

01173
2es
1

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

INVESTIGACION EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE
LA PERMEABILIDAD, LA POROSIDAD Y LA EXPANSION TERMICA
DE LAS ROCAS ARENISCAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA
(MECANICA)
P R E S E N T A :
ENRIQUE A. CONTRERAS LOPEZ.

México, D.F.

Febrero 1987.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

La permeabilidad, la porosidad y la expansión térmica son un conjunto de parámetros fundamentales para caracterizar a las rocas del subsuelo en lo que respecta a su función como recipientes de contención, medios de transporte y miembros estructurales. Debido a que la explotación de los yacimientos geotérmicos y petroleros involucra la ocurrencia de eventos susceptibles de hacer cambiar la temperatura de las rocas intervinientes, es evidente la importancia de que se tenga bien caracterizado el efecto de la temperatura sobre las propiedades referidas. La información existente acerca del efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de las rocas es en general muy escasa y en algunos casos exhibe un alto grado de inconsistencias, por lo que está plenamente justificada la realización de proyectos de investigación en este campo.

En el presente trabajo se reportan resultados de investigaciones acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad, la porosidad y la expansión térmica de las rocas areniscas en el intervalo de 20 C a 280 C. Los resultados de estas investigaciones pueden tener importantes aplicaciones prácticas debido a que los horizontes productores de muchos yacimientos geotérmicos y petroleros están constituidos por rocas areniscas. El procedimiento adoptado para realizar las investigaciones consistió en una combinación de mediciones experimentales en especímenes de roca y análisis teóricos basados en modelos conceptuales de medios porosos.

Se observó que la permeabilidad al agua de las rocas areniscas se reduce hasta en dos órdenes de magnitud con el incremento de la temperatura entre 20 C y 280 C. Se encontró que el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad es altamente reversible en ausencia de fenómenos tales como disolución de minerales, alteración de arcillas y obturación de los poros de las rocas. Se encontró además que la relación funcional entre la permeabilidad y la temperatura se apega con mucha aproximación a un modelo de variación lineal en coordenadas logarítmicas.

Se efectuaron una serie de estudios experimentales y analíticos para tratar de determinar el origen y la naturaleza de los mecanismos causantes de la disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura.

Se desarrolló un modelo físico-matemático del fenómeno de expansión térmica en un medio poroso. A partir de dicho modelo se establecieron las bases conceptuales y analíticas de un método experimental original que permite evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad a partir de datos de expansión térmica lineal del medio poroso. Empleando el método ideado se cuantificó el efecto de la temperatura sobre la porosidad de

algunas muestras de rocas areniscas sometidas a condiciones de confinamiento representativas de las condiciones de esfuerzo existentes en un yacimiento.

Se efectuaron estudios experimentales sobre diversos aspectos relacionados con la expansión térmica de las rocas areniscas. A partir de estos estudios se obtuvo información acerca de características tales como la magnitud del coeficiente de expansión térmica, la reversibilidad y la repetibilidad de la expansión térmica, el efecto de la rapidez de variación de la temperatura, el efecto de la presión de confinamiento y la isotropía de la expansión térmica.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	vi
NOMENCLATURA	viii
1 INTRODUCCION	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 ANTECEDENTES	3
1.3 DESARROLLO DEL TRABAJO Y DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS PRINCIPALES	4
2 CONCEPTOS BASICOS SOBRE EL FLUJO DE FLUIDOS EN MEDIOS POROSOS	7
2.1 LA LEY DE DARCY Y EL CONCEPTO DE PERMEABILIDAD	7
2.1.1 Antecedentes	7
2.1.2 Evolución de la ley de Darcy y Establecimiento del Concepto de Permeabilidad	8
2.1.3 Formulación Generalizada de la Ley de Darcy	12
2.2 LIMITACIONES DE LA LEY DE DARCY EN RELACION CON LAS CARACTERISTICAS DINAMICAS DEL FLUJO EN UN MEDIO POROSO	15
2.3 CORRELACIONES DE LA PERMEABILIDAD CON OTRAS PROPIEDADES DERIVADAS DE LA GEOMETRIA DE UN MEDIO POROSO	17
2.3.1 Teoría del Modelo Básico de Tubos Capilares	18
2.3.2 Teoría de Kozeny	19
2.4 DIMENSIONES Y UNIDADES DE LA PERMEABILIDAD	21
2.5 MEDICION DE LA PERMEABILIDAD	22
3 ANALISIS DEL FENOMENO DE EXPANSION TERMICA EN UN MEDIO POROSO Y DE SU RELACION CON EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD	26
3.1 EL CONCEPTO DE POROSIDAD	27
3.2 EXPRESIONES MATEMATICAS PARA DESCRIBIR LA VARIACION DE LA POROSIDAD EN FUNCION DE CAMBIOS DE VOLUMEN	28

3.3	RELACIONES ENTRE EL FENOMENO DE EXPANSION TERMICA EN UN MEDIO POROSO Y EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD	29
3.3.1	Definición de Coeficientes Volumétricos de Expansión Térmica de un Medio Poroso	29
3.3.2	Relación Entre los Coeficientes Volumetricos de Expansión Térmica y la Porosidad	30
3.3.3	Relaciones Entre los Coeficientes de Expansión Térmica y el Efecto de la Temperatura Sobre la Porosidad	31
3.4	ANALISIS E INTERPRETACION FISICA DE LOS COEFICIENTES DE EXPANSION TERMICA EN RELACION CON EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD	32
3.4.1	Análisis de la Expansión Térmica en un Medio Poroso Sujeto a Confinamiento Totalmente Rígido.	32
3.4.2	Análisis de la Expansión Térmica en un Medio Poroso Sujeto a Confinamiento Flexible	35
	Análisis del caso en que la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales	37
	Análisis del caso general en que la presión de confinamiento es mayor que la presión de poro	38
3.4.3	Conclusiones Acerca del Análisis del Fenómeno de Expansión Térmica en un Medio Poroso	40
3.5	DEDUCCION DE UN METODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD A PARTIR DE MEDICIONES DE EXPANSION TERMICA LINEAL	41
3.5.1	Equivalencia Entre el Coeficiente de Expansión Térmica del Material Sólido y el Coeficiente de Expansión Térmica del Volumen Total de un Medio Poroso	42
3.5.2	Deducción del Método Experimental	44
	APENDICE 3.A: DEDUCCION DE LA EC. 3.4.2	48
4	REVISION DE LITERATURA	51
4.1	EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PERMEABILIDAD	51
4.2	EXPANSION TERMICA DE ROCAS ARENISCAS Y EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD	57
5	EXTENSION DE LOS ESTUDIOS EXPERIMENTALES	65
5.1	MEDICIONES DE PERMEABILIDAD	65

5.2	MEDICIONES DE EXPANSION TERMICA REALIZADAS CON EL OBJETO DE OBTENER DATOS PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD	68
5.3	MEDICIONES REALIZADAS CON OBJETO DE INVESTIGAR DIVERSOS ASPECTOS RELACIONADOS CON LA EXPANSION TERMICA DE ROCAS	69
6	EQUIPO Y TECNICAS EXPERIMENTALES	74
6.1	CARACTERISTICAS GENERALES DEL EQUIPO	74
6.2	EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS QUE SE EMPLEARON PARA EFECTUAR LAS MEDICIONES DE PERMEABILIDAD	80
6.2.1	Sistema de Flujo	82
6.2.2	Configuración de los Componentes Dentro del Vaso de Presión	85
6.2.3	Sistema de Presurización	87
6.2.4	Sistema de Calentamiento y Control de la Temperatura	89
6.2.5	Sistemas de Medición	91
	Sistema de medición del gasto volumétrico del fluido de permeabilidad	93
	Sistema de medición de la presión diferencial	96
	Sistema de medición de temperaturas	99
6.2.6	Sistema de Adquisición de Datos	99
6.3	EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS QUE SE EMPLEARON PARA EFECTUAR LAS MEDICIONES DE EXPANSION TERMICA	100
7	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	107
7.1	EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PERMEABILIDAD	107
7.1.1	Análisis de los Resultados Experimentales	107
	Resultados de la muestra M107-V3	108
	Resultados de la muestra M129-V3	111
	Resultados de la muestra M107-V1	112
	Resultados de la muestra M107-H4 (agua)	117
	Resultados de la muestra M107-H4 (salmuera)	118
	Resultados de la muestra M107-H2	120
	Resultados de la muestra M127-V2	121
7.1.2	Discusión Acerca de la Caracterización de los Cambios de Permeabilidad Directamente Atribuibles al Efecto de la Temperatura	122
7.2	ESTUDIOS PARA INVESTIGAR EL ORIGEN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PERMEABILIDAD	150
7.2.1	Estudios Para Investigar la Vinculación Entre la Reducción de la Permeabilidad y la Reducción de la Porosidad	150

Efecto de la temperatura sobre la porosidad	151
Estimación del grado en que la reducción de porosidad originada por el incremento de la temperatura puede influir sobre la permeabilidad	153
7.2.2 Estudio Acerca del Efecto de la Reducción del Area de la Sección Transversal de los Conductos de Flujo Sobre la Permeabilidad	156
7.3 ESTUDIOS SOBRE DIVERSOS ASPECTOS DE LA EXPANSION TERMICA DE LAS ROCAS ARENISCAS	170
7.3.1 Reversibilidad y Repetibilidad de la Expansión Térmica	170
7.3.2 Efecto de la Rapidez de Variación de la Temperatura	171
7.3.3 Invariabilidad de los Segmentos de Enfriamiento de las Gráficas de Expansión Térmica	172
7.3.4 Efecto de la Presión de Confinamiento Sobre la Expansión Térmica	172
7.3.5 Isotropía de la Expansión Térmica	173
 8 CONCLUSIONES	 185
 REFERENCIAS	 190

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Pag.
2.1.1	Esquema del sistema experimental empleado por Darcy para estudiar el flujo de agua a través de lechos de arena.	9
2.5.1	Esquema y fórmulas de cálculo para determinar la permeabilidad de un medio poroso por medio de un sistema de flujo lineal.	24
2.5.2	Esquema y fórmulas de cálculo para determinar la permeabilidad de un medio poroso por medio de un sistema de flujo radial.	25
3.4.1	Esquema de un medio poroso revestido con una cubierta flexible, sometido a presión de confinamiento y presión de poro.	36
3.A.1	Diagrama de cuerpo libre de un elemento arbitrario de un medio poroso sometido a una presión de confinamiento P_C y a una presión de poro P_0 .	50
4.2.1	Expansión térmica lineal del cuarzo y de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Somerton y Selim, [1961]).	58
4.2.2	Expansión térmica lineal de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Ashqar, [1979]).	58
4.2.3	Efecto de la temperatura sobre el volumen de los poros de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Janah, [1980]).	60
4.2.4	Expansión térmica lineal de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Greenwald et al. [1982]).	60
4.2.5	Efecto de la temperatura sobre el volumen de poros de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Greenwald et al. [1982]).	61
4.2.6	Efecto de la temperatura sobre la porosidad de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Greenwald et al. [1982]).	61
6.1.1	Diagrama de conjunto del sistema experimental que se empleó para efectuar las mediciones de permeabilidad y de expansión térmica.	77

6.1.2	Esquema detallado del vaso de presión mostrando la configuración experimental y la instrumentación que se emplean en las determinaciones de comportamiento mecánico.	79
6.2.1	Diagrama simplificado del sistema experimental empleado para efectuar las mediciones de permeabilidad.	81
6.2.2	Diagrama del sistema de flujo que se empleó para hacer circular el fluido de trabajo a través de las muestras de roca durante la ejecución de las mediciones de permeabilidad.	83
6.2.3	Esquema detallado del vaso de presión mostrando la disposición de los componentes del arreglo experimental que se empleó para efectuar las mediciones de permeabilidad.	86
6.2.4	Diagrama del sistema de presurización.	88
6.2.5	Diagrama del sistema de calentamiento y control de la temperatura.	90
6.2.6	Diagrama simplificado de los sistemas de medición que se emplearon para medir las variables físicas requeridas para cuantificar la permeabilidad y monitorear el desarrollo de las pruebas.	92
6.2.7	Esquema del sistema de medición de la posición del émbolo de separación de los acumuladores hidroneumáticos.	94
6.2.8	Diagrama del sistema que se empleó para medir la diferencia de presiones entre los extremos de la muestra de roca.	97
6.3.1	Diagrama de conjunto del equipo experimental que se empleó para efectuar las mediciones de expansión térmica.	101
6.3.2	Esquema del montaje de la muestra de roca dentro del vaso de presión para la medición de expansión térmica.	102
6.3.3	Esquema detallado de la instrumentación que se empleó para medir la dilatación térmica de las muestras de roca.	104
7.1.1	Influencia de la temperatura sobre la permeabilidad de la muestra M107-V3.	134

7.1.2	Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-V3.	135
7.1.3	Efecto de la presión sobre la permeabilidad a diferentes temperaturas en la muestra M107-V3.	136
7.1.4	Gráfica permeabilidad-temperatura de resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M129-V3.	137
7.1.5	Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M129-V3.	138
7.1.6	Gráfica permeabilidad-temperatura de resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M107-V1.	139
7.1.7	Gráfica permeabilidad-tiempo de resultados de mediciones efectuadas en la muestra M107-V1.	140
7.1.8	Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-V1.	141
7.1.9	Influencia de la temperatura sobre la permeabilidad de la muestra M107-H4 (fluido: agua destilada).	142
7.1.10	Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-H4 con agua destilada como fluido de trabajo.	143
7.1.11	Gráfica permeabilidad-temperatura de resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M107-H4 con salmuera como fluido de trabajo.	144
7.1.12	Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-H4 (con salmuera como fluido de permeabilidad).	145
7.1.13	Gráfica permeabilidad-temperatura de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-H2.	146
7.1.14	Gráfica permeabilidad-temperatura de resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M127-V2.	147
7.1.15	Efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de algunas rocas areniscas (según datos de Casse [1974] y Aruna [1977]).	148
7.1.16	Efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas según el ajuste lineal en coordenadas logarítmicas de datos experimentales.	149

7.2.1	Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra M94-1 sometida a 20.7 Mpa de presión de confinamiento y presión de poro nula.	159
7.2.2	Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra M149-1 sometida a 20.7 Mpa de presión de confinamiento y presión de poro nula.	160
7.2.3	Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra BERE-1 sometida a 20.7 Mpa de presión de confinamiento y presión de poro nula.	161
7.2.4	Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra COLTON-1 sometida a 20.7 Mpa de presión de confinamiento y presión de poro nula.	162
7.2.5	Efecto de la temperatura sobre la porosidad de las muestras de roca arenisca M94-1, M149-1, BERE-1 y COLTON-1 sometidas a 20.7 Mpa de presión de confinamiento y presión de poro nula.	163
7.2.6	Efecto de la reducción del radio de los conductos de flujo sobre la permeabilidad de un modelo de tubos capilares.	164
7.3.1	Reversibilidad y repetibilidad de la expansión térmica: gráficas correspondientes a los dos ciclos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra M127-A.	174
7.3.2	Reversibilidad y repetibilidad de la expansión térmica: gráficas correspondientes a los dos ciclos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra M127-HA.	175
7.3.3	Gráficas de expansión térmica correspondientes a tres ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra M149-A con diferente rapidez de variación de la temperatura.	176
7.3.4	Gráficas de expansión térmica correspondientes a tres ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra KAYENTA-1 con diferente rapidez de variación de la temperatura.	177
7.3.5	Segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M127-A.	178

7.3.6	Segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M127-HA.	179
7.3.7	Segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M149-A.	180
7.3.8	Segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra KAYENTA-1.	181
7.3.9	Efecto aparente de la presión de confinamiento sobre la expansión térmica: gráficas correspondientes a tres ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra KAYENTA-2 a diferentes presiones de confinamiento.	182
7.3.10	Efecto real de la presión de confinamiento sobre la expansión térmica de la muestra KAYENTA-2, de acuerdo a los segmentos de enfriamiento de las gráficas mostradas en la Fig. 7.3.9.	183
7.3.11	Anisotropía de la expansión térmica de rocas areniscas: gráficas correspondientes a mediciones efectuadas en la dirección longitudinal de dos muestras cilíndricas que fueron cortadas del mismo núcleo en direcciones mutuamente perpendiculares.	184

LISTA DE TABLAS

Tabla	Título	Pag.
5.1.1	Extensión y condiciones experimentales de las mediciones de permeabilidad.	66
5.2.1	Extensión y condiciones experimentales de las mediciones de expansión térmica efectuadas para evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad.	71
5.3.1	Extensión y condiciones experimentales de las mediciones realizadas con objeto de investigar diversos aspectos relacionados con la expansión térmica de las rocas areniscas.	73
6.1.1	Capacidad experimental básica del simulador geotérmico.	76
7.1.1	Resultados de las mediciones de permeabilidad realizadas en la muestra M107-V3.	126
7.1.2	Resultados de las mediciones de permeabilidad realizadas en la muestra M129-V3.	127
7.1.3	Resultados de las mediciones de permeabilidad realizadas en la muestra M107-V1.	128
7.1.4	Resultados de las mediciones de permeabilidad realizadas en la muestra M107-H4 (con agua destilada como fluido de trabajo).	129
7.1.5	Resultados de las mediciones de permeabilidad realizadas en la muestra M107-H4 (con salmuera como fluido de trabajo).	130
7.1.6	Resultados de las mediciones de permeabilidad realizadas en la muestra M107-H2.	131
7.1.7	Resultados de las mediciones de permeabilidad realizadas en la muestra M127-V2.	132
7.1.8	Resumen de los parámetros descriptivos del ajuste lineal de los valores logarítmicos de datos experimentales permeabilidad-temperatura.	133
7.2.1	Efecto de la temperatura sobre la porosidad de la muestra M94-1; calculado a partir de datos experimentales de expansión térmica lineal.	165

7.2.2	Efecto de la temperatura sobre la porosidad de la muestra M149-1; calculado a partir de datos experimentales de expansión térmica lineal.	166
7.2.3	Efecto de la temperatura sobre la porosidad de la muestra COLTON-1; calculado a partir de datos experimentales de expansión térmica lineal.	167
7.2.4	Efecto de la temperatura sobre la porosidad de la muestra KAYENTA-1; calculado a partir de datos experimentales de expansión térmica lineal.	168
7.2.5	Coefficientes de expansión térmica lineal de las muestras de roca arenisca M94-1, M149-1, COLTON-1 y KAYENTA-1.	169

