



Revista Arbitrada Venezolana
del Núcleo Costa Oriental del Lago



mpacto *Científico*

Universidad del Zulia

Diciembre 2024
Vol. 19 N° 2

ppi 201502ZU4641
Esta publicación científica en formato digital
es continuidad de la revista impresa
Depósito Legal: pp 200602ZU2811 / ISSN:1856-5042
ISSN Electrónico: 2542-3207

 **Impacto Científico**

**Revista Arbitrada Venezolana
del Núcleo LUZ-Costa Oriental del Lago**

Vol. 19, N°2. Diciembre 2024. pp. 402-411

DOI: 10.5281/zenodo.14317668

Efecto de las estilolitas en la resistencia mecánica de las calizas, en la compactación y permeabilidad de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados

Ninfa María Castillo

Universidad del Zulia. Escuela de petróleo. Maracaibo, Venezuela

 <https://www.orcid.org/0009-0002-0808-829X>
ncastillo@fing.luz.edu.ve

Resumen

Los yacimientos naturalmente fracturados en rocas calizas presentan estilolitas que, junto con diaclasas, impactan la calidad del yacimiento debido a su efecto sobre la porosidad y la red de fracturas. Las estilolitas, a menudo acompañadas de cementos reprecipitados, pueden actuar como barreras que limitan el flujo de fluidos, reduciendo la permeabilidad efectiva del sistema poroso. En este estudio se analiza el efecto de las estilolitas en la resistencia mecánica, compactación y permeabilidad de los yacimientos carbonatados naturalmente fracturados. Para ello, se emplea una clasificación detallada de las morfologías de las estilolitas y su asociación con la compactación y la permeabilidad. Asimismo, se evalúan métodos específicos para estimar la resistencia de las estilolitas y su contribución a la calidad del yacimiento. Este análisis proporciona información crítica sobre la influencia de las estilolitas en la eficiencia de producción en calizas fracturadas.

Palabras clave: calizas; estilolitas; permeabilidad; yacimientos naturalmente fracturados.

Effect of stylolites on the mechanical strength of limestones in the compaction and permeability of naturally fractured carbonate reservoirs

Abstract

Naturally fractured reservoirs in limestone formations are influenced by stylolites and joints, which can affect reservoir quality by modifying the porous network and fracture systems. Stylolites, often combined with reprecipitated cements, may act as barriers that limit fluid flow, thus reducing effective permeability. This research evaluates the impact of stylolites on the mechanical strength, compaction, and permeability of naturally fractured carbonate reservoirs. An advanced classification of stylolite morphologies and their relationship with compaction and permeability variations is presented. Additionally, methods to assess stylolite strength and its impact on reservoir quality are analyzed. This study provides valuable insights into the role of stylolites in production efficiency for fractured limestone reservoirs.

Keywords: limestone, stylolites, permeability, naturally fractured reservoirs.

Introducción

El estudio de los yacimientos naturalmente fracturados plantea grandes desafíos debido a la complejidad en los intercambios de fluidos entre la matriz rocosa y las fracturas, característicos de su sistema de doble porosidad. Este sistema, frecuente en formaciones carbonatadas, presenta vacuolas y orificios de disolución que contribuyen a una porosidad vacular adicional, complicando la caracterización y el pronóstico de producción y declinación de presión.

Los yacimientos de carbonatos naturalmente fracturados se distinguen por sistemas de fracturas de alta permeabilidad que interactúan con la matriz, afectando la permeabilidad, porosidad y el flujo de fluidos. Esto exige una caracterización precisa para optimizar la recuperación de hidrocarburos. Como señala Aguilera (1993), las fracturas pueden actuar tanto como conductos como barreras para el movimiento de fluidos. Aharonov y Katsman (2009) complementan esta visión al abordar las estilolitas en carbonatos, identificándolas como posibles conductos o barreras de flujo, afectando la porosidad y la permeabilidad e introduciendo anisotropías que influyen en el comportamiento del yacimiento. Por lo tanto, es fundamental evaluar si las estilolitas actúan como vías de drenaje o como barreras de compartimentación.

