



Efecto de los esfuerzos sobre la permeabilidad en rocas de carbonato

Manuel Coronado

Instituto Mexicano del Petróleo

Este trabajo es una parte de un proyecto de la
Red de Geomecánica del Fondo Sectorial Conacyt-Sener-Hidrocarburos
Instituto Mexicano del Petróleo-Universidad de Alberta-Pemex Exploración y Producción
(2017-2022)

Colaboradores

*Martín A. Díaz Viera, Pedro F. Aguilar Gastelum, Enrique Serrano Saldaña, Mario E. Ramos García, Vicente Ponce
Quitizaman, Erick E. Luna Rojero, Gonzalo Zambrano Narváez, Rick Chalaturnyk, Mario E. Vadillo Sáenz, Aarón
Domínguez Torres, Rosario Pacheco Serrano y Aarón Sánchez Cruz*

6^{ta} Reunión Anual Capitulo Mexicano de Interpore, RACMI2020
27-28 de febrero 2020,
Museo de Geología del IG-UNAM, Ciudad de México

CONTENIDO

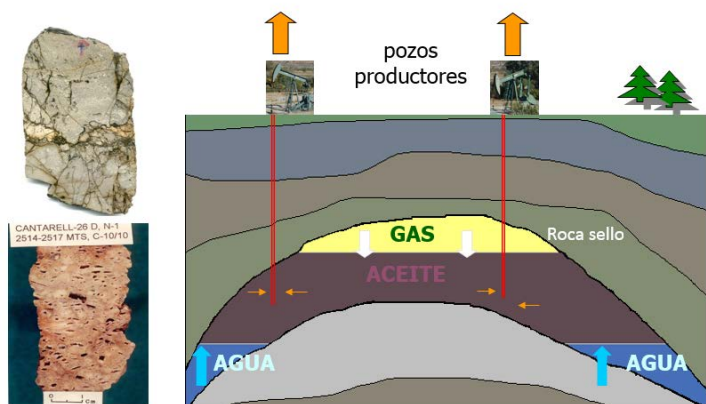
- Motivación del trabajo
- Muestras de roca y su caracterización
- Algunos resultados de pruebas de laboratorio
- Modelado
- Impresión 3D de rocas sintéticas
- Conclusiones

Esta presentación hace una descripción general del trabajo, y hay adicionalmente varias presentaciones en la RACMI 2020 que describen detalles específicos.

Otras presentaciones del proyecto en la RACMI 2020

- *Martín Díaz Viera* -Un modelo poroelástico para la simulación de medios porosos fracturados a escala de laboratorio.
- *Pedro Aguilar-Gastelum*-Simulación numérica de flujo monofásico en medios poroelásticos isótropos a escala de laboratorio.
- *Mario Vadillo Sáenz* -Simulación numérica de pruebas geomecánicas en muestras de roca caliza Bedford.
- *Aarón Sánchez Cruz*-Modelos de Red de Poros a partir de imágenes de microtomografía de muestras de rocas.
- *Rosario Pacheco Serrano*-Modelos geoestadísticos de vórgulos y fracturas a partir de láminas delgadas de muestras de roca de la Brecha K/Pg.
- *Aaron Domínguez Torres*-Evaluación experimental del efecto del cambio de esfuerzos en la permeabilidad absoluta de un medio poroso fracturado (*presentación en cartel*).

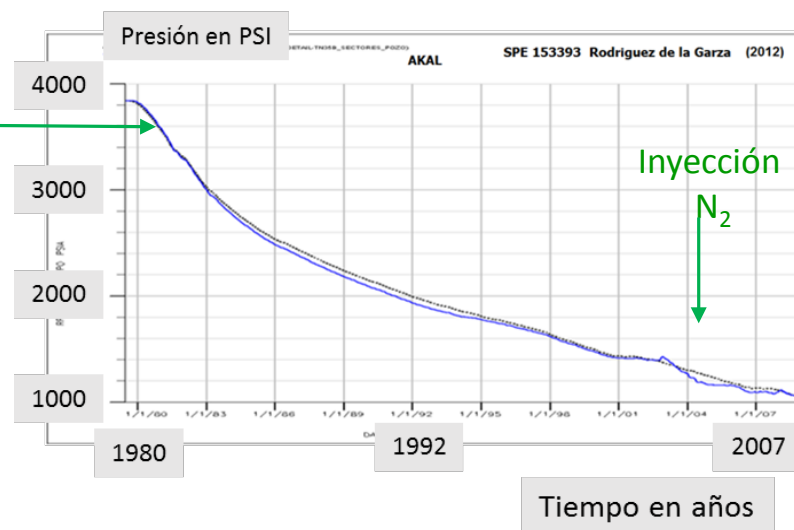
Durante la etapa de producción primaria de hidrocarburos en un yacimiento, la presión de los fluidos en su interior se reduce por la extracción.



Caída de presión de Akal de 3,800 psi en 1980, a 1000 psi en 2007.

