

Compresibilidad de las rocas de yacimientos de El Furrial

Marisela Sánchez, José Natera y Raúl Abreu.
INTEVEP S.A.

Resumen

Los yacimientos petrolíferos del campo El Furrial ubicados en el Norte de Monagas, en Venezuela, son yacimientos sobrepresurizados. Para el estudio del comportamiento esfuerzo-deformación de las areniscas de la Formación Naricual se realizaron pruebas geomecánicas en el laboratorio sobre muestras recuperadas de pozos a 4000 m de profundidad. Se determinó el coeficiente de compresibilidad mediante diferentes tipos de pruebas con variación de la presión de confinamiento o variación de la presión de poro. Para la interpretación de las pruebas con presión de poro variable se obtuvo el coeficiente de proelasticidad α a través de las pruebas hidrostáticas y también indirectamente mediante la determinación del parámetro B de Skempton y la relación de Poisson en condiciones con y sin drenaje. Los resultados indican que con las pruebas a presión de poro nula se obtiene un límite superior para la compresibilidad, mientras que la consideración de $\alpha=1$ en las pruebas a presión de poro variable es un límite inferior de la compresibilidad determinada con α variable a cada esfuerzo efectivo considerado.

Introducción

La declinación de la presión y movimiento de los fluidos durante la producción de un yacimiento petrolífero conducen a cambios volumétricos en las rocas debido al incremento de los esfuerzos efectivos en el macizo rocoso. En el caso de yacimientos sobrepresurizados y sin empuje de agua, como los de El Furrial, la ausencia de gas libre hace que la deformación de la roca, adquiera particular importancia como mecanismo de producción. La compresibilidad de la roca determina en buena proporción la fracción de petróleo a ser recuperada y, en consecuencia, las reservas. Esto se explica por la dependencia mutua que existe entre la presión y difusión del fluido, y la deformación de la roca. En el ámbito de la ingeniería de petróleo, la tradicional solución de balance de materiales [1] para el volumen de petróleo *in situ* (N_p) al igual que la expresión para el factor de recobro (F_r), incluye el comportamiento esfuerzo-deformación de la roca de manera muy simplificada a través de la compresibilidad efectiva (C_e) del sistema fluido-roca,

$$C_e = C_o + \frac{C_p + C_w S_w}{1 - S_w}, \quad (1)$$

donde la compresibilidad de los poros de la roca (C_p) aparece como un elemento que puede ser importante frente a la compresibilidad de los fluidos (C_w es la compresibilidad del agua, C_o la

compresibilidad del petróleo y S_w es la saturación de agua). Para la evaluación de C_p en los yacimientos de El Furrial, se realizó un conjunto de pruebas de laboratorio en muestras de las areniscas de la Formación Naricual. Estas areniscas son rocas de grano medio a grueso, bastante limpias, porosidad entre 12 y 17 % y permeabilidad al aire entre 500 y 1500 mD. Las pruebas consistieron en ensayos de compresión hidrostática con drenaje (con presión de poro nula o variable), ensayos hidrostáticos sin drenaje, pruebas de deformación uniaxial, y ensayos triaxiales convencionales (con y sin drenaje). La prueba de laboratorio más generalizada para la obtención de la compresibilidad de las rocas es la prueba de compresión hidrostática en muestras cilíndricas con presión de poro nula y aumento progresivo de la presión de confinamiento. En estas pruebas la determinación de C_p puede realizarse midiendo el volumen de fluido expulsado de la muestra durante la compresión hidrostática. También puede obtenerse este valor teóricamente a partir de los coeficientes calculados con la deformación volumétrica total de las muestras. La comparación de ambos procedimientos fue realizada. Sin embargo, un procedimiento que se acerca más a lo que ocurre en el yacimiento es el de confinar la muestra a las condiciones estimadas de presión total y de poro y disminuir la presión de poro, manteniendo la presión de confinamiento constante. La interpretación de estas pruebas requiere de la determinación de los esfuerzos efectivos y en consecuencia del coeficiente de poroelasticidad α . Para ello se obtuvo la relación de Poisson en condiciones drenadas y no drenadas mediante una serie de ensayos triaxiales convencionales, y el coeficiente B de Skempton [2] en pruebas hidrostáticas sin drenaje. Adicionalmente, se realizaron pruebas de compresión con deformación uniaxial ya que, bajo la suposición de que existe un régimen de deformación uniaxial dentro del macizo rocoso, en muchas ocasiones se utilizan los valores de compresibilidad uniaxial (obtenidos en pruebas de compresión con deformación lateral impedida) en lugar de los valores de compresibilidad hidrostática.

