media (MPa)	± 91.4	± 58.8	± 55.9	± 83.5	± 63.9	± 27.6	± 77.7
Clasificación por resistencia	R5 A R6	R4 a R5	R4 A R5	R5 a R6	R5	R3 a R4	R5

Tabla 1. Resultados representativos de la estimación de la resistencia mecánica para adoquines en la ciudad de Guanajuato.

4.5 Factores físicos y geológicos que influyen en la geometría de las estructuras plumosas

La geometría de las estructuras plumosas, descrita en las anteriores secciones del trabajo, se puede ver que cuando una inclusión de roca pequeña se encuentra dentro de la roca del adoquín las líneas de pluma (estrías) son desviadas o se detienen. En las zonas vesiculadas cuando había en el adoquín también se observó que las líneas de las plumas cambiaban su dirección o se volvían más onduladas y hasta llegar a ser irregulares (Figuras 8D, 9D y 12C). En algunos adoquines cuando cambia la cantidad de cristales con respecto a la matriz vítrea también se observan diferencias ya que en los adoquines observados en la Plazuela San Roque y en la calle Alonso muestra una textura porfídica con mayor cantidad de cristales, a diferencia de la calle Mendizábal y en la zona de Avenida Benito Juárez esquina con la calle Juan Valle que muestran una gran cantidad de adoquines con texturas afaníticas y una matriz vítrea abundante; en donde como consecuencia se expresan patrones bien definidos de estructuras plumosas (Figuras 8 y 9). Un factor físico que también se observó fue que había patrones de fractura plumosa más grandes y otros más pequeños en donde el origen, las marcas de costilla (*arrest lines*) y las estrías dependían también del tamaño del adoquín, esto sugiere que se usó una energía de impacto variable para formar y dimensionar el adoquín. La resistencia mecánica muestra que para los adoquines de roca riolita, riodacita y dacita que estaban en las calles de Avenida Benito Juárez, calle Mendizábal y Positos, en general presentan una resistencia mecánica alta, pero en comparación con los adoquines de la plazuela San Roque que son de roca dacita, andesita a basalto muestran menor resistencia mecánica. La morfología de la estructura plumosa se observó diferente para estas diferencias de la resistencia mecánica. Otro aspecto detectado fue que las losas o adoquines de arenisca volcánica de la Formación Loseros mostraban variabilidad en su resistencia mecánica debido al grado del intemperismo de las capas y sus resistencias mecánicas fueron mucho menores, sin embargo, estas losas no mostraban patrones de fractura de pluma.

5. Discusión

En esta parte se discuten los resultados del trabajo sobre las partes geométricas de las estructuras plumosas detectadas en los adoquines de la ciudad de Guanajuato y las implicaciones que tiene el análisis geométrico de estas morfologías en las superficies de fractura.

5.1 ¿Qué nos dice la geometría de la mecánica de formación de la fractura plumosa?

Los patrones de plumas descritos en algunas de las calles de Guanajuato muestran que hay variaciones en varias partes de la morfología, por ejemplo, la simetría o asimetría de los patrones de plumas, el tamaño de las plumas, como también la distancia entre las marcas de costilla, el tipo de imperfección en el origen de la pluma, las terminaciones de las plumas, lo accidentado o suavizado de la morfología y la presencia de plumas sobrepuestas. Estas observaciones y problemas que surgen de ello, a través de la historia ya se han discutido en los patrones de fractura y aspectos como definición, origen e interpretación de las fracturas (Pollard y

Aydin, 1988), su caracterización y su modelado. En general, en los adoquines predominan los patrones simétricos que sugieren que la energía mecánica empleada durante el impacto en la roca provocó que el origen de la pluma estuviera controlado. En los adoquines estudiados en este trabajo se observaron que los orígenes de la fractura eran cavidades o huecos, acumulaciones de minerales, o inclusiones de otra roca; se ha visto que el origen de la fractura se inicia en donde existen heterogeneidades geométricas y del material, esto se ha observado en cavidades, inclusiones de mineral o roca y presencia de microfracturas (Pollard y Aydin, 1988).

El tamaño de las plumas también es muy variable y se observa que su tamaño depende de la energía mecánica acumulada en el origen y después como esa energía puede irse disipando, ya que se han observados fracturas de pluma a escala de caras de montañas (Bahat et al., 1999). La variabilidad en la distancia entre las marcas de costilla y el tamaño de la superficie entre las marcas de costilla, estos parámetros representan la velocidad a la que ocurrió la propagación de la fractura (Kulander y Dean, 1985), para algunos de los adoquines de la ciudad de Guanajuato se aprecia que a veces estaban muy cercanas y eran numerosas las marcas de costilla lo que sugiere velocidades más rápidas.

Las direcciones de propagación de la energía mecánica están determinadas por las estrías de la pluma y se observó que estas estrías podrían desviarse en función de la textura de la roca, la rugosidad preexistente de la roca, imperfecciones o inclusiones de otras rocas y la presencia de fracturas u otras plumas que ya existieran en la roca. Otro aspecto que nos muestran las características morfológicas es que las fracturas se desarrollaron en varios tipos de modos de fractura, de acuerdo con Pollard y Aydin (1988), el desarrollo de la fractura presenta tres tipos de modo, modo I fractura de tensión, modo II fractura de cizalla y modo III fractura de cizalla con movimiento relativo perpendicular a la dirección de propagación.

