

SOME PHYSICAL PROPERTIES OF CERRO PRIETO CORES

W. H. Somerton

Professor of Petroleum Engineering, University of California
Berkeley, California, USA

INTRODUCTION

The physical properties of most rocks vary considerably depending on the confining stress and pore fluid pressure, temperature, and the type and amount of fluid saturation. Thus properties measured at surface conditions of pressure and temperature (as in routine core analyses) may be substantially different from the same properties measured at simulated reservoir conditions. Reservoir calculations on storage capacity and flow behavior based on routine core analysis data may be very misleading. Interpretation of well log data may also be in serious error if the effects, in particular, of temperature on sonic velocities and formation resistivity factors, are not properly accounted for.

In the present work a number of physical properties of core samples taken from the general area of the Cerro Prieto geothermal field have been measured at elevated temperatures and pressures. Results are reported for P and S wave velocities, and dynamic deformation properties have been calculated from these data. The effect of temperature at elevated stress on the permeability of a Cerro Prieto sandstone core was evaluated. Thermal properties of a suite of Cerro Prieto cores have been measured and the results are presented in a companion paper.¹

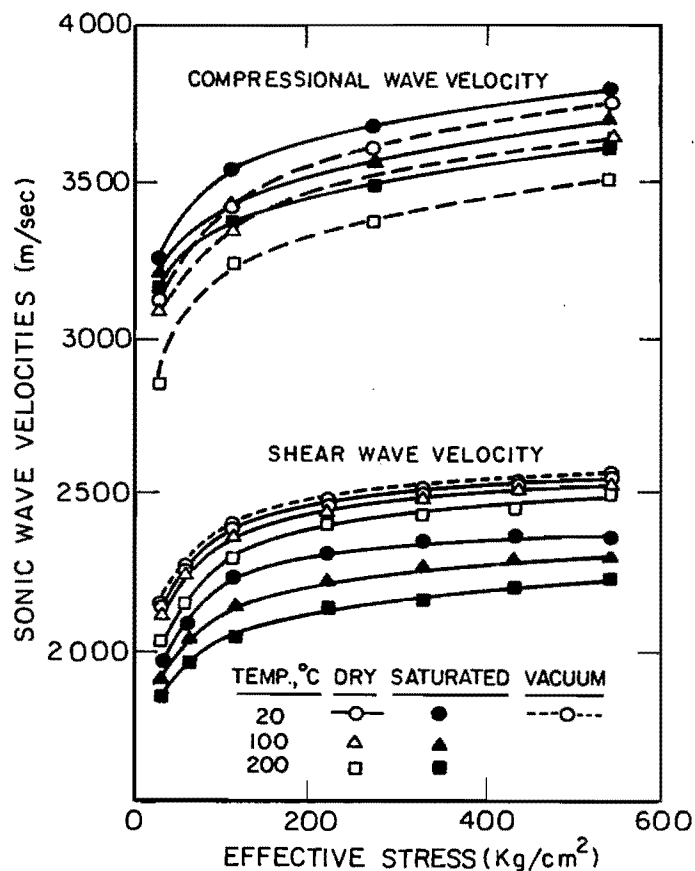
Most of the core samples used in the tests have been received from the University of California, Riverside project² and mineralogical data have been provided for these cores. For the most part, the wells from which the core samples were obtained were outside of the limits of geothermal development and thus the data are perhaps not directly representative of formations within the present producing area. Core samples, however, are from the same geologic formations (continental deltaic sediments derived from the Colorado River) and are taken from approximately the same depth intervals as the producing wells.

EFFECTS OF ENVIRONMENT ON ROCK PROPERTIES

The effects of temperature and pressure act in opposite directions on rock properties in many cases. For example, P and S wave velocities, deformation moduli, such as Young's modulus and bulk modulus, and strength of rocks increase with stress but decrease with temperature. Thermal conductivity and diffusivity as well as formation resistivity factor change in the same manner, although data on the latter property are sparse. Permeability and porosity, on the other hand, both decrease with increased stress and increased temperature.

The type and amount of fluid occupying the pore spaces also affect rock properties. Compressional velocities are increased and shear velocities are decreased with increased liquid saturation. The effects of fluid saturation on permeability, and thus the relative permeability concept, are well known. The type of fluid present may have a bearing on the effects of other parameters. For example, the presence of water in silicate rocks may cause sharp decreases in permeability with increased temperature. The same rocks saturated with oil or gas may show little or no change in permeability with temperature.

To give an idea of the magnitude of the effects of temperature, pressure and fluid saturation on rock properties, a few examples from earlier work are presented in the following.



XBL 7812-13299

Figure 1. Effects of temperature and stress on sonic velocities of Berea sandstone.

Sonic Velocities

The effects of temperature, stress and fluid saturation on compressional wave (P) and shear wave (S) velocities of a typical outcrop sandstone (Berea) are shown in Fig. 1. The effect of stress is generally represented by an equation of the form

$$V_{p,s} = A_{p,s}(\sigma)^{1/x_{p,s}} \quad (1)$$

According to Palen³ the values of constant (A) vary widely for different rock types ranging from 500 for softer rocks to 3000 for hard rocks in shear. Constants for compressional wave velocities are approximately 50 percent higher. The exponent (x) ranges from a value of 6 for unconsolidated sands to well over 40 for hard rocks.

The effects of temperature and fluid saturations on wave velocities in rocks have not yet been quantified but are the subjects of current investigations.