NOMENCLATURA

- A área de la sección transversal a la dirección del flujo
- a constante (Ecs. 2.2.3 y 2.2.4)
- b pendiente de la recta de mejor ajuste de los datos experimentales permeabilidad-temperatura en coordenadas logarítmicas
- C constante de la expresión original de la ley de Darcy
- C' constante de proporcionalidad (Ecs. 2.1.6 y 2.1.7)
- cc coeficiente de correlación del ajuste lineal de datos
- d longitud característica del medio poroso: diámetro medio de los granos; diámetro de los tubos capilares de un modelo de un medio poroso
- \vec{e}_z vector unitario en la dirección positiva de la coordenada vertical
- g magnitud de la aceleración de la gravedad
- \vec{g} vector de aceleración de la gravedad
- h altura piezométrica
- K permeabilidad
- L longitud
- l coseno del ángulo formado entre un vector y la dirección positiva del eje X
- m coseno del ángulo formado entre un vector y la dirección positiva del eje Y
- \dot{m} gasto másico
- N factor de proporcionalidad adimensional (Ec. 2.1.7); número total de tubos capilares de que consta un modelo básico de un medio poroso
- n coseno del ángulo formado entre un vector y la dirección positiva del eje Z
- Pc presión de confinamiento

P_o	presión de poro
p	presión estática del fluido
Q	gasto volumétrico
R	radio de la sección transversal del modelo de tubos capilares
Re	número de Reynolds
S	área superficial por unidad de volumen total
S_o	área superficial por unidad de volumen de material sólido
s	coordenada en la dirección del flujo
T	temperatura
\dot{T}	rapidez de variación de la temperatura
V	velocidad aparente del flujo
\vec{V}	vector de la velocidad aparente del flujo
V_i	velocidad aparente del flujo en la dirección de la coordenada x_i
V_s	velocidad aparente del flujo en la dirección de la coordenada s
V^*	velocidad media de las partículas del fluido
V_B	volumen total de un medio poroso
V_p	volumen de los poros
V_S	volumen del material sólido
X	eje de un sistema de coordenadas rectangulares
x	coordenada en la dirección del eje X
x_i	coordenada generalizada
Y	eje de un sistema de coordenadas rectangulares
y	coordenada en la dirección del eje Y
Z	eje de un sistema de coordenadas rectangulares
z	coordenada en la dirección del eje Z

α_B	coeficiente de expansión térmica del volumen total
α_L	coeficiente de expansión térmica lineal
α_P	coeficiente de expansión térmica del volumen de poros
α_S	coeficiente de expansión térmica del material sólido
Δ	denota un cambio en el valor de variable que antecede
ε	expansión térmica lineal unitaria del volumen total
ε^*	expansión térmica lineal unitaria del material sólido
γ	constante de Kozeny
λ	factor de fricción
μ	viscosidad dinámica del fluido
ϕ	porosidad
ρ	densidad del fluido
σ	esfuerzo
τ	factor de tortuosidad

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 CONTEXTO

El conocimiento de las propiedades físicas de las rocas es un aspecto importante para muchas aplicaciones relacionadas con la localización, evaluación y explotación de los recursos energéticos y minerales del subsuelo, así como en otras áreas de interés científico y tecnológico que involucran el estudio de eventos en los que las rocas de la corteza terrestre actúan como miembros estructurales, recipientes de contención y medios de transporte o de propagación.

Entre las propiedades físicas de rocas cuyo conocimiento es relevante para las aplicaciones genéricas antes mencionadas cabe citar por su importancia a las siguientes: densidad, porosidad, permeabilidad, constantes elásticas, resistencia mecánica, conductividad y difusividad térmica, calor específico, coeficiente de expansión térmica, resistividad eléctrica, compresibilidad y velocidad de propagación de ondas acústicas.

Uno de los métodos más importantes de que se dispone para obtener datos sobre propiedades físicas de las rocas consiste en efectuar mediciones de laboratorio en especímenes ya sea tomados de afloramientos o extraídos del subsuelo durante las operaciones de perforación de pozos. Actualmente es una práctica bastante común emplear datos obtenidos mediante experimentación en especímenes sometidos a condiciones ambiente de presión y temperatura para modelar y estudiar eventos que ocurren en el subsuelo, en donde las condiciones imperantes pueden ser muy diferentes.

Aunque los conocimientos que se tienen en la actualidad acerca de los efectos de la presión y de la temperatura sobre las propiedades de las rocas son limitados, constituyen evidencia suficiente para cuestionar la validez de emplear datos obtenidos a condiciones ambiente en aplicaciones en donde las rocas están sometidas a condiciones de alta presión y alta temperatura, tal como ocurre normalmente en los yacimientos geotérmicos y en yacimientos petroleros muy profundos.

Hasta ahora se ha desarrollado poca investigación sobre el comportamiento y las propiedades de rocas sometidas a condiciones de alta temperatura. Esto se debe parcialmente a que es relativamente reciente el interés en los procesos extractivos de energía y de minerales que involucran la participación de masas

de roca a alta temperatura. Otro factor limitante lo constituye la problemática inherente a cualquier campo de la experimentación cuando la temperatura es elevada, para lo cual se requiere de disponer de equipo especializado. De cualquier manera, la escasez de información acerca del efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de las rocas es un aspecto que puede limitar el desarrollo de actividades relacionadas principalmente con el aprovechamiento de los recursos del subsuelo. Por ejemplo, si en la tecnología de explotación de los yacimientos geotérmicos y petroleros se ignora el efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de las rocas intervinientes, se corre el riesgo de incurrir en errores en relación con actividades tales como estimación de las reservas y de la productividad del yacimiento, interpretación de registros eléctricos y pruebas de presión, modelación matemática, planeación de técnicas de estimulación y predicción de asentamientos del terreno.

Lo antes expuesto justifica la realización de proyectos de investigación acerca del efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de las rocas. En este contexto, el presente trabajo está dedicado a la investigación experimental del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad absoluta, la porosidad y la expansión térmica de rocas areniscas en el intervalo de 20°C a 280°C. Estas propiedades constituyen un conjunto de parámetros fundamentales para caracterizar a las rocas de un yacimiento en lo que respecta a su función como recipientes de contención, medios de transporte y miembros estructurales. Los resultados de las investigaciones realizadas pueden tener importantes aplicaciones debido a que los horizontes productores de muchos yacimientos petroleros y geotérmicos están constituidos por rocas areniscas.

Los estudios acerca del efecto de la temperatura sobre la porosidad y sobre la expansión térmica se originaron como parte de la metodología de investigación del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad, tópico que al inicio de este trabajo fue considerado como el objetivo central. Sin embargo, debido a que prácticamente no existían en la literatura reportes sobre investigaciones relativas al efecto de la temperatura sobre la porosidad y la expansión térmica de rocas areniscas, los estudios sobre estas propiedades se ampliaron más allá del mero contexto de apoyo a la metodología de investigación del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad. De esta manera, las investigaciones realizadas en relación con cada una de las tres propiedades constituyen partes igualmente importantes del presente trabajo.

1.2 ANTECEDENTES

La porosidad y la permeabilidad son las propiedades que describen a las características más importantes de las rocas desde el punto de vista de la ingeniería de yacimientos geotérmicos y petroleros, o sea la capacidad de almacenamiento y la transmisividad de los fluidos. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta que la explotación de los yacimientos involucra la ocurrencia de eventos susceptibles de alterar la temperatura de las rocas intervinientes, resulta de la mayor relevancia que se tenga bien caracterizado, cualitativamente y cuantitativamente, el efecto de la temperatura sobre la porosidad y la permeabilidad.

Los datos sobre permeabilidad de rocas para aplicaciones de ingeniería de yacimientos tradicionalmente se han obtenido a partir de mediciones de laboratorio en especímenes sometidos a temperatura ambiente, y en general se han aplicado sin tener en consideración la posibilidad de que esta propiedad sea dependiente de la temperatura.

Debido al interés en la geotermia y a que cada vez se perforan pozos petroleros a mayor profundidad, con lo cual se alcanzan mayores temperaturas en la roca, y se emplean técnicas de recuperación que involucran la inyección de fluidos calientes a la formación, el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas se ha convertido en un aspecto cuya investigación es prioritaria.

Se encuentran publicados en la literatura algunos pocos informes de investigaciones acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad absoluta de varios tipos de rocas y materiales porosos sintéticos percolados con agua, aceite, nitrógeno y otros fluidos (en el capítulo 4 se presenta la revisión de literatura y se proporcionan las referencias pertinentes).

En lo que se refiere a las investigaciones efectuadas en rocas areniscas empleando agua o soluciones acuosas como fluido de trabajo, los resultados reportados exhiben en especial un alto grado de inconsistencia y contradicciones. Mientras que algunos autores han reportado disminuciones muy importantes de la permeabilidad con el aumento de la temperatura, otros de ellos han calificado estas observaciones como erróneas y a la vez han reportado no haber detectado efecto alguno de la temperatura sobre la permeabilidad. Algunos de los autores que han reportado disminuciones de la permeabilidad con el aumento de la temperatura han externado algunas ideas sobre el posible origen del fenómeno, aunque sin efectuar ningún análisis posterior para tratar de establecer la validez de dichas hipótesis. Por otra parte, no se ha tratado de determinar si las observaciones

contradictorias reportadas por diferentes investigadores pueden explicarse considerando la posibilidad de que el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad sea diferente para rocas de diferentes características texturales. Tampoco se han hecho intentos para profundizar en el estudio del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas con la ayuda de modelos de medios porosos.

Atendiendo a la problemática expuesta en el párrafo anterior y teniendo en cuenta que el flujo de soluciones acuosas a través de rocas areniscas es un fenómeno de mucha importancia en ingeniería de yacimientos, el objetivo inicial de este trabajo consistió en mejorar los conocimientos acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas, tanto en lo que se refiere a la obtención de evidencias mediante experimentación como al entendimiento del origen del fenómeno y de las circunstancias que determinan su ocurrencia. Como ya se mencionó en la sección precedente, el objetivo inicial se enriqueció durante el desarrollo mismo de los estudios experimentales con la obtención de resultados originales, e importantes por sí mismos, acerca del efecto de la temperatura sobre la porosidad y sobre la expansión térmica de las rocas areniscas.

1.3 DESARROLLO DEL TRABAJO Y DESCRIPCION DE LOS RESULTADOS PRINCIPALES

Se efectuaron mediciones de la permeabilidad absoluta como función de la temperatura en seis especímenes de roca arenisca obtenidos de núcleos de perforación de tres pozos del campo geotérmico Cerro Prieto. En cada espécimen se midió la permeabilidad a varios niveles de temperatura en el intervalo de 20°C a 280°C. En la mayoría de los casos se empleó como fluido de trabajo salmuera sintética, de composición similar a la que se encuentra en el yacimiento.

Los resultados obtenidos indican en forma consistente que la permeabilidad de las rocas areniscas ensayadas se redujo notoriamente y en algunos casos acusadamente (hasta en dos órdenes de magnitud), con el aumento de temperatura entre los límites de 20°C y 280°C. Se observó que el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad es altamente reversible en ausencia de fenómenos tales como disolución de componentes, alteración de arcillas y obturación de los poros, los cuales también afectan a la permeabilidad de las rocas. Además, se encontró que la relación funcional entre la permeabilidad y la temperatura se apega con mucha aproximación a un modelo de variación lineal en coordenadas logarítmicas.

A continuación se efectuaron una serie de estudios experimentales y análisis con ayuda de un modelo simple de un medio poroso para tratar de determinar el origen y la naturaleza de los mecanismos responsables de la disminución de la permeabilidad con el aumento de temperatura. Como parte integral de lo anterior se trató de encontrar alguna razón que permitiera explicar y conciliar los resultados contradictorios que tradicionalmente caracterizan a las investigaciones sobre este tópico.

Por una parte se planteó el objetivo de determinar si la disminución de permeabilidad podía ser atribuida a una probable reducción de la porosidad producida por el aumento de la temperatura. Esto condujo a su vez a la necesidad de disponer de información acerca del efecto de la temperatura sobre la porosidad de las rocas areniscas. Debido a que los datos reportados en la literatura sobre este tópico eran escasos y poco confiables, se desarrolló un método experimental novedoso que permite evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad a partir de mediciones de expansión térmica lineal en la roca. Mediante la aplicación de este método se cuantificó el efecto de la temperatura sobre la porosidad en cuatro especímenes de rocas areniscas. Se determinó que la porosidad de las rocas areniscas ensayadas disminuyó en aproximadamente 2% como consecuencia de haberse incrementado su temperatura de 20 °C a 280 °C.

A continuación se trató de determinar si la reducción de porosidad del orden de 2% podía dar lugar al fenómeno de disminución de la permeabilidad con el aumento de temperatura en la proporción observada en las mediciones experimentales realizadas como parte de este trabajo, así como en algunas mediciones reportadas por otros investigadores. Se consideraron para ello dos líneas de evidencia. Por una parte, con base en resultados reportados en la literatura acerca del efecto de la presión de confinamiento sobre la porosidad y sobre la permeabilidad de rocas areniscas, se llegó a la conclusión de que reducciones de porosidad de hasta 10% producidas en las rocas por medio de la aplicación de presión de confinamiento no dan lugar a disminuciones de permeabilidad tan drásticas como las observadas por el efecto de la temperatura en el intervalo de 20 °C a 280 °C (en cuyo caso la reducción de porosidad involucrada es tan sólo del orden de 2%). Por otra parte, empleando un modelo básico de tubos capilares para idealizar a la roca se determinó que la reducción de porosidad del orden de 2% es insuficiente para explicar la disminución de permeabilidad en la proporción observada en las mediciones experimentales. Con fundamento en los argumentos anteriores se concluyó que la reducción de porosidad derivada de la expansión térmica de los materiales constituyentes de las rocas areniscas no es el mecanismo principal que dá origen a la disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura.

Otra línea de la investigación se desarrolló atendiendo a la hipótesis propuesta por algunos autores en el sentido de que la disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura se debe a una interacción física entre el cuarzo de la roca y el agua, fenómeno el cual supuestamente dá lugar a la reducción del área efectiva de los conductos de flujo. Idealizando a la roca mediante el modelo del haz de tubos capilares se analizó el efecto que tendría una determinada reducción del diámetro de los poros sobre la permeabilidad de rocas de diferente tamaño de poro. Se encontró que para una determinada reducción absoluta del diámetro de los conductos de flujo la disminución de la permeabilidad es una función inversa del diámetro original de los propios conductos. Tal reducción del tamaño de los poros podría originarse en las rocas areniscas por la ocurrencia de la propuesta interacción agua-cuarzo que se extendiera desde la pared de los poros hacia el centro de los mismos cubriendo un espesor dado, independientemente del tamaño del poro en el cual se desarrolla el fenómeno.

No obstante que proviene del análisis en un modelo muy simplificado, el resultado antes descrito sugiere que la ocurrencia de cualquier fenómeno que origine una determinada reducción del diámetro de los conductos de flujo producirá reducciones de permeabilidad que serán más significantes a medida que sea más fino el tamaño de los poros de la roca. Esta observación puede constituir la base para explicar los resultados inconsistentes y contradictorios que se han reportado en la literatura acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad.

Finalmente, otros logros derivados de la ejecución del presente trabajo consisten en una serie de estudios originales relacionados con diversos aspectos de la expansión térmica de las rocas areniscas, tales como reversibilidad de la expansión térmica, efecto de la rapidez de variación de la temperatura, efecto de la presión de confinamiento y evaluación de la anisotropía de la expansión térmica. Estos estudios se efectuaron con objeto de aprovechar la infraestructura experimental que se implementó para efectuar las mediciones que se requirieron para evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad y debido principalmente a que la investigación experimental sobre la expansión térmica de rocas areniscas era un campo prácticamente inexplorado. Los resultados obtenidos, aún en su calidad de subproductos, constituyen contribuciones originales al conocimiento del comportamiento de las rocas y también se incluyen en este trabajo.

CAPITULO 2

CONCEPTOS BASICOS SOBRE EL FLUJO DE FLUIDOS EN MEDIOS POROSOS

En este capítulo se presenta una revisión general acerca del concepto de permeabilidad en su carácter de parámetro fundamental mediante el cual se describe la capacidad de los medios porosos como elementos conductores de fluidos. El objetivo de la revisión es presentar unificadamente, con una estructuración adecuada al caso, los conceptos sobre flujo de fluidos en medios porosos que intervienen en el desarrollo y en las discusiones de este trabajo. El material expuesto consiste esencialmente de una síntesis de conceptos e información disponibles en varias fuentes, pudiendo considerársele como una monografía introductoria sobre el concepto de permeabilidad.

2.1 LA LEY DE DARCY Y EL CONCEPTO DE PERMEABILIDAD

2.1.1 Antecedentes

El movimiento de los fluidos a través de medios porosos debe estar gobernado por los mismos principios físicos que rigen el movimiento de los fluidos viscosos en conductos libres ordinarios. Estos principios, los cuales están expresados mediante las ecuaciones de Navier-Stokes de la mecánica de los fluidos, imponen sobre la distribución de velocidades en cualquier sistema de flujo la condición del equilibrio dinámico entre las fuerzas de inercia, las fuerzas viscosas, las fuerzas de cuerpo y las fuerzas originadas por la distribución interna de presiones en el fluido.

Por consiguiente, desde el punto de vista teórico debería ser posible describir el flujo de fluidos a través de medios porosos mediante la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo, las dificultades matemáticas que plantea la aplicación de estas ecuaciones para analizar el flujo en un medio poroso han determinado que las investigaciones más importantes sobre este tópico se hayan realizado empleando métodos experimentales.

Los primeros estudios experimentales sobre el flujo de fluidos en medios porosos se atribuyen a Darcy (Hubbert [1956]), quien en 1856 recurrió a la experimentación para estudiar aspectos relacionados con el flujo de agua a través de filtros de arena, estableciendo con ello las bases reales de la teoría cuantitativa del flujo de fluidos a través de medios porosos.

