

THERMAL CONDUCTIVITY OF CORE SAMPLES FROM THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD: EXPERIMENTAL RESULTS AND AN IMPROVED PREDICTION METHOD

L. F. Martínez B.

Department of Mechanical Engineering
University of California, Berkeley, California, USA

INTRODUCTION

Geothermal reservoir modeling and other subsurface thermal calculations require proper knowledge of the thermal properties of the rocks and fluids present in the reservoir and their dependence on temperature, pressure and fluid saturation.

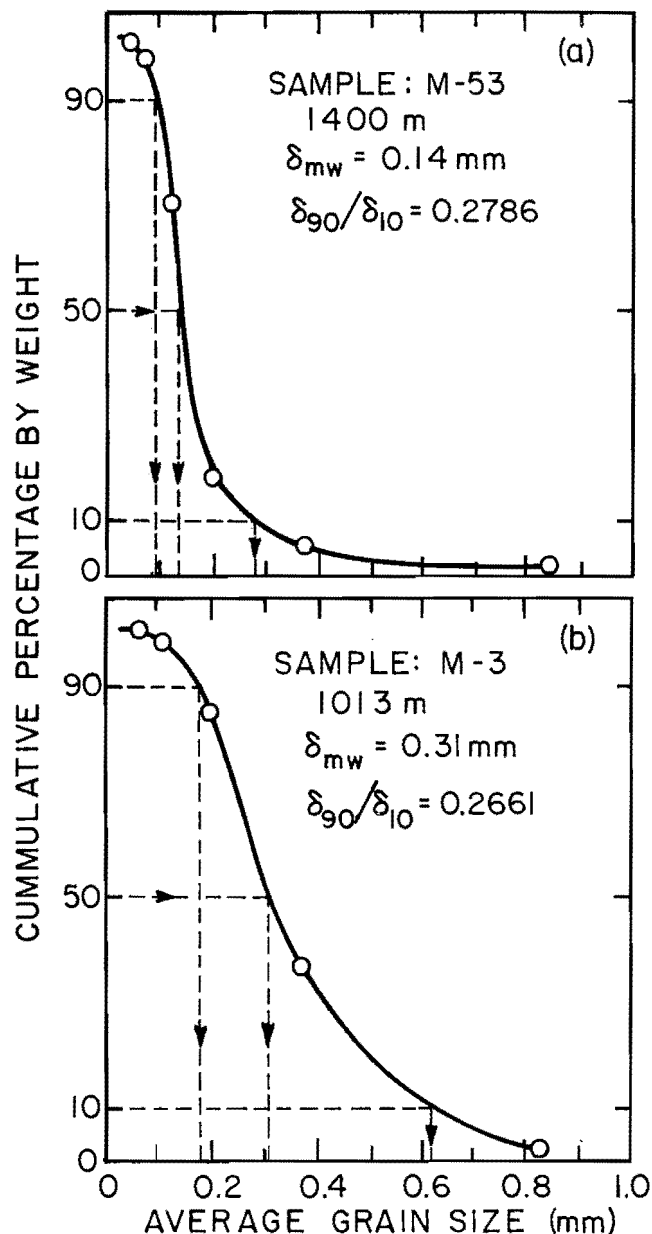
The difficulties involved in these measurements make it desirable to have a way of predicting such properties and their variations under changing environmental conditions. A correlation method is proposed, which enables estimation of the thermal conductivity of the rock-brine system using data on other physical properties that are easier to determine or are already available. These other properties are: porosity, grain size and size distribution, mineral composition and chemistry of rock and fluid.

This report presents results of thermal conductivity measurements on a variety of Cerro Prieto cores at two temperature levels for brine and air saturation conditions. These values are compared with values of thermal conductivities calculated from the correlation equations.

EXPERIMENTAL PROCEDURES

Properties were measured on cylindrical test specimens [5.08 cm (2 in.) in diameter by 3.18 cm (1.25 in.) high] prepared by diamond-drilling cores (Elders, et al., 1977). The test specimens were faced with precision to the above height keeping parallelism between faces within 0.0025 cm. Porosity was measured on the dry specimens using a gas expansion type (Boyle's Law) porosimeter with compressed nitrogen as the working gas. Grain size distribution was obtained from a screen analysis for each sample using Tyler mesh screens. Results of a typical analysis are shown in Table 1 and are plotted in Figure 1(a).

Thermal conductivity measurements were made using a standard steady-state thermal conductivity apparatus with brine-saturated and dry test specimens. The method used was to apply a steady one-dimensional heat flow through a stack, which consists of two cylindrical standards of known thermal conductivity placed one above and one below the test specimen. At steady-state conditions, the temperature drop across each standard should be equal and the heat flow through them should be the same as the heat flow through the



XBL 7811-6161

Figure 1. Cumulative percentage by weight versus grain size.

Table 1. Grain size analysis (sample M-53, 1400 m).

Class limit (mm)	Average grain size in range	Weight		
		(g)	(%)	Cummulative %
1.18		0.0	0.0	0.0
1.18 to 0.5	0.84	0.38	0.013	0.013
0.5 to 0.25	0.375	1.16	0.040	0.053
0.25 to 0.15	0.20	3.66	0.126	0.179
0.15 to 0.075	0.11	17.86	0.614	0.79
0.075 to 0.045	0.06	5.46	0.188	0.98
0.045	0.02*	0.56	0.019	1.00
		29.08		

* Set arbitrarily.

Note: Last column plotted against average grain size is shown in Fig. 1.

test specimen. The heat flux for the standards can be calculated from Fourier's Law of heat conduction. Using this value, the unknown thermal conductivity of the specimen is calculated (Somerton, 1973).

Saturation of the test specimens was achieved by subjecting them to 15 μ m of Hg vacuum overnight; holding this vacuum, the specimens were then flooded with a solution of 6% KCl by weight in distilled water.

For liquid-saturated test specimens, pore pressure was maintained at about 50 psi during the thermal conductivity measurements to prevent boiling of the brine inside the pores.

In order to make the dry measurements of thermal conductivity, the specimen was dried inside the cell of the apparatus by raising the temperature (if needed) and releasing the pore pressure, allowing the steam to escape completely before making the measurement.

The flow of heat was vertically downward in all measurements to eliminate any convective effects.

DISCUSSION OF THE EXPERIMENTAL RESULTS

Table 2 shows the results of experimental measurements of thermal conductivity, porosity, and median grain size. Specimens used were sandstones, silts, and shales ranging from 4.2 to 35% porosity and from 0.08 to 0.37 mm median grain size. In general, the brine-saturated samples showed higher thermal conductivities than the dry samples. Other conditions being the same, effective thermal conductivities are higher at lower temperatures

for systems of this kind. From past experience (Somerton, 1973) we have learned that differences in stress conditions have little effect on the thermal conductivity results, so that the variations in uniaxial stress shown in Table 2 have no significant effects on the results. Axial stress was only maintained above a level sufficient to assure good contact between the interfaces of the experimental stack.