Determinación de los coeficientes de compresibilidad de la roca

Se han definido diversos coeficientes de compresibilidad de las rocas [3,4] que permiten relacionar los cambios de la presión de poro p y/o de la presión de confinamiento σ , con la deformación volumétrica ϵ_v (cambios en el volumen poroso, V_p y el volumen total, V_b). La compresibilidad total en condiciones de carga hidrostática o isotrópica C_b , se define como

$$C_b = -\frac{1}{V_b} \left(\frac{\partial V_b}{\partial \sigma'} \right), \quad (2)$$

donde σ' es el esfuerzo efectivo. La compresibilidad uniaxial C_m (obtenida en condiciones de deformación uniaxial en la cual las deformaciones laterales $\epsilon_3 = \epsilon_2 = 0$ y $\epsilon_v = \epsilon_1$) se define a su vez como

$$C_m = -\frac{1}{H} \left(\frac{\partial H}{\partial \sigma'_1} \right), \quad (3)$$

siendo H la altura de la muestra. La compresibilidad del volumen poroso C_p es

$$C_p = -\frac{1}{V_p} \left(\frac{\partial V_p}{\partial \sigma'} \right). \quad (4)$$

Las deformaciones volumétricas totales se determinan a través de la variación de la geometría externa de la muestra ($\epsilon_v = 2\epsilon_3 + \epsilon_1$), mientras que la deformación del volumen poroso (ϵ_p) se obtiene midiendo el volumen de fluido desplazado de la muestra durante la compresión.

Las expresiones obtenidas por Geerstma [3] (Ecs. 5 y 6) para condiciones de carga hidrostática como una rederivación de las ecuaciones de Biot [5], permiten hallar las relaciones entre los coeficientes de compresibilidad para diferentes condiciones de variación de p y σ . Así,

$$\varepsilon_p = \frac{dV_p}{V_p} = C_r dp + \frac{1}{\phi}(C_b - C_r)(d\sigma - dp) \quad (5)$$

y

$$\varepsilon_b = \frac{dV_b}{V_b} = (C_r - C_b)dp + C_b d\sigma, \quad (6)$$

donde C_r es la compresibilidad de la matriz rocosa (o compresibilidad de los granos). Si en un ensayo hidrostático se mantiene la presión de poro constante ($dp = 0$), de la Ec. 5 resulta que $C_p = \frac{1}{\phi}(C_b - C_r)$ y de la Ec. 6 se obtiene el mismo C_b definido en la Ec. 2, y así para las diferentes condiciones posibles. Por otra parte, la Ec. 6 puede reescribirse como

$$C_b = \frac{1}{V_b} \frac{dV_b}{\left[d\sigma - \left(1 - \frac{C_r}{C_b}\right) dp \right]}, \quad (7)$$

donde aparece un factor multiplicando a la presión de poro denominado coeficiente α de poroelasticidad de Biot [5,6]. El concepto de esfuerzos efectivos se expresa en estas ecuaciones como $\sigma' = \sigma - \alpha p$, y este valor de α ,

$$\alpha = 1 - \frac{C_r}{C_b}, \quad (8)$$

corresponde a la condición, implícita en el desarrollo de las ecuaciones, de que no hay cambio de porosidad bajo variaciones equivalentes de presión de poro y de presión de confinamiento. Si se considera el comportamiento drenado y no drenado de la roca, el coeficiente de poroelasticidad [7] se expresa como