Caída de presión en Cantarell

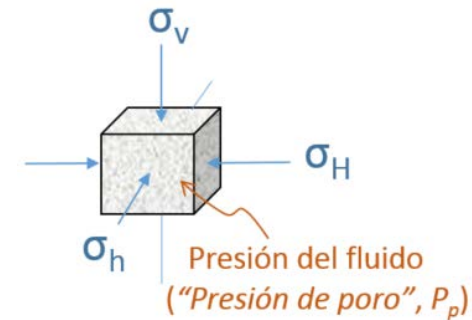
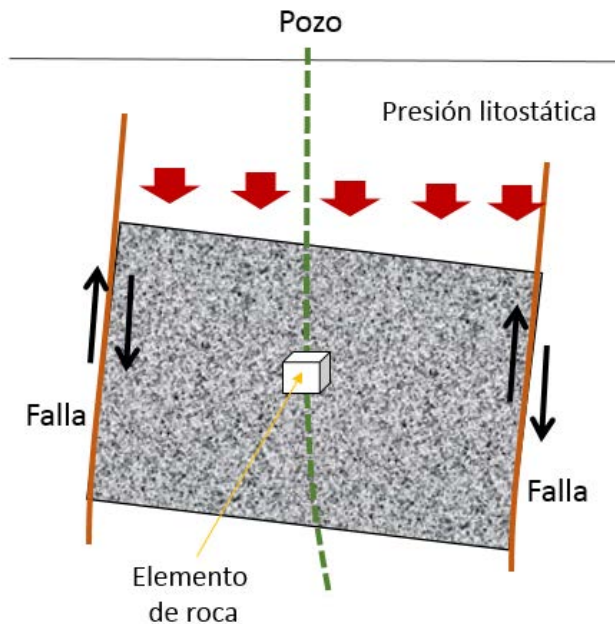
Presión de burbuja



La caída de presión de un yacimiento debida a su explotación modifica el equilibrio de esfuerzos mecánicos en la formación y esto modifica las propiedades asociadas al flujo de fluidos.

Rojas y Torres SPE 28714 (1994); León et al. WPC 2005
Rodríguez de la Garza et al SPE 153393 (2012).

El equilibrio original del *estado de esfuerzos* en la formación se ve modificado por la reducción de la presión del fluido.



En Cantarell (Celis, 2006, SPE 192089):

$$P_p < \sigma_h < \sigma_v < \sigma_H$$

$$P_p \sim \sigma_v/2$$

La modificación de los esfuerzos tiene impacto en la estructura interna del medio poroso, especialmente cuando hay fracturas.

Las fracturas pueden cerrarse, provocando una **disminución en la permeabilidad**, y con ello, reduciendo la capacidad de extracción de los hidrocarburos.

La reducción de la presión del fluido incrementa los gradientes de esfuerzo efectivo en la roca y puede provocar fracturamiento interno, lo cual **incrementa la permeabilidad**.

La extracción de hidrocarburos altera las propiedades petrofísicas asociadas al flujo de fluidos (permeabilidad, porosidad, compresibilidad, permeabilidades relativas, presión capilar), modificando las condiciones originales de explotación.

Estos cambios son considerados sólo parcialmente (a través de la compresibilidad de la roca) en la simulación de yacimientos al diseñar su plan de explotación.

Estudios sólo a escala de laboratorio.

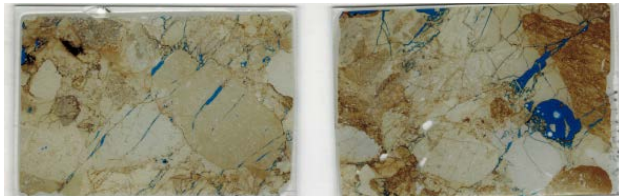
a) Rocas de carbonato en estudio:

- Núcleos de Cantarell
- Caliza Bedford
- Afloramiento

- a) Pruebas geomecánicas para medir el cambio de permeabilidad como función del esfuerzo de confinamiento radial y presión del fluido.
- b) Impresión 3D (a escala) de “rocas” sintéticas con estructura controlada similar a la encontrada en carbonatos, para realizar pruebas geomecánicas y analizar el cambio de permeabilidad como función de esfuerzos.
- c) Modelado matemático, numérico y computacional de flujo de fluidos en un medio poroso elástico deformable, a fin de interpretar las pruebas geomecánicas y obtener conocimiento básico del fenómeno.

(i) Yacimiento: Cantarell, bloque Akal, brecha del límite K/Pg

Brecha de granos gruesos, compacta, clastos angulosos o redondeados cementados en una matriz dolomítica, presenta fracturas y cavidades de disolución.



Estructura observada: presencia de fracturas cementadas y parcialmente abiertas, vórgulos (huecos) y clastos embebidos (pedazos de rocas)