Some correspondence of median grain size and thermal conductivities can be seen from Table 2. The higher thermal conductivities correspond to the specimens with larger median grain size, as expected, for reasons that will be explained below. Porosity has the inverse effect since the thermal conductivity of the saturating liquid is lower than that of the rock solids. Thus for larger porosities we would expect lower thermal conductivities, as is seen to be the case.

Thermal conductivity results are shown graphically in Figure 2 as a plot of a correlation equation, presented by Somerton (1973), which shows the variation of thermal conductivity with temperature as:

$$\lambda_T = \lambda_{68^\circ\text{F}} - \{0.709 \times 10^{-3}(T-528) \\ (\lambda_{68^\circ\text{F}}-0.800) [\lambda_{68^\circ\text{F}}(T-10^{-3})^{-0.545} \lambda_{68^\circ\text{F}} \\ + 0.798] \lambda_{68^\circ\text{F}}^{-0.64}$$

where:

Table 2. Results of experimental measurements.

Sample	Condition	Temperature (°F)	Temperature (°C)	Stress (psi)	Thermal conductivity (Btu/hr·ft°F) (W/m°K)	Porosity (%)	Median grain size (mm)
M-92, 1813-1821 m (sandstone)	SAT	132	56.0	760	1.50	2.25	28.7
	SAT	253	123.0	760	1.32	2.28	
	DRY	132.5	56.0	675	0.78	1.35	
	DRY	253.5	123.0	815	0.70	1.21	
M-92, 1813-1821 m (sandstone 66%, shale part. 34%)	SAT	132.5	56.0	844	1.37	2.37	19
	SAT	252.5	123.0	790	1.20	2.08	
	DRY	134	57.0	730	0.86	1.49	
	DRY	254	123.0	860	0.68	1.18	
M-53, 1900 m (sandstone)	SAT	134	57.0	840	2.27	3.93	19.6
	SAT	256	124.0	843	1.84	3.18	
	DRY	134.5	57.0	815	1.34	2.32	
	DRY	256	124.0	844	1.13	1.95	
M-92, 2509-2516 m (sandstone)	SAT	134	56.0	854	2.03	3.51	23.6
	SAT	257	125.0	872	1.72	2.98	
	DRY	133	56.0	703	1.08	1.87	
	DRY	255	124.0	840	0.87	1.51	
M-3, 2395-2398 m (Experiments made in 1977) (sandstone)	SAT	112	45.0	450	2.48	4.29	16.7
	SAT	200	94.0	675	2.19	3.79	
	DRY	113	45.0	450	1.01	1.75	
	DRY	202	94.0	6.9	0.95	1.64	
M-3, 2395 m (sandstone) (Experiments made in 1978)	SAT	134	57.0	349	2.68	4.64	16.1
	SAT	257	125.0	1012	2.13	3.68	
M-53, 1400 m (Unconsolid. brown sandstone)	SAT	134	57.0	995	1.31	2.27	35.0
	SAT	254	123.0	1068	1.18	2.04	
	DRY	134	57.0	568	0.34	0.59	
	DRY	254	123.0	962	0.27	0.47	

(continued)

Table 2. Continued.

Sample	Condition	Temperature (°F)	Temperature (°C)	Stress (psi)	Thermal conductivity (Btu/hr·ft·°F)	Thermal conductivity (W/m·°K)	Porosity (%)	Median grain size (mm)
M-53, 1708 m	SAT	136	58.0	827	1.77	3.06	17.0	0.10
(Compact grey	SAT	259	126.0	814	1.44	2.49		
silt)	DRY	139	60.0	810	1.10	1.90		
	DRY	259	126.0	984	0.94	1.63		
M-3, 1013 m	SAT	136	58.0	844	1.94	3.36	29.0	0.31
(Grey sandstone)	SAT	256	124.0	28	1.59	2.75		
	DRY	136	58.0	793	1.01	1.75		
M-94, 1292 m	SAT	133	56.0	894	1.37	2.37	14.8	0.08
(Shale)	SAT	255	124.0	967	1.15	1.99		
	DRY	135	57.0	984	0.88	1.52		
	DRY	258	125.0	1113	0.78	1.35		
M-94, 1292 m	SAT	133	56.0	945	2.13	3.68	26.7	0.17
(sandstone)	SAT	261	127.0	900	1.77	3.06		
	DRY	135	57.0	810	1.41	2.44		
	DRY	260	127.0	928	1.16	2.01		
M-3, 1986 m	SAT	135	57.0	1125	2.31	4.00	4.2	0.18
(Low porosity	SAT							
sandstone)								
M-6, 702 m	SAT	131			1.34	2.32	20.6	0.085
(Silt)								

λ_T = thermal conductivity of the system at temperature T,

$\lambda_{68^\circ\text{F}}$ = thermal conductivity of the system at room temperature (68°F), and

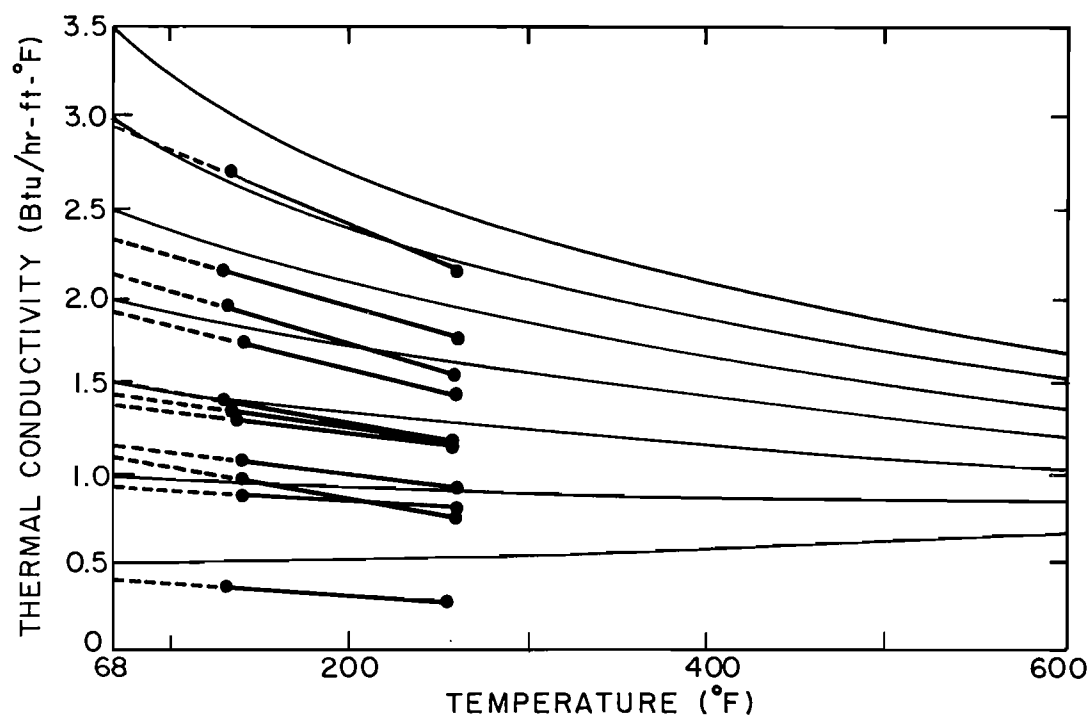
T = temperature in °R.