$$\alpha = \frac{3(\nu_u - \nu)}{B(1 - 2\nu)(1 + \nu_u)}, \quad (9)$$

donde ν_u y ν son la relación de Poisson en condiciones no drenadas y drenadas, respectivamente. B es el coeficiente de Skempton, el cual se define como el cociente entre la variación de p y la variación de σ en un ensayo hidrostático sin drenaje. En general, para suelos o materiales muy fracturados $\alpha=1$, con lo cual se llega al concepto de esfuerzos efectivos para consolidación unidimensional propuesto por Terzaghi [8].

Procedimiento experimental y equipos

Las pruebas fueron realizadas en un sistema de carga servocontrolado, constituido por una celda triaxial, intensificadores independientes de presión de poro y presión de confinamiento y diversas unidades de control y adquisición de datos. La instrumentación consiste de tres transductores de desplazamiento lineal (LVDT) colocados axialmente, un extensómetro circunferencial (ambos sistemas con precisión de milésimas de mm), una celda de compresión compensada por temperatura para la determinación de la carga axial, y transductores de presión de fluido en diversos puntos.

Las muestras fueron cortadas en cilindros de diámetro alrededor de 4 cm. y longitud de dos veces el diámetro, asegurándose el paralelismo de las caras. Los núcleos se lavaron con tolueno y metanol y se midió la porosidad y permeabilidad al gas. Luego se sometieron a saturación en aceite durante 24 horas bajo vacío y se les colocó una manga de teflón adaptable con temperatura para aislar la muestra del fluido de confinamiento durante la prueba. En la Tabla I se presenta la descripción de las pruebas realizadas.

Ensayo	Tipo	Descripción	Muestras	Profundidad
A	Hidrostático drenado $p=0$	Se mantuvo $p=0$, mientras se incrementó σ_c . * Se midió volumen de fluido desplazado durante la carga.	110, 124, 88-1, 147, 145, 171, 24*, 26*	4173 - 4507 m
B	Hidrostático drenado $p>0$	La presión de confinamiento se aumentó simultáneamente a la de poro ($\sigma_c=100, p=70$ MPa). Luego se disminuyó p , con σ constante.	87, 88, 124-1, 738, 11, 32	4173 - 4281 m
C	Hidrostático no drenado	Se aplicó carga hidrostática sin drenaje, midiendo los incrementos de p generados.	704, 708	4771 m
D	Deformación uniaxial $p=0$, $\epsilon_1=\epsilon_2=0$	Se aumentó la carga axial, mientras se ajustó σ_c tal que el diámetro de la muestra permaneciera constante	52, 54, 60, 71	4263 - 4259 m
E	Triaxial convencional drenado con $p=0$	Inicialmente se aplicó confinamiento hidrostático con drenaje y luego manteniendo σ_c constante se aplicó esfuerzo axial desviador hasta la falla.	728 ($\sigma_c=0$ Mpa), 5 (30), 4(10), 70-4(0), 70-3(30), 70-2(10)	4262 - 4773 m
F	Triaxiales convencionales sin drenaje	Se aplicó confinamiento hidrostático con drenaje y $p=10$ MPa. Luego se impidió la salida del fluido y se midió p durante el incremento de carga axial.	2 ($\sigma_c=30$ Mpa), 3(45), 716(55)	4773 - 4774 m

Tabla I. Descripción de las pruebas realizadas

Resultados

Compresibilidad de poros En dos de las pruebas hidrostáticas con $p=0$ (ver Tabla I) se determinó la compresibilidad de poros con la Ec. 4, a partir la cantidad de fluido expulsado de la muestra durante

la compresión (C_p medido). En las mismas pruebas también se obtuvo C_p a partir de las deformaciones totales (C_p calculado) con la Ec. 5, con un valor de $C_r = 2.75 \times 10^{-05}$ [2] y C_b obtenido de la Ec. 2 (el esfuerzo efectivo en este caso es igual al total). Estos resultados se presentan en la Fig. 1, y en la Fig. 2 se observa que los valores calculados y medidos para una misma presión se apartan poco en promedio (línea punteada) de una línea de 45° (línea llena). Esta correspondencia apoya las suposiciones de las ecuaciones involucradas.