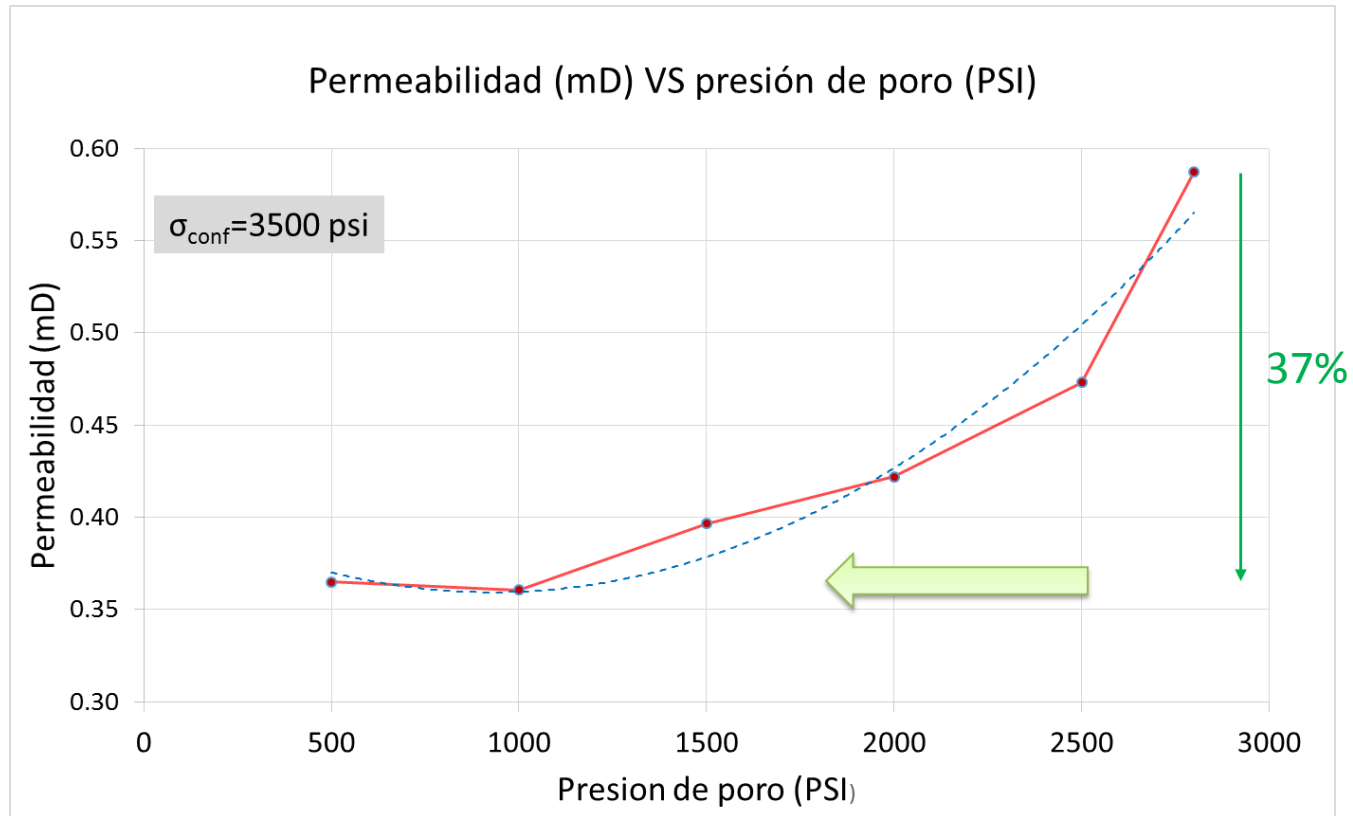
(ii) Roca estándar caliza Bedford (Indiana)



(iii) Afloramiento: Carbonatos de formaciones en Querétaro (El Doctor) y en Tabasco (El Guayal). Muestras de matriz impermeable con isotropía o anisotropía transversal y con fracturas cementadas.



Resultado obtenido en este proyecto en un núcleo de Cantarell



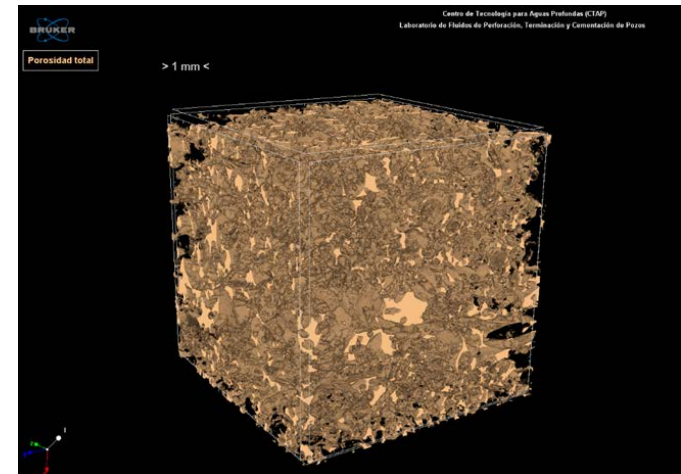
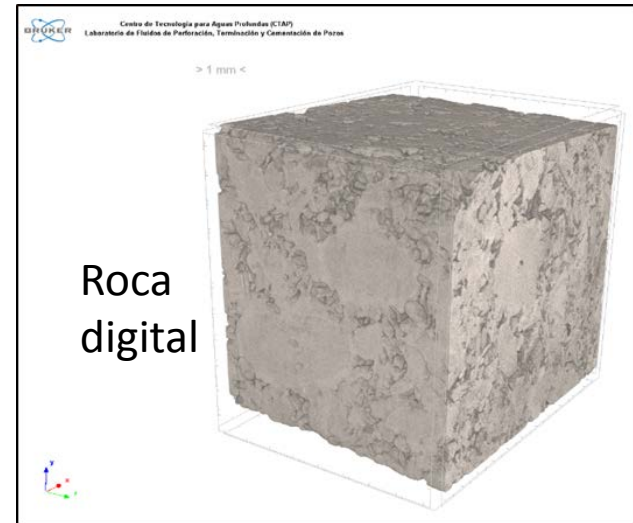
Fotografía de roca real