The parameter on the graph of Eq. (1), Figure 2, is the thermal conductivity of the rock-fluid system at room temperature, $\lambda_{68^\circ\text{F}}$. This correlation equation was developed from a large quantity of experimental results for different kinds of rocks. As can be seen in Figure 2, the trend of variation of thermal conductivity

with temperature, predicted by the correlation equation, corresponds reasonably well to our present results. This fact was used to extrapolate our results to 68°F (20°C), and we use these values to develop the prediction method explained below.

BACKGROUND ON THE PREDICTION METHOD

Using Eq. (1), we can predict thermal conductivity of a rock-fluid system at any temperature provided we know its thermal conductivity at 68°F (20°C). The method investigated here enables us to predict this required value ($\lambda_{68^\circ\text{F}}$) and then, using Eq. (1), to predict the thermal conductivity of the formation at any temperature in the range of 68° to 600°F (20° to 315°C).



XBL 7811-6162

Figure 2. Thermal conductivity (λ) versus temperature [experimental results and plot of Eq. (1)].

Equation (2), below, is a general correlation developed by Krupiczka (1967) to predict the thermal conductivity of a rock fluid system:

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{\left[0.28 - 0.757 \log \phi - 0.057 \log \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right) \right]} \quad (2)$$

where: λ = effective thermal conductivity of the system,

λ_f = thermal conductivity of the fluid inside the pores,

λ_s = thermal conductivity of the rock solids,

and

ϕ = porosity.

This correlation was developed as the best fit to a family of curves of λ/λ_f vs λ_s/λ_f with ϕ as parameter and having two curves limiting the family. These two curves correspond to two theoretical models of porous media as extremes in regard to porosity. The two theoretical models correspond to a model of cylinders exhibiting a porosity of 0.215 and to a model made up of spheres placed in cubic packing and a porosity of 0.476. The correlation was extrapolated slightly for porosities ranging from 0.20 to 0.50. This correlation has been tested by other investigators (Somerton, et al., 1974) finding that it agreed within 30% of the experimental values for 76% of the calculated values.

Equation (2) includes three factors that are very important in determining the effective thermal conductivity of the rock-fluid system, namely rock-solids and fluid thermal conductivities and porosity. Another very important factor not considered in this equation is grain size. This factor should account for the fact that, at the interface of contact between two grains and between grains and fluid, there will be additional resistance to the flow of heat. This is called contact resistance and exists when the medium changes. In a porous medium, this resistance will be proportional to the number and area of contacts between grains and between grains and fluid. In a fine-grained porous medium there are both more grain contacts and more surface area per unit volume than in a coarse-grained medium. Therefore, grain size should be an important parameter. Where there is a wide distribution of grain sizes, the median grain diameter may be used. However, to fully characterize the medium, another size-distribution parameter should probably also be used in the correlation.

REGRESSION ANALYSIS

Two factors were tested to account for the effects mentioned above. One was δ_m , the median grain size determined as shown in Table 1 and Figure 1 for a typical result (Pettijohn, 1957). The other was the ratio δ_{90}/δ_{10} , or the grain size at which 90% of the grains are coarser divided by the grain size at which only 10% of the grains are coarser. This ratio should give a better representation of the grain-size effect than the median grain size alone. A ratio of about 1 would indicate a

very uniform distribution of grain sizes and ratios less than 1 represent wider spread of grain size distribution. The method of calculating grain size distribution is shown in Figure 1(a) and (b).

Krupiczka's equation may be expressed in the general form:

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^E \quad (3)$$

where the exponent E is expressed as:

$$E = C_1 + C_2 \log P_1 + C_3 \log P_2 + \dots + C_{n+1} \log P_n$$

where P_i = parameter.

Linear regression analyses were run to obtain the different constants (C_i) included in E. The values of E that gave the experimental effective thermal conductivity λ were used in the regression analysis.

Three linear regression analyses were made: (1) on the original form of the exponent used by Krupiczka with the factors $\log \phi$ and $\log (\lambda_s/\lambda_f)$; (2) the same as (1) but adding the factor $\log \delta_m$; and (3) the same as (2) but adding the factor $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$. The form of the exponents corresponding to these analyses is the following:

$$E = C_1 + C_2 \log \phi + C_3 \log (\lambda_s/\lambda_f) + C_4 \log \delta_m + C_5 \log (\delta_{90}/\delta_{10}).$$

The results from the regression analysis for the constants C_i are presented in Table 3.

These exponents substituted into Eq. (3) give the best fit to the data for each particular option of the exponent. Table 4 shows the results given by these equations with different E options and the percent deviation from the experimental values. From these results we see that the modified versions (E-options 2 and 3) have the smaller deviations, which indicates the importance of the factors $\log \delta_m$ and $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$.

Correlation Coefficients and Significance Test

In order to quantify in a more objective way the improvements obtained after the inclusion of the size parameters, the correlation coefficients for each option of the exponent E were calculated. The correlation coefficient is defined (Stanley, 1973) as $R = \sqrt{R^2}$ where R^2 is the coefficient of multiple determination:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

where $\hat{y}$ is the estimator of y, and

$\bar{y}$ is the mean of y.

Results of these calculations are shown in Table 5. A value of $R = 1$ would mean perfect correlation and the closer R gets to 1 the better the correlation. Results shown in Table 6 indicate that the correlation is very much improved by the addition of the factors $\log \delta_m$ and $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$.

A significance (F) test (Stanley, 1973) for the different factors in each E option provided a way to isolate the effect of each factor and its relative importance. Results from this test are presented in Table 6. A large value of F in this test indicates a large significance of the particular factor. Even though none of the F values obtained indicated 95% significance of the variables (probably due to the limited number of data points) the values still indicate the relative importance of the factors. These results show that $\log \phi$ is the most significant factor and that the $\log \delta_m$ and $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$ factors are comparable to it. The significance of $\log (\lambda_s/\lambda_f)$ in the exponent is very small when $\log \delta_m$ and $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$ are included. This indicates that the latter factors are more significant than the former. This could be due to the

Table 3. Results from the regression analysis.