Darcy llevó a cabo sus investigaciones clásicas acerca del flujo de agua a través de empaquetamientos de arena empleando un sistema experimental como el que se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.1.1. Darcy formuló sus observaciones enunciando que el gasto volumétrico de agua (Q) que pasaba a través de un lecho de arena de sección transversal A y longitud L era directamente proporcional a la diferencia de las alturas piezométricas del fluido ($h_1 - h_2$), medidas respectivamente en una sección situada por encima y en otra sección situada por debajo del empaquetamiento de arena. La representación matemática que originalmente Darcy le dió a sus observaciones experimentales es

$$Q = - CA \frac{(h_2 - h_1)}{L} \quad (2.1.1)$$

donde C es "una constante de proporcionalidad dependiente de la permeabilidad de cada empaquetamiento de arena en particular" (Darcy [1856]).

A la Ec. 2.1.1 junto con una familia de expresiones matemáticas generalizadas que se han derivado de esta ecuación básica se les denomina en forma genérica como la ley de Darcy.

Dividiendo el gasto volumétrico (Q) entre el área de la sección transversal (A) se obtiene la llamada velocidad de filtración o velocidad lineal aparente del flujo (V). Dividiendo a su vez la velocidad aparente entre la porosidad del medio (ϕ) se obtiene la velocidad media de las partículas de fluido (V^*). Expresado en forma de ecuaciones, se tiene que

$$V = \frac{Q}{A} = - C \frac{(h_2 - h_1)}{L} \quad (2.1.2)$$

$$V^* = \frac{V}{\phi} = - C \frac{(h_2 - h_1)}{\phi L} \quad (2.1.3)$$

2.1.2 Evolución de la Ley de Darcy y Establecimiento del Concepto de Permeabilidad

Las investigaciones de Darcy en lo que concierne al flujo de fluidos a través de medios porosos se limitaron al estudio experimental del flujo de agua a través de empaquetamientos de arena que estaban totalmente saturados. Sin embargo, debido a su importancia práctica para caracterizar el flujo de fluidos a través de los medios porosos, los resultados básicos formulados

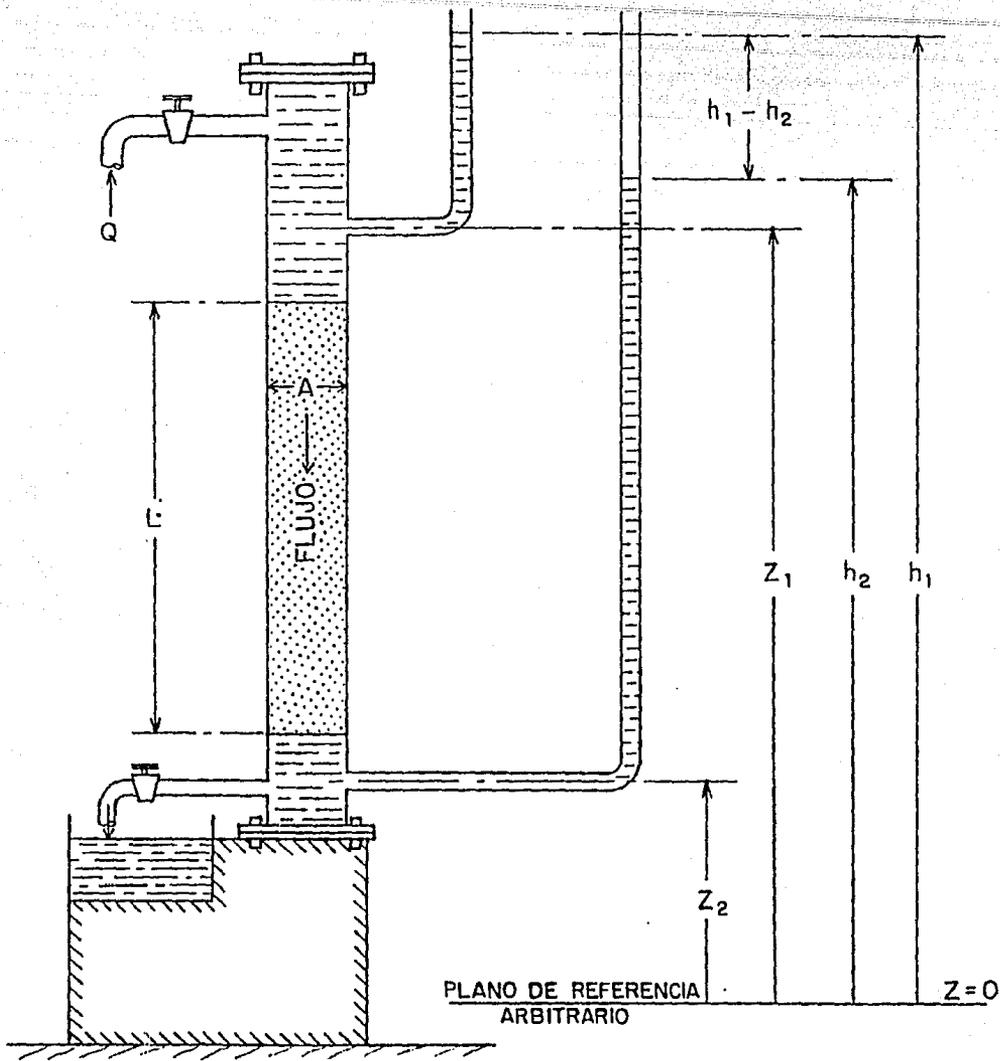


Fig. 2.1.1 Esquema del sistema experimental empleado por Darcy para estudiar el flujo de agua a través de lechos de arena (Hubbert, [1956]).

por Darcy en la manera expresada por la Ec. 2.1.1 han sido objeto de investigaciones empíricas, análisis teóricos y manipulaciones matemáticas (Hubbert [1956]). La finalidad de todo ello ha sido corroborar dicha ley, determinar sus límites de aplicabilidad, establecer modificaciones apropiadas para conferirle mayor generalidad, deducir expresiones matemáticas generalizadas conceptualmente equivalentes a la expresión original y adquirir conocimientos sobre la naturaleza de la constante de proporcionalidad "C" que figura en dicha expresión original.

Experimentalmente se determinó que la expresión original de la ley de Darcy también era aplicable para describir el flujo de otros fluidos diferentes al agua a través de empaquetamientos de arena y otros tipos de materiales porosos. Sin embargo, se encontró que el valor de la constante C dependía por una parte del tipo de medio poroso considerado, y por otra parte del tipo de fluido que se hacía circular a través de un medio poroso dado. Concretamente, se determinó que la constante C era directamente proporcional a la densidad del fluido (ρ), inversamente proporcional a la viscosidad del fluido (μ) y directamente proporcional al cuadrado de una longitud característica (d) del medio poroso, tal como el diámetro medio de los granos.

Por otra parte, con referencia a la Fig. 2.1.1 se tiene que la altura piezométrica (h) correspondiente a una sección horizontal cualquiera puede expresarse como la suma de la altura de una columna de líquido equivalente a la presión P y la altura (z) de la sección con respecto al plano de referencia arbitrario, es decir

$$h = \frac{P}{\rho g} + z \quad (2.1.4)$$

donde g es la magnitud de la aceleración de la gravedad y ρ es la densidad del fluido.

Substituyendo h por su equivalente según la Ec. 2.1.4 y considerando las observaciones experimentales mencionadas en el penúltimo párrafo, la Ec. 2.1.1, expresión básica de la ley de Darcy, se convierte en

$$Q = -C \cdot \frac{d^2 p}{\mu} \frac{A}{L} \left[\frac{(P_2 - P_1)}{\rho g} + (z_2 - z_1) \right] \quad (2.1.5)$$

o en forma equivalente, teniendo en cuenta la definición dada por la Ec. 2.1.2, se obtiene de la expresión anterior que

$$v = \frac{-C' d^2 \rho}{\mu L g} \left[\frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) \right] \quad (2.1.6)$$

donde C' es un nuevo factor de proporcionalidad, el cual no es dependiente de la densidad ni de la viscosidad del fluido.

El análisis dimensional de la Ec. 2.1.6 indica que el factor de proporcionalidad C' debe tener dimensiones de aceleración. Por consiguiente, al considerar el cociente que resulta de dividir el factor C' entre la magnitud de la aceleración de la gravedad (g) se obtiene finalmente un factor de proporcionalidad adimensional (N), con lo cual la Ec. 2.1.6 se convierte en

$$v = - \frac{Nd^2 \rho}{\mu L} \left[\frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + g(z_2 - z_1) \right] \quad (2.1.7)$$

La revisión de la Ec. 2.1.7 indica que todas las variables dinámicas susceptibles de influir en el fenómeno de flujo están consideradas explícitamente en la formulación. Por lo tanto, existen fundamentos para inferir que el factor N debe ser un parámetro adimensional relacionado con la única variable restante, o sea la forma geométrica de los conductos a través de los cuales ocurre el flujo en el medio poroso. Como resultado de este análisis, N adquiere el carácter de un factor de forma que debe ser constante para medios porosos geoméricamente similares en el sentido euclidiano (ángulos correspondientes iguales y longitudes correspondientes proporcionales).

Por medio de las Ecs. 2.1.1, 2.1.6 y 2.1.7 fácilmente puede determinarse que el factor de proporcionalidad C que figura en la expresión original de la ley de Darcy (Ec. 2.1.1) está relacionado con el factor N mediante la ecuación

$$C = \frac{Nd^2 \rho g}{\mu} \quad (2.1.8)$$

En el enunciado de sus descubrimientos Darcy expresó que el factor C era "un coeficiente que dependía de la permeabilidad de la arena". Como secuela de ello, fue costumbre durante mucho tiempo, especialmente en el campo de la hidrología del subsuelo, definir la permeabilidad de un sistema como el factor C. Sin embargo, tal como puede apreciarse en la Ec. 2.1.8, este factor incluye a las características geométricas del medio poroso, a las propiedades dinámicas del fluido y hasta a la aceleración de la gravedad. Consecuentemente, si C se adopta como una medida de la

permeabilidad resulta entonces que el mismo medio tendrá diferentes permeabilidades para diferentes fluidos.

Los inconvenientes de la situación antes descrita condujeron hacia una convergencia de opinión en el sentido de que la permeabilidad debería ser una constante característica del medio poroso, independiente del fluido involucrado en el proceso de flujo. Considerando este enfoque, de la Ec. 2.1.7 se infiere que las únicas características propias del medio poroso que intervienen en el fenómeno de flujo deben estar contenidas implícitamente en el factor geométrico

$$K \equiv Nd^2 \quad (2.1.9)$$

al cual se le define como la permeabilidad del medio poroso.

Substituyendo en la Ec. 2.1.7 el factor geométrico Nd^2 por el símbolo k con el que comunmente se denota a la permeabilidad, la expresión matemática de la ley de Darcy se convierte en

$$v = -k \frac{\rho}{\mu L} \left[\frac{(P_2 - P_1)}{\rho} + g(z_2 - z_1) \right]$$

donde (resumiendo el significado de las variables)

k - Permeabilidad del medio poroso.

v - Velocidad aparente del flujo ($v=Q/A$).

g - Magnitud de la aceleración de la gravedad.

ρ - Densidad del fluido.

μ - Viscosidad del fluido.

P - Presión en una sección horizontal dentro del sistema de flujo.

z - Altura de la sección horizontal con respecto a un plano de referencia arbitrario.

L - Distancia vertical entre las secciones consideradas.

2.1.3 Formulación Generalizada de la ley de Darcy

Por medio de observaciones experimentales se determinó que en el

campo gravitatorio terrestre la ley de Darcy es invariante con respecto a la dirección del flujo en el espacio tridimensional (Hubbert [1956]). Cuando esta característica se conjunta con el convenio de considerar el flujo de fluidos en medios porosos como un fenómeno continuo en el espacio, entonces la ley de Darcy puede expresarse en forma diferencial para una dirección arbitraria del flujo mediante la ecuación

$$v_s = - \frac{K\rho}{\mu} \left(\frac{1}{\rho} \frac{dP}{ds} + g \frac{dz}{ds} \right) \quad (2.1.10)$$

donde

s - Coordenada que define a la dirección del flujo.

z - Coordenada vertical; considerada positiva hacia arriba.

v_s - Velocidad aparente del flujo en la dirección de la coordenada s.

$\frac{dP}{ds}$ - Gradiente de presión a lo largo de la coordenada s.

$\frac{dz}{ds}$ - Derivada direccional de la coordenada z en la dirección s.

g - Magnitud del vector de aceleración de la gravedad.

ρ - Densidad del fluido.

μ - Viscosidad del fluido.

Resolviendo la velocidad v_s de la Ec. 2.1.10 en tres componentes paralelas a los ejes x_1 , x_2 y x_3 de un sistema ortogonal de coordenadas se obtiene la expresión equivalente

$$v_i = - \frac{K\rho}{\mu} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g \frac{\partial z}{\partial x_i} \right) \quad (2.1.11)$$

donde $i = 1, 2, 3$.

La Ec. 2.1.11 también puede escribirse empleando notación vectorial, en cuyo caso la expresión correspondiente es la ecuación

$$\vec{V} = - \frac{K\rho}{\mu} \left(\frac{1}{\rho} \nabla P + g \nabla z \right) \quad (2.1.12)$$

Si en particular uno de los ejes del sistema coordenado se hace coincidir con la dirección z , resulta entonces que

$$g \nabla z = g \vec{e}_z = - \vec{g} \quad (2.1.13)$$

donde \vec{e}_z es un vector unitario en la dirección positiva del eje Z y \vec{g} es el vector de aceleración de la gravedad.

Substituyendo la Ec. 2.1.13 en la Ec. 2.1.12 se tiene entonces que

$$\vec{V} = - \frac{K}{\mu} (\nabla P - \rho \vec{g}) \quad (2.1.14)$$

o si se despeja explícitamente para la permeabilidad se obtiene la expresión equivalente

$$K = \frac{\mu \vec{V}}{\rho \vec{g} - \nabla P} \quad (2.1.15)$$

Esta última ecuación puede considerarse como la definición empírica de la permeabilidad en términos de la ley de Darcy.

Las Ecs. 2.1.14 y 2.1.15 representan la formulación matemática generalizada de la ley de Darcy y constituyen la base fundamental para analizar todos los problemas de flujo viscoso de fluidos homogéneos a través de medios porosos. La formulación generalizada de la ley de Darcy se considera como un resultado empírico equivalente desde el punto de vista macroscópico al resultado promedio de aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes a un número muy grande de poros individuales. Actualmente se reconoce que la ley de Darcy juega en la teoría de conducción de fluidos a través de medios porosos el mismo papel que la ley de Ohm en la conducción de electricidad o que la ley de Fourier en la conducción de calor.

Debe tenerse en cuenta que las formas diferenciales de la ley de Darcy son una abstracción matemática, puesto que la permeabilidad y la velocidad aparente del flujo dejan de tener

significado físico para el caso de elementos infinitesimales de un medio poroso. Sin embargo, esto no representa limitaciones de tipo práctico, ya que no son las ecuaciones diferenciales, sino sus formas integrales, las que finalmente se emplean para estudiar el flujo de fluidos en medios porosos.

2.2 LIMITACIONES DE LA LEY DE DARCY EN RELACION CON LAS CARACTERISTICAS DINAMICAS DEL FLUJO EN UN MEDIO POROSO

Numerosos investigadores han abordado el problema de caracterizar y delimitar el intervalo de validez de la ley de Darcy en relación con la rapidez de percolación de los fluidos a través de medios porosos. Uno de los trabajos más importantes en este sentido es el de Fancher et al. [1933], en el cual se reportan resultados de experimentos que se condujeron con objeto de investigar la relación entre el tamaño de grano y la conductividad hidráulica de medios porosos consolidados y no consolidados. Los datos experimentales fueron correlacionados en un diagrama de fricción, tratando con ello de establecer una analogía con el método comunmente empleado para estudiar el flujo de fluidos a través de conductos libres. Se tomó como ordenada un factor de fricción (λ) y como absisa un número de Reynolds (Re) definidos respectivamente por

$$\lambda = \frac{d \Delta P}{2 \rho L V^2} \quad (2.2.1)$$

y

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (2.2.2)$$

donde

d - Diámetro promedio de los granos, definido por la ecuación

$$d = \left[\frac{\sum n_s d_s^3}{\sum n_s} \right]^{1/3}$$

donde d_s es la media aritmética de las aberturas en cualesquiera dos mallas consecutivas de las series Tyler o U. S. Standard y n_s es el número de granos de diámetro d_s determinado mediante análisis de mallas (Fancher et al. [1933]).

ΔP - Caída de presión a través del medio poroso.

L - Longitud del medio poroso en la dirección del flujo.

V - Velocidad aparente del flujo ($V=Q/A$).

ρ - Densidad del fluido.

μ - Viscosidad del fluido.

Para el caso de las arenas no consolidadas se encontró que podía obtenerse una expresión única para el factor de fricción en términos del número de Reynolds. Por otra parte, para las areniscas consolidadas se encontró que la relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds era diferente para cada uno de los especímenes investigados. (Nótese que si se hubiera obtenido una relación única entre el factor de fricción y el número de Reynolds para el caso de los materiales consolidados, hubiera sido entonces posible estudiar la conductividad hidráulica de las rocas y otros medios porosos consolidados a partir de datos del tamaño promedio de los granos, suplantando así la formulación empírica del fenómeno expresada por la ley de Darcy).

Al margen de la discusión anterior, el aspecto realmente importante de los resultados de Fancher et al. [1933] es que para números de Reynolds menores que la unidad se tiene que los datos experimentales se apegan estrictamente a la relación

$$\lambda \text{ Re} = a \quad (2.2.3)$$

donde a es una constante.

Substituyendo en la Ec. 2.2.3 al factor de fricción y al número de Reynolds por sus respectivas definiciones de acuerdo a las Ecs. 2.2.1 y 2.2.2, se obtiene la expresión

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\rho V}{d^2} a \quad (2.2.4)$$

la cual es equivalente a la ley de Darcy.

En base a lo anterior, se considera en general que para fines prácticos es adecuado aceptar como límite superior para la aplicación de la ley de Darcy el dado por un número de Reynolds igual a la unidad, con el parámetro d representando un valor promedio razonable del diámetro de los granos.

