

PROPERTIES OF CERRO PRIETO ROCK AT SIMULATED IN SITU CONDITIONS

J. F. Schatz
Terra Tek, Inc.
Salt Lake City, Utah, U.S.A.

ABSTRACT

Rocks from the Cerro Prieto Geothermal Field were tested under simulated in situ conditions in the laboratory to determine their properties and response to pore pressure reduction as would be caused by reservoir production. The primary purpose of the project was to provide information on compaction and creep as they may contribute to surface subsidence. Results show typical compressibilities for reservoir rocks of about 1×10^{-6} psi⁻¹ and creep compaction rates of about 1×10^{-9} sec⁻¹ when triggered by 1000 psi pore pressure reduction. This creep rate would cause significant porosity reduction if it continued for several years. Therefore it becomes important to learn how to correctly extrapolate such data to long times.

INTRODUCTION

As part of the Lawrence Berkeley Laboratory's Geothermal Subsidence Research Management Program, Terra Tek, Inc. has studied the physical processes leading to subsidence in geothermal reservoirs. The general objective of this project was to provide information on rock properties that could be used to understand, model and predict reservoir rock compaction that could cause subsidence. Project tasks included core collection in the field, rock testing in the laboratory, with both short-term and creep tests, and constitutive modeling to describe creep compaction behavior. Most of these results are fully described in other publications[1,2,3]. It is the purpose of this paper to give a final summary of test results obtained for rock from the Cerro Prieto Geothermal Field in Baja, California, Mexico.

DESCRIPTION OF ROCKS

Cores were obtained from existing storage at Cerro Prieto. An attempt was made to select material for testing that was representative of the field in general, although this attempt was somewhat limited by core availability. Figure 1 shows a simplified map of the geothermal field, with the identifying labels and locations of wells from which core was obtained for testing. Figure 2 shows a schematic cross-section of the field, indicating the depths from which cores were obtained in the various wells. This cross-section is not meant to be an accurate representation of the geology, but instead it is meant to be a guide to identifying core location. Fluid was also obtained from a wellhead in the field. The fluid was preserved by acidification and stored for later use.

Table 1 shows the wells and depths from which the 40 feet of total core were obtained. A summary of properties is given in Table 2. In general, these rocks were medium to fine grained sandstones with about 20% porosity. Mineralogy was sedimentary with varying amounts of alteration. The main evidence of alteration was appearance of epidote and authigenic silica, and disappearance of calcite. Fluid chemistry (adjusted to reservoir conditions) was about 20,000 ppm dissolved solids (mostly salts) with near-saturation values of silica and moderate amounts of carbon dioxide.

Table 3 shows specific values of porosity and calcite content for the rocks tested. Calcite content is emphasized because fluid chemistry equilibrium played a role in many of the creep and permeability test results, and carbonate equilibrium proved the most difficult to control. Thus, results are considered more reliable for rocks which contained little or no calcite.

TEST PROCEDURES

Several Terra Tek testing systems were used for this work. The general sample configuration and capabilities are shown in Figure 3. All tests were run at or near simulated in situ conditions of confining pressure, pore pressure, temperature, and fluid chemistry. Most test samples were right circular cylinders 2 inches in diameter by 4 inches long.

In general, test confining pressures were less than or equal to 1 psi per foot of burial and pore pressures and temperatures were obtained from field information. A summary of conditions is given in Table 4. Axial load was applied in most tests such that total axial stress was approximately 1 psi per foot of burial and ratio of effective axial stress to effective confining pressure was 3/2.

Four types of tests were run, as described in the following:

Basic Tests: These tests consisted of achieving reservoir conditions, and then initiating one of three possible perturbations:

- a) Reduction of pore pressure to simulate reservoir production while holding other stresses constant, to obtain a compressibility for compaction modeling.

- b) Increase of confining pressure while holding other stresses constant, to check validity of effective stress concepts.
- c) Reduction of pore pressure, while adjusting axial load and confining pressure to maintain uniaxial compaction, to simulate a one-dimensional compaction condition commonly used in reservoir modeling.

Ultrasonics: These tests, at elevated temperature and pressure, were to determine ultrasonic velocities at in situ conditions, and then the change in ultrasonic velocity as caused by reduction of pore pressure. The purpose was to see if compaction-caused velocity increase was enough to be detected downhole with sonic tools, or at the surface with seismic instrumentation.