Pruebas hidrostáticas y de deformación uniaxial con presión de poro nula

Después de determinar las deformaciones axiales, radiales y volumétricas, se obtuvo C_b (Ec. 2) y C_m (Ec. 3) utilizando un ajuste de plantillas cúbicas (splines). La Fig. 3 muestra los resultados de ambos conjuntos de pruebas y tal como era de esperarse por las diferentes trayectorias de esfuerzos utilizadas, no hay coincidencia entre ambas compresibilidades, siendo $C_b > C_m$. Se observa además dependencia no lineal con la presión.

Si se toma una envolvente promedio sobre cada grupo de puntos, se observa que para un esfuerzo de 60 MPa por ejemplo, $C_m = 0.8 \times 10^{-4}$ y $C_b = 1.5 \times 10^{-4}$, lo cual representa una diferencia del 90%. Si tomamos en cuenta que el factor de recobro es directamente proporcional a C_e , considerando valores usuales de la compresibilidad de los fluidos, F_r puede verse afectado por esta diferencia hasta en un 40 %. En realidad, la suposición de una condición de deformación uniaxial y lo que esto conlleva en términos de los esfuerzos aplicados, está tan justificada como cualquier otra suposición si se desconoce el régimen de esfuerzos *in situ*.

Pruebas hidrostáticas con presión de poro variable

En estas pruebas se confinó la muestra a una cierta condición de esfuerzos hidrostáticos (ver Tabla I), se mantuvo la presión de confinamiento constante mientras se disminuía la presión de poro. En la Fig. 4 se muestra C_b (p =variable) obtenido con un valor de $\alpha=1$ (esfuerzo efectivo de Terzagui), junto con las curvas promedio que representan los resultados de C_b en las pruebas con $p=0$, y C_m . Tal como se observa en la Fig. 4, la influencia de la presión de poro en la compresibilidad total es tan notable como la influencia de la condición de deformación uniaxial.