1 cm



Porosidad
laboratorio
caliza Bedford:
15.7-16.8%
(5 muestras)

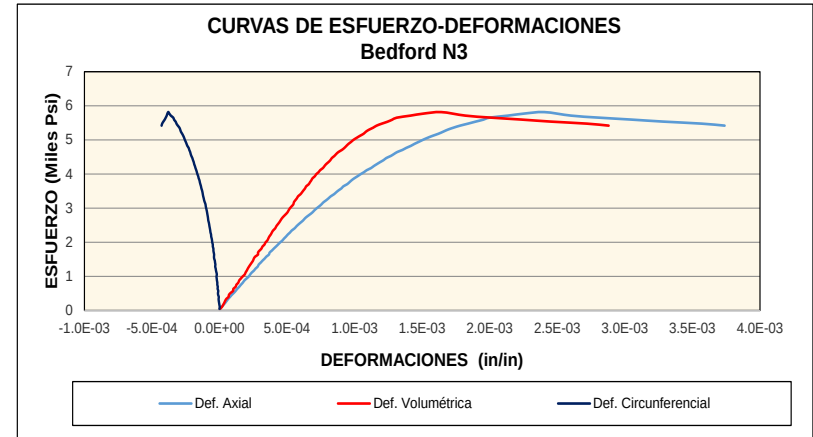
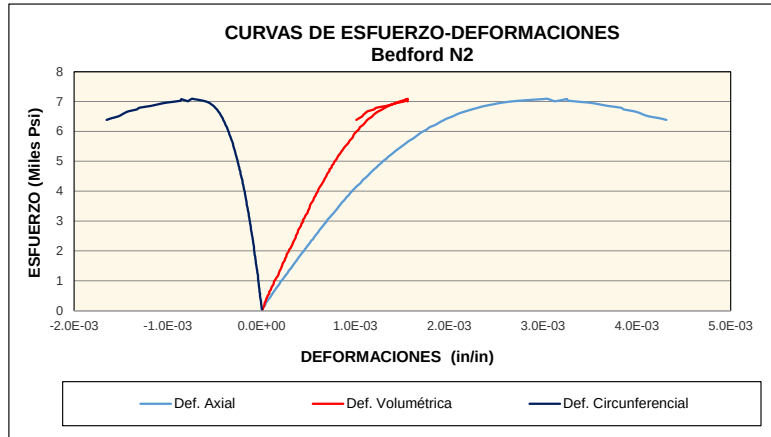
Resolución 5 micras
Porosidad calculada 13.24%



Pruebas triaxiales a núcleos de caliza Bedford

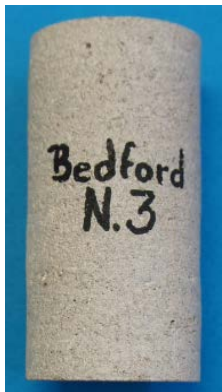
$\sigma_{\text{conf}} = 1000 \text{ psi}$

$\sigma_{\text{conf}} = 2000 \text{ psi}$



MODULOS MECÁNICOS ESTÁTICOS

Muestra	Presion Confinamiento (Psi)	Metodo	Modulo Young (Psi)	Coefficiente correlación	Rel. Poisson (Adim)	Coefficiente correlación	Carga máx. (lbs)	Co (psi)
Bedford N2	1000	Tangente (25%-75%)	3524.16	0.995	0.21	0.999	12,335.45	7,093.48
		Promedio (20%-80%)	3465.68	0.992	0.21	0.999		
		Secante (0%-50%)	4232.34		0.19			
Bedford N3	2000	Tangente (25%-75%)	3360.03	0.994	0.18	0.997	10,083.56	5,814.15
		Promedio (20%-80%)	3311.89	0.991	0.18	0.996		
		Secante (0%-50%)	4144.56		0.14			



antes



después

MODELOS MATEMÁTICOS EN DESARROLLO

- Modelo matemático de elasticidad: medio poroso deformable, heterogéneo y anisótropo (sin fluido).
- Modelo matemático de poroelasticidad monofásico: medio poroso deformable heterogéneo y anisótropo en presencia de un fluido ligeramente compresible
- Modelo matemático de poroelasticidad bifásico (agua-aceite): medio poroso deformable heterogéneo y anisótropo

MODELOS NUMÉRICOS Y COMPUTACIONALES EN DESARROLLO

Plataforma comercial *Comsol Multiphysics* y software abierto *FEniCS*

- Modelo de elasticidad
- Modelo de poroelasticidad monofásico.
- Validaciones.
- Aplicaciones preliminares.