Permeability: A number of rocks were tested for permeability at in situ condition, and changes caused by pore pressure reduction. These tests were to assist in reservoir modeling.

Creep: These tests consisted of achieving reservoir conditions, reducing pore pressure, as in many of the previous tests, but then holding these conditions for long periods of time (up to weeks). It was the intention of these tests to determine if compaction continued, as a time-dependent effect, long after stress and pressure changes ceased. This effect could have important implications for compaction/subsidence modeling.

For all tests described, fluid chemistry was monitored and controlled to be as representative of reservoir conditions as possible. Special and extensive precautions were taken for creep tests, since chemical-mechanical interaction could play a role in creep.

TEST RESULTS

Basic Tests

Average results are shown in Table 5, in terms of equivalent compressibility (volume strain increment divided by effective stress increment) for each test type. A typical test of the pore pressure cycling type is shown in Figure 4. In this test the effective stress has been increased and decreased several times to show the effect of cyclic discharge/recharge. Note the slight stiffening for each cycle and the permanent (irreversible) compaction.

Ultrasonic Velocities

Ultrasonic velocities given in Table 6 generally increased with 1000 psi reduction in pore pressure (due to compaction). Average increase in V_P was 1.3% and in V_S was 2.1%. These increases were easily measurable under controlled laboratory conditions; however, it is uncertain if they could be observed in the field because of signal-to-noise and repeatability problems.

Permeability

Permeabilities were measured at in situ pressures and at room temperature, elevated temperature, 1000 psi pore pressure reduction and after creep. Average results are given in Table 7. Little or no reduction is seen as caused by pore pressure decrease; however, significant reduction is associated with creep. It is uncertain as to how much of the creep-associated reduction is associated with non-equilibrium chemical effects and how much would occur in a field situation.

Creep

Average creep results are given in Table 8. Creep rate decreases as test duration increases. The observed creep rate of about 10^{-9} /record appears at first to be insignificant. However, if the rate were to continue for six years, all porosity would be removed! Therefore, it becomes important to learn how to extrapolate such creep rates observed in a few days or weeks to several years. Figure 5 shows the results of three typical creep tests. The initial volume decrease is caused by initial pore pressure reduction, and decrease thereafter is caused by creep.

INTERPRETATION AND CONCLUSIONS

Compressibilities of Cerro Prieto cores, as obtained from instantaneous behavior in response to stress changes that simulate reservoir production, are typical of porous reservoir sandstones. Compressibilities are of the order 1×10^{-6} psi $^{-1}$. Ultrasonic velocities increase by 1-2% coincident with porosity decrease. It is uncertain if this small a change in sonic velocity could be used as a field diagnostic tool.

Permeabilities, in the range of a few millidarcies, and strongly affected by creep, are quite low. It seems quite likely that the fluid flow paths in the rocks tested here, which are intact and unfractured, are not representative of what occurs in the reservoir. It follows that fractures or other conduits to fluid must play a role in reservoir production.

Creep, as triggered by pore pressure reduction, is a significant phenomena in these rocks, and if continued at the rate observed in the laboratory would lead to significant reduction in porosity over a period of years in the field. It becomes important to develop a method of extrapolation of time-dependent behavior as observed in the laboratory to the longer times that correspond to reservoir production. Effective compressibility when creep is accounted for (defined as long term volume change divided by pore pressure change) may be several orders of magnitude greater than initial apparent compressibilities.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to acknowledge the support and assistance of the U.S. Department of Energy, Division of Geothermal Energy, the Lawrence Berkeley Laboratory Earth Sciences Division, and the Comi-