En este estudio, se examinan las estilolitas sedimentarias y su influencia en la resistencia mecánica, compactación y permeabilidad en calizas fracturadas. La investigación reciente indica que las estilolitas en calizas pueden no alterar significativamente la permeabilidad cuando están perpendiculares al flujo; sin embargo, cuando están paralelas, pueden comportarse como conductos de fluidos. Además, se han utilizado para inferir paleo-esfuerzos, vinculando sus formas con tensiones in situ. Aunque las estilolitas tienden a debilitar las rocas y a introducir anisotropías geomecánicas, existe una falta de estudios que cuantifiquen este impacto de manera sistemática en la resistencia de la roca. Observaciones en campo sugieren que las estilolitas pueden reducir considerablemente la resistencia de las rocas, aunque la cuantificación precisa de este efecto sigue siendo limitada.

Materiales y métodos

Las muestras estudiadas son calizas aloquímicas (oolíticas) que contienen capas de arcilla y presentan estilolitas en la mayoría de los núcleos recuperados (Rolland *et al.*, 2014). Las calizas se clasificaron en unidades O1 a O6, siguiendo a André (2003), e incluyen grainstones, wackestones y packstones con diversas características texturales y geológicas (ver Tabla 1 para porosidad media). Estas rocas, con porosidad entre 0.06 y 0.21, muestran que la porosidad disminuye con la profundidad. Las muestras con estilolitas son más porosas que la roca sin estilolitas, con una diferencia de 0.01 a 0.03 en porosidad.

Tabla 1: Descripción petrofísica de los carbonatos investigados en este estudio

Código de la muestra de roca	Profundidad (m)	Promedio de porosidad (%)	Litología
O1 (ESTo6683)	159	16.8	packstone y wackestone
O2 (ESTo7755)	228	19.8	grainstone y packstone
O3 (ESTo6705)	174	15.1	grainstone
O4 (ESTo6770)	214	7.1	grainstone
O5 (ESTo6950)	316	14.4	grainstone
O6 (ESTo7042)	364	6.9	grainstone

Fuente: Rolland *et al.*, (2014).

Pruebas mecánicas y caracterización

Las estilolitas presentaron variaciones en su morfología, desde dientes de 1 mm aproximadamente (Figura 1a), hasta más de 1 cm en algunos casos (Figura 1b), (Rolland *et al.*, 2014). De las 48 pruebas uniaxiales, 32 corresponden a muestras con estilolitas. Las muestras fueron sometidas a deformación uniaxial hasta el fallamiento a una tasa de 10^{-5} / s. Aunque la falla fue inestable en la mayoría de los casos, algunas muestras permitieron el análisis petrografía al detenerse antes del fallamiento. Este enfoque ayuda a entender cómo las estilolitas influyen en la resistencia y permeabilidad de las rocas.

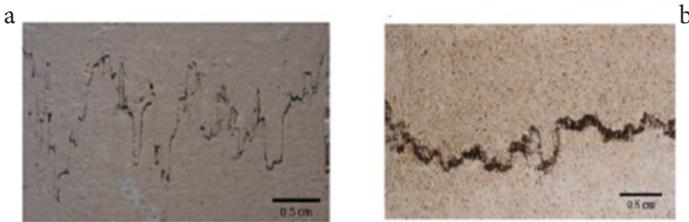


Figura 1. Estilolitas abiertas en los núcleos analizados (Rolland *et al.* 2014).

Datos geomecánicos

La resistencia a la compresión uniaxial (UCS) en condiciones secas osciló entre 48 y 150 MPa, y entre 30 y 90 MPa en condiciones húmedas. Las muestras sin estilolitas no mostraron anisotropía, y la UCS y anisotropía fueron similares en muestras con y sin estilolitas, sin un impacto significativo de las estilolitas en las propiedades mecánicas. Se observaron las siguientes características en las muestras con estilolitas:

- Las curvas tensión-deformación de muestras con y sin estilolitas fueron similares, con una fase elástica seguida de un pico y ablandamiento.
- Las estilolitas paralelas a la tensión aplicada mostraron fallas más inestables.
- El módulo tangente fue generalmente menor en muestras con estilolitas en comparación con muestras sin estilolitas.

Modelado estocástico

Debido a la heterogeneidad de las muestras, se empleó el software de elementos finitos RFPA2D (Tang, 1997) para modelar la falla en las calizas con estilolitas,

asumiendo que la resistencia local de cada elemento refleja la presencia de microporos. La heterogeneidad del material se simuló asignando módulos de Young de acuerdo con una distribución de probabilidad.