E Option	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
(1)	-0.14578	-0.34884	0.67856	--	--
(2)	0.21213	-0.31124	0.41281	0.10170	--
(3)	0.41727	-0.15958	-0.02492	0.07687	0.45858

Table 4. Comparison of results given by correlations.

Sample	ϕ	λ_s	λ_f	δ_m (mm)	$\frac{\delta_{90}}{\delta_{10}}$	Experi- mental	Eq. (2)		E-option 1		E- option 2	% Error	E- option 3	% Error
							Krupiczka original	% Error	Krupiczka modified	% Error				
M-92, 1813-1821 m	0.287	2.83	0.343	0.10	0.243	1.58	1.319	-16.5	1.396	-11.6	1.374	-13.0	1.458	-7.7
M-53, 1900 m	0.196	3.61	x	0.37	0.172	2.51	2.03	-19.1	2.227	-11.3	2.311	-7.9	2.376	-5.3
M-92, 2509-2516 m	0.236	2.723	x	0.25	0.264	2.20	1.473	-33.0	1.413	-35.8	1.517	-31.0	1.505	-31.5
M-3, 2395-2398 m	0.167	3.83	x	0.34	0.159	2.60	2.41	7.3	2.581	-0.7	2.597	-0.1	2.640	1.5
M-3, 2395 m	0.161	0.384	x	0.34	2.95	2.95	2.49	-15.6	2.631	-10.8	2.640	-10.5	2.664	-9.7
M-53, 1400 m	0.350	3.61	x	0.14	0.279	1.40	1.30	-7.1	1.814	29.6	1.739	23.6	1.498	14.1
M-53, 1708 m	0.170		x	0.10	0.040	1.91								
M-3, 1013 m	0.290	3.762	x	0.31	0.266	2.12	1.542	-27.3	2.055	-3.1	2.103	0.8	1.841	-13.2
M-94, 1292 m (shale)	0.148	2.78	x	0.08	0.276	1.46	2.057	40.9	1.683	15.3	1.593	9.1	1.481	1.4
M-94, 1292 m (S.S.)	0.267	3.54	x	0.17	0.144	2.31	1.587	-31.3	1.940	-16.0	1.889	18.2	2.271	-1.7
M-3, 1986 m	0.042	3.36	x	0.18	0.044	2.52*	6.16	144.0	3.414	35.5	3.166	25.6	5.046	100.2
M-6, 702 m	0.206	3.13	x	0.085	0.180	1.42*	1.778	25.2	1.778	25.2	1.657	16.7	1.847	30.1

*Values not included in developing correlations.

Table 5. Correlation coefficients for the three options of E.

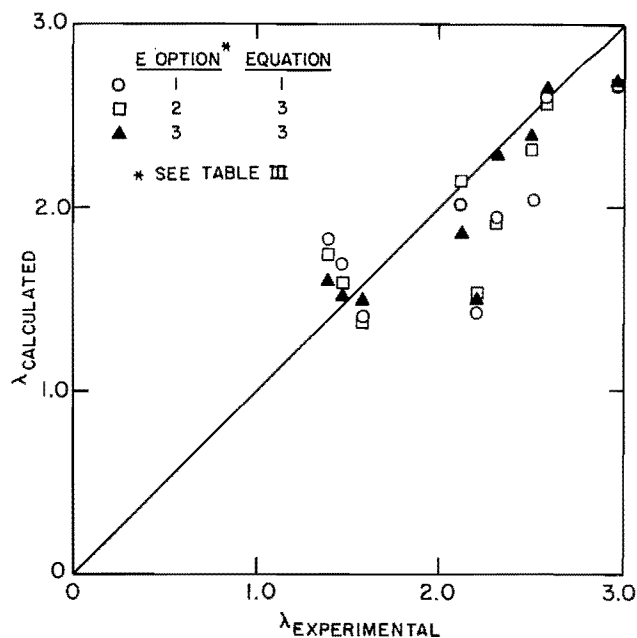
E option	R ²	R
(1)	0.782	0.884
(2)	0.825	0.908
(3)	0.951	0.975

range of variation of $\log (\lambda_s/\lambda_f)$ for our set of samples, which is very small. (For example, λ_f does not vary since we used the same fluid in our experiments.) This is not to say that (λ_s/λ_f) is not an important parameter because it is the term to which the exponent is applied.

Comparison of Predicted with Experimental Results

A comparison of the thermal conductivities obtained by the three equations [formed with the three options of the exponent E in Eq. (3)] with the experimental results is shown in Figure 3. In this graph, perfect agreement between calculated and experimental results would fall on the 45 degree line so that the results are better as they approach the line. With the exceptions of samples M-92 (2509 m) and M-3 (1986 m), fairly good agreement will be noted particularly for option E-3.

The present correlations were developed using only the liquid-saturated experimental



XBL 7811-6163

Figure 3. Calculated versus experimental thermal conductivity.

results. The original Krupiczka equation gave poor results for air-saturated samples. Because the Cerro Prieto geothermal field is liquid dominated, the liquid-saturated values would be more useful for this report. Further research is being done at Berkeley (Chaffari, in prep.) to develop a theoretical model, which will predict the effective thermal conductivity of a porous medium with gas-, liquid- or mixed-saturation conditions.

Table 6. Significance test results.

E option	Factor	F value	F value for significance at 95% level (Stanley, 1973)
(1)	$\log \phi$	3.35	$F_{1-6} = 5.99$
	$\log (\lambda_s/\lambda_f)$	2.95	
(2)	$\log \phi$	3.07	$F_{1-5} = 6.61$
	$\log \delta_m$	2.66	
	$\log (\lambda_s/\lambda_f)$	0.54	
(3)	$\log \phi$	4.62	$F_{1-4} = 7.71$
	$\log (\delta_{90}/\delta_{10})$	4.33	
	$\log \delta_m$	3.99	
	$\log (\lambda_s/\lambda_f)$	0.03	

APPLICATION AND METHOD OF ANALYSIS

The correlating equation that gave the best results for predicting the effective thermal conductivity of Cerro Prieto rock-liquid systems is:

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{E_3} \quad (4)$$

where

$$E_3 = 0.41727 - 0.15958 \log \phi \\ - 0.02492 \log (\lambda_s / \lambda_f) + 0.07687 \log \delta_m \\ - 0.45858 \log (\delta_{90} / \delta_{10})$$

and where δ_m is in millimeters. In using Eq. (4), the values of the rock-solids thermal conductivity (λ_s) and saturating liquid thermal conductivity (λ_f) at 68°F (20°C) must be known. To obtain the rock-solids thermal conductivity, a weighted average of the thermal conductivity of the individual mineral components of the rock is used. (See Table 7 for a typical calculation.) Results of mineral analyses made by x-ray diffraction technique were provided by the University of California, Riverside (Elders, et al., 1977). Densities and thermal conductivities of the individual components of the rock were taken from Horai (1971). The process of obtaining λ_s is easily understood by examining Table 7 and will not be discussed further here.