Ecuaciones para el caso de flujo monofásico ligeramente compresible

Ecuación de balance de masa

$$S \frac{\partial p}{\partial t} + \alpha_B \frac{\partial(\nabla \cdot \vec{w})}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{\bar{\bar{k}} \cdot \nabla p}{\mu} \right] = q$$

Ecuación de balance de momento

$$\nabla \cdot \left[\bar{\bar{\sigma}}_e - \alpha_B p \bar{\bar{I}} \right] = 0$$

$$\bar{\bar{\sigma}}_e = \bar{\bar{C}} : \bar{\bar{\varepsilon}}$$

Relación lineal
esfuerzo-deformación

$$\bar{\bar{\varepsilon}} = \frac{1}{2} \left[\nabla \vec{w} + (\nabla \vec{w})^T \right]$$

p presión del fluido

$\vec{w}$ Desplazamientos
del sólido

$$S = c_s (\alpha_B - \phi) + \phi c_f$$

α_B Coef. de Biot

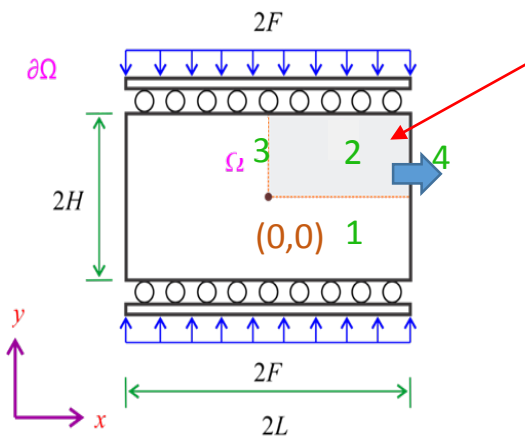
$\bar{\bar{k}} \rightarrow k \bar{\bar{I}}$ Permeabilidad
(escalar)

Cuatro ecuaciones y cuatro variables: p, w_x, w_y, w_z (presión y desplazamientos)

Condiciones iniciales y de frontera específicas para cada caso

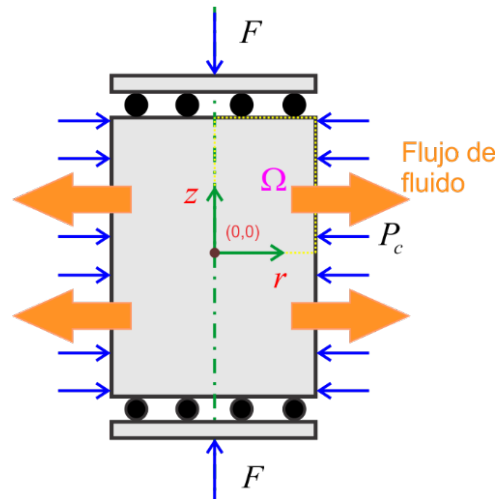
Caso 1

Problema clásico de Mandel de consolidación de suelos (1953)