Bulk Compressibility

Figure 2 shows the effects of stress and temperature on the bulk compressibility of Berea sandstone. The calculated values at 20°C are from earlier work⁴ which showed that a correction factor could be applied to compressibilities calculated from sonic data as

$$C_{bd}/C_{bs} = 5.0 \sigma^{1/6} \quad (2)$$

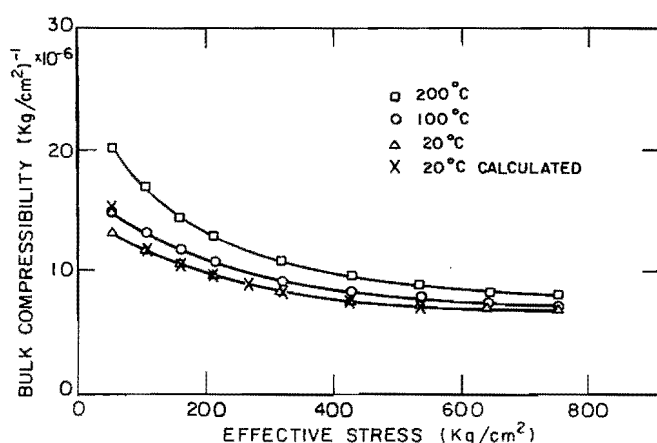
where: C_{bd} = compressibilities calculated from sonic data

C_{bs} = compressibilities from static data

σ = effective stress

The quantity C_{bd} is calculated from sonic data using the well-known expression for dynamic bulk modulus

$$K = 1/C_{bd} = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \quad (3)$$



XBL 7812-13600

Figure 2. Effects of temperature and stress on bulk compressibility of Berea sandstone.

where: V_p = compressional velocity

V_s = shear velocity

ρ = bulk density

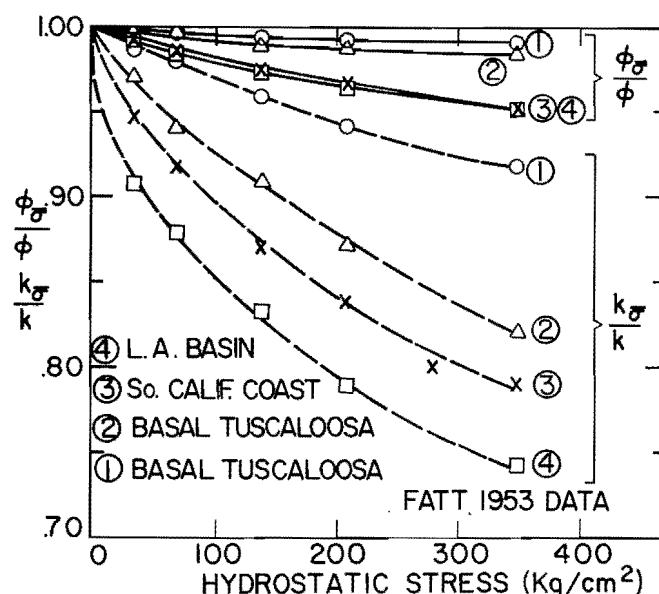
Except for the lowest stress value, corrected dynamic bulk compressibility values shown in Fig. 2 agree quite well with measured static values.

Porosity

The effect of stress on the porosity of sandstone is shown in Fig. 3 taken from early work by Fatt.⁵ Figure 4 shows calculated changes in porosity with stress and temperature for Berea sandstone. These calculations were based on the above bulk volume compressibility data and pore volume compressibility data presented by von Gonten and Choudhary.⁶ It is interesting to note that the effect of increased temperature is to decrease porosity. Compressional velocity, which is used in sonic log measurements, also decreases with increased temperature. Since the time-average method for interpreting sonic logs shows a reciprocal relation between velocity and porosity, the above effects could lead to substantial errors in the interpretation.

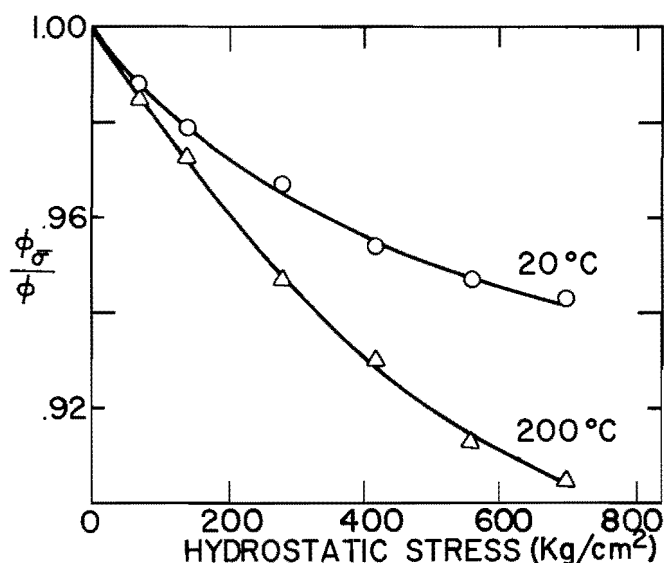
Permeability

The effect of stress in reducing permeability of rocks has been well established. Figure 3 shows the results of early work by Fatt.⁵ The effects of temperature in reducing permeability of rocks have only recently been observed. Results of measurements by Casse⁷ are shown in Fig. 5. The substantial reduction in permeability appears to result from clay-quartz-water reactions at the high pressures and temperatures. Negligible effects of temperature have been observed in cases where oil or gases were the flowing fluids or in cases of rocks containing no clay or quartz.



XBL 7812-13601

Figure 3. Effect of stress on porosity and permeability of sandstones.



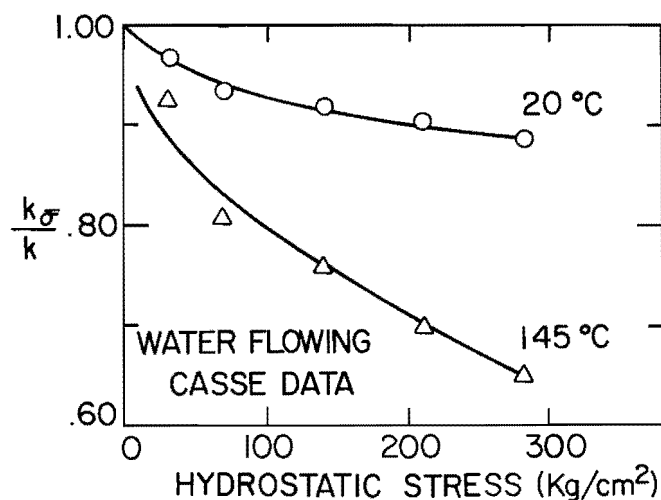
XBL 7812-13602

Figure 4. Calculated effects of temperature and stress on porosity of Berea sandstone.