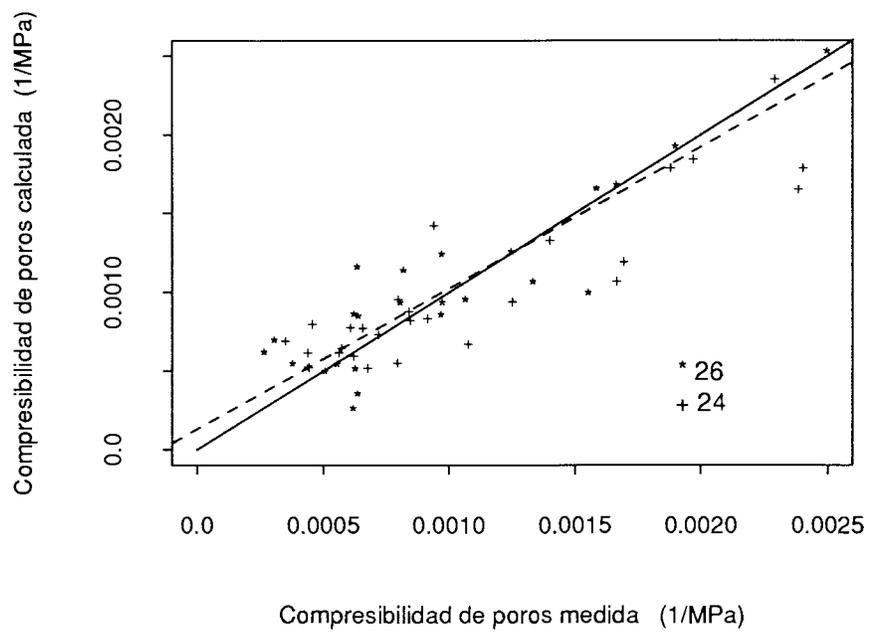
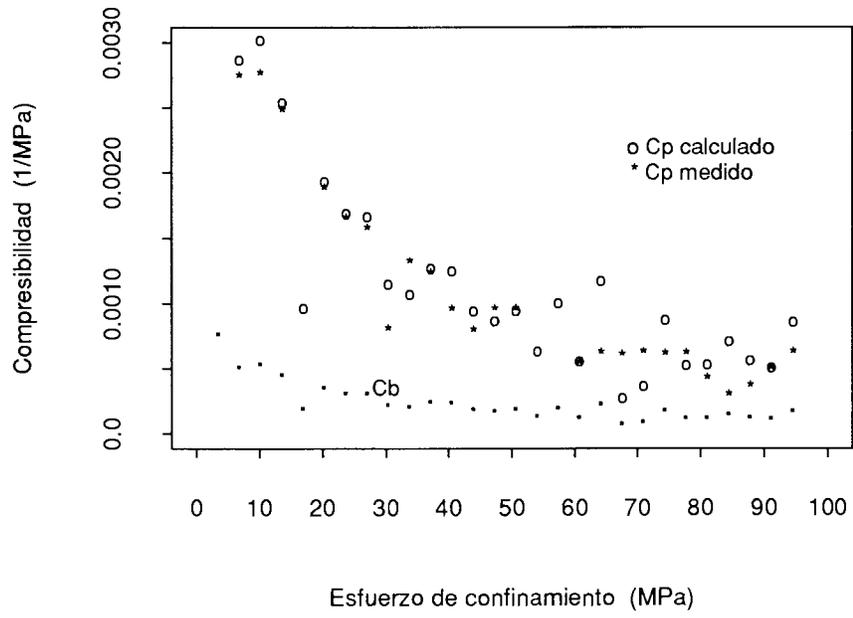
Para una adecuada interpretación de los resultados de las pruebas con presión de poro variable es necesario calcular los esfuerzos efectivos. Para ello se resolvió iterativamente la Ec. 7 por diferencias finitas, a través de la siguiente ecuación,

$$\sigma'_i = \sigma_i - p_i \left(1 - \frac{C_r}{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_{i-1})} (\sigma'_{i-1} - \sigma'_{i+1}) \right). \quad (10)$$

En la Fig. 5 se observa que la prueba con $p = 0$ representa un límite superior de C_b , mientras que la prueba con $p =$ variable, con los esfuerzos efectivos calculados con $\alpha=1$ es un límite inferior.

Fig. 1. Valores de Compresibilidad C_b , C_p calculada y C_p medida obtenidas en un ensayo tipo A

Fig. 2. Comparación de los valores de C_p calculado y C_p medido para igual presión en dos pruebas tipo A



Determinación de coeficiente de poroelasticidad α

El coeficiente α se determinó en función del esfuerzo efectivo según la Ec. 8 en las pruebas tipo A y B. En la Fig. 6 se presentan los resultados en los cuales se observa bastante dispersión, aunque hay una tendencia claramente lineal de disminución de α con el esfuerzo efectivo, en el rango de presiones observadas en los ensayos. Esta relación lineal sugiere que para estas rocas α depende solo de las características de la roca [9] y no del fluido. Utilizando las soluciones de poroelasticidad lineal que consideran la influencia del fluido y el comportamiento drenado y no drenado de la roca, el coeficiente α se obtiene también de la Ec. 10. Se utilizaron datos de ensayos triaxiales convencionales realizados con presión de poro nula para determinar ν , y se ejecutaron ensayos triaxiales convencionales sin drenaje para calcular ν_u . El módulo de Poisson se determinó a la presión asociada a la parte de pendiente constante de la curva esfuerzo deformación. En la Tabla II se presentan los promedios de los valores obtenidos

