

# Aplicación de la Tomografía Óptica Coherente en la Caracterización de Rocas Porosas

## Application of Optical Coherence Tomography in the Characterization of Porous Rocks

Presentación: 8-9/10/2024

Doctorando:

**Pablo Manuel TABLA**

Grupo de Fotónica Aplicada - Facultad Regional Delta - Universidad Tecnológica Nacional (GFA-FRD-UTN)  
Argentina

Director:

**Jorge Román TORGA**

Codirector:

**Eneas Nicolas MOREL**

### Resumen

Este trabajo se centra en la aplicación de la tomografía óptica coherente (OCT) para la caracterización de láminas delgadas de roca, en particular, cortes de roca patrón Bentheimer. La técnica interferométrica OCT se utilizó para obtener imágenes tridimensionales del interior de las muestras, permitiendo observar estructuras internas como capas, fisuras y poros con alta precisión. Se evaluaron dos casos principales: el primero se enfocó en la variación de la resolución de la técnica al modificar la configuración del cabezal óptico y el paso entre puntos durante los barridos; el segundo caso demostró la capacidad de OCT para penetrar en la roca y visualizar fisuras internas. Los resultados indican que OCT es una herramienta valiosa para la caracterización de materiales porosos, ofreciendo ventajas significativas sobre las técnicas convencionales en términos de resolución, volumen de muestra analizado y capacidad para obtener imágenes en tiempo real. Esta técnica tiene un gran potencial para mejorar la comprensión de las propiedades de las rocas, especialmente en aplicaciones relacionadas con la industria energética.

Palabras clave: Tomografía, materiales porosos, rocas, Bentheimer, microscopía óptica

### Abstract

This work focuses on the application of Optical Coherence Tomography (OCT) for the characterization of thin rock sections, specifically Bentheimer rock standard cuts. The interferometric OCT technique was used to obtain three-dimensional images of the interior of the samples, allowing for the observation of internal structures such as layers, fissures, and pores with high precision. Two main cases were evaluated: the first focused on the variation of the technique's resolution by modifying the configuration of the optical head and the step size between points during scans; the second case demonstrated OCT's ability to penetrate the rock and visualize internal fissures. The results indicate that OCT is a valuable tool for the characterization of porous materials, offering significant advantages over conventional techniques in terms of resolution, analyzed sample volume, and real-time imaging capability. This technique has great potential to enhance the understanding of rock properties, particularly in applications related to the energy industry.

Keywords: Tomography, porous materials, rocks, Bentheimer, optical microscopy

## Introducción

La caracterización detallada de topografías superficiales y la tomografía de materiales porosos son elementos fundamentales en distintas etapas en la producción de energía, particularmente en la industria del petróleo y del gas. El análisis de rocas extraídas de reservorios hidrocarburiíferos, donde el tamaño de los poros varía entre 100 micrones y menos de 10 nanómetros, es crucial para comprender la calidad y productividad de estos reservorios.

Diversas instituciones líderes en el sector energético han establecido laboratorios especializados para avanzar en la caracterización de materiales porosos. Destacan el Área de Caracterización de Materiales en YTEC (YPF), el área de ensayos de materiales de TECHINT, el Laboratorio de Caracterización Tecnológica de la Universidad de San Pablo con Petrobras, y el área de investigación en materiales de Pan American Energy junto con CONICET. Estos centros emplean técnicas convencionales como microscopía óptica, microscopía electrónica (SEM, TEM/STEM, SEM-EDS) y diversas técnicas de rayos X (XPS, XRF, mCT). Estas metodologías proporcionan imágenes detalladas de la microestructura, composición química y estructura cristalina de los materiales, permitiendo la identificación de minerales y la evaluación de la pureza y porosidad de las rocas (Goldstein 2017).

No obstante, las técnicas convencionales presentan limitaciones significativas, como el alto costo de los equipos (generalmente superior a 200,000 USD), la necesidad de condiciones ambientales controladas y el reducido volumen de muestra que pueden analizar (menos de 1 mm<sup>3</sup>). Para superar algunas de estas limitaciones, el Centro de Ensayos Estructurales (CENES) de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional propone la aplicación de la tomografía óptica coherente (OCT) (Fujimoto 2008). Esta técnica innovadora, con un costo significativamente menor (menos de 50,000 USD), permite analizar volúmenes de hasta 1 cm<sup>3</sup> y proporciona imágenes 3D del interior de las muestras en tiempo real y "in situ" (Campello 2014).