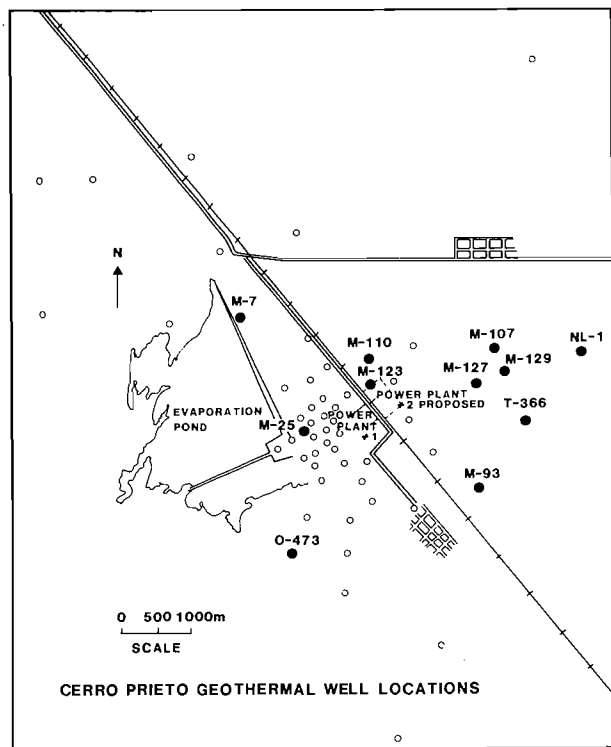
sion Federal de Electricidad of Mexico. Individuals who contributed significantly were John Nobel of LBL (now at Phillips Petroleum), Ing. Alfredo Mañon of CFE, Ahmed Abou-Sayed of Terra Tek, and Kenneth Wolgemuth of Terra Tek (now at Amerada Hess).

REFERENCES

1. Schatz, J.F., S. Carlisle and K. Wolgemuth, "Creep Compaction of Geothermal Reservoir Rock", in Proc. 21st U.S. Symposium on Rock

Mechanics, University of Missouri, Rolla, 1980.

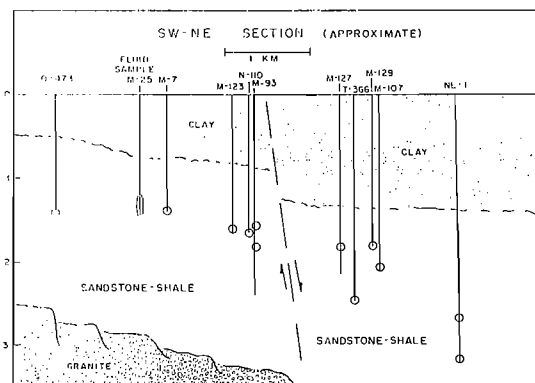
2. Abou-Sayed, A.S., J.F. Schatz and K. Wolgemuth, "Compaction and Permeability of Cerro Prieto Cores: A Laboratory Evaluation", in Proc. 2nd Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexicali, 1979.
3. Schatz, J.F. and K.M. Wolgemuth, "Physical Processes of Subsidence in Geothermal Reservoirs", Terra Tek, Inc. Report in Preparation, 1981.



XBL 826-714

Figure 1. Simplified map of the Cerro Prieto Geothermal Field, showing wells from which core was obtained for testing.

Figura 1: Mapa simplificado del Campo Geotérmico de Cerro Prieto mostrando los pozos de los cuales se obtuvieron los núcleos utilizados en las pruebas.

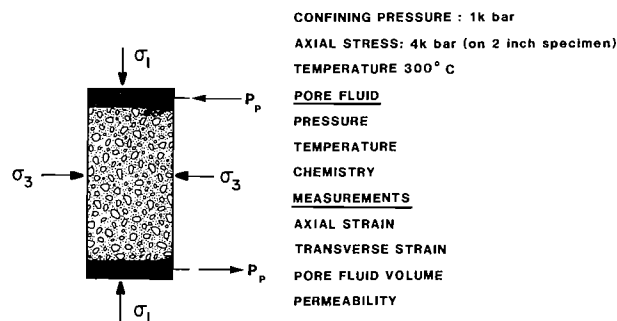


XBL 826-715

Figure 2. Schematic cross-section of Cerro Prieto Field showing core depths (not meant to be geologically accurate).

Figura 2: Corte transversal esquemático del Campo de Cerro Prieto mostrando las profundidades de los núcleos (no intenta ser geológicamente exacto).