El coeficiente B de Skempton se obtuvo de dos pruebas hidrostáticas sin drenaje y resultó ser constante para el rango de presión estudiado (0–100 MPa). Para los valores promedio resultó $\alpha = 0.68$, lo cual corresponde al valor promedio obtenido en la Fig. 6 para un esfuerzo efectivo alrededor de 100 MPa. Los parámetros B, α y ν_u obtenidos para las areniscas de Naricual son cercanos a los datos recopilados por Detournay, et. al. [9] para diversas areniscas, los cuales se han incluido en la Tabla II.

Identificación	B	ν	ν_u	α	Ref.
Arenisca de Naricual	0.73	0.14	0.29	0.68	[10,11]
Berea	0.62	0.20	0.33	0.79	[9]
Arenisca de Weber	0.73	0.15	0.29	0.73	[9]
Arenisca de Ohio	0.5	0.18	0.28	0.74	[9]
Arenisca de Pecos	0.61	0.16	0.31	0.83	[9]
Arenisca de Ruhr	0.88	0.12	0.31	0.65	[9]
Arenisca de Boise	0.61	0.15	0.31	0.85	[9]

Tabla II Coeficientes de poroelasticidad para diversas areniscas

Fig. 3. Resultados de las pruebas hidrostáticas con $p=0$ y las pruebas de deformación uniaxial mostrando C_b y C_m respectivamente

Fig. 4 Resultados de las pruebas hidrostáticas con $p=0$ (Tipo A) y con $p>0$ (Tipo B)