El Primer Workshop de Tomografía de Materiales de Argentina (Y-TEC 2023), subrayó la creciente demanda de técnicas avanzadas para la caracterización de materiales. Los participantes destacaron la necesidad de métodos que superen las limitaciones de las técnicas tradicionales, abriendo la puerta a nuevas investigaciones y aplicaciones. Este contexto justifica la exploración y evaluación de la OCT como una alternativa prometedora. El objetivo del trabajo es evaluar la capacidad de OCT para obtener imágenes 3D de alta resolución en muestras de roca, analizando aspectos como el contraste entre distintos materiales y resina o aire y extender la resolución espacial hasta el micrón.

## Descripción general de la técnica aplicada a láminas de roca

La tomografía óptica coherente (OCT) permite obtener imágenes mediante un barrido con una fuente de luz enfocada sobre una muestra de roca en cortes delgados, Campello (2014). En cada punto de la superficie (plano x-y) donde se enfoca el láser, se mide la diferencia de camino óptico (OPD), que se define como el producto de la distancia recorrida por el haz de luz dentro de la muestra y el índice de refracción del material atravesado. La OPD se mide desde la superficie del corte de roca (superficie de referencia) hasta los distintos puntos del interior de la muestra a lo largo de un eje perpendicular (eje z) al plano de la superficie (plano x-y).

Las muestras analizadas son cortes delgados de roca impregnada con resina, cada uno con sus respectivos índices de refracción:  $n_c$  para la roca y  $n_r$  para la resina. La lámina de roca, con un espesor aproximado de entre 20 y 30  $\mu\text{m}$ , se encuentra entre un portaobjetos y un cubreobjetos. Al penetrar el haz de luz en la muestra, la OPD varía en función de las distancias recorridas dentro de la roca, que están relacionadas con las variaciones en el índice de refracción en las interfaces internas. Además de las reflexiones específicas causadas por cambios en el índice de refracción o el material, la técnica detecta variaciones en el brillo o la intensidad de la señal reflejada, que corresponden a regiones con diferentes niveles de reflectividad: la roca presenta zonas de baja reflectividad, mientras que la resina muestra zonas de alta reflectividad.

La figura 1 ilustra este proceso con un esquema que muestra el haz incidente y las variaciones en la señal a medida que este interactúa con las distintas interfaces internas. La señal de interferencia resultante, generada por la superposición de las ondas reflejadas de estas interfaces, permite calcular la OPD y, en consecuencia, la distancia entre las diferentes interfaces internas. Esta información se utiliza para formar una imagen 3D y determinar dimensiones de estructuras internas, espesores de capas, volúmenes de poros o fisuras, dimensiones de canales o gargantas internas, y la profundidad a la que se encuentran medidas desde la superficie de la muestra (Bear 1988).

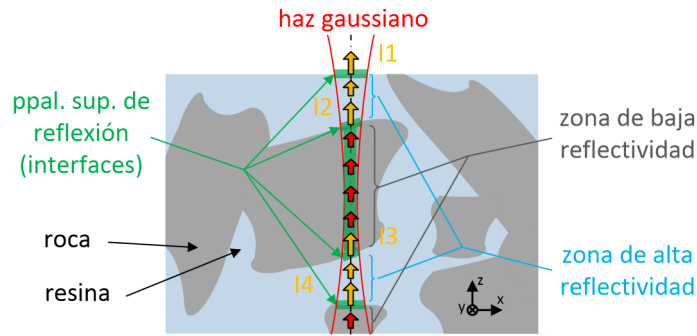


Figura 1: Esquema de la estructura interna de la muestra y las reflexiones del haz láser incidente

## Esquema experimental

Las medidas se realizaron con un interferómetro de baja coherencia que utiliza una fuente de luz centrada en 850 nm y un ancho espectral de 180 nm. La luz se acopla a una fibra óptica monomodo y se dirige a un cabezal óptico, que enfoca el haz sobre la muestra. Este cabezal también recoge la luz reflejada, que es dirigida a un espectrómetro. El cabezal óptico se compone de un colimador (“La” en la figura 2a) que recoge la luz a la salida de la fibra y un objetivo de microscopio (“Lb” en la figura 2a) para enfocar el haz sobre la muestra. Se emplearon dos variantes de colimador triplete y dos variantes de objetivo de microscopio.