When only an estimation of the quartz content is available, λ_s can be estimated by using Eq. (5) (Somerton, et al., 1974):

$$\lambda_s = 4.44Q + 1.65 (1 - Q) \quad (5)$$

where Q is the quartz content percentage by weight.

To obtain the liquid thermal conductivity, handbook values could be used. For sodium or potassium chloride solutions, Eq. (6) could be used (Yusufova, et al., 1975):

$$\lambda_f = \lambda_w [1 - (2.20 \times 10^{-3}) S \\ + (1.025 \times 10^{-5}) S^2] \quad (6)$$

where: λ_f = thermal conductivity of the solution at 68°F (20°C),

λ_w = thermal conductivity of pure water at 68°F, and

S = salt concentration by weight (%).

In addition to thermal conductivity of rock solids and contained fluid, use of Eq. (4) to predict effective thermal conductivity at 68°F requires knowledge of porosity, median grain size, and size distribution. If precise values of these quantities are not known, estimated values will suffice. At the minimum, porosity must be known or estimated. If the other values cannot be estimated, a reasonable prediction of effective thermal conductivity could be made by substituting E option (1) into Eq. (3). A much better prediction could be made if median grain

Table 7. Rock-solids thermal conductivity (λ_s) calculation [sample M-92, 1833 m (assumed for 1813-1821 m)].

Mineral	% by weight	Density (g/cc)	% by volume N_i	λ_i (Btu/hr·ft°F)	$N_i \times \lambda_i$
Quartz	39.6	2.647	40.4	4.45	1.78
Plagioclase	6.6	2.618	6.8	1.24	0.084
Potassium feldspar	11.2	2.618*	11.5	1.24*	0.143
Calcite	26.8	2.721	26.6	2.08	0.553
Chlorite	0.8	2.763	0.8	2.84	0.023
Kaolinite	2.9	3.413*	2.3	1.6	0.037
Mixed layer	2.5	2.763*	2.4	2.84*	0.068
$\Sigma = 100$			$\Sigma = 100$		$\lambda_s = 2.830$

*Assumed values according to similarity in composition with known values (see for example Horai, 1971).

size as well as porosity were determined or estimated, in which case effective thermal conductivity can be predicted by substituting E option (2) into Eq. (3).

With a value of effective thermal conductivity now known, values at other temperatures may be calculated with Eq. (1). A simplified version of Eq. (1) suggested by Somerton et al. (1974) for systems of lower thermal conductivities is given by

$$\lambda_T = \lambda_{680F} - 0.90 \times 10^{-3}(T - 528^\circ)(\lambda_{680F} - 0.82) \quad (7)$$

CONCLUSIONS

Values of thermal conductivity and other physical properties were obtained for a variety of core samples from the Cerro Prieto geothermal field, at different conditions of temperature and fluid saturation.

A regression analysis was made using a number of parameters describing the nature of the rock-fluid system. Porosity was found to be of greatest importance and median grain size and grain size distribution were of nearly equal importance. The correlation equations--including median grain size, grain size distribution, porosity, and ratio of rock-solid to fluid conductivity--gave better results in predicting effective thermal conductivity values than a previously developed correlation by Krupiczka (1967). This was true even when this equation was correlated to give the best fit to the Cerro Prieto data (E option 1).

These correlation equations, together with others (Somerton, 1973; Somerton, et al., 1974; Yusufova, et al., 1975) provide a complete method that permits the user to calculate the effective thermal conductivity at any temperature for a formation fully saturated with liquid. These results could be used, for example, in numerical simulation of the Cerro Prieto geothermal field.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported, in part, by the U. S. Department of Energy under contract no.

W-7405-ENG-48. The author wishes to express his thanks to his graduate research advisor, Professor W. H. Somerton, for his support and guidance. Thanks are also due to Professor W. A. Elders and Dr. James Hoagland, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Riverside, for providing core material and mineralogical data.

REFERENCES CITED

- Elders, W. A., Olson, E. R., Hoagland, J. R., Barker, C. E., Johnson, P. D., and Collier, P., 1977. A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: petrology and light stable isotope geochemistry of wells M48, M91, M92, and Prian no. 1, in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico. Riverside, University of California, Inst. of Geophys. and Planetary Phys., UCR/IGPP-77/37.
- Ghaffari, Anoush, in preparation. Thermal conductivity of porous systems. PhD thesis, Berkeley, University of California.
- Gomaa, Ezatt, 1973. Thermal behavior of partially liquid saturated porous media. PhD thesis, Berkeley, University of California.
- Horai, Ki-iti, 1971. Thermal conductivity of rock-forming minerals. *J. Geophys. Res.*, v. 76, no. 5, p. 1278.
- Krupiczka, R., 1967. Analysis of thermal conductivity in granular materials. *Intl. Chem. Engr.*, v. 7, no. 1, p. 122.
- Pettijohn, F. J., 1957. *Sedimentary rocks*. New York, Harper and Row, 2nd ed.
- Somerton, W. H., 1973. Thermal properties of hydrocarbon bearing rocks at high temperatures and pressures. Berkeley, University of California, Amer. Pet. Inst. Res. Proj. 117, final report, 83 p.
- Somerton, W. H., Keese, J. A., and Chu, S. L., 1974. Thermal behavior of unconsolidated oil sands. *Soc. Pet. Engr. J.*, v. 14, No. 5, p. 513.
- Stanley, L. T., 1973. *Practical statistics for petroleum engineers*. Tulsa, Petroleum Publishing Company.
- Yusufova, V. D., Pepinov, R. I., Nikolaev, V. A., and Guseinov, G. M., 1975. Thermal conductivity of aqueous NaCl solutions (in Russian). *Inzhenerno Fizicheskii Zhurnal*, v. 29, no. 4, p. 600.

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE MUESTRAS DE NUCLEOS DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y UN METODO DE PREDICCION MEJORADO

INTRODUCCION

Para la preparación de modelos de yacimientos geotérmicos y otros calculos térmicos subterráneos se requiere conocer las propiedades térmicas de las rocas y fluidos presentes, y la dependencia de estas propiedades de la temperatura, presión y saturación de fluidos.