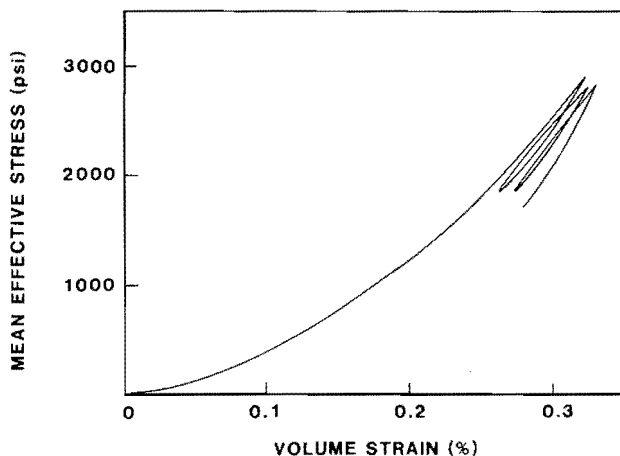
TESTING SYSTEM



XBL 826-716

Figure 3. Test system capabilities, showing schematic representation of test sample.

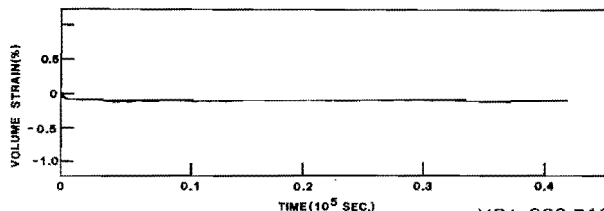
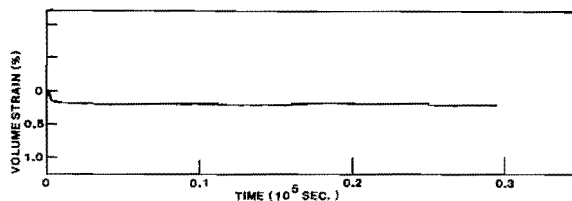
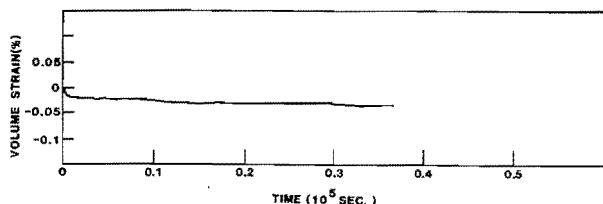
Figura 3: Capacidades del sistema de pruebas, mostrando una representación esquemática de una muestra.



XBL 826-717

Figure 4. Basic pore pressure cycling test on Cerro Prieto core from Well M-107, depth 6,936 ft, initial porosity 18.6%.

Figura 4: Prueba básica de variaciones cíclicas de presión de poro en un núcleo del pozo M-107 de Cerro Prieto a una profundidad de 6,936 pies, con porosidad inicial de 18.6 por ciento.



XBL 826-718

Figure 5. Typical creep results, Cerro Prieto rock. Uppermost curve is 0473, middle is M127 and bottom is M110. Average creep rate seen here is $1.9 \times 10^{-9}/\text{sec}$.

Figura 5: Resultados típicos de deformación progresiva para rocas de Cerro Prieto. La curva superior es para el pozo 0-473, la del medio para el pozo M-127 y la inferior para el pozo M-110. La velocidad promedio de deformación progresiva mostrada aquí es de $1.9 \times 10^{-9}/\text{seg}$.

Table 1. Core obtained.

Tabla 1. Núcleos obtenidos.

	Well	Depth (ft)
Cerro Prieto (40 ft)	M-7	4600
	M-93	5100, 5900, 6400, 7800
	M-107	5300, 7000
	M-110	5400
	M-127	6100, 7100
	M-129	5300, 5900
	NL-1	9000, 10,500
	O-473	4500
	T-366	8200

Table 2. Summary of properties.

Tabla 2. Resumen de las propiedades.

	C.P. (280°C)
Porosity	20%
Grain Density	2.7
Mineralogy	Altered Sedimentary
Fluid Chemistry	20,000 ppm Silica CO ₂

Table 3. Specific core properties.

Tabla 3. Propiedades específicas de los núcleos.

Well	Depth (m)	Porosity (%)	Calcite (%)
M-107	2115	25	0
M-110	1644	15	0
M-127	1871	17	0
NL-1	2735	18	0
T-366	2522	20	0
M-7	1410	19	1
O-473	1384	23	1
M-93	1566, 1804	39	6
M-129	1802	17	8

Table 4. Test conditions.

Tabla 4. Condiciones de pruebas.

Temperature, T	250-300°C
Confining Pressure, P _c	3000-7000 psi
Pore Pressure, P _p	1500-3000 psi
Axial Load, L	as appropriate (see text)

Table 5. Basic test results.