Por analogía con la descripción y terminología adoptada por la hidrodinámica ordinaria, al tipo de flujo en medios porosos que es descrito por la ley de Darcy se le denomina como flujo viscoso o flujo laminar, mientras que al régimen de flujo cuyo comportamiento se desvía de la ley de Darcy se le denomina como flujo turbulento.

2.3 CORRELACIONES DE LA PERMEABILIDAD CON OTRAS PROPIEDADES DERIVADAS DE LA GEOMETRIA DE UN MEDIO POROSO

Como ayuda para mejorar el entendimiento del flujo de fluidos en medios porosos y también con el objeto de disminuir las mediciones experimentales necesarias para caracterizar a las rocas y otros materiales porosos, se ha tratado de establecer correlaciones entre la permeabilidad y otras propiedades igualmente relacionadas con el arreglo geométrico de los poros, tales como la porosidad, el área de la superficie interna y el tamaño de los poros.

El establecimiento de correlaciones empíricas entre la permeabilidad y la porosidad ha sido un objetivo especialmente buscado por muchos investigadores (Scheiddeger [1960]). Sin embargo, considerando la gran diversidad de configuraciones geométricas que en teoría puede adoptar una estructura porosa, se llega a la conclusión de que no puede existir una correlación única entre la permeabilidad y la porosidad. Las correlaciones empíricas entre la permeabilidad y la porosidad que se encuentran reportadas en la literatura contienen invariablemente otros factores, a los cuales usualmente se les relaciona en forma muy vaga con algunas propiedades geométricas del medio poroso. Realmente estos factores son sólo parámetros indeterminados, los cuales se introducen con el objeto de hacer que los datos experimentales correspondientes a un medio poroso dado se ajusten conforme a una ecuación deseada. Puesto que en general no existen formas independientes para determinar los factores de ajuste, la utilidad práctica de las correlaciones empíricas es en general muy limitada.

También se ha tratado de establecer correlaciones entre la permeabilidad y la porosidad empleando procedimientos teóricos. Este enfoque consiste esencialmente en representar al medio poroso mediante un modelo físico al cual puede dársele un tratamiento matemático por medio de las ecuaciones clásicas de la hidrodinámica. En la obra de Scheiddeger [1960] se presenta una revisión completa de las teorías que se han desarrollado para relacionar la permeabilidad con la porosidad y con otras características geométricas de un medio poroso. Con base en información contenida en la obra antes mencionada, a continuación se incluye la descripción resumida de dos de dichas teorías: la teoría derivada del modelo básico de tubos capilares y la teoría

de Kozeny. La teoría derivada del modelo básico de tubos capilares se presenta en forma más extensa con objeto de ilustrar la esencia del procedimiento que se emplea para intentar establecer correlaciones entre la permeabilidad y la porosidad.

2.3.1 Teoría del Modelo Básico de Tubos Capilares

Se representa al medio poroso por medio de un empaquetamiento de tubos capilares rectos, todos ellos de igual diámetro y longitud, dispuestos en una sola dirección. Empleando la bien conocida ecuación de Hagen-Poiseuille que describe el flujo laminar en conductos circulares, se tiene que el gasto volumétrico (Q) de un fluido circulando a través del modelo descrito está dado por

$$Q = - \frac{N\pi d^4}{128\mu} \frac{dP}{dX} \quad (2.3.1)$$

donde

N - Número total de tubos capilares de que consta el modelo.

d - Diámetro de los tubos capilares.

μ - Viscosidad del fluido.

$\frac{dP}{dX}$ - Gradiente de presión en la dirección del flujo.

Por otra parte, la porosidad (ϕ) del modelo está dada por

$$\phi = \frac{N\pi d^2}{4A} \quad (2.3.2)$$

donde A es el área de la sección transversal total del modelo.

Dividiendo la Ec. 2.3.1 entre el área de la sección transversal del modelo y substituyendo en el resultado la expresión para la porosidad dada por la Ec. 2.3.2, se obtiene que

$$V = - \frac{\phi d^2}{32\mu} \frac{dP}{dX} \quad (2.3.3)$$

donde V es la velocidad media aparente del flujo.

Por otra parte, desde el punto de vista de la ley de Darcy se tiene que el fenómeno de flujo en el modelo de tubos capilares está descrito por

$$v = - \frac{K}{\mu} \frac{dP}{dX} \quad (2.3.4)$$

donde k es la permeabilidad del modelo.

Igualando las Ecs. 2.3.3 y 2.3.4 se obtiene la expresión

$$K = \frac{\phi d^2}{32} \quad (2.3.5)$$

la cual describe la relación que existe entre la permeabilidad, la porosidad y el diámetro de los tubos capilares del modelo.

También se suele involucrar en la formulación matemática de los modelos de medios porosos a otro parámetro geométrico denominado área superficial específica (S). El área superficial específica se define como la relación entre el área superficial interna de los conductos de flujo y el volumen total del medio poroso. Para el modelo básico de tubos capilares se tiene que

$$S = \frac{4\phi}{d} \quad (2.3.6)$$

Substituyendo el diámetro de los tubos capilares (d) en la Ec. 2.3.5 por su equivalente según la Ec. 2.3.6 se obtiene la expresión equivalente

$$K = \frac{\phi^3}{2S^2} \quad (2.3.7)$$

la cual describe explícitamente la relación entre la permeabilidad, la porosidad y la superficie específica del medio poroso considerado idealmente como un haz de tubos capilares.

2.3.2 Teoría de Kozeny

En la teoría de Kozeny se representa al medio poroso como un empaquetamiento de conductos capilares rectos de sección transversal arbitraria. Resolviendo las ecuaciones de

Navier-Stokes simultáneamente para todos los conductos intersectados por una sección transversal a la dirección del flujo y comparando el resultado así obtenido con la descripción del flujo en términos de la ley de Darcy, Kozeny demostró que la permeabilidad del modelo está expresada por

$$K = \frac{\gamma \phi^3}{S^2} \quad (2.3.8)$$

donde γ es una constante adimensional que depende solamente de la forma geométrica de la sección transversal de los capilares.

Al factor γ se le conoce como la constante de Kozeny, verificándose que para el caso de un círculo $\gamma=0.5$, para el caso de un cuadrado $\gamma=0.5619$ y para el caso de un triángulo equilátero $\gamma=0.5974$. Para el caso de conductos de sección transversal circular la Ec. 2.3.8 toma la forma especial de la Ec. 2.3.7, por lo que se infiere que la teoría de Kozeny incluye al modelo básico de tubos capilares como caso especial.

Se han propuesto numerosas modificaciones a la ecuación original de Kozeny. Una de dichas modificaciones se propuso para tomar en cuenta el hecho de que los conductos de flujo en un medio poroso real no son rectos, por lo que la longitud de la trayectoria de las partículas de fluido debe ser mayor que la longitud macroscópica del medio poroso en la dirección del flujo. La modificación se implementó incluyendo un factor de tortuosidad (τ), el cual se define como la relación entre la longitud de la trayectoria real de las partículas de fluido y la longitud del medio poroso. La inclusión del factor de tortuosidad en la formulación original de Kozeny dá lugar a la siguiente expresión modificada

$$K = \frac{\gamma \phi^3}{\tau S^2} \quad (2.3.9)$$

a la cual se le denomina comunmente como "ecuación de Kozeny".

La ecuación de Kozeny está orientada para tener aplicabilidad general a todos los medios porosos, puesto que, al menos en teoría, los factores γ y τ involucran a todos los detalles geométricos de la estructura porosa.

Otra modificación que es ampliamente usada es la que se conoce como ecuación de Kozeny-Carman, la cual está dada por la expresión

$$K = \frac{\phi^3}{5 S_o^2 (1 - \phi)^2} \quad (2.3.10)$$

donde S_o es la superficie de los conductos expuesta al flujo por unidad de volumen del material sólido (no de volumen total del medio poroso).

Puesto que $S^2 = S_o(1-\phi)^2$, resulta que la Ec. 2.3.10 es un caso particular de la Ec. 2.3.9 cuando $\tau=1$ y $\gamma=1/5$. Según Carman, estos valores son los que mejor ajustan con resultados experimentales.

Es muy difícil verificar las ecuaciones tipo Kozeny, debido a que los factores S y τ son muy difíciles de evaluar en forma independiente. Además, en la práctica γ es un factor empírico que exhibe considerable variación de uno a otro medio poroso real. No obstante, la teoría de Kozeny muestra en forma bastante concluyente que la permeabilidad, la porosidad y el área superficial específica de un medio poroso están interrelacionados.

Por otra parte, la utilidad práctica de las ecuaciones tipo Kozeny es bastante limitada en lo que se refiere a la determinación de una propiedad a partir del conocimiento de otra; por ejemplo, determinar la permeabilidad a partir de la porosidad. En este caso se tendría el problema de determinar independientemente por vía de la experimentación a los factores γ , τ y S . Puesto que las técnicas experimentales para medir directamente la permeabilidad y la porosidad son relativamente sencillas, parece más razonable emplear las ecuaciones tipo Kozeny para determinar los valores de γ , τ y S a partir de mediciones directas de la porosidad y de la permeabilidad.

2.4 DIMENSIONES Y UNIDADES DE LA PERMEABILIDAD

Estableciendo la ecuación de dimensiones de la Ec. 2.1.15 que define empíricamente a la permeabilidad en términos de la ley de Darcy, o bien considerando la Ec. 2.1.9 que define a la permeabilidad como un factor geométrico característico del medio poroso, se obtiene que

$$[K] = [L^2]$$

es decir, que la permeabilidad tiene las dimensiones de longitud

al cuadrado.

Lo anterior implica que las unidades racionales para expresar la permeabilidad son, dependiendo del sistema de unidades consistente de que se haga uso, el cm^2 , el m^2 , el pie^2 , etc. Sin embargo, en aplicaciones prácticas se emplea casi universalmente una unidad no racional denominada "darcy" y sus correspondientes submúltiplos, el milidarcy, el microdarcy, etc.

El darcy como unidad de permeabilidad se define de la siguiente manera: (Amyx et al. [1960]).

"un medio poroso tiene una permeabilidad de un darcy cuando un fluido homogéneo de 1 centipoise de viscosidad y que llena completamente los poros del medio fluye bajo condiciones de flujo viscoso con un gasto de un centímetro cúbico por segundo por cada centímetro cuadrado de sección transversal, bajo la acción de un gradiente hidráulico o gradiente de presión de una atmósfera por centímetro"

La relación entre el darcy y las unidades racionales de permeabilidad pueden determinarse a partir de la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ darcy} = 9.87 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$$

2.5 MEDICION DE LA PERMEABILIDAD

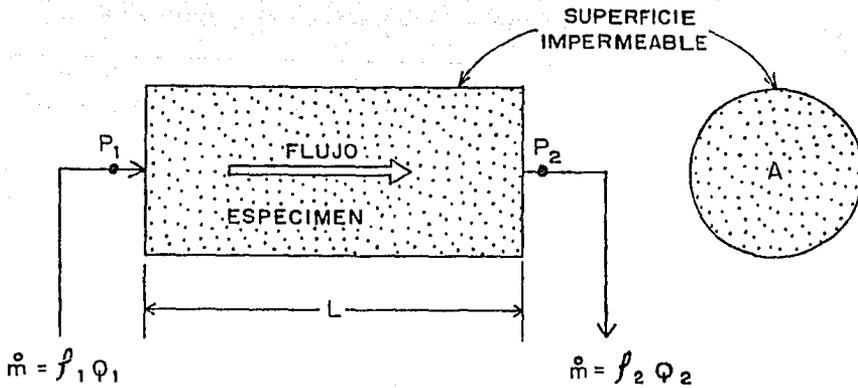
Debido a que no existen procedimientos que permitan determinar confiablemente y con un sentido práctico la permeabilidad de un medio poroso a partir de los factores geométrico que caracterizan su estructura, se tiene que recurrir en general a técnicas experimentales de medición directa para su evaluación.

La permeabilidad de un medio poroso se determina en la práctica mediante la aplicación de procedimientos hidrodinámicos. Estos consisten esencialmente en hacer pasar un fluido a través del medio y medir todas las variables del flujo necesarias para calcular la permeabilidad mediante la forma integrada de la ley de Darcy que corresponda al sistema experimental de flujo empleado.

La práctica común para efectuar mediciones de permeabilidad en laboratorio consiste en implementar sistemas de flujo para los cuales sea fácil llevar a cabo la integración de la ley de Darcy. Para tal objeto, se preparan especímenes de geometría sencilla,

tales como cilindros o prismas rectangulares. Además, se proveen las condiciones de frontera necesarias para inducir un flujo de tipo unidimensional a escala macroscópica. Esto se logra aplicando una diferencia de presiones a través de caras opuestas del espécimen en la dirección de una de sus dimensiones, e impermeabilizando las superficies periféricas paralelas a la dirección en que se desea el flujo.

Los sistemas de flujo unidimensional que más se emplean para efectuar mediciones de permeabilidad son el sistema lineal y el sistema radial, los cuales se muestran respectivamente en las Figs. 2.5.1 y 2.5.2 junto con las correspondientes fórmulas para calcular la permeabilidad ya sea que usen líquidos o gases como fluidos de trabajo. Como ya se mencionó, las fórmulas para el cálculo de la permeabilidad proceden de la integración de la ley de Darcy para los sistemas de flujo considerados. Los desarrollos matemáticos involucrados en la obtención de las fórmulas que se presentan en las Figs. 2.5.1 y 2.5.2 pueden verse por ejemplo en la obra de Amyx et al. [1960]. Para obtener estas fórmulas se supone al integrar la ley de Darcy que se ha alcanzado en los sistemas de flujo unidimensional la condición de gasto másico uniforme en cualquier sección normal a la dirección del flujo. A partir de que se establece la diferencia de presiones a través del espécimen, esta condición se alcanza rápidamente en la mayoría de los casos de aplicación práctica.



Para el caso de flujo de un fluido incompresible:

$$K = \frac{Q \mu L}{A (P_1 - P_2)} \quad (2.5.1)$$

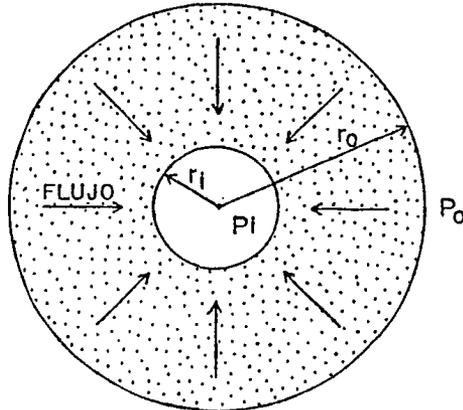
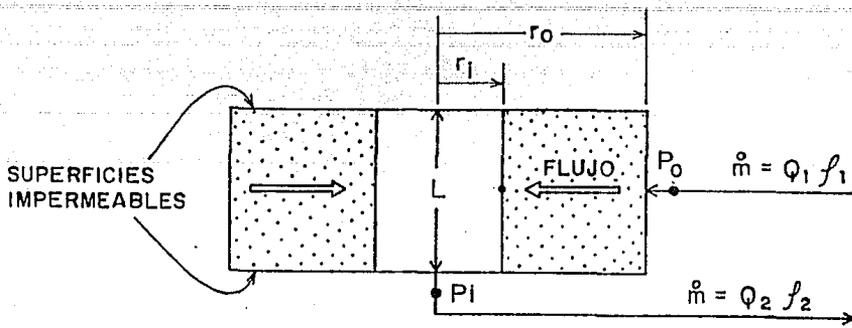
Para el caso de flujo isotérmico de un gas perfecto:

$$K = \frac{2 \dot{m} L \mu P_1}{\rho_1 (P_1^2 - P_2^2)} \quad (2.5.2)$$

donde

- K - Permeabilidad absoluta del espécimen.
- Q - Gasto volumétrico del fluido a través del espécimen.
- \dot{m} - Gasto másico del fluido a través del espécimen.
- μ - Viscosidad dinámica del fluido.
- ρ - Densidad del fluido.
- P_1 - Presión absoluta del fluido al entrar al espécimen.
- P_2 - Presión absoluta del fluido al salir del espécimen.
- A - Area de la sección transversal a la dirección del flujo.
- L - Longitud del espécimen.

Fig. 2.5.1 Esquema y fórmulas de cálculo para determinar la permeabilidad de un medio poroso por medio de un sistema de flujo lineal.



Para el caso de flujo de un fluido incompresible:

$$K = \frac{Q\mu \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}{2\pi L (P_o - P_i)} \quad (2.5.3)$$

Para el caso de flujo isotérmico de un gas perfecto:

$$K = \frac{\dot{m} P_o \mu \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right)}{\pi L \rho_1 (P_o^2 - P_i^2)} \quad (2.5.4)$$

donde

K - Permeabilidad absoluta.

Q - Gasto volumétrico.

\dot{m} - Gasto másico.

μ - Viscosidad del fluido.

ρ - Densidad del fluido.

r_i - Radio interior del espécimen.

r_o - Radio exterior del espécimen.

L - Longitud del espécimen.

P_o - Presión absoluta del fluido en r_o .

P_i - Presión absoluta del fluido en r_i .

Fig. 2.5.2 Esquema experimental y fórmulas de cálculo para determinar la permeabilidad de un medio poroso por medio de un sistema de flujo radial.

CAPITULO 3

ANALISIS DEL FENOMENO DE EXPANSION TERMICA EN UN MEDIO POROSO Y DE SU RELACION CON EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD

El objetivo del presente capítulo es exponer una serie de conceptos sobre expansión térmica y porosidad que intervienen en el desarrollo de los capítulos subsecuentes de esta tesis. La exposición de los conceptos se lleva a cabo por medio de un análisis físico-matemático acerca del fenómeno de expansión térmica en un medio poroso. Mediante este análisis se demuestra que existen vinculaciones directas entre ciertas características relacionadas con la expansión térmica del medio y la variación que experimenta la porosidad con los cambios de temperatura. El análisis consiste esencialmente en representar por medio de expresiones matemáticas una serie de razonamientos y consideraciones de tipo físico acerca de la naturaleza del fenómeno de expansión térmica en un medio poroso. Como producto final, se llega al establecimiento de las bases conceptuales y analíticas de un método experimental original para evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad a partir de mediciones de expansión térmica lineal en el medio poroso.