Las dificultades involucradas en la medición de dichas propiedades hacen deseable contar con una forma de predecirlas en función de las condiciones ambientales. Se propone aquí un método de correlación que permite la estimación de la conductividad térmica del sistema salmuera-roca utilizando propiedades físicas de fácil determinación. Dichas propiedades son: porosidad, tamaño de grano y distribución granulométrica, composición mineralógica, y composición química de los fluidos y rocas.

En este informe se presentan los resultados de las mediciones de conductividad térmica a dos temperaturas en diversos núcleos de Cerro Prieto saturados de salmuera o aire. Estos valores se comparan con los valores de conductividades térmicas calculados de las ecuaciones de correlación.

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

Se midieron las propiedades en especímenes de prueba cilíndricos de 5.08 cm (2 pulg.) de diámetro por 3.18 cm (1.25 pulg.) de altura obtenidos con barrena corta-núcleos de diamante (Elders, et al., 1977). Los especímenes de prueba se facetaron con precisión a la altura especificada, manteniendo el paralelismo entre las caras dentro de una tolerancia de 0.0025 cm. Se midió la porosidad en los especímenes secos utilizando un porosímetro de tipo expansión de gas (Ley de Boyle) usando nitrógeno comprimido como gas de trabajo. Para cada muestra se obtuvo la distribución granulométrica mediante tamizado utilizando tamices de malla Tyler. Los resultados de un análisis típico aparecen en la Tabla 1 y se grafican en la Figura 1(a).

Las mediciones de conductividad térmica se hicieron utilizando un aparato de conductividad térmica estándar de estado estacionario con especímenes secos y saturados con salmuera. El método consiste esencialmente en inducir un flujo de calor estacionario unidimensional a través de una pila formada por dos especímenes estándar cilíndricos de conductividad térmica conocida colocados uno arriba y uno debajo del espécimen de prueba. En condiciones de estado estacionario la caída de temperatura a través de cada espécimen estándar debe ser igual, y la cantidad de calor que pasa por ellas debe ser igual a la que pasa a través del espécimen de prueba. Para los especímenes estándar este flujo de calor puede calcularse por

la Ley de Fourier de conducción de calor. Utilizando este valor se calcula la conductividad térmica desconocida del espécimen (Somerton, 1973).

Para preparar los especímenes de prueba se los mantuvo durante toda la noche en una cámara de vacío a una presión de 15 μ m Hg. A continuación se los saturó con una solución de KCl al 6% por peso en agua destilada.

Para los especímenes de prueba saturados de líquido se mantuvo la presión de poro alrededor de 50 psi para evitar la ebullición de la salmuera dentro de los poros durante las mediciones de la conductividad térmica. Para poder hacer las mediciones de la conductividad térmica en seco, se secó el espécimen dentro de la celda del aparato elevando la temperatura (en caso necesario) y aliviando la presión de los poros, permitiendo el escape completo del vapor antes de hacer las mediciones.

En todas las mediciones el flujo del calor fue verticalmente descendente para eliminar cualquier efecto convectivo.

DISCUSION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Tabla 2 muestra los resultados de las mediciones experimentales de la conductividad térmica, la porosidad y la mediana del tamaño de grano (mediana granulométrica). Las muestras utilizadas en el trabajo experimental fueron areniscas, limos y lutitas cuyas porosidades y medianas granulométricas variaban entre 4.2 y 35%, y 0.08 y 0.37 mm, respectivamente. En general las muestras saturadas con salmuera presentaron mayores conductividades térmicas que las muestras secas. En igualdad de condiciones para sistemas de este tipo, las conductividades térmicas efectivas son mayores a menores temperaturas. Resultados experimentales (Somerton, 1973) indican que las diferencias en condiciones de esfuerzo tienen poco efecto en los resultados de conductividad térmica, de modo que las variaciones en el esfuerzo uniaxial que aparecen en la Tabla 2 no afectan significativamente los resultados. El esfuerzo axial se mantuvo a un nivel lo suficientemente alto como para asegurar un buen contacto entre las superficies de la pila experimental.

En la Tabla 2 puede observarse cierta correspondencia entre la mediana granulométrica y las conductividades térmicas. Las conductividades térmicas más altas corresponden a los especímenes con mayor mediana granulométrica. Esto es de esperarse por razones que se explicarán posteriormente, ya que la conductividad térmica del líquido saturante es menor que la conductividad térmica de los sólidos de la roca. Por lo tanto, para mayores porosidades se esperarían menores conductividades térmicas, como se ha visto que es el caso.

En la Figura 2 aparecen los resultados de la conductividad térmica en una gráfica de una ecuación de correlación (Somerton, 1973), que da la variación de la conductividad térmica con la temperatura como:

$$\lambda_T = \lambda_{68^\circ\text{F}} - \{0.709 \times 10^{-3}(T-528) \\ (\lambda_{68^\circ\text{F}}-0.800) [\lambda_{68^\circ\text{F}}(T-10^{-3})^{-0.545} \lambda_{68^\circ\text{F}} \\ + 0.798] \lambda_{68^\circ\text{F}}^{-0.64} \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} \lambda_T &= \text{conductividad térmica del sistema a temperatura } T, \\ \lambda_{68^\circ\text{F}} &= \text{conductividad térmica del sistema a temperatura ambiente (68°F)} \\ T &= \text{temperatura en } ^\circ\text{R} \end{aligned}$$

El parámetro de la gráfica de la Ecuación 1, Figura 2, es la conductividad térmica del sistema de fluido-roca a temperatura ambiente, $\lambda_{68^\circ\text{F}}$.

Esta ecuación de correlación fue desarrollada basándose en gran cantidad de resultados experimentales para diferentes tipos de rocas. Como puede observarse en la Figura 2 la tendencia de la conductividad térmica a variar con la temperatura, predicha por la ecuación de correlación, corresponde bastante bien a nuestros resultados actuales. Este hecho se utilizó para extrapolar nuestros resultados a 68°F (20°C). Empleamos estos valores para desarrollar el método de predicción como se explicará posteriormente.

ANTECEDENTES DEL METODO DE PREDICCIÓN

Utilizando la Ecuación 1 se puede predecir la conductividad térmica de un sistema fluido-roca a cualquier temperatura, siempre y cuando se conozca el valor de la conductividad térmica a 68°F (20°C). El método que se investiga aquí permite predecir este valor requerido ($\lambda_{68^\circ\text{F}}$) y la conductividad térmica de la formación a cualquier temperatura en el rango de 68° a 600°F (20° a 315°C), utilizando la Ecuación 1.