Procedimiento de modelado

- 1. Configuración inicial:** Se ajustaron parámetros para igualar las propiedades de las muestras sin estilolitas en la capa O3 y observar la evolución del daño.
- 2. Creación de muestras con estilolitas:** Se modelaron geometrías donde las estilolitas tenían 5 mm de grosor, y se ajustaron las propiedades para obtener resultados consistentes con los datos experimentales de la capa O3. Las simulaciones mostraron que la resistencia de la zona de estilolita podía ser hasta un 10% menor.

Resultados del modelado: Se observó que el daño en las simulaciones, tanto con estilolitas perpendiculares como paralelas a la tensión, fue consistente con las muestras sin estilolitas. Sin embargo, el modelo predijo una anisotropía no observada en las pruebas experimentales, y la falla en orientaciones oblicuas se concentró en la zona de estilolita, con poco daño en el resto de la muestra. Simulaciones adicionales con una zona de estilolita más heterogénea arrojaron resultados más coherentes con los datos experimentales.

Resultados y discusión

Control microestructural y resistencia mecánica de la roca caliza

Los ensayos realizados sobre las calizas indican un debilitamiento notable en presencia de agua, con una reducción promedio del 34% en la resistencia a la compresión uniaxial (UCS) respecto a las muestras secas. Estos resultados concuerdan con Brantut *et al.* (2014), quienes señalaron que la deformación dependiente del tiempo, debido al microcraqueo causado por corrosión bajo tensión, es especialmente relevante en calizas expuestas al agua a bajas tasas de deformación.

El análisis muestra que las estilolitas actúan como planos de debilidad dentro de la roca debido a su alta porosidad y heterogeneidad. La rugosidad de las estilolitas es un factor que afecta considerablemente el desarrollo del daño, generando variabilidad en la resistencia medida en las pruebas de UCS. Las simulaciones numéricas sugieren que esta rugosidad puede actuar como un concentrador de esfuerzos, lo cual concuerda con

las observaciones experimentales. Estas variaciones en rugosidad podrían explicar las diferencias en resistencia observadas entre muestras de distintas secciones del núcleo.

Planos de debilidad en formaciones carbonatadas

Los resultados indican que el grosor de las estilolitas influye en su efecto sobre la resistencia de la roca. Las estilolitas delgadas, donde la rugosidad es más pronunciada, tienden a comportarse como concentradores de esfuerzo, propiciando la formación de microgrietas sin introducir anisotropía mecánica. Por otro lado, las estilolitas más gruesas suelen comportarse como planos de debilidad evidentes, con resistencia reducida cuando son cargadas en un ángulo respecto a su plano.

Efecto de las estilolitas en la compactación

Para estimar la compactación de las calizas, se emplearon dos métodos. La aproximación conservadora, basada en la suma de las amplitudes máximas de los dientes de todas las estilolitas, indica que la compactación atribuible a las estilolitas representa entre 3.0 y 5.6% del núcleo. Sin embargo, un método de cálculo alternativo muestra que las estilolitas podrían contribuir hasta un 25-39% a la compactación total. Este resultado sugiere que las estilolitas desempeñan un papel importante en la reestructuración de la porosidad y compacidad de la roca, y su influencia depende de las características texturales y de grosor de cada estilolita.

Influencia de las estilolitas en el flujo de fluidos

La microestructura de las estilolitas parece influir en el comportamiento de flujo de fluidos en las calizas. Los agujeros de disolución en los dientes de las estilolitas indican la acción de fluidos lixiviantes que disuelven la roca localmente. Estos agujeros parecen ser puntos de acumulación, funcionando como barreras locales que permiten el flujo vertical en otras zonas. Adicionalmente, las venas observadas en los flancos de los dientes de las estilolitas sugieren que estos flancos podrían ser rutas de flujo, posiblemente sirviendo como sitios de dilatación que facilitan la migración de fluidos a través de la matriz carbonatada.

Conclusiones

Se establece que las estilolitas tienen un espesor crítico de 5 mm, a partir del cual intensifican el debilitamiento de la roca. Las variaciones en las estructuras de las estilolitas ya sean rectangulares, tipo pinos o de punta aguda, influyen significativamente en su función como barreras de flujo o como drenajes permeables. Estas características impactan en la compactación y productividad del yacimiento. Este estudio reafirma

el papel de las estilolitas en la modulación de las propiedades mecánicas y de flujo de las calizas, actuando como concentradores de esfuerzos y potenciales vías de fluidos según su orientación y características morfológicas. Los resultados obtenidos tienen implicaciones directas en la interpretación de la integridad estructural y el flujo de fluidos en formaciones carbonatadas, contribuyendo así al desarrollo de modelos más precisos para la explotación de yacimientos naturalmente fracturados.