El análisis y el método experimental que aquí se presentan son logros originales del autor. De acuerdo a una extensa búsqueda bibliográfica en la literatura abierta se encontró que no existen reportados análisis similares. Tampoco se encontró evidencia de que la metodología experimental para evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad a partir de mediciones de expansión térmica lineal hubiera sido propuesta o empleada con anterioridad. Por consiguiente, puede razonablemente afirmarse que el análisis y el método experimental aquí expuestos representan una modesta contribución al entendimiento y caracterización del comportamiento de los medios porosos.

El método experimental que se estableció en calidad de producto final del análisis presentado en este capítulo se aplicó dentro del contexto de las investigaciones que se efectuaron para estudiar la influencia de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas. Empleando este método experimental se evaluó el efecto de la temperatura sobre la porosidad de varias muestras de roca de este tipo. La extensión de estas mediciones se describe en la sección 5.2 y los correspondientes resultados se presentan en la sección 7.2.

3.1 EL CONCEPTO DE POROSIDAD

Un medio poroso se define como un material sólido que contiene una cantidad relativamente grande de huecos o espacios vacíos, aislados o interconectados, dispersos dentro del material en una distribución espacial que puede ser aleatoria o regular (Collins, [1976]). De acuerdo con esta definición, prácticamente todas las rocas presentes en la naturaleza pueden considerarse como medios porosos, en especial aquellas que son portadoras de fluidos en los yacimientos geotérmicos y petroleros.

La porosidad se define como la fracción del volumen total del medio que es "ocupada" por los poros, grietas y espacios vacíos en general. La expresión matemática de esta definición está dada por

$$\phi = \frac{V_P}{V_B} \quad (3.1.1. a)$$

o en forma equivalente por

$$\phi = 1 - \frac{V_S}{V_B} \quad (3.1.1. b)$$

en donde ϕ es la porosidad, V_P es el volumen de los espacios vacíos, V_B es el volumen total del medio y V_S es el volumen del material sólido. La Ec. 3.1.1.b se obtiene directamente de la Ec. 3.1.1.a teniendo en cuenta que los volúmenes V_P , V_B y V_S están relacionados por

$$V_B = V_P + V_S \quad (3.1.2)$$

Para muchas aplicaciones es conveniente distinguir entre dos clases de porosidad: la porosidad total o absoluta y la porosidad efectiva. La porosidad total es la que resulta de considerar a la totalidad de los espacios vacíos existentes en el medio, sin tomar en cuenta la condición de aislamiento o interconectividad entre ellos; por la otra parte, la porosidad efectiva es la que resulta de considerar únicamente a aquellos espacios que están interconectados y que pueden ser accedidos sin fragmentar el espécimen del material bajo consideración. La Ec. 3.1.1.b representa exclusivamente a la porosidad total, mientras que la Ec. 3.1.1.a puede representar ya sea a la porosidad total o a la porosidad efectiva, lo cual depende de si

en el término V_B se incluye al volumen del total de espacios vacíos o únicamente al volumen de los espacios vacíos interconectados. Cuando en el texto de este trabajo no se indique en forma explícita de cual porosidad se trata, debe interpretarse que se trata de la porosidad total.

Muchas rocas, como la lava y otras rocas ígneas, tienen porosidad total elevada, aunque porosidad efectiva prácticamente nula. En cambio, en las rocas areniscas y en algunos otros tipos de rocas sedimentarias se tiene que la porosidad total y la porosidad efectiva son esencialmente iguales.

Dentro del contexto de las aplicaciones relacionadas con la ingeniería de los yacimientos geotérmicos y petroleros, la porosidad es indudablemente una de las propiedades más importantes que caracterizan a las rocas. Desde el punto de vista de la ingeniería de yacimientos, la interpretación más fundamental que se hace de la porosidad es en calidad de parámetro representativo de la capacidad que tienen las rocas para almacenar fluidos. Sin embargo, la porosidad no solamente caracteriza a las rocas de un yacimiento en lo que se refiere a su función como recipientes de almacenamiento de los fluidos, sino que también influye en su desempeño como medios de conducción a través de los cuales ocurren fenómenos de transporte de fluidos y de energía, tales como flujo de los fluidos contenidos en los poros de la roca, transferencia de calor, propagación de ondas acústicas y conducción de energía eléctrica.

En efecto, en la literatura se encuentran reportados numerosos estudios analíticos en modelos de medios porosos así como resultados de mediciones experimentales en muestras de roca, los cuales indican, ya sea en forma cuantitativa o cualitativa, que la porosidad está vinculada con la permeabilidad (p. ej. Scheidegger [1960]), con la conductividad térmica (p. ej. Martínez [1978], Reddy [1977]), con la velocidad de propagación de las ondas acústicas (p. ej. Wyllie [1956]) y con el factor de resistividad eléctrica de la formación (p. ej. Archie [1942], Winsauer et al [1952]).

3.2 EXPRESIONES MATEMATICAS PARA DESCRIBIR LA VARIACION DE LA POROSIDAD EN FUNCION DE CAMBIOS DE VOLUMEN

Si un medio poroso se somete a cambios de presión y de temperatura a partir de unas condiciones de referencia dadas, es de esperarse que debido a la compresibilidad y a la expansión térmica del material sólido se produzcan cambios consecuentes en el volumen total, en el volumen de los poros y en el volumen del propio material sólido. Puesto que en general debe ser diferente el cambio proporcional de cada uno de estos volúmenes, es de esperarse que como consecuencia de ello se produzcan cambios en

la porosidad del medio.

Empleando las Ecs. 3.1.1.a, 3.1.1.b y 3.1.2, se obtienen fácilmente expresiones algebraicas que describen los cambios de la porosidad del medio en función de los cambios fraccionales del volumen total, del volumen de poros y del volumen del material sólido. Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

a) En función de los cambios fraccionales del volumen total y del volumen de los poros:

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \frac{1 + \frac{\Delta V_P}{V_{P_0}}}{1 + \frac{\Delta V_B}{V_{B_0}}} \quad (3.2.1)$$

b) En función de los cambios fraccionales del volumen total y del volumen del material sólido:

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \frac{1}{\phi_0} \left[1 - (1 - \phi_0) \frac{1 + \frac{\Delta V_S}{V_{S_0}}}{1 + \frac{\Delta V_B}{V_{B_0}}} \right] \quad (3.2.2)$$

donde el subíndice "o" denota a los valores iniciales correspondientes a las condiciones de referencia, mientras que el símbolo "Δ" denota a los cambios ocurridos en los volúmenes V_B , V_P y V_S como consecuencia de cambios en la temperatura, en la presión y en el estado de esfuerzos en general.

3.3 RELACIONES ENTRE EL FENOMENO DE EXPANSION TERMICA EN UN MEDIO POROSO Y EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD

3.3.1 Definición de Coeficientes Volumétricos de Expansión Térmica de un Medio Poroso

Si un medio poroso se somete a cambios de temperatura a la vez que se mantienen constantes la presión y el estado de esfuerzos, como consecuencia de la expansión térmica del material sólido que constituye la matriz o esqueleto es de esperarse que se produzcan cambios en el volumen total, en el volumen de los poros, en el volumen del material sólido mismo y en las dimensiones lineales del medio. A fin de caracterizar adecuadamente la relación entre los cambios de temperatura y los cambios del volumen total, del

volumen de poros y del volumen del material sólido, es conveniente considerar tres coeficientes de expansión térmica volumétrica en la forma que se definen a continuación:

a) Coeficiente de expansión térmica del volumen total (α_B)

$$\alpha_B = \frac{1}{V_B} \frac{\partial V_B}{\partial T} \quad (3.3.1)$$

b) Coeficiente de expansión térmica del volumen de poros (α_P)

$$\alpha_P = \frac{1}{V_P} \frac{\partial V_P}{\partial T} \quad (3.3.2)$$

c) Coeficiente de expansión térmica del material sólido (α_S)

$$\alpha_S = \frac{1}{V_S} \frac{\partial V_S}{\partial T} \quad (3.3.3)$$

Los coeficientes de expansión antes definidos denotan respectivamente la magnitud del cambio proporcional que experimenta el volumen total, el volumen de los poros y el volumen del material sólido cuando el medio poroso se somete a un cambio unitario de temperatura.

3.3.2 Relación Entre los Coeficientes Volumétricos de Expansión Térmica y la Porosidad

Derivando parcialmente la Ec. 3.1.2 con respecto a la temperatura y dividiendo la expresión resultante entre V_B se obtiene que

$$\frac{1}{V_B} \frac{\partial V_B}{\partial T} = \frac{1}{V_B} \frac{\partial V_P}{\partial T} + \frac{1}{V_B} \frac{\partial V_S}{\partial T}$$

Substituyendo a V_B en el miembro de la derecha de la ecuación anterior por sus equivalentes según las Ecs. 3.1.1.a y 3.1.1.b, el resultado a que se llega es

$$\frac{1}{V_B} \frac{\partial V_B}{\partial T} = \frac{\phi}{V_P} \frac{\partial V_P}{\partial T} + (1 - \phi) \frac{1}{V_S} \frac{\partial V_S}{\partial T} \quad (3.3.4)$$

Involucrando en esta última ecuación las definiciones de los coeficientes volumétricos de expansión térmica dadas por las Ecs. 3.3.1, 3.3.2 y 3.3.3, se obtiene finalmente la expresión

$$\alpha_B = \phi \alpha_P + (1 - \phi) \alpha_S \quad (3.3.5)$$

Esta ecuación demuestra que los tres coeficientes volumétricos de expansión térmica antes definidos están relacionados entre sí y con la porosidad del medio.

3.3.3 Relaciones Entre los Coeficientes de Expansión Térmica y el Efecto de la Temperatura Sobre la Porosidad

a) En función de α_B y α_P

Derivando parcialmente la Ec. 3.1.1.a con respecto a la temperatura y dividiendo la ecuación resultante entre V_B , se obtiene que

$$\frac{1}{V_B} \frac{\partial V_P}{\partial T} = \phi \frac{1}{V_B} \frac{\partial V_B}{\partial T} + \frac{\partial \phi}{\partial T}$$

Substituyendo a V_B en el miembro izquierdo de la ecuación anterior por su equivalente según la Ec. 3.1.1.a y teniendo en cuenta las definiciones para α_B y α_P dadas por las Ecs. 3.3.1 y 3.3.2, resulta la expresión

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = \phi (\alpha_P - \alpha_B)$$

Integrando esta última ecuación entre las temperaturas T y T_0 se obtiene que

$$\frac{\phi(T)}{\phi_0} = \exp \int_{T_0}^T (\alpha_P - \alpha_B) dT \quad (3.3.6)$$

b) En función de α_P y α_S

Derivando parcialmente la Ec. 3.1.1.b con respecto a la temperatura se obtiene que

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = -\frac{1}{V_B} \frac{\partial V_S}{\partial T} + \frac{V_S}{V_B} \frac{1}{V_B} \frac{\partial V_B}{\partial T}$$

Substituyendo en el lado derecho de la ecuación anterior a V_B en el primer término y a (V_B/V_S) en el segundo término por sus expresiones equivalentes según la Ec. 3.1.1.b e involucrando las definiciones de los coeficientes α_B y α_S dadas por las Ecs. 3.3.1 y 3.3.3, resulta lo siguiente:

$$\frac{\partial \phi}{\partial T} = (1 - \phi) (\alpha_B - \alpha_S) \quad (3.3.7)$$

Integrando esta última ecuación entre las temperaturas T y T_0 , el resultado que se obtiene es la expresión

$$\frac{\phi(T)}{\phi_0} = \frac{1}{\phi_0} \left[1 - (1 - \phi_0) \exp \int_T^{T_0} (\alpha_S - \alpha_B) dT \right] \quad (3.3.8)$$

Las Ecs. 3.3.6 y 3.3.8 demuestran que el efecto de la temperatura sobre la porosidad está directamente vinculado con los coeficientes volumétricos de expansión térmica. Estas ecuaciones son equivalentes y directamente puede obtenerse una a partir de la otra empleando la Ec. 3.3.5.

3.4 ANALISIS E INTERPRETACION FISICA DE LOS COEFICIENTES DE EXPANSION TERMICA EN RELACION CON EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD

En esta sección se ilustra el significado físico de los coeficientes de expansión térmica que antes se definieron para un medio poroso y a la vez se analiza, desde la misma perspectiva física, su vinculación con el efecto de la temperatura sobre la porosidad. Con tal objeto, empleando las relaciones matemáticas establecidas en la sección previa se analiza a continuación el fenómeno de expansión térmica para el caso de un medio poroso sometido a tres diferentes tipos de confinamiento mecánico.

3.4.1 Análisis de la Expansión Térmica en un Medio Poroso Sujeto a un Confinamiento Totalmente Rígido

Considérese el caso de un medio poroso sometido a un confinamiento rígido; por ejemplo, un fragmento de una roca

arenisca consolidada alrededor de la cual se ajustara una cubierta completamente rígida que no permitiera ningún aumento en el volumen total de la pieza de roca. Si en estas condiciones se incrementa la temperatura del medio poroso, ocurrirá entonces que la expansión del material sólido tendrá lugar completamente a expensas del volumen de los poros. Puesto que la dilatación del material sólido no podrá efectuarse uniformemente en todas direcciones debido a la restricción impuesta, es de esperarse que se generen esfuerzos termomecánicos y que se produzcan cambios en la geometría de la estructura porosa.

Para este caso, las expresiones matemáticas que describen las principales características del fenómeno de expansión térmica y su relación con la variación de porosidad son como sigue:

Por la restricción impuesta:-- $\Delta V_B = 0$ (3.3.9)

De la Ec. 3.1.2:----- $\Delta V_P = -\Delta V_S$ (3.3.10)

De la Ec. 3.3.1:----- $\alpha_B = 0$ (3.3.11)

De la Ec. 3.3.5:----- $\alpha_P = \left(\frac{\phi - 1}{\phi}\right) \alpha_S$ (3.3.12)

De la Ec. 3.3.7:----- $\frac{d\phi}{dT} = (\phi - 1) \alpha_S$ (3.3.13)

De la Ec. 3.3.8:----- $\frac{\phi(T)}{\phi_0} = \frac{1}{\phi_0} \left[1 - (1 - \phi_0) \exp \int_T^{T_0} \alpha_S dT \right]$ (3.3.14)

Las dos últimas expresiones son especialmente importantes debido a que representan, una en forma diferencial y la otra en forma integral, la máxima variación de la porosidad que bajo cualquier condición puede esperarse ocurra como consecuencia de cambios de temperatura en un medio poroso cuya matriz está constituida por un determinado material con un coeficiente volumétrico de expansión térmica α_S . Esta aseveración se apoya simplemente en el hecho de que el confinamiento rígido dá lugar al caso extremo en que el total de la expansión del material sólido ocurre a expensas del volumen de los poros.

Si la última ecuación se expresa en función de un valor medio de α_S apropiado para el intervalo de temperatura de T a T_0 , la máxima variación de porosidad que puede sufrir un medio poroso como consecuencia de un cambio de temperatura ΔT está dada por

$$\frac{\phi(T)}{\phi_0} = \frac{1}{\phi_0} \left[1 - (1 - \phi_0) \exp(\alpha_S \Delta T) \right] \quad (3.4.1. a)$$

O expresada en forma de un cambio referido a la porosidad correspondiente a la temperatura T_0 , está dada por

$$\frac{\Delta\phi}{\phi_0} = \frac{1}{\phi_0} \left[1 - (1 - \phi_0) \exp(\alpha_S \Delta T) \right] - 1 \quad (3.4.1. b)$$

A manera de ejemplo, considérese el caso de una roca arenisca bajo la suposición de que está constituida únicamente por granos de cuarzo. El coeficiente volumétrico de expansión térmica del cuarzo en el intervalo de 20°C a 300°C tiene un valor de $0.45 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (calculado a partir de datos de cambio fraccional de volumen total contra temperatura reportados por Clark [1966]). Si la porosidad de la roca es de 20% a la temperatura de 20°C, aplicando la Ec. 3.4.1.b resulta que la máxima variación de porosidad que podrá esperarse ocurra como consecuencia de incrementar la temperatura de la roca desde 20°C hasta 300°C es

$$\frac{\Delta\phi}{\phi_0} = -0.051$$

lo cual significa una reducción de porosidad de 5.1%.

Si ahora se considera una roca cuya porosidad a la temperatura de 20°C es de 5%, entonces la variación de porosidad asociada al incremento de temperatura de 20°C a 300°C es

$$\frac{\Delta\phi}{\phi_0} = -0.241$$

o sea que en este caso la reducción de porosidad es de 24.1%.

Los anteriores ejemplos indican que el efecto de la temperatura sobre la porosidad de un medio poroso debe ser en general mucho más significativo a medida que es menor la porosidad

intrínseca del medio.

3.4.2 Análisis de la Expansión Térmica en un Medio Poroso Sujeto a Confinamiento Flexible

Se analiza ahora el caso más general de un medio poroso sujeto a confinamiento mediante una cubierta flexible que se adapta a su superficie exterior, pero la cual no restringe por sí misma los cambios del volumen total del medio si éste es sometido a cambios de temperatura. Se considera que la cubierta es impermeable y que es capaz de transmitir fielmente al medio poroso cualquier presión que se le aplique externamente.

Con respecto al medio poroso, se supone que éste satisface las siguientes condiciones:

- (a) Todos los poros del medio están interconectados.
- (b) En cualquier plano de corte a través del medio poroso se verifica que la relación entre el área correspondiente a los poros intersectados y el área total del plano seccionante es igual a la porosidad del medio.
- (c) En cualquier plano seccionante a través del medio se verifica que los huecos correspondientes a los poros intersectados por el plano tienen una distribución areal uniforme.
- (d) El material sólido que forma la matriz del medio poroso es homogéneo y su dilatación térmica es isotrópica.