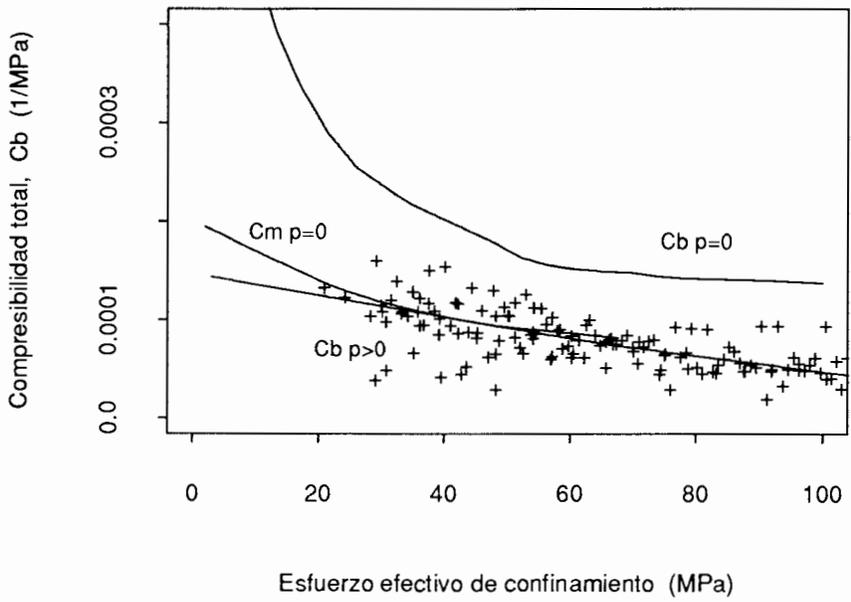
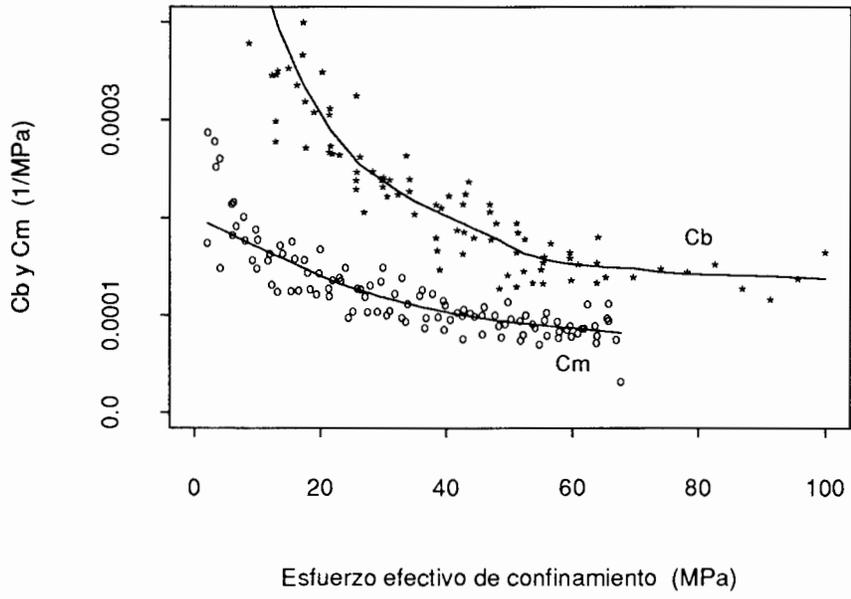
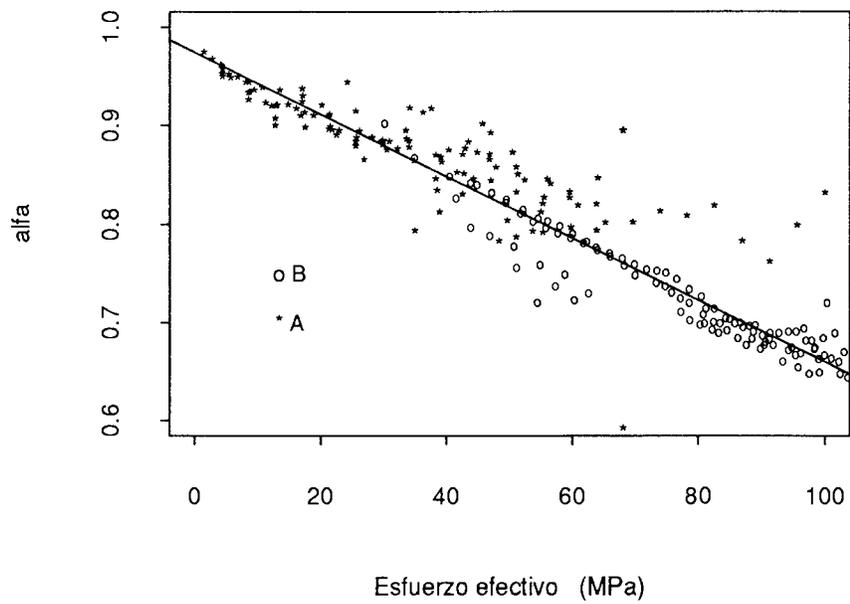
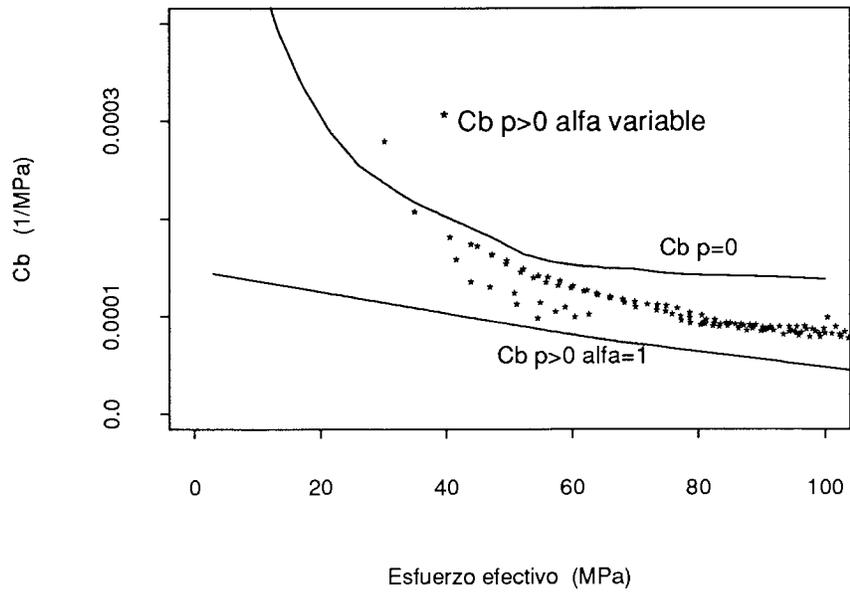