Referencias bibliográficas

- Aguilera, R. (1993). Advances in the Study of Naturally Fractured Reservoir. JCPT, p. 5.
- Aharonov, E., Katsman, R. (2009). Interaction between pressure solution and clays in stylolite development: insights from modeling. *Am. J. Sci.* 309 (7), 607–632.
- Alsharhan, A., Sadd, J.L. (2000). Stylolites in Lower Cretaceous Carbonate Reservoirs. v. 69. Society for Sedimentary Geology Special Publication, U.A.E, pp. 185–207.
- André, G. (2003). Characterization of Meso-Cenozoic Deformations and Fluid Circulations in the Eastern Paris Basin. Thesis. Univ. Henri Poincaré, Nancy, France.
- Bathurst R.G.C. (1971). Carbonate sediments and their diagenesis. Amsterdam/London/New York: Elsevier.
- Brantut, N., Heap, M.J., Baud, P., Meredith, P.G. (2014). Mechanisms of time-dependent deformation in porous limestone. *J. Geophysics. Res.* 119(7), 5444-5463.
- Carozzi, A.V., Vonbergen, D. (1987). Stylolitic porosity in carbonates - a critical factor for deep hydrocarbon production. *J. Pet. Geol.* 10 (3), 267–282.
- Cilona, A., Baud, P., Tondi, E., Agosta, F., Vinciguerra, S., Rustichelli, A., Spiers, C.J. (2012). Deformation bands in porous carbonate grainstones: field and laboratory observations. *J. Struct. Geol.* 45, 137-157.
- Dawson, W.C. (1988). Stylolite Porosity in Carbonate Reservoirs: American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery Article, American Association of Petroleum Geologists Annual Convention, Houston, Texas, 20–23 March 1988 (Article #91030).
- Donath, F.A. (1964). Strength variation and deformational behavior in anisotropic rock, in *State of Stress in the Earth's Crust.* edited by W. R Judd, pp. 281-297, New York: American Elsevier.

- Dunnington, H.V. (1954). Stylolite development post-dates rock induration. *J. Sediment Petrol.* 24 (1), 27–49.
- Dunnington, H.V. (1967). Aspects of Diagenesis and Shape Change in Stylolitic Limestone Reservoirs: 7th World Petroleum Congress, 2–9 April 1967, Mexico City, Mexico. 2 pp. 339–352 12129.
- Ebner, M., Piazzolo, S., Renard, F., Koehn, D. (2010). Stylolite interfaces and surrounding matrix material: Nature and role of heterogeneities in roughness and microstructural development. *J. Struct. Geol.* 32(8), 1070-1084.
- Finkel, E.A., Wilkinson, B.H. (1990). Stylolitization as source of cement in Mississippian Salem Limestone, West-Central Indiana. *AAPG Bull. -Am. Assoc. Pet. Geol.* 74 (2), 174–186.
- Gatelier, N., Pellet, F., Loret, B. (2002). Mechanical damage of an anisotropic porous rock in cyclic triaxial tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39, 335-354.
- Heap, M.J., Baud, P., Reuschlé, T., Meredith, P.G. (2014a). Stylolites in limestones: barriers to fluid flow? *Geology* 42 (1), 51–54.
- Koehn, D., Renard, F., Toussaint, R., Passchier, C.W. (2007). Growth of stylolite teeth patterns depending on normal stress and finite compaction. *Earth Planet. Sci. Lett.* 257 (3–4), 582–595.
- Koehn, D., Ebner, M., Renard, F., Toussaint, R., Passchier, C.W. (2012). Modelling of stylolite geometries and stress scaling. *Earth Planet. Sci. Lett.* 341, 104–113.
- Koepnick, R.B. (1987). Distribution and permeability of stylolite-bearing horizons within a Lower Cretaceous carbonate reservoir in the Middle East. *Soc. Pet. Eng. Form. Eval.*: 2 <http://dx.doi.org/10.2118/14173-PA>.
- Larbi, J.A. (2003). Effect of stylolites on the durability of building stones: two cases studies. *HERON*, 48 (3).
- Lind, I., Nykjaer, O., Priisholm, S., Springer, N. (1994). Permeability of stylolite-bearing chalk. *J. Pet. Technol.* 46:986–993. <http://dx.doi.org/10.2118/26019-PA>.
- Merino, E. (1992). Self-organization in stylolites. *Am. Sci.* 80, 466.
- Nelson, R.A. (1981). Significance of fracture sets associated with stylolite zones. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 65, 2417–2425.
- Park, W.C., Schot, E.H. (1968). Stylolites: their nature and origin. *J. Sediment. Petrol.* 38 (1), 175–191.
- Pollard, D.D., Aydin, A.A. (1988). Progress in understanding jointing over the past century: *Geological Society of America Bulletin* 100, 1181-1204.
- Rolland, A., Toussaint, R., Baud, P., Conil, N., Landrein, P. (2014). Morphological analysis of Sedimentary stylolites for paleostress estimation in limestones