Considérese ahora que un medio poroso con las características indicadas se recubre con el tipo de cubierta flexible que antes se describió y que a continuación se somete a una presión de confinamiento P_C y a una presión de poro P_0 , donde P_C es mayor o igual que P_0 . (Ver esquema ilustrativo de este tipo de confinamiento en la Fig. 3.4.1). En el apéndice que se incluye al final de este capítulo se demuestra que bajo estas condiciones de confinamiento, el material sólido del medio poroso se encuentra sometido a un estado isotrópico de esfuerzos representado por el arreglo

$$\begin{bmatrix} -\sigma & 0 & 0 \\ 0 & -\sigma & 0 \\ 0 & 0 & -\sigma \end{bmatrix}$$

donde

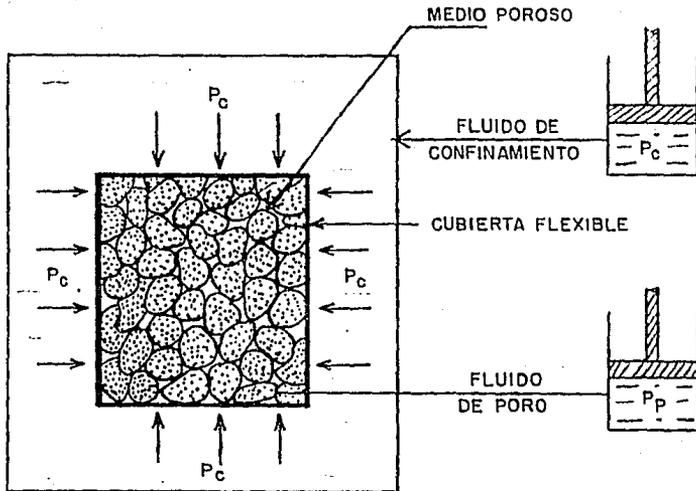


Fig. 3.4.1 Esquema de un medio poroso revestido con una cubierta flexible, sometido a presión de confinamiento y presión de poro.

$$\sigma = \frac{P_C - \phi P_o}{1 - \phi} \quad (3.4.2)$$

Análisis del Caso Particular en que la Presión de Confinamiento y la Presión de Poro son Iguales

A continuación se analiza el fenómeno de expansión térmica en el caso particular en que la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales. De la Ec. 3.4.2 resulta que

$$\sigma = P_C = P_o$$

es decir, el esfuerzo compresivo actuando en el material sólido tiene la misma magnitud que la presión del fluido de poro y que la presión de confinamiento. Esto significa que la restricción que se opone a que el material sólido se expanda hacia el interior de los poros es igual a la restricción que se opone a que la expansión ocurra en cualquiera otra dirección en que se tenga que desplazar al material sólido adyacente. Bajo estas condiciones, la expansión térmica del medio poroso equivale al caso de la dilatación térmica libre de un cuerpo sólido constituido por material que es isotrópico en lo que respecta a sus características de expansividad, en donde se verifica que los espacios vacíos dentro del cuerpo se dilatan en la misma proporción que se dilataría un volumen macizo del mismo material que forma las paredes que limitan a los espacios vacíos contenidos dentro del cuerpo considerado (Sears y Zemansky [1957]).

Con base en lo expuesto en el párrafo anterior, el cambio que se produce en el volumen total del medio poroso como consecuencia de un incremento de temperatura dT , puede expresarse por

$$dV_B = V_B \alpha_S dT \quad (3.4.3)$$

donde α_S es el coeficiente volumétrico de expansión térmica del material sólido.

Por otra parte, de la Ec. 3.3.1 mediante la cual se definió el coeficiente de expansión térmica del volumen total de un medio poroso, se tiene que

$$dv_B = v_B \alpha_B dT \quad (3.4.4)$$

Comparando las Ecs. 3.4.3 y 3.4.4, resulta para el caso bajo consideración que

$$\alpha_B = \alpha_S$$

Substituyendo la igualdad anterior en la Ec. 3.3.5, el resultado a que se llega es

$$\alpha_B = \alpha_p = \alpha_S \quad (3.4.5)$$

Finalmente, substituyendo esta última expresión en la Ec. 3.3.7, se obtiene entonces que

$$\frac{d\phi}{dT} = 0$$

o en forma equivalente

$$\phi(T) = \phi_0 \quad (3.4.6)$$

La Ec. 3.4.5 indica que cuando en un medio poroso la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales, entonces los respectivos coeficientes de dilatación térmica del volumen total, del volumen del material sólido y del volumen de los poros son iguales entre sí. Por su parte, la Ec. 3.4.6 indica explícitamente que en este caso la porosidad no resulta afectada por el incremento de temperatura.

Análisis del Caso General en que la Presión de Confinamiento es Mayor que la Presión de Poro

Considerando ahora el caso general en que la presión de confinamiento es mayor que la presión de poro, se tiene que la restricción que se opone a que la expansión del material sólido ocurra hacia el interior de los poros es la propia presión del fluido de poro (P_0), mientras que la restricción que se opone a que la expansión ocurra en la dirección del material sólido adyacente es el esfuerzo σ expresado por la Ec. 3.4.2. De la misma Ec. 3.4.2 se infiere que el esfuerzo σ es mayor que la

presión de poro P_o en una cierta cantidad dada por

$$\sigma - P_o = \frac{P_c - P_o}{1 - \phi} \quad (3.4.7)$$

Debido a que la restricción que se opone a la dilatación del material es menor hacia el interior de los poros que en la dirección del material adyacente, es de esperarse que en este caso la expansión térmica del material sólido no ocurra uniformemente en todas direcciones, sino que ocurra con cierto grado de preferencia hacia el interior de los espacios vacíos. Es de esperarse así mismo que en la medida en que aumente la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro aplicada a un medio poroso dado así también se intensificará el carácter direccional de la expansión térmica del materia sólido, tendiendo a alcanzarse asintóticamente en este proceso la situación límite correspondiente al caso de confinamiento rígido analizado en la subsección precedente.

En la subsección 3.4.1 quedó establecido que cuando el medio poroso se somete a un confinamiento totalmente rígido se tiene el caso en que la reducción de la porosidad con la temperatura alcanza su valor máximo. También ya ha quedado establecido que cuando la presión de confinamiento es igual a la presión de poro se tiene el caso en que es nulo el efecto de la temperatura sobre la porosidad. Por otra parte, el caso en que la presión de confinamiento es mayor que la presión de poro representa la condición general de confinamiento, en donde el confinamiento rígido es el caso límite en un extremo y el confinamiento flexible con $P_c = P_o$ es el caso límite en el extremo opuesto. Por consiguiente, el efecto de la temperatura sobre la porosidad en el caso general debe estar ubicado entre los valores correspondientes a los casos extremos. Con base en estos razonamientos, el efecto de la temperatura sobre la porosidad para el caso general puede expresarse cualitativamente por

$$\frac{1}{\phi_o} \left[1 - (1 - \phi_o) \exp(\alpha_s \Delta T) \right] < \frac{\phi(T)}{\phi_o} < 1 \quad (3.4.8)$$

donde ϕ_o es la porosidad correspondiente a una temperatura de referencia dada.

Para el caso general en que la presión de confinamiento es mayor que la presión de poro, el efecto de la temperatura sobre la porosidad está expresado en forma cuantitativa en términos de los coeficientes de expansión α_B , α_p y α_s mediante las Ecs. 3.3.6 y 3.3.8. Analizando estas ecuaciones conjuntamente con la Ec. 3.4.8, se deduce la siguiente relación

de magnitud entre los coeficientes de expansión térmica del volumen total, del volumen de poros y del volumen del material sólido:

$$\alpha_p < \alpha_B < \alpha_S$$

(3.4.9)

Es decir, el cambio proporcional del volumen de los poros es menor que el cambio proporcional del volumen total, y éste a su vez es menor que el cambio proporcional del volumen del material sólido.

Los valores particulares que adoptan los coeficientes de expansión térmica del volumen total y del volumen de los poros para los casos extremos de confinamiento rígido y de confinamiento flexible con $P_C = P_0$ están dados en función del coeficiente de expansión térmica del material sólido mediante las Ecs. 3.3.11 y 3.3.12 para el primer caso y mediante la Ec. 3.4.5 para el segundo caso. Los valores de α_B y α_p correspondientes a estos casos extremos definen en términos de α_S el rango de variación que puede esperarse para los respectivos coeficientes de expansión térmica del volumen total y del volumen de poros.

A medida que se incremente la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro se incrementará también la preferencialidad con la que el material sólido se expande hacia el interior de los poros. Esto dará como resultado que el cambio proporcional del volumen de los poros sea cada vez menor con respecto al cambio proporcional en el volumen total y que éste a su vez sea cada vez menor con respecto al cambio proporcional en el volumen del material sólido. Este mecanismo, originado por la expansión preferencial del material sólido hacia el interior de los poros, es el que determina que la porosidad de un medio poroso disminuya al incrementarse su temperatura.

3.4.3 Conclusiones Acerca del Análisis del Fenómeno de Expansión Térmica en un Medio Poroso

A continuación se citan las principales conclusiones que pueden establecerse en calidad de resultados del análisis del fenómeno de expansión térmica en un medio poroso sometido a los tres tipos de confinamiento considerados:

- (a) Al aumentar la temperatura de un medio poroso sometido a confinamiento se reduce la porosidad.

- (b) La reducción de la porosidad con el incremento de la temperatura se debe a que el material sólido se expande preferencialmente hacia el interior de los poros, excepto en el caso en que la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales.
- (c) El efecto de la temperatura sobre la porosidad depende de las condiciones de confinamiento a que se encuentra sujeto el medio poroso; a medida que aumenta la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro se incrementa el efecto de la temperatura sobre la porosidad.
- (d) El efecto de la temperatura sobre la porosidad alcanza su manifestación máxima en el caso hipotético de un medio poroso sujeto a un confinamiento totalmente rígido, mientras que el efecto es nulo cuando el medio se somete a confinamiento flexible con la presión de confinamiento siendo igual a la presión de poro.
- (e) La reducción proporcional de porosidad asociada al aumento de la temperatura es más significativa a medida que es menor la porosidad intrínseca del medio poroso.
- (f) El cambio proporcional del volumen total de un medio poroso depende de las condiciones de confinamiento a que el medio se encuentra sujeto. La dilatación del volumen total es máxima y proporcionalmente igual a la dilatación volumétrica del material sólido cuando la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales, mientras que es nula en el caso extremo en que el medio se encuentra sujeto a confinamiento totalmente rígido.
- (g) El cambio proporcional del volumen de los poros puede asumir valores positivos o negativos dependiendo de la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro. Adquiere su valor máximo y es igual al cambio proporcional del volumen del material sólido cuando la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales, mientras que su valor mínimo corresponde al caso en que el medio está sujeto a confinamiento rígido.

3.5 DEDUCCION DE UN METODO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD A PARTIR DE MEDICIONES DE EXPANSION TERMICA LINEAL

Empleando algunos de los fundamentos expuestos en las Seccs. 3.3 y 3.4, en esta sección se demuestra que es factible evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad de un medio poroso a partir únicamente de mediciones de expansión térmica lineal en un

especimen del medio.

3.5.1 Equivalencia Entre el Coeficiente de Expansión Térmica del Material Sólido y el Coeficiente de Expansión Térmica del Volumen Total de un Medio Poroso

En calidad de antecedente que interviene directamente en la deducción del método experimental antes mencionado, a continuación se deriva una relación de equivalencia entre el coeficiente de expansión térmica del material sólido (α_S) y el coeficiente de expansión térmica del volumen total (α_B) de un medio poroso. Mediante esta relación se demuestra que el coeficiente α_S correspondiente al medio poroso sometido a una presión de confinamiento P_C y a una presión de poro P_O , equivale al coeficiente α_B correspondiente a una presión de confinamiento P_C^* y a una presión de poro P_O^* , donde

$$P_C^* = P_O^* = \frac{P_C - \phi P_O}{1 - \phi}$$

Para demostrar lo anterior se parte de la consideración de que el coeficiente de expansión térmica del material sólido debe depender en general del esfuerzo σ al cual dicho material se encuentra sometido en el medio poroso. Según la Ec. 3.4.2 este esfuerzo está dado por

$$\sigma = \frac{P_C - \phi P_O}{1 - \phi} \quad (3.5.1)$$

Si la presión de confinamiento y la presión de poro aplicadas al medio poroso se hacen variar de forma tal que el esfuerzo σ permanezca constante, cabe suponer entonces que el coeficiente de expansión térmica del material sólido no sufrirá alteraciones. Las expresiones matemáticas correspondientes a este planteamiento son

$$\alpha_S(P_C, P_O) = \alpha_S(P_C^*, P_O^*) \quad (3.5.2)$$

bajo la condición de que

$$\frac{P_C - \phi P_O}{1 - \phi} = \frac{P_C^* - \phi P_O^*}{1 - \phi} \quad (3.5.3)$$

La condición descrita por la ecuación anterior también puede escribirse como

$$P_C^* = (P_C - \phi P_o) + \phi P_o^* \quad (3.5.4)$$

existiendo un número infinito de parejas de valores de P_C^* y P_o^* que satisfacen esta ecuación.

Si en especial el valor de P_o^* se elige conforme a la expresión

$$P_o^* = \frac{P_C - \phi P_o}{1 - \phi} \quad (3.5.5)$$

entonces al substituir este valor de P_o^* en la Ec. 3.5.4 resulta que

$$P_C^* = P_o^* = \frac{P_C - \phi P_o}{1 - \phi} \quad (3.5.6)$$

Por otra parte, en la sección previa quedó establecido, (ver Ec. 3.4.5), que para un medio poroso sometido a confinamiento flexible en el caso particular en que la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales, se cumple que

$$\alpha_B = \alpha_S \quad (3.5.7)$$

Por consiguiente, si P_C^* y P_o^* satisfacen a la Ec. 3.5.6, por lo que respecta a la consideración de la Ec. 3.5.7 resulta que

$$\alpha_B(P_C^*, P_o^*) = \alpha_S(P_C^*, P_o^*) \quad (3.5.8)$$

y por lo que corresponde a la Ec. 3.5.2 resulta que

$$\alpha_S(P_C, P_O) = \alpha_S(P_C^*, P_O^*) \quad (3.5.9)$$

Substituyendo la Ec. 3.5.8 en la Ec. 3.5.9 el resultado a que finalmente se llega es

$$\alpha_S(P_C, P_O) = \alpha_B(P_C^*, P_O^*) \quad (3.5.10)$$

donde, reiterándolo por su importancia, P_C^* y P_O^* están dados por la Ec. 3.5.6.

3.5.2 Dedución del Método Experimental

Supóngase que se requiere cuantificar el efecto de la temperatura sobre la porosidad de un medio poroso que se encuentra sometido a una presión de confinamiento P_C y a una presión de poro P_O . La Ec. 3.3.8 es la expresión general que caracteriza este efecto en función del coeficiente de expansión térmica del volumen total (α_B), del coeficiente de expansión térmica del volumen del material sólido (α_S) y de la porosidad del medio a la temperatura de referencia (ϕ_O). Para facilitar la exposición subsecuente la Ec. 3.3.8 se reescribe abajo como la Ec. 3.5.11.

$$\frac{\phi(T)}{\phi_O} (P_C, P_O) = \frac{1}{\phi_O} \left\{ 1 - (1 - \phi_O) \exp \int_T^{T_O} \left[\alpha_S(P_C, P_O) - \alpha_B(P_C, P_O) \right] dT \right\} \quad (3.5.11)$$

Suponiendo que la porosidad ϕ_O es un dato conocido, el problema de cuantificar el efecto de la temperatura sobre la porosidad se reduce a evaluar la integral que aparece en la Ec. 3.5.11, la cual para facilitar el desarrollo matemático se representará por el símbolo " Σ ". Esto es

$$\Sigma(T) = \int_{T_O}^T \left[\alpha_S(P_C, P_O) - \alpha_B(P_C, P_O) \right] dT \quad (3.5.12)$$

Teniendo en cuenta la relación de equivalencia descrita por la Ec. 3.5.10, la ecuación anterior se convierte en

$$\Sigma(T) = \int_{T_0}^T \left[\alpha_B(P_C^*, P_O^*) - \alpha_B(P_C, P_O) \right] dT \quad (3.5.13)$$

donde P_C^* y P_O^* están dados por la Ec. 3.5.6.

Para proseguir con la deducción es necesario asumir que las dimensiones lineales del medio poroso, considerado en un contexto macroscópico, cambian en la misma proporción en todas direcciones cuando varía la temperatura del medio (isotropía de la dilatación térmica del volumen total del medio poroso). Bajo esta consideración es fácil demostrar que si se desprecian términos poco significativos de segundo y tercer orden, entonces el coeficiente de expansión térmica del volumen total puede expresarse por

$$\alpha_B = 3 \left(\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) \quad (3.5.14)$$

donde L es la distancia lineal entre dos puntos cualesquiera del medio poroso. El término entre paréntesis que aparece en la ecuación anterior equivale al coeficiente de dilatación lineal con el que usualmente se caracteriza la expansión térmica de los materiales sólidos.

Substituyendo en la Ec. 3.5.13 la formulación expresada por la Ec. 3.5.14 se obtiene que

$$\Sigma(T) = 3 \int_{T_0}^T \left[\left(\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) (P_C^*, P_O^*) - \left(\frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) (P_C, P_O) \right] dT \quad (3.5.15)$$

Simplificando la ecuación anterior y adoptando la notación abreviada definida por

$$\left(\frac{dL}{L} \right) (P_C^*, P_O^*) \equiv \left(\frac{dL}{L} \right)^*$$

$$\left(\frac{dL}{L} \right) (P_C, P_O) \equiv \left(\frac{dL}{L} \right)$$

la expresión equivalente que se obtiene es

$$\Sigma (T) = 3 \int_T^{T_0} \left[\left(\frac{dL}{L} \right)^* - \left(\frac{dL}{L} \right) \right] \quad (3.5.16)$$

Efectuando las integraciones indicadas en la ecuación anterior y aplicando límites, se obtiene que

$$\Sigma (T) = \ln \left[\frac{1 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^*}{1 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)} \right]^3 = \ln \left[\frac{1 + \epsilon^*}{1 + \epsilon} \right]^3 \quad (3.5.17)$$

donde

ϵ : dilatación lineal unitaria asociada al incremento de temperatura $\Delta T = T - T_0$, medida en el medio poroso sometido a la presión de confinamiento P_C y a la presión de poro P_0 . Para facilitar referencias subsecuentes se adopta el convenio de designar a esta variable como la expansión lineal unitaria total.