La Ecuación 2, que sigue, es una correlación general desarrollada por Krupiczka (1967) para predecir la conductividad térmica de un sistema fluido-roca:

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{\left[0.28 - 0.757 \log \phi - 0.057 \log \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right) \right]} \quad (2)$$

donde

$$\begin{aligned} \lambda &= \text{conductividad térmica efectiva del sistema} \\ \lambda_f &= \text{conductividad térmica del fluido dentro de los poros} \\ \lambda_s &= \text{conductividad térmica de los sólidos de la roca} \\ \phi &= \text{porosidad} \end{aligned}$$

Esta correlación se desarrolló como el mejor ajuste a una familia de curvas de λ/λ_f vs λ_s/λ_f con ϕ como parámetros, con dos curvas que limitan dicha familia. Estas dos curvas corresponden a dos modelos teóricos de medios porosos, de porosidades extremas. Dichos modelos teóricos corresponden a un modelo de cilindros que tienen una porosidad de 0.215 y a un modelo de esferas arregladas en un empaque cúbico con una porosidad de 0.476. La correlación se extrapola ligeramente para porosidades del 20 al 50%. Esta correlación ha sido puesta a prueba por otros investigadores (Somerton, et al., 1974), encontrándose que estuvo de acuerdo dentro del 30% de los valores experimentales para el 76% de los valores calculados.

La Ecuación 2 incluye tres factores que son muy importantes para determinar la conductividad térmica efectiva de un sistema fluido-roca, a saber: las conductividades térmicas del sólido de la roca y del fluido, y la porosidad. Un factor muy importante que no se considera en esta ecuación es el tamaño de grano. Este factor deberá considerar el hecho de que en la superficie de contacto entre dos granos, y entre granos y fluido habrá una resistencia adicional al flujo del calor. Esto se llama resistencia de contacto y aparece cuando el medio cambia. En un medio poroso, esta resistencia será proporcional al número y área de contacto entre granos, y entre granos y fluido. En un medio poroso de grano fino hay un mayor número y área de contacto por unidad de volumen que en un medio de grano grueso. Por lo tanto, el tamaño de grano debe ser un parámetro importante. Donde existe una amplia distribución granulométrica, puede utilizarse la mediana granulométrica. Sin embargo, para caracterizar completamente el medio, probablemente debería utilizarse también en la correlación otro parámetro de la distribución granulométrica.

ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Se probaron dos factores que consideran los efectos mencionados anteriormente; uno fue δ_m , la mediana granulométrica determinada como se muestra para un resultado típico en la Tabla 1 y en la Figura 1, (Pettijohn, 1957). El otro fue la razón δ_{90}/δ_{10} , donde δ_A corresponde al tamaño de grano para el cual A por ciento de la muestra es de grano mayor. Esta razón debe dar una mejor representación del efecto correspondiente al tamaño del grano que el uso de la mediana granulométrica únicamente. Una razón de aproximadamente 1 indica una distribución muy uniforme de tamaños de grano; razones menores que 1 representan una dispersión más amplia de la distribución granulométrica. El método para calcular la distribución granulométrica aparece en la Figura 1(a) y (b).

La ecuación de Krupiczka puede expresarse en forma general como:

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^E \quad (3)$$

donde el exponente E se expresa como,

$$E = C_1 + C_2 \log P_1 + C_3 \log P_2 + \dots + C_{n+1} \log P_n$$

donde P_i = parámetro,

Se hicieron análisis de regresión lineal para obtener las diferentes constantes (C_i) incluidas en E. Se utilizaron en el análisis de regresión los valores de E que dieron la conductividad térmica efectiva experimental.

Se realizaron tres análisis de regresión lineal: 1) en la forma original del exponente utilizado por Krupiczka con los factores $\log \phi$ y $\log (\lambda_s/\lambda_f)$; 2) igual que (1) pero agregando el factor $\log \delta_m$; y 3) igual que (2) pero agregando el factor $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$. La forma de los exponentes que corresponde a estos análisis es la siguiente:

$$E = C_1 + C_2 \log \phi + C_3 \log (\lambda_s/\lambda_f) + C_4 \log \delta_m + C_5 \log (\delta_{90}/\delta_{10}).$$

Los resultados del análisis de regresión para las constantes C_i se dan en la Tabla 3.

Estos exponentes substituídos en la Ecuación 3 dan el mejor ajuste a los datos para cada opción particular del exponente. En la Tabla 4 se detallan estas ecuaciones para las diferentes opciones de E; también se muestra la desviación de los valores experimentales en porciento. De estos resultados podemos ver que las versiones modificadas (opciones E-2 y E-3) tienen las menores desviaciones, lo que es una indicación de la importancia de los factores $\log \delta_m$ y $\log (\lambda_{90}/\lambda_{10})$.

Coefficientes de Correlación y Prueba de Significación.

Para cuantificar en forma más objetiva los mejores ajustes obtenidos al incluir los parámetros granulométricos, se calcularon los coeficientes de correlación para cada opción del exponente E. El coeficiente de correlación se define (Stanley, 1973) como $R = \sqrt{R^2}$ donde R^2 es el coeficiente de determinación múltiple,

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

donde $\hat{y}$ = estimador de y, e
 $\bar{y}$ = la media de y.

Los resultados de estos cálculos aparecen en la Tabla 5. Un valor de $R = 1$ significaría una correlación perfecta; cuanto más se aproxime R a 1 mejor es la correlación. Los resultados que aparecen en la Tabla 6 indican que la correlación mejora mucho al añadir los factores $\log \delta_m$ y $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$.

Una prueba de significación F (Stanley, 1973) para los diferentes factores en cada opción de E, proporcionó una forma de aislar el efecto de cada factor y determinar su importancia relativa. Los resultados de esta prueba aparecen en la Tabla 6. A mayor valor de F, mayor es la significación del factor. Aún cuando ninguno de los valores F obtenidos indica un nivel de 95% de significación de las variables (probablemente debido al número limitado de datos), los valores indican la importancia relativa de los factores. Estos resultados muestran que el factor $\log \phi$ es el más significativo y que los factores $\log \delta_m$ y $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$ son comparables con él. La significación de $\log (\lambda_s/\lambda_f)$ en el exponente es muy pequeña cuando se incluyen los factores $\log \phi_m$ y $\log (\delta_{90}/\delta_{10})$. Esto indica que la significación de los últimos factores sobrepasa a la del factor anterior. Esto puede deberse al estrecho rango de variación de $\log (\lambda_s/\lambda_f)$ para nuestro grupo de muestras (λ_f por ejemplo no varía ya que usamos el mismo fluido en nuestros experimentos). Esto no quiere decir que (λ_s/λ_f) no sea un parámetro importante, puesto que es el término al que se aplica el exponente.

Comparación de los Resultados Calculados con los Experimentales

En la Figura 3 aparece una comparación de los resultados obtenidos mediante las tres ecuaciones (formadas con las tres opciones del exponente E en la Ecuación 3) con los resultados experimentales. En esta gráfica se obtendría un acuerdo perfecto entre los resultados calculados y experimentales sobre la línea de 45°, de modo que los resultados son mejores conforme se acercan a la línea. Con la excepción de las muestras M-92 (2509 m) y M-3 (1986 m), se observa que existe bastante buen acuerdo, sobre todo para la opción E-3.