Tabla 5. Resultados de pruebas básicas.

	Compressibility ($\times 10^{-6}$ psi $^{-1}$)
Reduced P_p	0.7
Increased P_c	0.9
Reduced P_p (Uniaxial) p	0.8

Table 6. Ultrasonic results.

Tabla 6. Resultados ultrasónicos.

	V_p (km/sec)	V_s (km/sec)
Initial P_p	3.95	2.36
Reduced P_p	4.00	2.41

Table 7. Permeability results (millidarcies).

Tabla 7. Resultados de permeabilidad (milidarcies).

Room Temp.	High Temp.	P_p Reduced	Post Creep
4.0	2.4	2.4	1.5

Table 8. Creep results.

Tabla 8. Resultados de deformación progresiva.

	Duration (10^5 /sec)	Volume Strain Rate (10^{-9} /sec)
Cerro Prieto Shorter Term	0.2	7.2
Cerro Prieto Longer Term	4.0	0.3

PROPIEDADES DE LAS ROCAS DE CERRO PRIETO BAJO CONDICIONES IN-SITU SIMULADAS

RESUMEN

Rocas del Campo Geotérmico de Cerro Prieto fueron estudiadas bajo condiciones in situ simuladas para determinar sus propiedades y su respuesta a la reducción de presión de poro que se produciría por la explotación del yacimiento. El propósito principal del proyecto fue obtener información sobre compactación y deformación progresiva porque las mismas podrían contribuir al asentamiento del terreno. Los resultados muestran compresibilidades típicas para rocas de yacimiento de alrededor de 1×10^{-6} psi $^{-1}$ y velocidades de compactación de deformación progresiva de alrededor de 1×10^{-9} sec $^{-1}$ provocadas por una reducción de presión de poro de 1000 psi. Esta velocidad de deformación progresiva podría ocasionar una reducción significativa de la porosidad si continuara durante varios años. Por lo tanto, es importante saber cómo extrapolar correctamente tales datos a períodos largos de tiempo.

INTRODUCCION

Como parte del Geothermal Subsidence Research Management Program del Lawrence Berkeley Laboratory, Terra Tek, Inc. ha estudiado los procesos físicos que conducen al asentamiento del terreno en yacimientos geotérmicos. El objetivo general de

este proyecto fue obtener información sobre propiedades de roca que pudieran utilizarse para comprender, modelar, y predecir la compactación de la roca del yacimiento que pudiera producir asentamiento. Las tareas del proyecto incluyeron la recolección de núcleos en el campo, el estudio de rocas en el laboratorio mediante pruebas de corto plazo y de deformación progresiva, y el modelado constitutivo para describir el comportamiento de la compactación por deformación progresiva. La mayoría de estos resultados están descritos en más detalle en otras publicaciones [1,2,3]. El propósito de este trabajo es dar un resumen final de los resultados obtenidos en las pruebas con rocas del Campo Geotérmico de Cerro Prieto, en Baja California, México.

DESCRIPCION DE ROCAS

Los núcleos seleccionados para las pruebas se obtuvieron en los almacenes de Cerro Prieto. Para las pruebas se intentó seleccionar material que fuera representativo del campo en general, pero este intento se vio limitado por la disponibilidad de núcleos. La Figura 1 muestra un mapa simplificado del campo geotérmico, indicando la localización de pozos de donde se obtuvieron los núcleos utilizados en las pruebas. La Figura 2 muestra un corte transversal esquemático del campo

indicando las profundidades a las cuales se obtuvieron los núcleos en los varios pozos. Este corte transversal no intenta representar la geología con exactitud, sino que pretende ser una guía para identificar la ubicación de núcleos. También se obtuvieron muestras de fluido de un cabezal de pozo. Dicho fluido se preservó mediante acidificación y se almacenó para uso posterior.

La Tabla 1 muestra los pozos y profundidades de donde se obtuvieron los 40 pies de núcleo total. En la Tabla 2 se ofrece un resumen de las propiedades de las rocas. En general, estas rocas eran areniscas de grano mediano a fino con una porosidad de alrededor del 20 por ciento. La mineralogía era sedimentaria con cantidades variables de alteración. La principal evidencia de alteración fue la aparición de epidota y de sílice autigénica, y la desaparición de calcita. La química del fluido (ajustada a las condiciones del yacimiento) fue de alrededor de 20,000 ppm de sólidos disueltos (principalmente sales), con valores de sílice cercanos a la saturación y cantidades moderadas de dióxido de carbono.