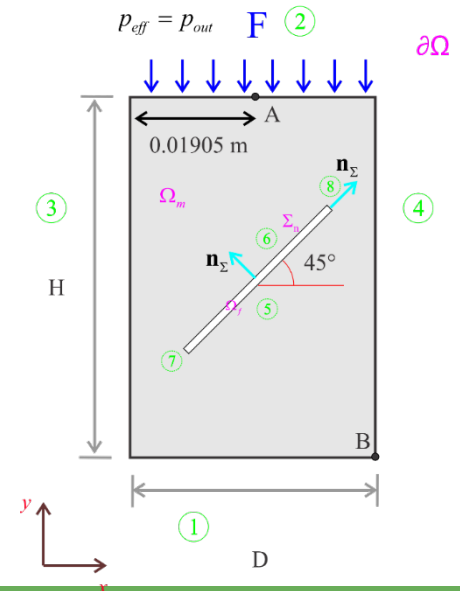
Caso 2

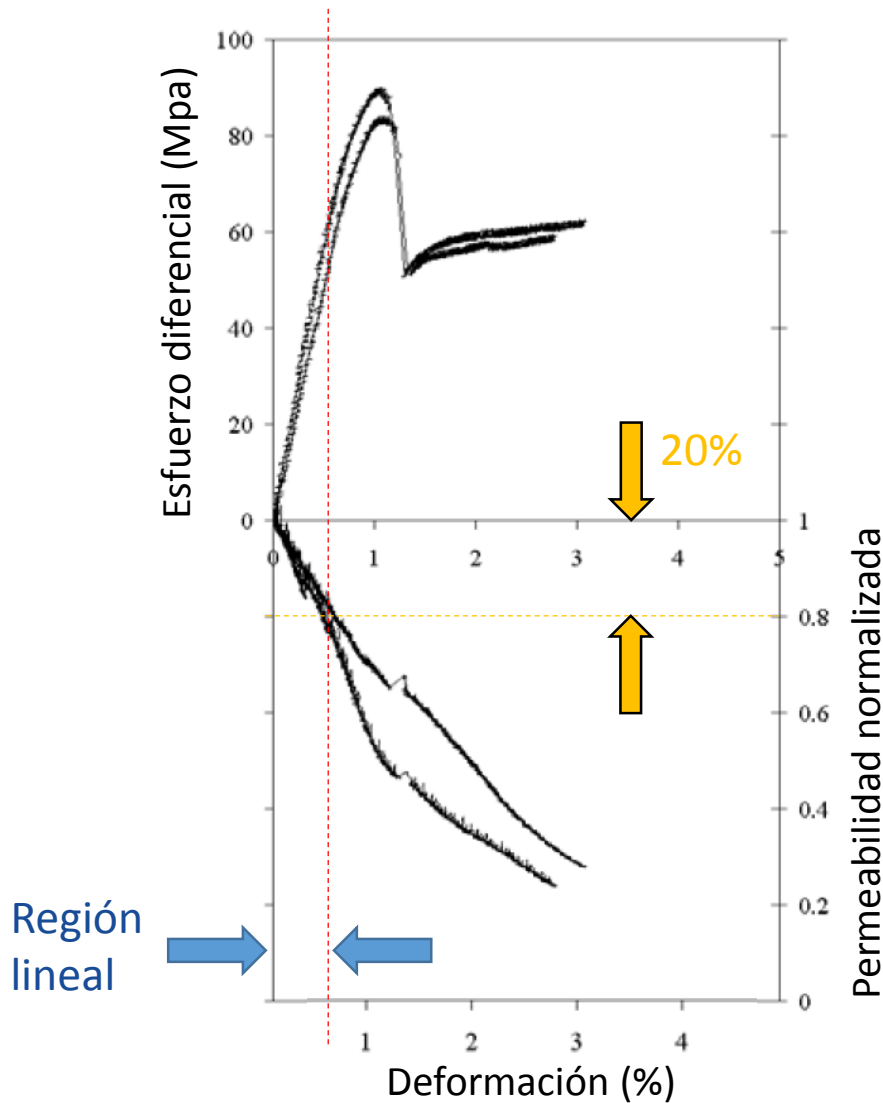
Cilindro poroso sometido a carga vertical, confinamiento radial y expulsión de fluido radial (Cui&Abousleisman,2001)



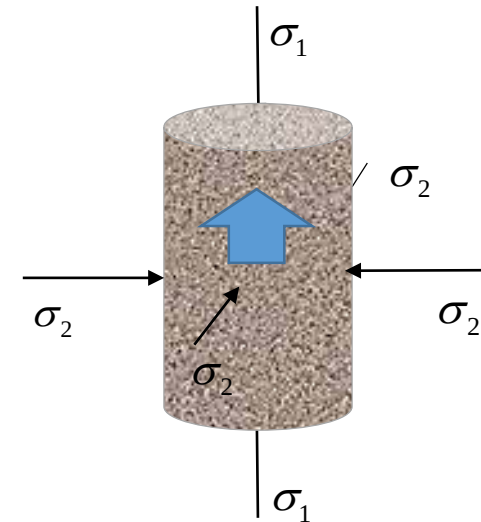
Caso 3

Problema de fractura explícita de Lamb y Gorman (2010)