Fig. 5 Límites inferiores y superiores de C_b mostrando la compresibilidad total calculada con un α variable determinado con la Ec. 10

Fig. 6 Valores de α obtenidos de los ensayos tipo A y B a partir de la Ec. 7



Conclusiones

Se han determinado y comparado los coeficientes de compresibilidad siguiendo diversos métodos de ensayo. La compresibilidad de poros medida por el volumen de fluido desplazado y calculada a través del coeficientes de compresibilidad total son concordantes, lo cual es previsible dada la poca presencia de cementante y material más compresible como arcillas en las muestras. Las pruebas de deformación uniaxial conducen a resultados que son casi un orden de magnitud menor que los resultados de las pruebas hidrostáticas con presión de poro nula. La interpretación de pruebas hidrostáticas con presión de poro variable se realizó utilizando el principio de esfuerzos efectivos, para lo cual se determinó el coeficiente de poroelasticidad α por diversos métodos. Los resultados indican que la compresibilidad en las pruebas con p variable y α variable en función del esfuerzo efectivo está dentro del límite superior constituido por el coeficiente de compresibilidad para $p=0$ y el límite inferior representado por la compresibilidad con p variable y $\alpha=1$, tal como era de esperarse. Se determinaron ν y ν_u a través de pruebas triaxiales convencionales con y sin drenaje y el parámetro B de Skempton, lo cual condujo a un valor de $\alpha=0.68$. Este valor está dentro de los valores usuales obtenidos para areniscas y corresponde al valor promedio a alta presión obtenido de las pruebas hidrostáticas con presión de poro variable.

Referencias

1. Hawkins M. F. Material balances in expansion type reservoirs above the bubble point. *Trans. AIME* (20)4:267 (1955).
2. Skempton A. Effective stress in soil, concrete and rocks. *Pore pressure and suction in soils*. Londres, Butterworth. p4-16 (1961)
3. Geertsma J. The effect of fluid pressure decline on volumetric changes of porous rocks. *Trans. AIME*. (210):330-340 (1957).
4. Zimmerman R., Somerton W. y King M. Compressibility of porous rocks. *Journal of Geophysical Research*. Vol 91, B-12, p 765-777 (1986).
5. Biot M. A. General theory of three dimensional consolidation. *Journal of Applied Physics*. 12,155-154 (1941).
6. Biot M. A. General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material. *Jour. Appl. Mech.* 78, 91-96 (1956).
7. Rice J. y Cleary M. Some basic stress-diffusion solutions for fluid saturated elastic porous media with compressible constituents. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. Vol 14, 2, 227-241 (1976).
8. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics. New York; John Wiley & Sons. (1943)9.
9. Detournay E., Cheng A. H., Roegiers J.C. y McLennan J. Poroelasticity considerations in In situ stress determination by Hydraulic Fracturing. *Int. J Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.* Vol 26, N 6 pp 507-513 (1989)..
10. Sánchez M., Natera J., Rodríguez A. y Linarez J. Evaluacion de propiedades geomecánicas de la Formación Naricual. *INT-(en preparación)* (1990)
11. Natera J., Sánchez M., Abreu R., Rodríguez A., y Olmedo B. Estudio de compresibilidad de las rocas de la Formación Naricual, Pozo FUL-7. *INT-EPYC-0012-89* (1989).