Electrical Properties

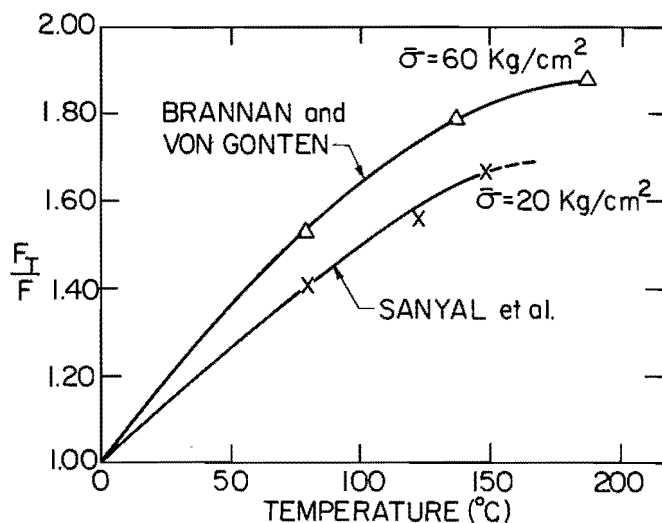
The electrical resistivity factor used in quantitative interpretation of electrical logs is known to increase with increased stress.⁸ The very large effect of temperature on resistivity factor is shown in Fig. 6 in which data by Sanyal, et al.⁹ and Brannon and von Gonten¹⁰ are compared. Causes of this large effect are unknown and are the subject of continuing research in our laboratory.

The other important electrical parameter, the saturation exponent (n) in Archie's equation, is also known to be affected by stress. Dobrynin¹¹ has shown that (n) increases with increased stress. One might also expect this value to increase with temperature although no data to this effect have been found in the technical literature.



XBL 7812-13603

Figure 5. Effect of temperature and stress on permeability of Berea sandstone.



XBL 7812-13604

Figure 6. Effects of temperature and stress on formation resistivity factor for Berea sandstone.

CONCEPT OF EFFECTIVE STRESS

In the foregoing and in the remainder of this paper, the terms stress and pressure have been used interchangeably. Technically this is not correct and reference should be made to confining or overburden stress and to pore fluid pressure. Effective stress is given as

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{conf}} - N \times P_p \quad (4)$$

where (N) is an empirical constant expressing the fraction of the pore fluid pressure (P_p) which effectively counteracts the confining stress (σ_{conf}). Chierici, et al.¹² contend that (N) is a strong function of clay or shale content of sandstones, the value decreasing with increase in clay content.

One should note that if in the above relationship for effective stress the value of (N) is less than 1.0 (N is often taken as 0.85), change in pore fluid pressure would have less effect on effective stress than change in overburden or confining stress. Recent work by Zoback and Byerlee¹³ shows that at least in the case of pore properties (porosity and permeability), change in pore pressure has a substantially greater effect than change in confining stress. To explain this effect these investigators propose a model consisting of two parts -- the solid framework of the rock and a softer pore lining and grain cementing material. Changes in pore fluid pressure would thus have a greater effect on the softer pore lining and cementing material than on the harder solid framework of the rock. The "effective stress" as far as pore properties are concerned would thus require the value of (N) to be greater than unity.

We must conclude from the above that to relate laboratory measured data directly to subsurface reservoir performance, more needs to be

known about the response of rocks to different subsurface stress conditions.

MEASUREMENTS ON CERRO PRIETO CORES

Physical properties measurements on Cerro Prieto cores have been limited due partly to the lack of cores of sufficient size to run the tests and to the large amount of time required for most measurements. Core size requirements are less restrictive for thermal conductivity measurements and a substantial number of cores have been run as reported in a companion paper.¹ The following data are presented only to show the order of magnitude of the effects of pressure, temperature and fluid saturation on "typical" Cerro Prieto rocks. These results should be useful in reaching decisions on the extent of future work in this area.

Velocity and Deformation Properties

Measured compressional and shear velocities for a Cerro Prieto sandstone are shown in Figs. 7 and 8, respectively. The effects of effective stress, temperature and fluid saturation are shown. The pore fluid pressure was maintained high enough only to keep the saturating brine (6000 ppm KCl) in liquid phase.

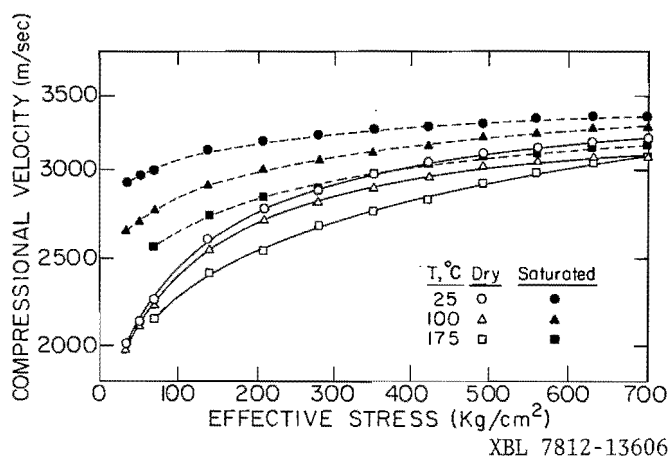


Figure 7. Compressional wave velocities for Cerro Prieto sandstone.