La Tabla 3 muestra valores específicos de porosidad y contenido de calcita para las rocas estudiadas. Se enfatiza el contenido de calcita porque el equilibrio químico del fluido juega un papel en muchos de los resultados de las pruebas de deformación plástica y permeabilidad, y porque se encontró que el equilibrio de los carbonatos es el más difícil de controlar. Por lo tanto, los resultados se consideran más fidedignos para rocas con poco o ningún contenido de calcita.

PROCEDIMIENTOS DE LAS PRUEBAS

En este trabajo se utilizaron varios sistemas de pruebas de Terra Tek. En la Figura 3 se muestra la configuración general de la muestra y las capacidades generales del sistema de pruebas. Todas las pruebas se efectuaron bajo condiciones de presión de confinamiento, presión de poro, temperatura y química del fluido iguales o cercanos a las condiciones *in situ*. La mayor parte de las muestras de la prueba fueron cilindros circulares de 2 pulgadas de diámetro por 4 pulgadas de largo.

En general, las presiones de confinamiento de las pruebas fueron menores que o iguales a 1 psi por pie de profundidad; las presiones de poro y las temperaturas se obtuvieron de datos del campo. En la Tabla 4 se resume las condiciones de prueba. En la mayoría de las pruebas se aplicó una carga axial de modo que el total del esfuerzo axial fuera aproximadamente de 1 psi por pie de profundidad, y el cociente entre el esfuerzo axial efectivo y la presión de confinamiento efectivo fuera 3/2.

Como se describe a continuación, se corrieron cuatro tipos de pruebas:

Pruebas básicas: Las mismas consistieron en lograr primero condiciones de yacimiento, seguidas luego de una de las siguientes tres posibles perturbaciones:

- a) Reducción de la presión de poro para simular

la producción del yacimiento mientras los otros esfuerzos se mantienen constantes, para obtener una compresibilidad para el modelado de compactación.

- b) Incremento de la presión de confinamiento mientras los otros esfuerzos se mantienen constantes, para comprobar la validez de los conceptos de esfuerzo efectivo.
- c) Reducción de la presión de poro mientras se ajusta la carga axial y la presión de confinamiento para mantener una compactación uniaxial, simulando la condición de compactación unidimensional usada comúnmente en el modelado de yacimientos.

Ultrasónicas: Dichas pruebas, realizadas a elevada temperatura y presión, se utilizaron para determinar las velocidades ultrasónicas bajo condiciones *in situ*, y luego para determinar el cambio de velocidades ultrasónicas causado por la reducción de la presión de poro. El propósito fue determinar si el incremento de velocidad causado por la compactación es suficiente como para ser detectado dentro del pozo con sondas sónicas o en la superficie con instrumentación sísmica.

Permeabilidad: Se examinó la permeabilidad de un número de rocas bajo condiciones *in situ* y se estudiaron los cambios ocasionados por la reducción de la presión de poro. Estas pruebas fueron realizadas en apoyo al modelado del yacimiento.

Deformación Plástica: Estas pruebas consistieron en establecer primero condiciones de yacimiento, reduciendo luego la presión de poro, como en muchas de las pruebas anteriores, pero manteniendo luego estas condiciones por largos períodos de tiempo (de hasta semanas). El propósito de estas pruebas fue determinar si la compactación continuaba, como un efecto dependiente del tiempo, mucho después que cesaran los cambios de esfuerzo y de presión. Este efecto podría tener implicaciones importantes en el modelado de compactación y asentamiento del terreno.

En todas las pruebas descritas se monitoreó y controlaron las propiedades químicas de los fluidos de manera que fueran representativas de las condiciones del yacimiento. En las pruebas de deformación progresiva se tomaron especiales y extensas precauciones ya que las interacciones químico-mecánicas pueden ser un factor en la deformación progresiva.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Pruebas Básicas:

En la Tabla 5 se muestran los resultados promedio, en términos de compresibilidad equivalente (incremento de la deformación volumétrica dividido por el incremento de esfuerzo efectivo) para cada tipo de prueba. En la Figura 4 se muestra el resultado de una prueba típica en la que se hizo variar en forma cíclica la presión de poro. En dicha prueba, el esfuerzo efectivo fue aumentado y disminuido varias veces para mostrar

el efecto de descarga/recarga cíclica. Nótese en cada ciclo la pequeña rigidización y la compactación permanente (irreversible).