ϵ^* : dilatación lineal unitaria asociada al incremento de temperatura $\Delta T = T - T_0$, medida en el medio poroso sometido a la presión de confinamiento P_C^* y a la presión de poro P_0^* dadas por la Ec. 3.5.6; representa la expansión lineal unitaria del material sólido del medio poroso cuando éste se encuentra sometido a la presión de confinamiento P_C y a la presión de poro P_0 . Para facilitar referencias subsecuentes se adopta el convenio de designar a esta variable como la expansión lineal unitaria de matriz.

Substituyendo ahora la Ec. 3.5.17 en la Ec. 3.5.12 se obtiene que

$$\int_T^{T_0} \left[\alpha_S(P_C, P_0) - \alpha_B(P_C, P_0) \right] dT = \ln \left[\frac{1 + \epsilon^*}{1 + \epsilon} \right]^3 \quad (3.5.18)$$

Por último, substituyendo la Ec. 3.5.18 en la Ec. 3.5.11 el resultado al cual se llega como producto final de todo el desarrollo es

$$\frac{\phi(T)}{\phi_0} (P_C, P_0) = \frac{1}{\phi_0} \left[1 - (1 - \phi_0) \left(\frac{1 + \epsilon^*}{1 + \epsilon} \right)^3 \right] \quad (3.5.19)$$

Esta ecuación describe el efecto de la temperatura sobre la porosidad en función únicamente de parámetros de dilatación térmica lineal del medio poroso. Queda así demostrado que el efecto de la temperatura sobre la porosidad de un medio poroso sometido a una presión de confinamiento y a una presión de poro dadas puede evaluarse a partir de mediciones experimentales de dilatación térmica lineal. Por consiguiente, la Ec. 3.5.19 formalmente representa las bases conceptuales y el modelo analítico de uno de los posibles métodos experimentales susceptibles de emplearse para determinar el efecto de la temperatura sobre la porosidad de un medio poroso confinado.

APENDICE 3.A: DEDUCCION DE LA EC. 3.4.2

En la Fig. 3.A.1 se muestra el diagrama de cuerpo libre de un elemento de volumen de un medio poroso sometido a una presión de confinamiento P_C y a una presión de poro P_O . Se considera un elemento en forma de tetraedro, referido a un sistema de coordenadas rectangulares. Se asume que el medio poroso satisface las condiciones referidas en la pag. 35. Tres de las caras del elemento son perpendiculares a los ejes coordenados y se considera que están revestidas con una cubierta flexible, a través de la cual actúa la presión de confinamiento P_C . La cara restante es un plano de corte arbitrario a través poroso (plano N). La orientación del plano N está definida mediante el vector unitario \vec{n} , el cual es perpendicular al plano y está dirigido hacia afuera del elemento. La orientación del vector \vec{n} a su vez está definida mediante los cosenos directores l , m y n , o sea los cosenos de los ángulos formados entre dicho vector y la dirección positiva de los ejes X, Y y Z, respectivamente.

El área total del plano de corte (A), es la suma del área proyectada por los poros intersectados (A_P) y del área correspondiente al material sólido que queda expuesto por el plano de corte (A_S). Por la condición (b) que se describe en la pag. 35 se tiene que

$$A_P = \phi A$$

$$A_S = (1-\phi)A$$

donde ϕ es la porosidad del medio.

Sobre el área A_P actúa la presión del fluido de poro (P_O), ejerciendo un esfuerzo normal a la superficie del plano N. Sobre el área A_S actúa un esfuerzo medio \vec{S} , el cual representa la interacción mecánica entre el material sólido situado a ambos lados del plano de corte. Bajo el supuesto de que la distribución areal de la porosidad es uniforme en el plano N, se tiene que el esfuerzo \vec{S} en cada punto del área A_S tenderá hacia un valor uniforme igual al valor medio.

Si se desprecian el peso propio del elemento y el peso del fluido contenido en los poros, al considerar la condición de equilibrio de fuerzas que debe existir en el elemento se obtiene la siguiente expresión

$$P_C A l \vec{i} + P_C A m \vec{j} + P_C A n \vec{k} + P_O \phi A + \vec{S} A (1-\phi) = 0$$

Simplificando la ecuación anterior y despejando el vector

esfuerzo, se obtiene que

$$\vec{S} = [(P_C - \phi P_O) / 1 - \phi] (-\vec{n}) = S (-\vec{n})$$

de donde se infiere que el vector esfuerzo actúa en dirección perpendicular al plano de corte considerado, aunque en sentido opuesto al del vector unitario \vec{n} .

Por consiguiente, la componente tangencial del esfuerzo que actúa sobre el plano de corte tiene un valor nulo, mientras que la componente normal es un esfuerzo compresivo (σ), el cual está dado por

$$\sigma = S = (P_C - \phi P_O) / 1 - \phi$$

Debido a que la ecuación anterior no involucra ningún parámetro relacionado con la orientación del plano arbitrario de corte, resulta entonces que el esfuerzo normal en el material sólido del medio poroso tiene el mismo valor en todas direcciones, condición que define lo que se conoce comúnmente como un estado isotrópico de esfuerzo.

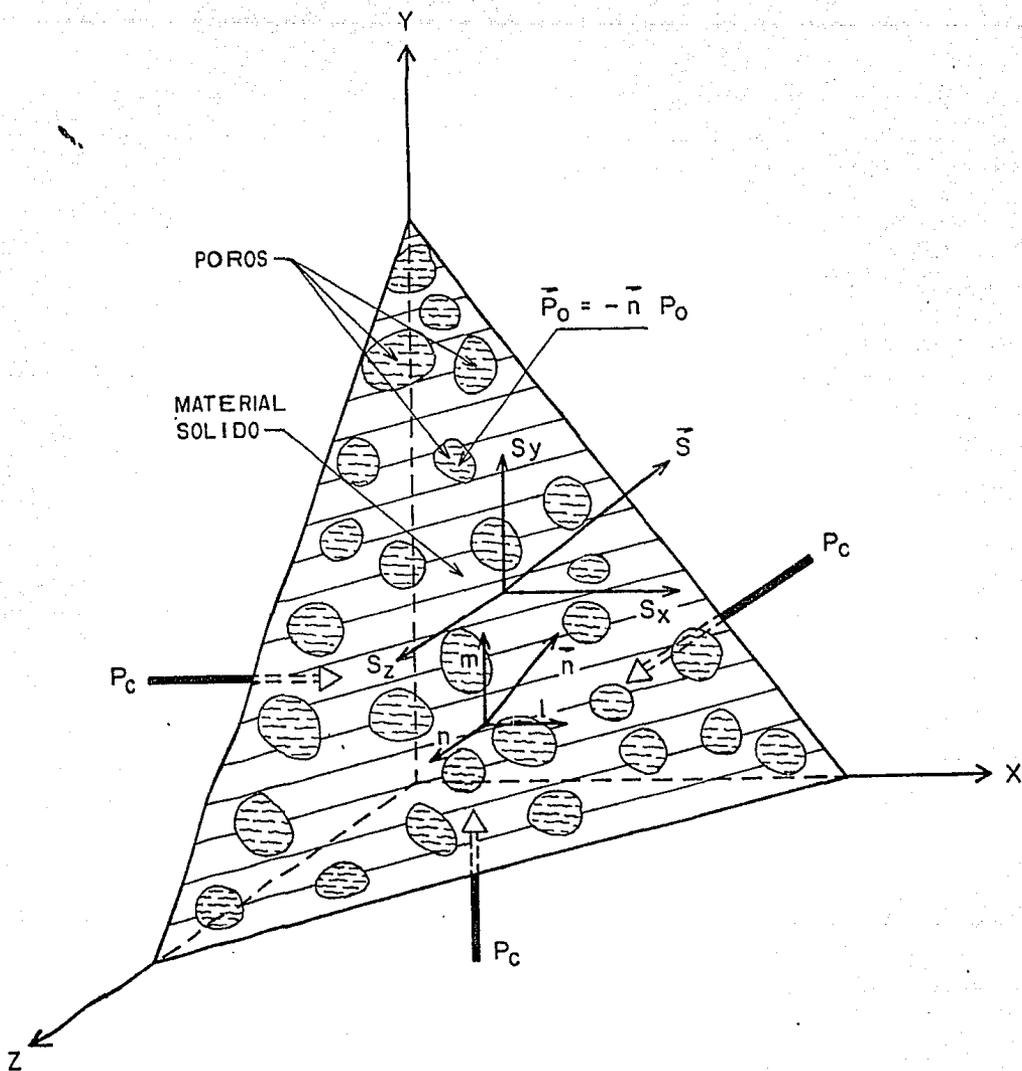


Fig. 3.A.1 Diagrama de cuerpo libre de un elemento arbitrario de un medio poroso sometido a una presión de confinamiento P_c y a una presión de poro P_o .

CAPITULO 4

REVISION DE LITERATURA

Este capítulo es una revisión de los trabajos más relevantes que han sido reportados por otros autores acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad, la porosidad y la expansión térmica de rocas areniscas. Todas las investigaciones reportadas en la literatura sobre estos tópicos están circunscritas dentro del ámbito meramente experimental. La revisión muestra que los resultados experimentales reportados son muy contradictorios en lo que respecta a la influencia de la temperatura sobre la permeabilidad, por lo que el efecto real es cuestionable y se justifica plenamente la realización de investigaciones adicionales para mejorar la caracterización y el entendimiento del fenómeno. Por lo que se refiere a investigaciones sobre aspectos relacionados con la expansión térmica de rocas areniscas, puede decirse que se trata de un campo prácticamente inexplorado; en efecto, la revisión muestra que los resultados publicados son muy escasos, existiendo al respecto una gran diversidad de aspectos de interés práctico cuya investigación al parecer nunca se ha intentado. También son muy escasos los resultados que se han reportado acerca del efecto de la temperatura sobre la porosidad, los cuales además exhiben incongruencias muy significantes que determinan que no se les pueda otorgar mucha confiabilidad.

4.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PERMEABILIDAD

Casse [1974] realizó investigaciones experimentales acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad en especímenes de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera. Se emplearon como fluidos de trabajo agua, aceite mineral y nitrógeno en estado gaseoso. Las mediciones cubrieron el intervalo de temperatura de 25°C a 150°C. En todos los casos se aplicó a las muestras de roca ensayadas una presión de confinamiento constante de 13.8 MPa. Los resultados de las mediciones efectuadas empleando agua como fluido de trabajo mostraron considerable disminución de la permeabilidad en todas las muestras así ensayadas, habiéndose observado reducciones de hasta 62% con el aumento de temperatura de 25°C a 150°C. El efecto de la temperatura sobre la permeabilidad fue esencialmente reversible en todos los casos; es decir, al enfriarse las rocas la permeabilidad recobró su valor original. Los especímenes que se emplearon para efectuar las mediciones con agua también se sometieron a mediciones empleando aceite mineral y nitrógeno en estado gaseoso como fluidos de

trabajo. Las mediciones con aceite y nitrógeno no mostraron cambios significativos de la permeabilidad con el aumento de temperatura, por lo que se concluyó que la reducción de la permeabilidad al agua con el aumento de la temperatura no podía ser atribuida a cambios inducidos térmicamente en la estructura porosa de la roca. El factor dominante al que se le atribuyó el origen del fenómeno de reducción de la permeabilidad al agua con el aumento de la temperatura fue una supuesta interacción entre la roca y el fluido, aunque sin descartar la contribución en pequeña escala de los cambios estructurales que se darían en la roca como consecuencia del incremento de temperatura.

Weinbrandt et al. [1975] reportaron resultados de mediciones de permeabilidad como función de la temperatura en muestras de roca arenisca Boise y Berea. Se empleó agua como fluido de trabajo y se cubrió el intervalo de temperatura de 25°C a 150°C. Las muestras ensayadas se sometieron a 13.8 MPa de presión de confinamiento. En todos los casos se observaron reducciones de permeabilidad de aproximadamente 60% con el incremento de temperatura de 25°C a 150°C. El efecto de la temperatura fue reversible y se apreció que la disminución de permeabilidad fue menos acentuada a medida que se alcanzaban mayores niveles de temperatura, sugiriéndose con ello una tendencia hacia un valor de estabilización.

Aruna et al. [1977] efectuaron estudios acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad para una amplia variedad de materiales (arenas no consolidadas, rocas areniscas consolidadas y rocas calizas), fluidos de trabajo (agua, aceite mineral, octanol y nitrógeno) y presiones de confinamiento. Las mediciones cubrieron el intervalo de temperatura de 25°C a 150°C. Se aplicó a las muestras presión de confinamiento entre 6.9 MPa y 27.6 MPa. La permeabilidad al agua de las areniscas, tanto de las consolidadas como de las no consolidadas, resultó ser fuertemente dependiente de la temperatura, habiéndose observado en todos los casos reducciones de permeabilidad de entre 50% y 60% para el incremento de temperatura de 25°C a 150°C. Cuando se empleó como fluido de trabajo aceite mineral, octanol o nitrógeno, se encontró que la permeabilidad de las areniscas sufrió sólo variaciones muy poco significantes con el aumento de la temperatura. Por otra parte, en mediciones efectuadas en muestras de roca caliza Indiana empleando agua como fluido de trabajo no se observó reducción de la permeabilidad con el aumento de la temperatura. Para las mediciones en las muestras de arenisca empleando agua como fluido de trabajo se tuvo el efecto adicional de que al incrementarse la presión de confinamiento se intensificó la influencia de la temperatura sobre la permeabilidad. La reducción de la permeabilidad con el aumento de la temperatura que se observó en las areniscas cuando se empleó agua como fluido de trabajo se atribuyó a interacciones entre la sílice de la roca y las moléculas de agua. Se planteó la hipótesis de que este mecanismo origina que las moléculas de

agua afectadas por la interacción pierden su movilidad y se convierten prácticamente en una extensión de la superficie sólida que limita los canales y poros del medio, dando lugar así a que se reduzca la sección transversal efectiva para el flujo.

Danesh et al. [1978] reportaron resultados experimentales acerca del flujo de fluidos a alta temperatura en especímenes no consolidados de arena Ottawa y de pequeños balines de acero inoxidable. Se empleó agua y aceite mineral como fluidos de trabajo. Para ambos tipos de materiales se observaron reducciones de la permeabilidad al agua del orden de 25% con el aumento de la temperatura de 25°C a 150°C. Cuando se empleó aceite como fluido de trabajo en la muestra de balines de acero no se observó dependencia de la permeabilidad con la temperatura. Al parecer no se realizó la medición de permeabilidad en la muestra de arena empleando aceite como fluido de trabajo, ya que no se mencionan resultados al respecto. A manera de conclusiones se comenta que la permeabilidad absoluta de los medios porosos puede depender significativamente del fluido de trabajo y del tipo de medio poroso. Se menciona además que la reducción de la permeabilidad al agua con el aumento de la temperatura puede ser consecuencia del campo de fuerzas intermoleculares dentro de la capa límite de agua adyacente a la superficie sólida de la roca, campo el cual es diferente del que existe en el seno del volumen de agua situado fuera de la zona de influencia de la superficie sólida.

Gobran et al. [1980] efectuaron mediciones de la permeabilidad como función de la temperatura en una muestra no consolidada de arena Ottawa empleando agua como fluido de trabajo. La muestra se sometió a cambios cíclicos de temperatura en el intervalo de 20°C a 177°C. Se aplicó a la muestra una presión de confinamiento constante de 13.8 MPa. Se observaron reducciones de permeabilidad del orden de 25% para el incremento de temperatura de 20°C a 177°C. Se apreciaron reducciones permanentes de la permeabilidad con cada nuevo ciclo de calentamiento y enfriamiento. La mayor parte de la reducción de la permeabilidad ocurrió en el intervalo de 20°C a 65°C. Se efectuaron experimentos para determinar si la reducción de permeabilidad podía atribuirse a la migración y depositación de partículas finas en los estrechamientos de los conductos de flujo. Con esta finalidad, a temperatura ambiente se hizo pasar a través de la muestra un volumen de agua equivalente a 500 volúmenes de poro. Puesto que no se observaron modificaciones de la permeabilidad durante el proceso de flujo, se descartó la migración y depositación de partículas finas como el agente causante de la reducción de la permeabilidad con el aumento de la temperatura. Se concluyó que la permeabilidad de la arena Ottawa confinada era dependiente de la temperatura.

Potter et al. [1981] investigaron el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad al agua en especímenes de roca arenisca consolidada "St. Peter", la cual está constituida por cuarzo en un porcentaje mayor que 99%. Empleando un sistema experimental con tuberías normales de acero inoxidable se observó reducción de la permeabilidad con el tiempo (35% de reducción en 6 horas) a la temperatura constante de 100°C. Empleando un sistema experimental con tuberías de titanio recubiertas con teflón, inertes a la corrosión y a la oxidación, no se observó reducción de la permeabilidad con el tiempo a la temperatura constante de 100°C, ni como función de la temperatura en el intervalo de 20°C a 200°C. La reducción de permeabilidad observada con el empleo del sistema de flujo a base de tuberías convencionales se atribuyó al taponamiento de los canales de flujo de la roca debido a la precipitación de óxidos o hidróxidos férricos coloidales, sustancias que a su vez se formaron con iones férricos generados por la oxidación y corrosión del acero de la tubería. Se concluyó que la temperatura en sí misma no tiene un efecto significativo sobre la permeabilidad de las rocas areniscas. Además, se externó la creencia de que las reducciones de permeabilidad con el aumento de temperatura que antes habían sido reportadas por Aruna et al. [1977], Danesh et al. [1978] y Gobran et al. [1980] eran sólo consecuencia del taponamiento de los canales de flujo debido a la precipitación de sustancias coloidales derivadas de los iones férricos producidos por la oxidación y corrosión de la tubería de acero que estos investigadores emplearon en sus sistemas experimentales.