Las presentes correlaciones se desarrollaron utilizando únicamente los resultados experimentales de las muestras saturadas con líquido. La ecuación original de Krupiczka dió malos resultados para muestras saturadas con aire. Ya que el campo geotérmico de Cerro Prieto está dominado por líquido, los valores de muestras saturadas con líquido serían más útiles para este informe. En Berkeley (Ghaffari, en preparación) se están llevando a cabo investigaciones adicionales para desarrollar un modelo teórico que prediga la conductividad térmica efectiva de un medio poroso saturado por gas, líquido o mezcla.

APLICACION Y METODO DE ANALISIS

La ecuación de correlación que dió los mejores resultados para predecir la conductividad térmica efectiva de los sistemas de líquido-roca de Cerro Prieto es:

$$\frac{\lambda}{\lambda_f} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{E_3} \quad (4)$$

donde

$$E_3 = 0.41727 - 0.15958 \log \phi \\ - 0.02492 \log (\lambda_s/\lambda_f) + 0.07687 \log \delta_m \\ - 0.45858 \log (\delta_{90}/\delta_{10})$$

y donde, δ está en milímetros. Al usar la Ecuación 4^m es necesario tener los valores de la conductividad térmica de los sólidos de la roca (λ_s) y del líquido saturante (λ_f), a 68°F (20°C). Para obtener la conductividad térmica de los sólidos de la roca se utiliza un promedio ponderado de la conductividad térmica de los minerales de la roca, (véase la Tabla 7 para un cálculo típico). La Universidad de California en Riverside (Elders, et al., 1977) proporcionó análisis mineralógicos obtenidos por difracción de rayos-X. Las densidades y la conductividades térmicas de los componentes individuales de la roca se tomaron de un informe de Horai (1971). El procedimiento para obtener λ_s se comprende fácilmente examinando la Tabla 7 y no será discutido aquí.

Cuando sólo se puede obtener una estimación del contenido de cuarzo puede utilizarse la Ecuación 5 (Somerton, et al., 1974):

$$\lambda_s = 4.44Q + 1.65 (1 - Q) \quad (5)$$

donde Q es el porcentaje de cuarzo en peso.

La conductividad térmica del líquido puede obtenerse de la literatura técnica. Para soluciones de cloruro de potasio o de sodio, puede utilizarse la Ecuación 6 (Yusufova, et al., 1975);

$$\lambda_f = \lambda_w [1 - (2.20 \times 10^{-3}) S \\ + (1.025 \times 10^{-5}) S^2] \quad (6)$$

donde λ_f = conductividad térmica de la solución a 68°F (20°C)
 λ_w = conductividad térmica de agua pura a 68°F, y
 S = concentración de sal en peso (%).

Además de la conductividad térmica de los sólidos de la roca y del fluido contenido, el uso de la Ecuación 4 para predecir la conductividad térmica efectiva a 68°F requiere conocer la porosidad, la distribución granulométrica y su mediana. En caso de no conocerse los valores exactos de estas cantidades, serán suficientes los valores estimados. Por lo menos deberán conocerse o estimarse la porosidad. Si los otros valores no pueden ser estimados podría hacerse una predicción razonable de la conductividad térmica efectiva substituyendo la opción E-1 en la Ecuación 3. Se podría hacer una predicción mucho mejor si se determinaran o estimaran la mediana granulométrica así como la porosidad, en cuyo caso puede calcularse la conductividad térmica efectiva substituyendo la opción E-2 en la Ecuación 3.

Ya conociendo el valor de la conductividad térmica efectiva, pueden calcularse los valores a otras temperaturas utilizando la Ecuación 1. Una versión simplificada de la Ecuación 1 sugerida por Somerton, et al. (1974) para sistemas de conductividades térmicas menores está dada por

$$\lambda_T = \lambda_{68°F} - 0.90 \times 10^{-3} (T - 528^\circ) (\lambda_{68°F} - 0.82) \quad (7)$$

CONCLUSIONES

Se obtuvieron valores experimentales de las conductividades térmicas y otras propiedades físicas para varias muestras de núcleos del campo geotérmico de Cerro Prieto, bajo diferentes condiciones de temperatura y saturación de fluido.

Se hizo un análisis de regresión utilizando diversos parámetros que describen la naturaleza del sistema roca-fluido. Se encontró que la porosidad era de la mayor importancia y que la mediana y la distribución granulométrica eran de casi igual importancia. Las ecuaciones de correlación que incluyen la mediana y distribución granulométrica, porosidad y la razón de las conductividades de los sólidos de la roca y del fluido dieron mejores resultados para predecir los valores de la conductividad térmica efectiva que la correlación desarrollada anteriormente por Krupiczka (1967), aún cuando esta ecuación se correlacionó para dar el mejor ajuste con los datos de Cerro Prieto (Opción E-1).

Estas ecuaciones de correlación, junto con las de otros (Somerton, 1973; Somerton, et al., 1974; Yusufova, et al., 1975) proporcionan un método completo que permite calcular para cualquier temperatura la conductividad térmica efectiva de una formación totalmente saturada con líquido. Estos resultados podrían utilizarse, por ejemplo, en la simulación numérica del campo geotérmico de Cerro Prieto.

Agradecimientos

Esta investigación fue financiada, en parte, por el U.S. Department of Energy bajo contrato No. W-7405-ENG-48. El autor desea agradecer a su consejero de investigación, Prof. W. H. Somerton, por sus consejos y ayuda. Se agradece también al Prof. W. A. Elders y al Dr. James Hoagland, Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, por proveer núcleos y datos mineralógicos.

Títulos de Figuras

Figura 1. Porcentaje acumulativo por peso versus tamaño de grano.

Figura 2. Conductividad térmica (λ) versus temperatura (resultados experimentales y gráfica de la Ecuación 1).

Figura 3. Conductividad térmica experimental versus calculada.

Títulos de Tablas

Tabla 1. Análisis granulométrico (Muestra M-53, 1400 m).

Tabla 2. Resultados de mediciones experimentales.

Tabla 3. Resultados del análisis de regresión.

Tabla 4. Comparación de los resultados dados por las correlaciones.

Tabla 5. Coeficientes de correlación para las tres opciones del valor de E.

Tabla 6. Resultados de las pruebas de significación (Pruebas F).

Tabla 7. Cálculo de las conductividades térmicas de los sólidos de la roca (λ_s) (Muestra M-92, 1833 m, supuestamente representativa del intervalo 1813-1821 m).