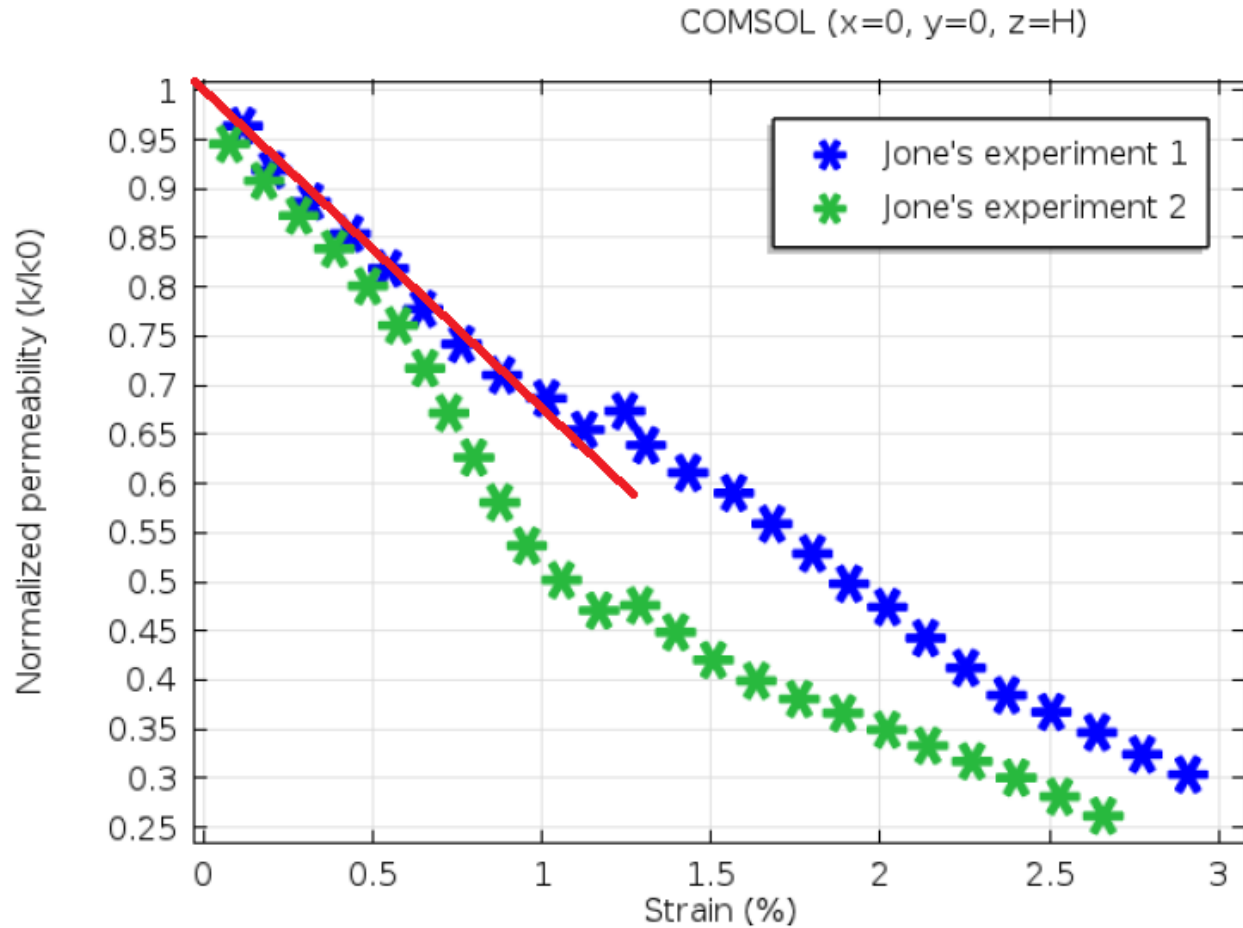




Experimento de laboratorio de Jones & Smart (2002, SPE 78155) en una roca tipo arenisca con esfuerzo de confinamiento constante (σ_2) y de carga (σ_1) incremental hasta la falla mecánica de la roca.



Ajuste de la permeabilidad en la región lineal del experimento 1



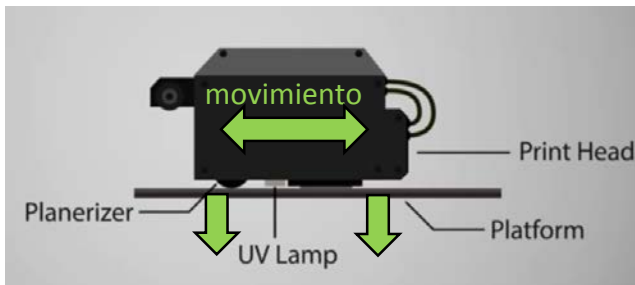
Diseño original



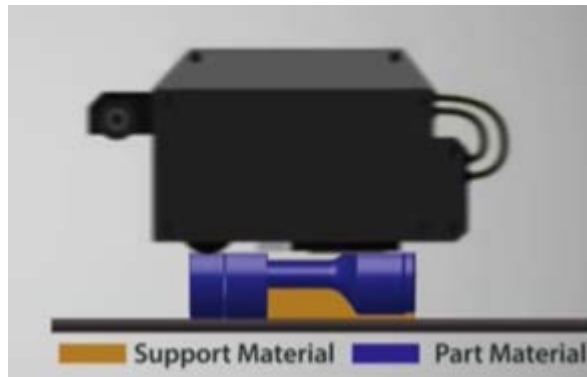
seccionar en capas horizontales



Cabezal de impresión



Inyección de gotas de polímero líquido curable con UV y material de soporte (cera), formando capas



Destellos de UV



Impresora ProJet MJP 3600 Max de 3D Systems, en el IMP



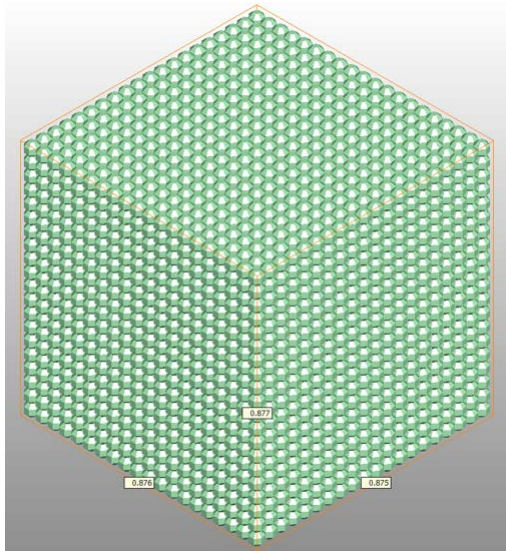
ATRATIVOS:

- Se conoce la estructura interior de las muestras.
- Se pueden obtener múltiples muestras idénticas.
- Se puede copiar estructuras de rocas reales (a escala)

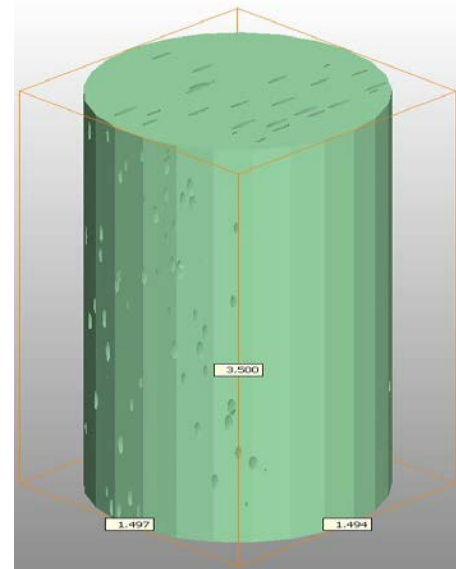
LIMITANTES:

- Impresión restringida a resolución máxima real de 70μ .
- Limitación por extracción del material de soporte (esto requerido en estudios del flujo de fluido).
- Interacción resina-fluido no es representativa de rocas reales.
- Rango de porosidad y permeabilidad son diferentes a las rocas reales.
- Propiedades mecánicas son diferentes a las rocas reales.