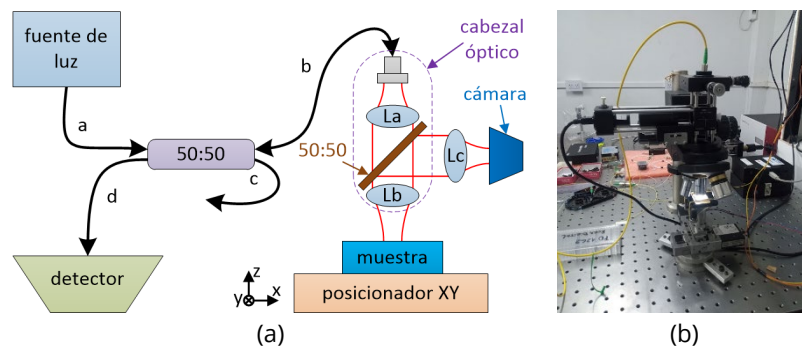


Figura 2: (a) Esquema experimental del sistema de tomografía de coherencia óptica y el microscopio óptico utilizados para las mediciones y (b) fotografía del tomógrafo montado en el laboratorio.

En paralelo al interferómetro, se montó un microscopio óptico para obtener imágenes de la zona de interés en la muestra antes de utilizar el tomógrafo. Esto permitió optimizar el proceso de enfoque y ajustar los límites en el área de barrido. El microscopio se montó utilizando un objetivo de microscopio (Lb) combinado con el divisor de haz 50:50, una lente (Lc) y una cámara digital, como se indica en la figura 2a. La figura 2b muestra una fotografía del montaje final utilizado para las mediciones.

## Resultados - Imágenes de tomografía en láminas delgadas de roca

Las imágenes se obtuvieron mediante un barrido punto a punto sobre un área predeterminada, con una distancia específica entre cada punto. Estos barridos se realizaron con dos posicionadores XY motorizados, como se muestra en la figura 2a. La secuencia de imágenes presentada corresponde a cortes de roca tipo Bentheimer, una arenisca conocida por su alta porosidad y permeabilidad, con un contenido predominante de cuarzo y una textura homogénea que la convierte en un material de referencia ideal para estudios de caracterización de rocas. Los cortes de Bentheimer, junto con la resina, se colocaron entre un portaobjetos y un cubreobjetos, con espesores que varían entre 20 y 30 micrones.

Se presentan los resultados en dos casos. En el primero, se muestra cómo varía la resolución de la técnica al ajustar la configuración del cabezal óptico y el paso entre puntos. En el segundo, se demuestra la capacidad de la técnica para penetrar la roca y visualizar el efecto de una fisura interna.

Caso 1: Se muestran imágenes obtenidas en una misma zona de la muestra con diferentes configuraciones del cabezal óptico y pasos en el área de barrido, para mostrar la diferencia en la resolución lateral del sistema según la configuración utilizada.