6. Conclusiones

Los patrones geométricos de fractura plumosa observados en los adoquines de las calles Mendizábal, Plaza de Gavira, Avenida Benito Juárez, calle Positos, y calle Alonso, muestran una morfología constituida por origen de la fractura, marcas de pluma, marcas de costilla, plumas curvadas y zonas de borde. Los resultados de este trabajo muestran que los patrones geométricos resultantes de la estructuras plumosas reconocidas puede ser modelados matemáticamente con funciones de un círculo, elipse y superelipse; a su vez estos patrones fueron influidos por las características texturales de la roca del adoquín, así como de otras características geológicas como inclusiones, tipo de roca, discontinuidades, el grado de resistencia mecánica y la intensidad de la energía mecánica originada por el cantero. Estos resultados muestran que el proceso de formación de fractura en adoquines de (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)ja huellas distintivas que permiten inferir procesos de laboreo y labrado o esculpido en piedra.

Bibliografía/Referencias

- Ameen, M. S. (1995). Factography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis. En *Factography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis*. (págs. 1-10). London: Special Publications.
- Arango-Londoño. (2006). Adoquines de concreto: Propiedades físico-mecánicas y sus correlaciones. *Revista Tecnológicas No.6*, 121-137.
- Atkinson, B. K. (1987). *Fracture mechanics of rock*. London: Academic Press Geology Series.
- Bahamontes, R.,; Vargas-Tejeda, S., Echaverguren, T. (2013). Análisis de métodos de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón. *Revista de la Construcción* , 17-26.
- Bahat, D & Rabinovitch, A. (1988). Paleostress determination in a rock by a fractographic method. *Journal of Structural Geology*, 193-199.
- Bahat, D., Grossenbacher, K., Karasaki, K. (1999). Mechanism of exfoliation joint formation in granitic rocks. *Journal of Structural Geology*, 85-96.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Hodgson, R. A. (1961). Classification of structures on joint surfaces. *American Journal of Science*, 493-502.

- Kulander, B. R. & Dean, S. L. (1995). Observations on fractography with laboratory experiments for geologists. En M. Ameen, *Fractography: fracture topography as a tool in fracture mechanics and stress analysis* (págs. 59-82). London : Special Publications Geological Society of London .
- Kulander, B. R., Barton, C. C., Dean, S. L. (1979). *The application of fractography to core and outcrop fracture investigations*. Morgantown: United States Department of Energy.
- Kulander, B. R., Barton, C.C., Dean, S.L. (s.f.). The application of fractography to core and outcrop fracture investigations. Virginia, USA.
- Kulander, B.R., and Dean, S. L. (1985). Hackle plume geometry and joint propagation dynamics, in International Symposium on Fundamentals of Rock Joints.
- Lutton, R. J. (1969). Systematic mapping of fracture morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 2061-2066.
- Mecholsky, J.J.; Rice, R. W. & Freiman, S. W. (1974). Prediction of fracture energy and flaw size in glasses from measurements of mirror size. *J. Am. Ceram. Soc.*, 440-443.
- Müller, G. & Dahm, T. (2000). Fracture morphology of tensile cracks and rupture velocity. *Journal of Geophysical Research*, 723-738.
- Parker, J.M. (1942). Regional systematic jointing in slightly deformed sedimentary rocks. *Bulletin of the Geological Society of America*, 381-408.
- Parker, J. M. (1942). Regional systematic jointing in slightly deformed sedimentary rocks. En *Geological Society of America*, 53 (págs. 381-408).
- Payne, B. W. & Ball, A. (1976). The determination of crack velocities in anisotropic materials by the analysis of Wallner lines. *Philosophical Magazine*, 917-922.
- Ramírez Garzón, S. (2009). Caracterización mediante un análisis fractográfico de diferentes modos de fallas en ejes. 35-38. Bogotá.
- Rincón, J.M., Callejas, P., Capel, F. (1989). Fractografía de vidrios y materiales cerámicos. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 257-267.
- Roberts, J.C. (1961). Featherstone-fracture and the mechanics of rock jointing. *American Journal of Science*, 481-492.
- Tosca-Gómez, V., Puy-Alquiza, M.J. (2016). Inventario de Canteras en el Distrito Minero de Guanajuato. *Jóvenes en la Ciencia, Revista de Divulgación Científica*.
- Trueba-Olivares, E. (1985). *Guanajuato en los caminos de Tierra adentro*. Guanajuato: Gobierno del Estado de Guanajuato.
- Varas-Ramírez, J.B. y Areche-García, J.N., (2021). Comportamiento mecánico del adoquín de hormigón adicionado residuos orgánicos del maíz. *Revista Científica Dominio de las Ciencias*, 148-168.
- Woodworth, J. B. (1896). *On the fracture system of joints, with remarks on certain great fractures*. Proceedings of the Boston Society of Natural History.
- Zapffe, C. A. y Clogg, M. (1944). Fractography: a new tool for metallurgical research. *American Society of Metals*.