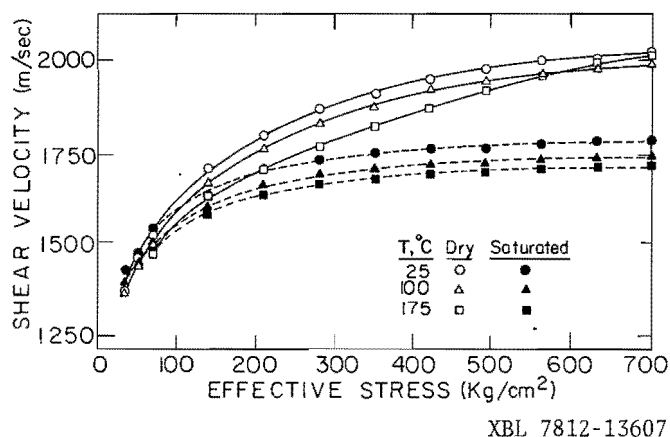


Figure 8. Shear wave velocities for Cerro Prieto sandstone.

The value of the exponent (x) in Eq. 1 averages about 9.0 for this soft sandstone in dry condition, being much closer to the theoretical value of 6.0 for unconsolidated sands than would be expected for harder sandstones. For the liquid saturated core, the value of (x) increases to about 20, indicating a much lesser effect of stress in this case. The value of constant (A) varies depending on temperature, fluid saturation and whether shear or compressional velocity. No analytical expression has yet been developed relating the value of (A) to the above parameters. However, this is part of our continuing research.

Based on the well-known relationships between compressional and shear wave velocities and dynamic elastic moduli, Young's modulus, bulk modulus and Poisson's ratio have been calculated and are plotted as shown in Figs. 9, 10 and 11, respectively. Bulk modulus should provide useful data for subsidence calculations. Young's modulus and Poisson's ratio data may be useful for well-bore stability studies as, for example, in the mechanical properties log.¹⁴

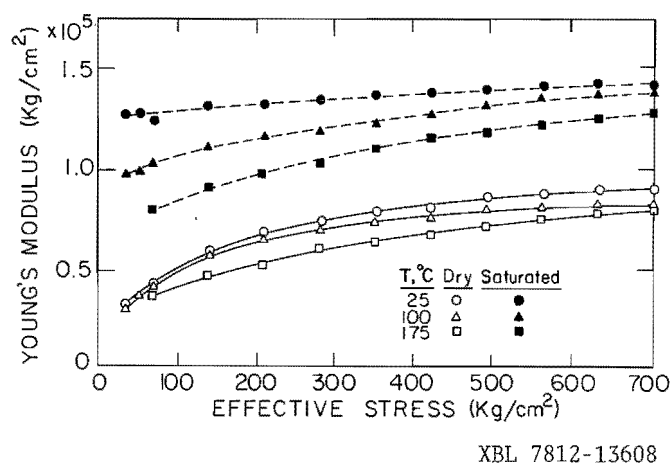


Figure 9. Dynamic Young's modulus for Cerro Prieto sandstone.

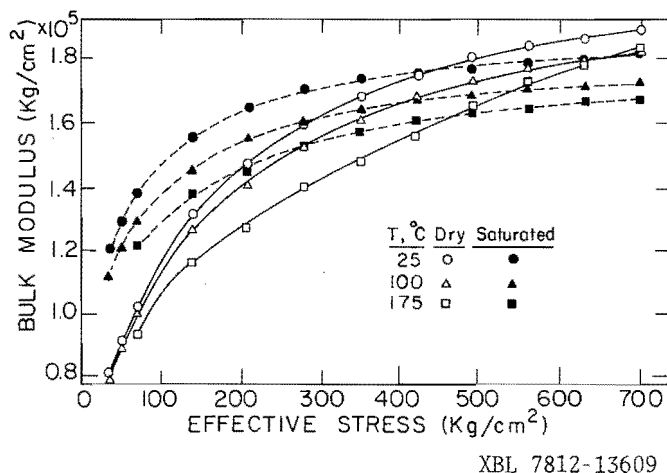
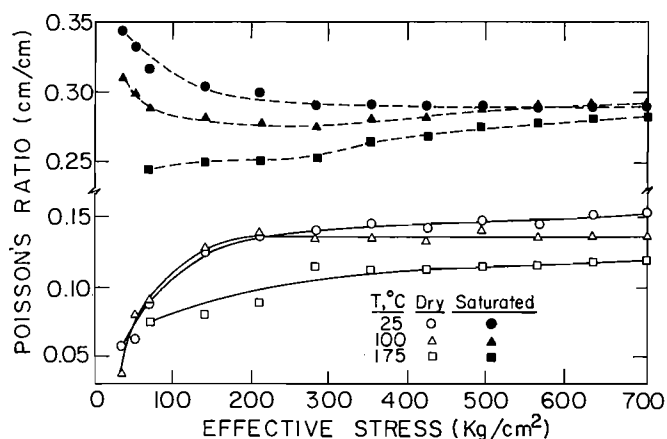


Figure 10. Dynamic bulk modulus for Cerro Prieto sandstone.



XBL 7812-13610

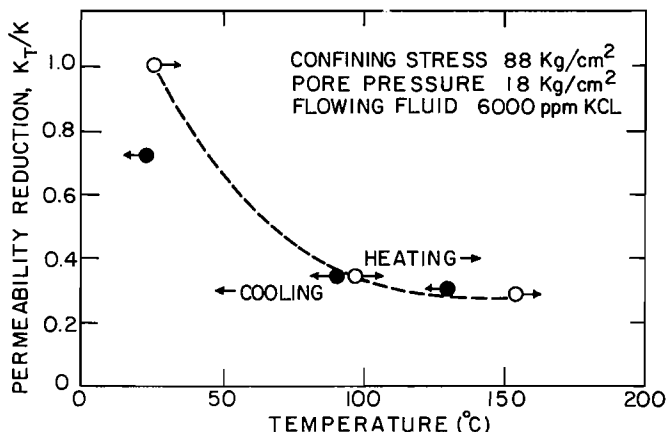
Figure 11. Dynamic Poisson's ratio for Cerro Prieto sandstone.