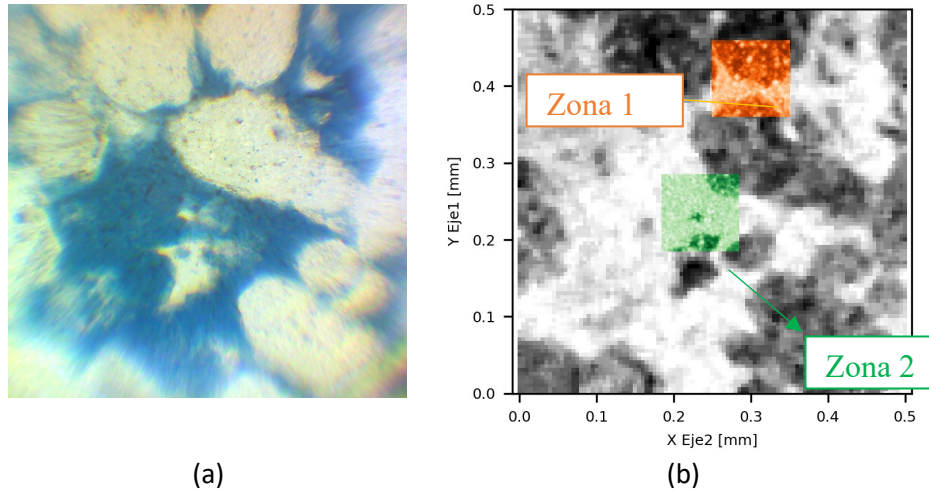


Figura 3: Muestra Roca BENTHEIMER. (a) Fotografía general de la muestra. (b) Tomografía óptica. Cabezal: Colimador distancia focal 18mm y objetivo de microscopio distancia focal de 9mm, Barrido: 500x500 um, paso: 5 um, OPD 388  $\mu$ m.

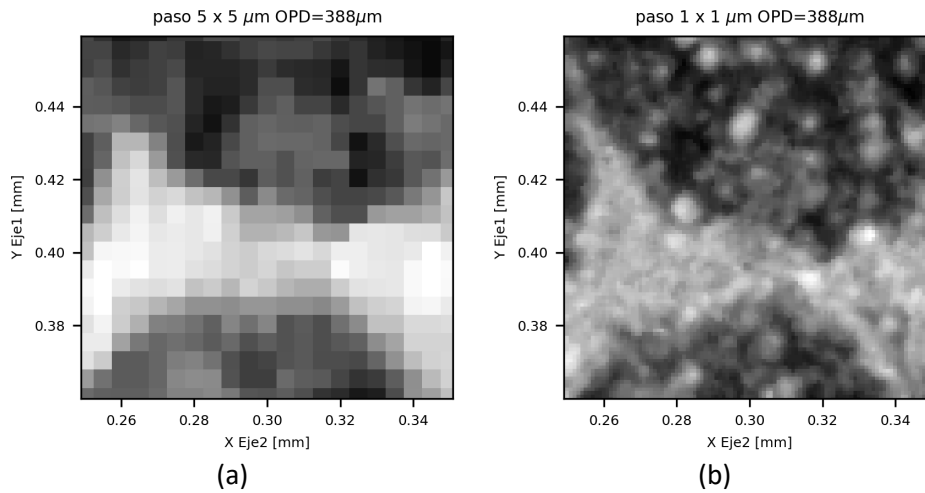


Figura 4: ZONA 1, Tomografía óptica sobre la muestra BENTHEIMER de la zona 1 (en la figura 3) obtenidas con un barrido de 100x100 um a una profundidad de OPD=388 um, en dos configuraciones de medida distintas:  
(a) Paso: 5 um, Cabezal: Colimador distancia focal 18mm y objetivo de microscopio distancia foca de 9 mm  
(b) Paso: 1 um, Cabezal: Colimador distancia focal 18mm y objetivo de microscopio distancia foca de 4.5mm