Diseño de muestras usando software libre, *OpenScad*. Se da como entrada la posición, tamaño, orientación y tipo de cada inclusión (esferoide o hexaedro). Como salida se tiene un archivo STL a partir del cual se hace la impresión 3D.

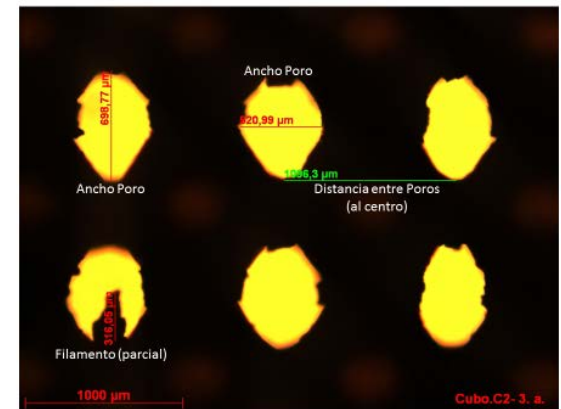
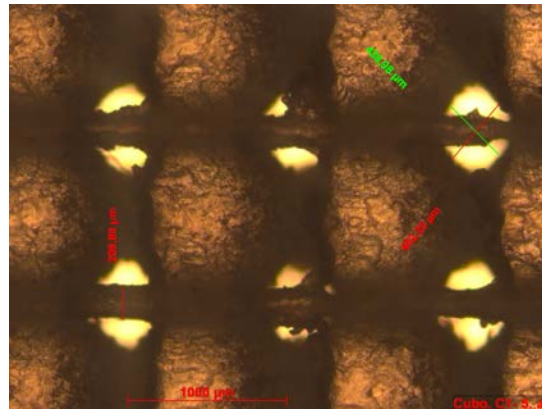
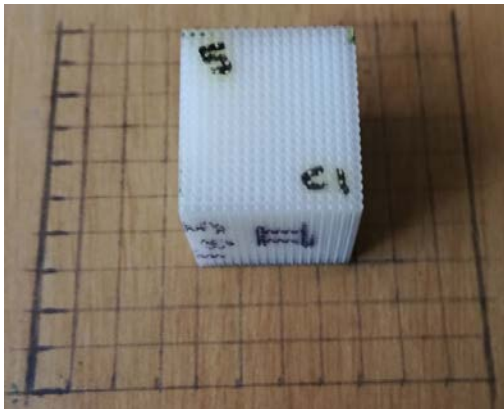


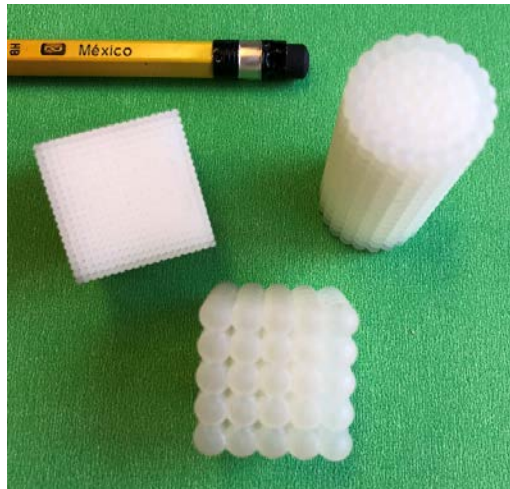
Cubo de 1" de lado, con
20 esferas por lado



Cilindro con inclusiones
esferoidales verticales

- Desarrollo de metodologías de impresión 3D de rocas sintéticas.
- Estudio de propiedades de flujo en términos de estructura interna.
- Efecto de los esfuerzos sobre la permeabilidad de la roca para diversas estructuras internas:
 - Granular simétrica con granos traslapados
 - Matriz sólida con fracturas que percolan
 - Matriz sólida con vórgulos y fracturas interconectados





Conclusiones

Se han caracterizado núcleos de carbonatos de Cantarell y de caliza Bedford, y se analiza el efecto de los esfuerzos en su permeabilidad. Se encontró que el núcleo de Akal analizado tiene una importante variación de la permeabilidad con el cambio de esfuerzos y de presión del fluido.

Se desarrollan modelos matemático, numéricos y computacionales para describir las pruebas realizadas, y entender y extrapolar su comportamiento.

Se diseñan e imprimen en 3D muestras sintéticas que emplean para analizar el fenómeno del efecto de esfuerzos sobre la permeabilidad.

Gracias por su atención

Este trabajo es parte del proyecto 280097 de la Red de Geomecánica financiada parcialmente por el Fondo Sectorial Sener-Conacyt-Hidrocarburos, en colaboración con el IMP, la Universidad de Alberta en Canadá y Pemex Exploración y Producción.