An interesting feature of Fig. 11 is the two-fold difference in Poisson's ratio for dry and liquid saturated rocks. This offers the possibility of detecting liquid/gas interfaces in subsurface formations where both shear and compressional wave velocities are measured in boreholes.

Fluid Flow Behavior

The Cerro Prieto core tested in the present work showed substantial reduction in flow capacity with increased temperature. Figure 12 shows that at 155°C the permeability of the core to 6000 ppm KCl solution was reduced to less than 30 percent of its room temperature value. Upon cooling the heated sample to room temperature, the permeability was restored to about 75 percent of its original value.

The above flow behavior is typical for a low permeability sandstone. The causes for the large permeability reduction are not clearly understood. The several possible causes include clay swelling, thermal expansion of mineral grains, quartz



XBL 7812-13605

Figure 12. Effect of temperature on permeability of Cerro Prieto sandstone.

dissolution and subsequent plugging, and electrokinetic effects. The use of 6000 ppm KCl solution as the flowing fluid has been successful in minimizing the reduction in permeability due to swelling of clay minerals. There is the possibility that its effectiveness in this regard is reduced at elevated temperatures. The permanent reduction in permeability may be due to migration of clay minerals and may be associated with clay swelling. The dissolution of quartz and reduction in apparent permeability either due to the silica gel formed or redeposition of silica in pore necks is being investigated. Thermal expansion of mineral grains at pore necks could have some effect on reduction of permeability with increased temperature and this is being investigated by use of a network model containing convergent-divergent pore channels. Electrokinetic or streaming potential effects leading to counter-flow of fluids has also been considered as a partial cause of reduction in apparent permeability.

Other Properties

In addition to further velocity and permeability tests on other Cerro Prieto cores, several other measurements should be made to provide more data for log interpretation and reservoir performance predictions. A new apparatus has been constructed and is now being tested to measure both pore and bulk compressibilities and thermal expansions at elevated temperatures and pressures. We also now have the capability of measuring electrical resistivity factor at elevated temperature. Other capabilities include the measurement of thermal properties as will be covered in a companion paper.

A new apparatus which will permit the simultaneous measurement of all of the above mentioned properties, is in the final design stages and construction will begin in the very near future. This apparatus will be available for testing Cerro Prieto cores.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

This work has demonstrated the importance of measuring the physical properties of rocks at simulated subsurface conditions. Substantial errors in well log interpretation and in reservoir performance prediction calculations may result if stress and temperature dependence of physical properties is not considered. Although few tests have been made specifically on Cerro Prieto cores, results of these tests demonstrate the large changes in properties with temperature and stress which do occur.

We have apparatus available for measuring most of the rock properties needed in the development of geothermal resources. This apparatus could be made available to provide the rock test data required for the Cerro Prieto project.

REFERENCES

1. Martinez-Baez, L. F., "Experimental investigation of thermal conductivity of core samples from the Cerro Prieto geothermal field and a proposed prediction method", paper prepared

- for First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, San Diego, Calif., Sept. 20-22, 1978.
2. Elders, W. A., et al, "Comprehensive study of samples from geothermal reservoirs", Inst. of Geoph. and Plan. Physics., Univ. of Calif, Riverside, report 77/37, December 1977.
 3. Palen, W. A., "The effects of temperature pressure and saturation on sonic velocities and dynamic elastic moduli of reservoir sandstones", M.S. thesis, University of Calif., Berkeley, January 1978.
 4. Somerton, W. H., El-Shaarani, A. H. and Mobarak, S. M., "High temperature behavior of rocks associated with geothermal type reservoirs", Soc. Pet. Engrs. preprint 4897, Calif. Reg. Mtg., April 4-5, 1974.
 5. Fatt, I., "The effect of overburden pressure on relative permeability", J. of Pet. Tech., Vol. 5, No. 10, Oct. 1953, p. 15-17.
 6. Von Gonten, W. D. and Choudhary, B. K., "The effect of pressure and temperature on pore volume compressibility", Soc. Pet. Engrs. Preprint 2526, Sept. 1969.
 7. Casse, F. J., "The effect of temperature and confining pressure on fluid flow properties of consolidated rocks", Ph.D. Dissertation, Stanford University, November 1974.
 8. Fatt, I., "Effect of overburden and reservoir pressure on electric logging formation factor", Bull. Amer. Assoc. Pet. Geol., Vol. 41, No. 11, Nov. 1957, p. 2456-66.
 9. Sanyal, S. K., Marsden, S. S. and Ramey, H. J., Jr., "The effect of temperature on electrical resistivity of porous media", Trans. Soc. Prof. Well Log Anal., 13th Symp., May 1972.
 10. Brannan, G. O. and Von Gonten, W. D., "The effect of temperature on the formation resistivity factor of porous media", Trans. Soc. Prof. Well Log Anal., 14th Symp., May 1973.
 11. Dobrynin, V. M., "Effect of overburden pressure on some physical properties of sandstones", AIME Pet. Trans., Vol. 225, 11-360, 1962.
 12. Chierici, G. L., Ciucci, G. M., Eva, F. and Long, G., "Effect of overburden pressure on some petrophysical characteristics of sandstone reservoir rocks", 7th World Pet. Congr., Mexico City, 1967.
 13. Zoback, M. D. and Byerlee, J. D., "Permeability and Effective Stress", Amer. Assoc. Pet. Geol. Bul., Vol. 59, p. 154, 1975.
 14. Tixier, M. P., Loveless, G. W. and Anderson, R. A., "Estimation of formation strength from the mechanical properties log", J. Pet. Tech., p. 283, March 1975.

ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS DE NUCLEOS DE CERRO PRIETO

INTRODUCCION

Las propiedades físicas de la mayoría de las rocas varían considerablemente en función de los esfuerzos de confinamiento y de la presión del fluido contenido en los poros, de la temperatura, y del tipo y grado de saturación de los fluidos. Por lo tanto, las propiedades medidas bajo condiciones superficiales de presión y temperatura (como en análisis rutinarios de núcleos) pueden ser substancialmente diferentes de las mismas propiedades medidas bajo condiciones simuladas de yacimiento. Los cálculos sobre capacidad de almacenamiento del yacimiento y comportamiento del flujo en el mismo, basados en datos rutinarios de análisis de núcleos pueden ser muy engañosos. La interpretación de los datos de registro de pozo también puede estar seriamente equivocada si no se consideran adecuadamente los efectos, sobre todo de la temperatura, sobre las velocidades sónicas y los factores de resistividad de la formación.

En el presente trabajo se han medido, a temperaturas y presiones elevadas, diversas propiedades físicas de muestras de núcleos tomadas del

área general del campo geotérmico de Cerro Prieto. Se presentan los resultados para velocidades de ondas P y S; en base a estos datos se han calculado las propiedades de deformación dinámica. Se evaluó el efecto de la temperatura a esfuerzos elevados sobre la permeabilidad de un núcleo de arenisca de Cerro Prieto. Se midieron las propiedades térmicas de una serie de núcleos de Cerro Prieto, y se presentan los resultados en un trabajo complementario¹.

La mayoría de las muestras de núcleos utilizadas en las pruebas fueron provistas por el proyecto Riverside de la Universidad de California², que también proporcionó datos mineralógicos para dichos núcleos. En su mayoría, los pozos de los que se tomaron las muestras estaban fuera de los límites del campo desarrollado, y por lo tanto es posible que los datos no sean directamente representativos de las formaciones del área productora actual. Sin embargo, las muestras provienen de las mismas formaciones geológicas (sedimentos deltaicos continentales derivados del Río Colorado); tomadas aproximadamente a los mismos intervalos de profundidad que los pozos en producción.

EFFECTOS DEL MEDIO AMBIENTE SOBRE LAS PROPIEDADES DE LAS ROCAS

En muchos casos los efectos de la temperatura y presión actúan en direcciones opuestas sobre las propiedades de la roca. Por ejemplo, las velocidades de las ondas P y S, los módulos de deformación, tales como el módulo de Young y el módulo volumétrico, y la resistencia de las rocas aumentan con el esfuerzo, pero disminuyen con la temperatura. La conductividad térmica y la difusividad, así como el factor de resistividad de la formación cambian de la misma manera, aunque existen pocos datos sobre esta última propiedad. Por otra parte, la permeabilidad y la porosidad disminuyen con un mayor esfuerzo y una mayor temperatura.

El tipo y cantidad de fluido que ocupa los espacios de los poros también afecta las propiedades de la roca. Las velocidades de compresión aumentan y las velocidades de corte disminuyen cuando aumenta la saturación del líquido. Los efectos de la saturación de fluidos sobre la permeabilidad, y por lo tanto, el concepto de permeabilidad relativa, son bien conocidos. El tipo de fluido presente puede tener influencia sobre los efectos de otros parámetros. Por ejemplo, la presencia de agua en rocas de silicato puede causar disminuciones muy marcadas en la permeabilidad al aumentar la temperatura. Las mismas rocas saturadas con petróleo o gas pueden sufrir muy poco o ningún cambio de la permeabilidad con la temperatura.

Para dar una idea de la magnitud de los efectos de la temperatura, presión y saturación de fluidos sobre las propiedades de la roca, se presentan a continuación algunos ejemplos de trabajos anteriores.

Velocidades Sónicas

Los efectos de la temperatura, esfuerzo y saturación de fluidos sobre las velocidades de la onda de compresión (P) y la onda de corte (S) en una arenisca aflorante típica (Berea) aparecen en la Figura 1. El efecto del esfuerzo por lo general se representa mediante una ecuación de la forma

$$V_{p,s} = A_{p,s}(\sigma)^{1/x_{p,s}} \quad (1)$$

Según Palen³ los valores de la constante (A) en esfuerzo cortante para los diferentes tipos de roca varían considerablemente, desde 500 para las rocas más blandas, hasta 3000, para rocas duras. Las constantes para velocidades de onda de compresión son aproximadamente 50 por ciento más elevadas. El exponente (x) varía entre un valor de 6, para arenas no consolidadas, hasta bien arriba de 40, para rocas duras.

Los efectos de la temperatura y las saturaciones de fluidos sobre las velocidades de onda en rocas no se han cuantificado aún, pero están siendo investigados actualmente.

Compresibilidad Volumétrica

La Figura 2 muestra los efectos del esfuerzo y la temperatura sobre la compresibilidad volumétrica de la arenisca Berea. Los valores calculados a 20°C se obtuvieron de trabajos anteriores⁴ que demostraron que se puede aplicar un factor de corrección a las compresibilidades calculadas a partir de datos sónicos como

$$C_{bd}/C_{bs} = 5.0 \sigma^{1/6} \quad (2)$$

en que: C_{bd} = compresibilidades calculadas a partir de los datos sónicos

C_{bs} = compresibilidades obtenidas de datos estáticos

σ = esfuerzo efectivo

La cantidad C_{bd} se calcula a partir de los datos sónicos utilizando la bien conocida expresión para el módulo volumétrico dinámico

$$K = 1/C_{bd} = \rho[V_p^2 - (4/3)V_s^2]$$

en que: V_p = velocidad de compresión (3)

V_s = velocidad de corte

ρ = densidad global

Con excepción del esfuerzo de más bajo valor, los valores corregidos de compresibilidad volumétrica dinámica que aparecen en la Figura 2, concuerdan bastante bien con los valores estáticos medidos.