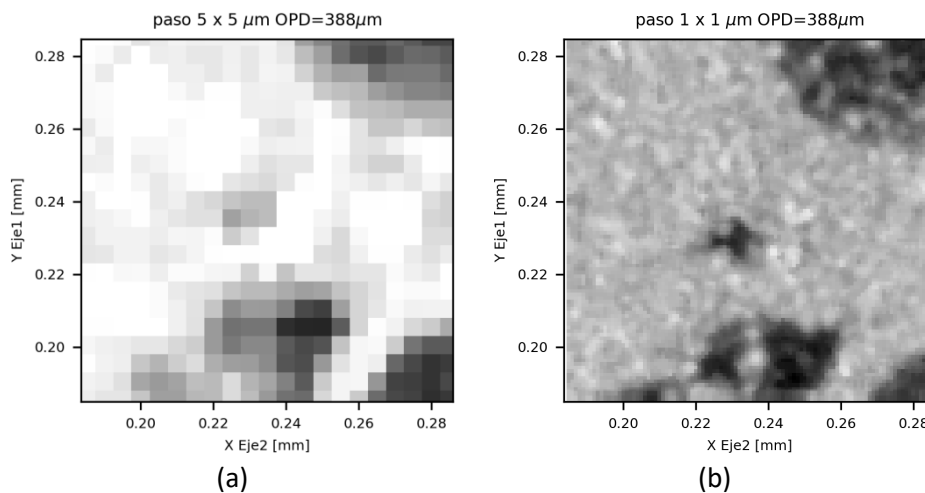


Figura 5: ZONA 2, Tomografía óptica sobre la muestra BENTHEIMER de la zona 1 (en la figura 3) obtenidas con un barrido de 100x100 um a una profundidad de OPD=388 um, en dos configuraciones de medida distintas:  
(a) Paso: 5 um, Cabezal: Colimador distancia focal 18mm y objetivo de microscopio distancia foca de 9 mm  
(b) Paso: 1 um, Cabezal: Colimador distancia focal 18mm y objetivo de microscopio distancia foca de 4.5mm

Caso 2: Se presenta la capacidad de la técnica para adquirir imágenes tomográficas de la roca, con diferentes cortes en profundidad. Se muestra una secuencia de 9 imágenes correspondientes a cortes de la muestra en el mismo plano x-y, obtenidas a distintas profundidades en el eje z. La primera imagen se toma a una profundidad de OPD=390 micrones y las siguientes se obtienen aumentando la profundidad en un valor de 3 micrones donde se puede ver la evolución de la fisura sobre la muestra.

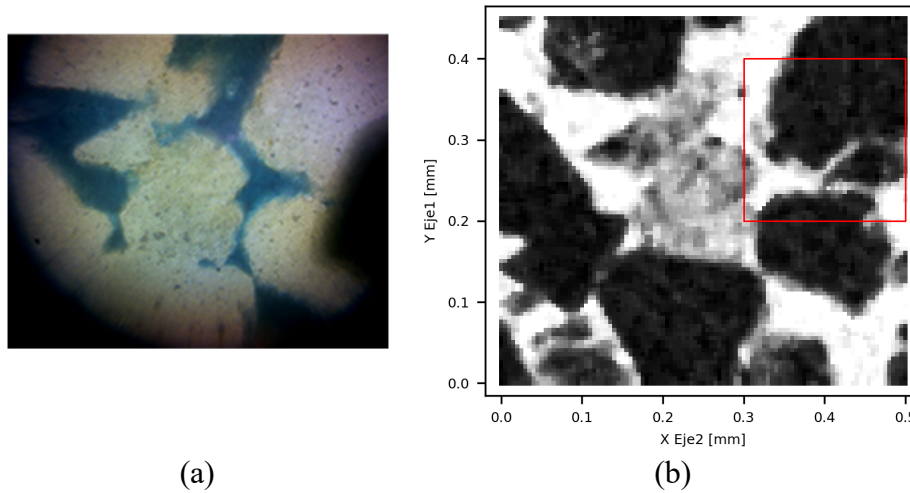


Figura 6: Muestra BENTHEIMER. (a) Fotografía general de la muestra. (b) Tomografía óptica. Cabezal: Colimador distancia focal 6mm y objetivo de microscopio distancia focal de 4.5mm, Barrido: 500x450 um, paso: 5 um,, OPD 400 um.