surrounding. The Andra Underground Research Laboratory site. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 67, 212-225.

Rustichelli, A., Tondi, E., Korneva, I., Baud, P., Vinciguerra, S., Agosta, F., Reuschlé, T., Janiseck, J.M. (2015). Bedding parallel stylolites in shallow-water limestone successions of the Apulian Carbonate Platform (central-southern Italy). *Italian J. Geosc.* 134 (3), 513-534.

Railsback, L.B. (1993). Lithologic controls on morphology of pressure-dissolution surfaces (stylolites and dissolution seams) in Paleozoic carbonate rocks from the mid-eastern United-States. *J. Sediment. Res.* 63 (3), 513-522.

Raynaud, S., Carrio-Schaffhauser, E. (1992). Rock matrix structures in a zone influenced by a stylolite. *J. Struct. Geol.* 14 (8-9), 973-980.

Renard, F., Schmittbuhl, J., Gratier, J.-P., Meakin, P., Merino, E. (2004). Three-dimensional roughness of stylolites in limestones. *J. Geophysics. Res. Solid Earth* 109. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JB002555>.

Rispoli, R. (1981). Stress-fields about strike-slip faults inferred from stylolites and tension gashes. *Tectonophysics* 75, 29-36.

Rolland, A., Toussaint, R., Baud, P., Schmittbuhl, J., Conil, N., Koehn, D., Renard, F., Gratier, J.P. (2012). Modeling the growth of stylolites in sedimentary rocks. *J. Geophysics. Res. Solid Earth* 117 (6), B06403.

Schmittbuhl, J., Renard, F., Gratier, J.P., Toussaint, R. (2004). Roughness of stylolites: Implications of 3D high resolution topography measurements. *Phys. Rev. Lett.* 93 (23), 238501, doi:10.1103/PhysRevLett.93.238501.

Stearns, D. W, and Friedman, M. (1972). Reservoirs in Fractured rock in stratigraphic oil and gas fields classification, exploration methods and case histories. *Am. Assoc. Petrol. Geologist. Men* 16, p 82-106

Stockdale, P.B. (1943). Stylolites: primary or secondary? *J. Sediment. Petrol.* 13, 3-12.

Tang, C. (1997). Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34, 249-261.

Vajdova, V., Zhu, W., Chen T.-M.N., Wong, T.-f. (2010). Micromechanics of brittle faulting and cataclástico flow in Tavel limestone. *J. Struct. Geol.* 32, 1158-1169.

Vásquez H., Andrés R. (2001). Introducción a la geomecánica petrolera. Quinta edición. V.V.A. Consultores, C.A. Caracas, Venezuela

Wong, T.-f., Wong, R.H.C., Chau, K.T., Tang, C.A (2006). Microcrack statistics, Weibull distribution and micromechanical modeling of compressive failure in rock. *Mech. Mat.* 38, 664-681.

Xu, T., Tang, C.-a., Zhao, J., Li, L., Heap, M.J. (2012). Modelling the time-dependent rheological behavior of heterogeneous rocks. *Geophysics. J. Int.* 189, 1781-1796.

Young, R.B. (1945). Stylolites Solution in Witwatersrand quartzites. *Geol. Soc. S. Afr. Trans.* 47, 137-142.

Zhou, X., Aydin, A., (2010). Mechanics of pressure solution seam growth and evolution. *J. Geophysics. Res.-Solid Earth* 115, 18.