Porosidad

El efecto del esfuerzo sobre la porosidad de la arenisca aparece en la Figura 3, tomada de un trabajo anterior de Fatt⁵. La Figura 4 muestra las variaciones calculadas de la porosidad en función del esfuerzo y de la temperatura para la arenisca Berea. Dichos cálculos de basaron en los datos de compresibilidad volumétrica mencionados y en datos de compresibilidad volumétrica de poros presentados por von Gonten y Choudhary⁶. Es interesante notar que el efecto de una mayor temperatura es el de disminuir la porosidad. La velocidad de compresión, que se utiliza en los registros de medidas sónicas, también disminuye cuando aumenta la temperatura. Puesto que el método de promedio de tiempo para interpretar los registros sónicos muestra una relación recíproca entre la velocidad y la porosidad, los efectos mencionados podrían llevar a errores substanciales de interpretación.

Permeabilidad

Ha sido bien establecido el efecto del esfuerzo en la reducción de la permeabilidad de las rocas. La Figura 3 muestra los resultados del temprano trabajo de Fatt⁵. Los efectos de la temperatura en la reducción de la permeabilidad de las rocas se han observado sólo recientemente. En la Figura 5 aparecen los resultados de las medidas de Casse⁷. La substancial reducción de la permeabilidad parece resultar de reacciones entre arcilla, cuarzo, y agua a altas presiones y temperaturas. Se ha observado que los efectos de la temperatura son insignificantes en casos en

que los fluidos son petróleo o gases, o en casos de rocas sin arcilla o cuarzo.

Propiedades Eléctricas

Se sabe que el factor de resistividad eléctrica utilizado en la interpretación cuantitativa de los registros eléctricos aumenta cuando aumenta el esfuerzo⁸. El importante efecto que tiene la temperatura sobre el factor de resistividad se muestra en la Figura 6, en la que se comparan datos de Sanyal y otros⁹, y Brannon y von Conten¹⁰. Las causas de este importante efecto son desconocidas y están siendo investigadas continuamente en nuestro laboratorio.

Se sabe que el otro parámetro eléctrico de importancia, el exponente de saturación (n) en la ecuación de Archie, también es afectado por el esfuerzo. Dobrynin¹¹ ha demostrado que (n) aumenta cuando aumenta el esfuerzo. También podría esperarse que esta cantidad aumentará con la temperatura, aunque en la literatura técnica no se han encontrado datos que lo comprueben.

CONCEPTO DEL ESFUERZO EFECTIVO

En lo que antecede y en lo que resta de este trabajo se utilizan indistintamente los términos esfuerzo y presión. Técnicamente esto no es correcto, y se debe hacer referencia al esfuerzo de confinamiento o de sobrecarga, y a la presión de los fluidos en los poros. El esfuerzo efectivo está dado como:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{conf}} - N \times P_p \quad (4)$$

en que (N) es una constante empírica que expresa la fracción de la presión de fluidos de poro (P_p) que contrarresta efectivamente el esfuerzo de confinamiento (σ_{conf}). Chierici y otros¹² afirman que (N) es una fuerte función del contenido de arcilla o lutita de las areniscas, cuyo valor disminuye cuando aumenta el contenido de arcilla.

Debe notarse que si en la relación anterior para el esfuerzo efectivo el valor de (N) es menor que 1.0 (N frecuentemente es tomado como 0.85), los cambios en la presión de los fluidos de poro tendrían menos efecto sobre el esfuerzo efectivo que los cambios en el esfuerzo de confinamiento o sobrecarga. Trabajos recientes por Zoback y Byerlee¹³ demuestran que por lo menos en el caso de propiedades de los poros (porosidad y permeabilidad), el cambio en la presión de los poros tiene un efecto bastante mayor que el cambio en el esfuerzo de confinamiento. Para explicar este efecto los investigadores proponen un modelo que consiste de dos partes -- la estructura sólida de la roca, y un material más blando que reviste los poros y cementa los granos. En esta forma los cambios en la presión de fluidos de poro tendrían un mayor efecto sobre el material más blando que sobre la estructura sólida más dura de la roca.

El "esfuerzo efectivo" requeriría pues, en lo que se refiere a las propiedades de los poros, que el valor de (N) fuera mayor que uno.

Debemos concluir por lo anterior que para poder relacionar directamente los datos medidos

en el laboratorio con el comportamiento de yacimientos subterráneos se requieren mayores conocimientos sobre la reacción de las rocas a las diferentes condiciones de esfuerzo subterráneo.

MEDIDAS EN LOS NÚCLEOS DE CERRO PRIETO

Las mediciones de las propiedades físicas de los núcleos de Cerro Prieto fueron limitadas debido parcialmente a la falta de núcleos de suficiente tamaño para hacer las pruebas y a la gran cantidad de tiempo requerido por la mayoría de las medidas. Los requerimientos de tamaño de núcleo son menos restrictivos para las medidas de conductividad térmica, y se ha medido un número importante de núcleos, según se informa en un trabajo complementario¹. Los siguientes datos se presentan sólo para ilustrar el orden de magnitud de los efectos de presión, temperatura y saturación de fluidos sobre las rocas "típicas" de Cerro Prieto. Estos resultados deberían ser de utilidad para tomar decisiones sobre la magnitud de trabajos futuros en esta área.

Propiedades de Velocidad y Deformación

En las Figuras 7 y 8 aparecen respectivamente las velocidades de compresión y de corte para una arenisca de Cerro Prieto. Se muestran los efectos de esfuerzo efectivo, temperatura y saturación de fluidos. La presión del fluido en los poros se mantuvo suficientemente alta como para mantener en fase líquida la salmuera que satura la roca (6,000 ppm KCl).

El valor del exponente (x) en la Ecuación 1 promedia alrededor de 9.0 para esta arenisca blanda en condiciones secas, acercándose mucho más al valor teórico de 6.0 para arenas no consolidadas que lo que se esperaría para areniscas más duras. Para el núcleo saturado de líquido el valor de (x) aumenta a alrededor de 20, indicando en este caso un efecto mucho menor del esfuerzo. El valor de la constante (A) varía en función de la temperatura, saturación de fluidos y de si la velocidad es de compresión o de corte. No se ha desarrollado aún ninguna expresión analítica que relacione el valor de (A) con los parámetros mencionados. Sin embargo, esto es parte de la investigación que estamos realizando.