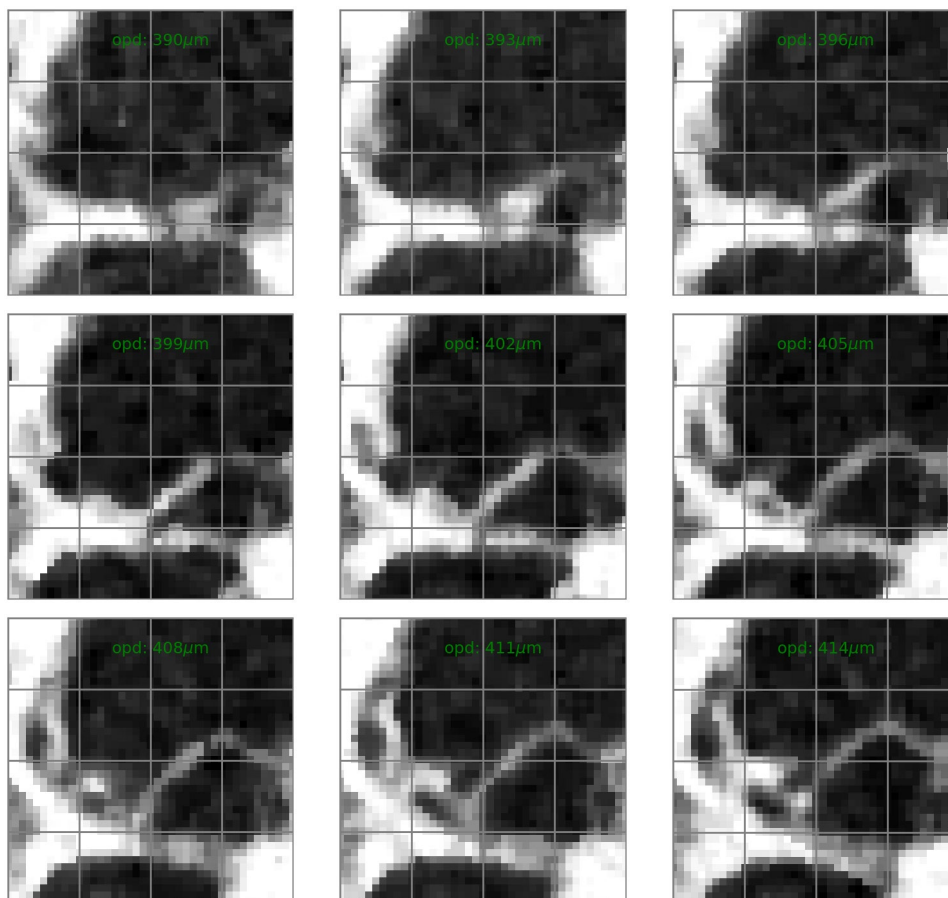


Figura 7: Muestra BENTHEIMER, Tomografía óptica sobre la muestra BENTHEIMER de la zona roja (en la figura 6) Secuencia de imágenes cada 3 um de profundidad óptica (OPD). Cabezal: Colimador distancia focal 6mm y objetivo de microscopio distancia focal de 4.5mm, Barrido: 200x200 um, paso: 5 um.



## Conclusiones

La tomografía óptica coherente (OCT) ha demostrado ser una herramienta eficaz para la caracterización de láminas delgadas de roca, proporcionando imágenes 3D detalladas del interior de las muestras. Los resultados indican que la técnica permite ajustar la resolución mediante la configuración del cabezal óptico y el paso entre puntos, revelando con precisión estructuras internas como capas y fisuras. OCT también es capaz de penetrar la roca y visualizar fisuras internas con claridad, superando las limitaciones de las técnicas convencionales que ofrecen en su mayoría una visión superficial.

La combinación de OCT con otras técnicas de caracterización mejora el análisis de propiedades como la porosidad y la composición mineralógica. En resumen, OCT es una herramienta valiosa para caracterizar materiales porosos, con un gran potencial para mejorar significativamente el análisis y comprensión de las propiedades de las rocas en la industria energética y otras aplicaciones.

## Referencias

Bear, J. (1988). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications.

Campello S.L., W.P. dos Santos, V.F. Machado, C.C.B.O. Mota, A.S.L. Gomes, R.E. de Souza. (2014). Micro-structural information of porous materials by optical coherence tomography, *Microporous and Mesoporous Materials*, Volume 198, ISSN 1387-1811,

Fujimoto, J. G. & Drexler, W., (Eds.). (2008). *Optical Coherence Tomography: Technology and Applications*. Springer.

Goldstein, J., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., ... & Michael, J. R. (2017). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer.

Y-TEC. (2023). *Primer Workshop de Tomografía de Materiales*. [La Plata, Argentina].  
<https://iipg.conicet.gov.ar/primer-workshop-argentino-de-tomografia-de-materiales/>