Velocidades ultrasónicas:

Las velocidades ultrasónicas dadas en la Tabla 6 aumentan generalmente con una reducción de 1000 psi en la presión de poro (debido a compactación). El incremento promedio en V_p fue del 1.3 por ciento y en V_s del 2.1 por ciento. Estos incrementos fueron fácilmente medibles bajo condiciones de laboratorio controladas; sin embargo, se duda que puedan ser observadas en el campo debido a relaciones señal-ruido y problemas de repetibilidad.

Permeabilidad

Las permeabilidades se midieron a presiones in situ, a temperatura ambiente, temperatura elevada, reducción de presión de poro de 1000 psi, y después la deformación progresiva. En la Tabla 7 se dan los resultados promedio. Se observa poca o ninguna reducción ocasionada por la disminución de la presión de poro; sin embargo, una reducción significativa se asocia con la deformación progresiva. Es incierto cuánta de la reducción asociada con la deformación progresiva se deba a efectos químicos de no-equilibrio y cuánta reducción ocurriría bajo condiciones de campo.

Deformación Progresiva

En la Tabla 8 se ofrecen los resultados promedio de deformación progresiva. La velocidad de deformación progresiva decrece cuando aumenta la duración de la prueba. La velocidad de deformación progresiva observada de alrededor de 10^{-9} /registro parece insignificante al principio. Sin embargo, si la misma continuara por seis años, se eliminaría toda la porosidad. Por lo tanto, es importante saber como extrapolar a varios años las velocidades de deformación progresiva observadas en unos pocos días o semanas. La Figura 5 muestra los resultados de tres típicas pruebas de deformación progresiva. La disminución inicial de volumen es causada por la reducción inicial de la presión de poro y la posterior disminución se debe a la deformación progresiva.

INTERPRETACION Y CONCLUSIONES

Las compresibilidades de los núcleos de Cerro Prieto obtenidas del comportamiento instantáneo en respuesta a cambios de esfuerzo que simulan la explotación del yacimiento son típicas de yacimientos de areniscas porosas. Las compresibilidades son del orden de 1×10^{-6} psi⁻¹. Las velocidades ultrasónicas aumentan un 1-2 por ciento coincidiendo con la disminución de porosidad. Es incierto si este pequeño cambio en la velocidad sónica podría utilizarse en el campo como una herramienta de diagnóstico.

Las permeabilidades son muy bajas, del orden de unos pocos milidarcies, y fuertemente afectadas por la deformación progresiva. Parece muy probable que las trayectorias de flujo del fluido en las rocas aquí examinadas, que están intactas y no fracturadas, no sean representativas de lo que sucede en el yacimiento. Se deduce que las fracturas u otros conductos que permitan el paso del fluido deben jugar un papel en la explotación del yacimiento.

La deformación progresiva provocada por la reducción de la presión de poro es un fenómeno importante en estas rocas, y si continuara a la velocidad observada en el laboratorio, conduciría a una gran reducción de la porosidad en el campo en un período de años. Es importante desarrollar un método de extrapolación del comportamiento dependiente del tiempo observado en la laboratorio para períodos mayores, correspondientes a la duración de la explotación yacimiento. La compresibilidad efectiva, cuando se tiene en cuenta la deformación progresiva (definida como el cambio a largo plazo del volumen dividido por el cambio de presión de poro) puede ser varios órdenes de magnitud mayor que las compresibilidades aparentes iniciales.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer el apoyo y ayuda del U.S. Department of Energy, División of Geothermal Energy, de la Earth Sciences Division del Lawrence Berkeley Laboratory, y de la Comisión Federal de Electricidad de México. Personas que contribuyeron enormemente fueron John Noble del LBL (ahora con Phillips Petroleum), Ing. Alfredo Mañón de CFE, Ahmed Abou-Sayed de Terra Tek y Kenneth Wolgemuth de Terra Tek (ahora con Amerada Hess).