Mediante las bien conocidas relaciones entre las velocidades de las ondas de compresión y de corte, y los módulos de elasticidad dinámica, se ha calculado el módulo de Young, el módulo volumétrico y la relación de Poisson, graficados en las Figuras 9, 10 y 11, respectivamente. El módulo volumétrico debería proporcionar datos útiles para los cálculos de asentamiento. Los datos del módulo de Young y de la relación de Poisson pueden ser útiles para estudios de estabilidad del pozo, como por ejemplo, en el registro de propiedades mecánicas¹⁴.

Una característica interesante de la Figura 11 es la diferencia entre la relación de Poisson para las rocas secas y saturadas de líquido. Esto ofrece la posibilidad de detectar superficies de contacto entre líquido y gas en formacio-

nes subterráneas cuando se miden en pozos las velocidades de onda de compresión y de corte.

Comportamiento del Flujo de Fluidos

El núcleo de Cerro Prieto estudiado en el presente trabajo mostró una reducción importante de la capacidad de flujo al incrementar la temperatura. La Figura 12 muestra que a 155°C la permeabilidad del núcleo a una solución de 6000 ppm KCl se redujo a menos de 30 por ciento de su valor a temperatura ambiente. Al enfriar la muestra hasta llevarla nuevamente a temperatura ambiente, se restauró la permeabilidad a aproximadamente 75 por ciento de su valor original.

El comportamiento descrito es típico de areniscas de baja permeabilidad. Las causas de la gran reducción en permeabilidad no se comprenden con claridad. Las varias causas posibles incluyen expansión de la arcilla, expansión térmica de granos minerales, disolución de cuarzo y taponamiento subsiguiente, y efectos electrocinéticos. El uso de una solución de 6000 ppm KCl como fluido resultó efectivo para reducir al mínimo la disminución de la permeabilidad debido a la expansión de los minerales de arcilla. Existe la posibilidad de que su efectividad en este aspecto se reduzca a temperaturas elevadas. La reducción permanente de la permeabilidad puede deberse a una migración de los minerales de arcilla, y puede asociarse con la expansión de la arcilla. Se está investigando la disolución de cuarzo y la reducción en la permeabilidad aparente ya sea debida a la formación de gel de sílice o al redepósito de sílice en los cuellos de los poros. La expansión térmica de los granos minerales en los cuellos de los poros podría tener algún efecto sobre la reducción de la permeabilidad al aumentar la temperatura y esto se está investigando mediante un modelo que contiene canales de poros divergentes y convergentes. También se consideraron potenciales electrocinéticos y de corriente que conducen a contraflujos de fluidos, como causas parciales de la reducción de la permeabilidad aparente.

Otras Propiedades

Además de pruebas adicionales de velocidad y permeabilidad en otros núcleos de Cerro Prieto deben hacerse varias otras mediciones para proporcionar mayor información para la interpretación de los registros y las predicciones del comportamiento del yacimiento. Se ha construido un nuevo aparato que está a prueba actualmente, para medir las compresibilidades tanto volumétricas como de poro, y las expansiones térmicas a temperaturas y presiones elevadas. Además, ahora tenemos la capacidad de medir el factor de resistividad eléctrica a temperaturas elevadas. Entre otras capacidades se incluye la medición de propiedades térmicas, según se trata en un artículo complementario¹.

Está a punto de completarse el diseño de un aparato nuevo que permitirá la medición simultánea de todas las propiedades mencionadas anteriormente; su construcción se iniciará en un futuro muy

cercano. Se contará con este aparato para las pruebas de los núcleos de Cerro Prieto.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este trabajo ha demostrado la importancia de medir las propiedades físicas de las rocas bajo condiciones subterráneas simuladas. Se pueden cometer errores muy importantes en la interpretación de los registros de pozo y en los cálculos de predicción de comportamiento del yacimiento, si no se toma en cuenta la dependencia de las propiedades físicas al esfuerzo y a la temperatura. Aunque se han hecho pocas pruebas específicamente en núcleos de Cerro Prieto, los resultados de estas pruebas demuestran los grandes cambios que ocurren en las propiedades con la temperatura y el esfuerzo.

Tenemos aparatos disponibles para medir la mayoría de las propiedades de las rocas que se necesitan conocer para el desarrollo de los recursos geotérmicos. Podría contarse con estos aparatos para obtener los datos sobre pruebas de rocas que se requieran para el proyecto de Cerro Prieto.

Títulos de Figuras

- Figura 1. Efectos de temperatura y esfuerzo sobre las velocidades sónicas en arenisca Berea.
- Figura 2. Efectos de temperatura y esfuerzo sobre la compresibilidad volumétrica de la arenisca Berea.
- Figura 3. Efecto del esfuerzo sobre la porosidad y la permeabilidad de areniscas.
- Figura 4. Efectos calculados de temperatura y esfuerzo sobre la porosidad de la arenisca Berea.
- Figura 5. Efectos de temperatura y esfuerzo sobre la permeabilidad de la arenisca Berea.
- Figura 6. Efectos de temperatura y esfuerzo sobre el factor de resistividad de la arenisca Berea.
- Figura 7. Velocidades de ondas de compresión en una arenisca de Cerro Prieto.
- Figura 8. Velocidades de ondas de corte en una arenisca de Cerro Prieto.
- Figura 9. Modulo dinámico de Young de una arenisca de Cerro Prieto.
- Figura 10. Modulo dinámico volumétrico de una arenisca de Cerro Prieto.
- Figura 11. Relación dinámica de Poisson de una arenisca de Cerro Prieto.
- Figura 12. Efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de una arenisca de Cerro Prieto.