Gobran et al. [1981] midieron la permeabilidad al agua como función de la temperatura en un empaquetamiento de arena Ottawa no consolidada y en una muestra de roca arenisca Berea. Las mediciones se efectuaron en el intervalo de 20°C a 150°C. Se reportó no haber detectado reducción de la permeabilidad con el aumento de la temperatura en ninguno de los dos especímenes. Se sugirió que las reducciones de permeabilidad con el aumento de temperatura que previamente habían sido reportadas por otros autores se debían posiblemente a errores en la medición de la caída de presión del fluido de trabajo al circular a través de las muestras ensayadas.

La conclusión básica que puede establecerse de la revisión de literatura hasta aquí presentada es que la investigación experimental acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas ha producido resultados que a primera vista aparentan ser sumamente controvertidos e inconsistentes, de manera que dicho efecto dista mucho de que se le pueda considerar como un fenómeno bien caracterizado.

Dentro de un contexto de análisis, se incluyen a continuación algunas observaciones sobre la forma en que se ha conducido la investigación experimental acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad. Se señalan, desde el punto

de vista del autor del presente trabajo, algunas deficiencias en la metodología general de investigación y de análisis de los resultados experimentales. A estas deficiencias se les puede atribuir en buena medida el alto grado de la aparente controversia e inconsistencia de los resultados experimentales reportados por los diferentes autores que han abordado la investigación de este tópico.

Los resultados experimentales que se reportan en los trabajos antes revisados corresponden a mediciones realizadas en muy diversos tipos de medios porosos. En efecto, se reportan resultados de mediciones en rocas areniscas consolidadas, en arenas no consolidadas y hasta en especímenes formados por empaquetamientos de balines de acero y cuentas de vidrio. Ante tal variedad de materiales es evidente que no existe una base sólida para hacer comparaciones de los resultados reportados en los diferentes trabajos.

Al parecer no se ha considerado en absoluto la posibilidad de que el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad al agua de las rocas areniscas y de las arenas no consolidadas sea dependiente de sus características texturales. En este respecto, considérese por ejemplo la hipótesis propuesta por Aruna et al. [1977] y Danesh et al. [1978] en el sentido de que la disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura se debe a interacciones entre la superficie sólida que limita a los conductos de flujo y las moléculas de agua, fenómeno el cual supuestamente daría lugar a que se redujera la sección transversal efectiva para el flujo. Si el efecto superficial en cuestión se extiende a través de un número determinado de espesores o capas moleculares, es evidente que el efecto sobre el flujo total deberá ser mayor a medida que sea menor el diámetro de los poros o conductos de flujo.

La observación descrita en el párrafo anterior puede constituir la base para explicar los resultados inconsistentes y hasta contradictorios que se han reportado en la literatura acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad. Por ejemplo, si la propuesta interacción entre la superficie sólida y las moléculas de agua se desarrolla por efecto de la temperatura cubriendo un espesor dado independiente del tamaño de los poros, se tiene entonces un mecanismo que puede dar lugar a reducciones considerables o a reducciones poco significantes de la permeabilidad, dependiendo ello del tamaño de los poros del material en cuestión. Este planteamiento sugiere que el análisis y la comparación de resultados experimentales acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad al agua de las areniscas deben de efectuarse teniendo muy en cuenta las características texturales de estos materiales.

Por otra parte, al parecer no se han efectuado estudios para tratar de determinar el grado en que la reducción de la permeabilidad con el aumento de la temperatura pudiera atribuirse a disminuciones de la porosidad posiblemente asociadas al mismo proceso de incremento de temperatura. Lo más avanzado a que se ha llegado en este respecto consiste en suponer que la reducción de la porosidad con la temperatura debe de ser muy pequeña, y que por consiguiente no debería influir notoriamente sobre la permeabilidad (Somerton, [1982]). Sin embargo, un estudio sistemático acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad requiere de que en primer lugar se cuantifique, en base a mediciones experimentales directas y no sólo en suposiciones, cual es el efecto de la temperatura sobre la porosidad. Una vez conocido lo anterior, por medio de modelos estructurales de medios porosos y apoyándose en evidencias experimentales se podría hacer una evaluación más objetiva del grado en que la disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura puede ser atribuida a reducciones de la porosidad generadas por el propio proceso de calentamiento de las rocas.

De todo lo expuesto en esta sección resulta claro que distan mucho de ser concluyentes los conocimientos que actualmente se tienen acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas. La gran cantidad de controversias e inconsistencias de los datos reportados en la literatura permiten afirmar que es aún muy pobre la caracterización cualitativa y cuantitativa del fenómeno, por lo que está plenamente justificada la ejecución de investigaciones adicionales al respecto. Estas investigaciones deben enfocarse por una parte a ampliar la base de evidencias experimentales mediante mediciones de laboratorio, y por otra parte a identificar y caracterizar los mecanismos que pueden dar lugar a la ocurrencia del fenómeno de disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura. Como parte del presente trabajo se incluyen contribuciones a la investigación de este fenómeno dentro de los dos aspectos antes mencionados. En el contexto experimental se reportan los resultados de mediciones de permeabilidad como función de la temperatura efectuadas en seis especímenes de roca arenisca obtenidos de núcleos de perforación de tres pozos del campo geotérmico Cerro Prieto. La extensión y las condiciones experimentales de estas mediciones se describen detalladamente en la sección 5.1, mientras que la presentación y la discusión de los correspondientes resultados se encuentran en la sección 7.1. En el contexto de investigación para tratar de identificar y caracterizar los mecanismos responsables de la disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura se efectuaron algunos estudios cuya descripción y resultados se presentan en la sección 7.2.

4.2 EXPANSION TERMICA DE ROCAS ARENISCAS Y EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD

Somerton y Selim [1961] efectuaron mediciones de expansión térmica lineal en especímenes secos de las rocas areniscas Bandera, Berea y Boise, así como en cuarzo cristalino puro. Las mediciones se efectuaron a presión atmosférica. Se cubrió el intervalo de temperatura de 25°C a 1000°C y el calentamiento se efectuó con una rapidez de 6°C/min. En los especímenes de roca arenisca se efectuaron mediciones en las direcciones perpendicular y paralela al plano de estratificación de los sedimentos constitutivos de las rocas. Para el cuarzo puro se efectuaron mediciones en las direcciones paralela y perpendicular al llamado eje C del cuarzo cristalino. En los tres tipos de rocas se encontró que la magnitud de la expansión térmica fue aproximadamente igual en las direcciones paralela y perpendicular a su plano de estratificación. Además, se observó que las respectivas magnitudes de la expansión térmica de los tres tipos de rocas fueron muy similares entre sí y muy aproximadamente iguales a la expansión del cuarzo en la dirección perpendicular al eje C. Debido a que el contenido de cuarzo de los especímenes fluctuaba desde 50% para la roca Boise hasta 90% para la roca Berea, los autores sugirieron que la presencia de cuarzo en un porcentaje por arriba de un cierto valor mínimo probablemente domina las características de expansión térmica de las areniscas. En la Fig. 4.2.1 se muestran los resultados más relevantes del trabajo de Somerton y Selim [1961] en forma de gráficas de expansión térmica lineal unitaria contra temperatura. No se reportan en el trabajo referido valores explícitos del coeficiente de expansión térmica de los materiales ensayados, si bien este coeficiente puede determinarse aproximadamente a partir de las gráficas de expansión térmica.

Ashqar [1979] reportó resultados de mediciones de expansión térmica lineal en especímenes de las rocas areniscas Boise, Berea y Bandera. En este caso las mediciones se efectuaron con los especímenes saturados con agua y sometidos a 20.7 MPa de presión de confinamiento y 6.9 MPa de presión de poro. Se cubrió el intervalo de temperatura de 30°C a 175°C y el calentamiento se efectuó con una rapidez de aproximadamente 1°C/min. Solamente se reportan curvas de expansión térmica para la etapa de calentamiento de las muestras de roca, ya que no se efectuaron mediciones durante la etapa de enfriamiento ni se aplicaron cambios cíclicos de temperatura. Los resultados reportados por Ashqar [1979] se muestran en la Fig. 4.2.2. Este autor comparó sus curvas de expansión térmica con aquellas obtenidas por Somerton y Selim [1961] para el mismo tipo de rocas, pero en especímenes secos y sometidos solamente a la acción de la presión atmosférica. Se reportó una buena concordancia general entre ambos tipos de curvas, por lo que se sugirió que la expansión térmica de las rocas areniscas Boise,

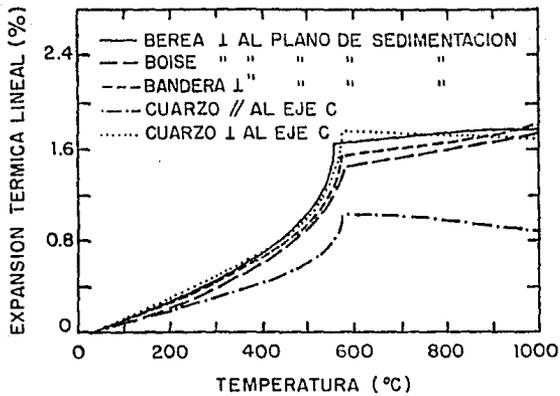


Fig. 4.2.1 Expansión térmica lineal del cuarzo y de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Somerton y Selim, [1961]).

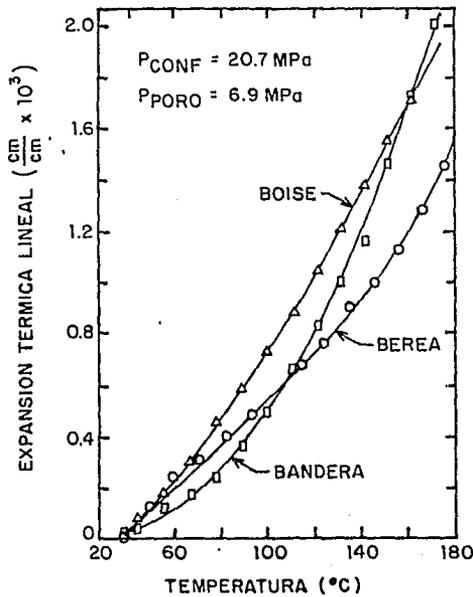


Fig. 4.2.2 Expansión térmica lineal de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Ashqar, [1979]).

Berea y Bandera no era fuertemente dependiente de las condiciones de esfuerzo y saturación. Tampoco en este trabajo se reportaron valores explícitos del coeficiente de expansión térmica lineal de las rocas ensayadas.

Janah [1980] reportó resultados de una serie de mediciones que se dedicaron para investigar el efecto de la temperatura sobre el cambio del volumen de los poros en especímenes de las mismas rocas areniscas Boise, Berea y Bandera. Los especímenes ensayados se sometieron a 20.7 MPa de presión de confinamiento y 6.9 MPa de presión de poro. El cambio en el volumen de los poros se midió como función de la temperatura en el intervalo de 30°C a 170°C. En la Fig. 4.2.3 se muestran los resultados reportados. Se concluyó que para el caso de rocas areniscas saturadas con líquido y sometidas a condiciones de esfuerzo, el volumen de los poros disminuye con el aumento de la temperatura. Se enfatiza además que la magnitud de la contracción térmica del volumen de los poros depende de la porosidad de la roca, siendo más significativa la reducción fraccional del volumen de los poros a medida que disminuye la porosidad de la roca. De acuerdo a los resultados reportados, se observa que la reducción fraccional del volumen de los poros asociada al incremento de temperatura de 30°C a 175°C fue de 0.55% para la roca Boise, de 1.04% para la roca Berea y de 1.55% para la roca Bandera. En relación con la apreciación externada por el autor del trabajo referido en el sentido de que el volumen de los poros disminuye con el aumento de la temperatura, es procedente hacer notar que dependiendo de la magnitud de la presión de confinamiento y de la presión de poro también es posible, al menos desde el punto de vista del análisis físico-matemático del fenómeno, que el volumen de los poros aumente con el incremento de la temperatura (consultar sección 3.4.2 del presente trabajo).

Greenwald et al. [1982] presentaron un diferente conjunto de resultados experimentales para el mismo tipo de mediciones que antes habían sido reportadas por Ashqar [1979] y Janah [1980]. Las curvas de expansión térmica lineal reportadas por Greenwald et al. [1982] se muestran en la Fig. 4.2.4, mientras que las gráficas de contracción térmica del volumen de los poros se muestran en la Fig. 4.2.5. Se aprecian algunas diferencias entre las curvas de expansión térmica lineal reportadas por Greenwald et al. [1982] y aquellas presentadas por Ashqar [1979], siendo más significantes estas diferencias para el caso de la roca Berea. Por otra parte, la reducción fraccional del volumen de poro asociada al incremento de temperatura de 30°C a 170°C que reporta Greenwald et al. [1982] para las rocas Boise, Berea y Bandera es de 3.0%, 3.7% y 4.0% respectivamente. Estos valores difieren en forma muy significativa de aquellos que antes habían sido reportados por Janah [1980]. No obstante la diferencia de los resultados y de que al parecer el último autor en reportar resultados conocía aquellos del que reportó primero (por pertenecer ambos autores en forma contemporánea al mismo

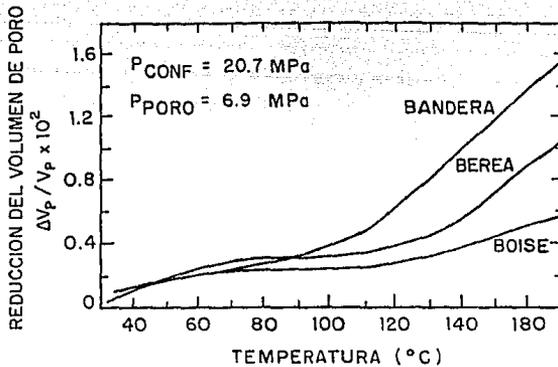


Fig. 4.2.3 Efecto de la temperatura sobre el volumen de los poros en las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Janah, [1980]).

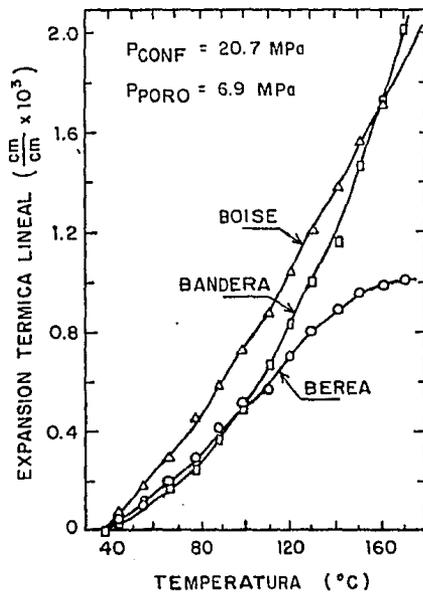


Fig. 4.2.4 Expansión térmica lineal de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Greenwald et al [1982]).

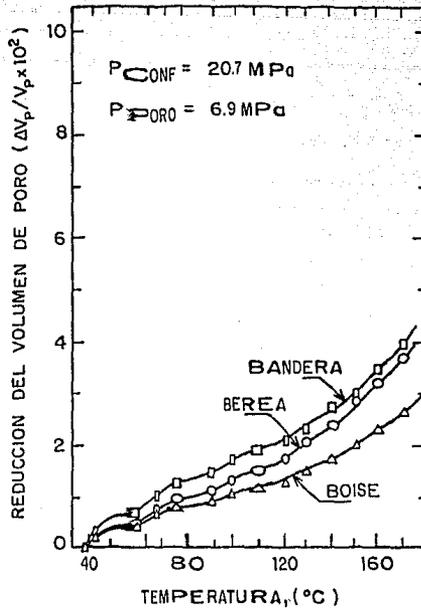


Fig. 4.2.5 Efecto de la temperatura sobre el volumen de poros de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Greenwald et al. [1982])

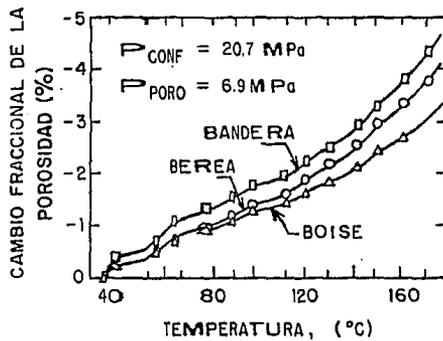


Fig. 4.2.6 Efecto de la temperatura sobre la porosidad de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera, (Greenwald et al. [1982]).

grupo de trabajo en la Universidad de California en Berkeley), ningún comentario o aclaración se hizo al respecto.

Adoptando la suposición de que el cambio proporcional del volumen total es igual a tres veces el cambio proporcional de la longitud de las rocas, $(\Delta V_B/V_B=3\Delta L/L)$, Greenwald et al. [1982] conjuntaron sus resultados de expansión térmica lineal y de contracción térmica del volumen de los poros para calcular el cambio fraccional en la porosidad de las rocas Boise, Berea y Bandera con el aumento de temperatura en el intervalo de 30°C a 170°C (el procedimiento de cálculo consiste simplemente en aplicar la expresión matemática identificada en el presente trabajo como la Ec. 3.2.1). Los resultados correspondientes se muestran en la Fig. 4.2.6, de donde se aprecia que la reducción de porosidad asociada al incremento de temperatura de 30°C a 170°C fue, según Greenwald et al. [1982], de 3% para la roca Boise, de 3.8% para la roca Berea y de 4.4% para la roca Bandera.

Parece ser que los resultados de Greenwald et al. [1982] son los únicos datos publicados que describen explícitamente el efecto de la temperatura sobre la porosidad de rocas areniscas. Por consiguiente, es importante analizar si estos resultados son correctos considerando el punto de vista de la física del fenómeno de expansión térmica en un medio poroso.

Empleando las Ecs. 3.1.1.a, 3.1.1.b y 3.1.2 del presente trabajo se demuestra fácilmente que en un medio poroso los cambios fraccionales del volumen total, del volumen de poros y del volumen del material sólido están relacionados por la expresión

$$\frac{\Delta V_s}{V_s} = \frac{1}{1 - \phi_0} \left(\frac{\Delta V_B}{V_B} - \phi_0 \frac{\Delta V_P}{V_P} \right) \quad (4.2.1)$$

donde ϕ_0 es la porosidad inicial del medio.

Por otra parte, los resultados experimentales de Greenwald et al. [1982], mostrados en las Figs. 4.2.4 y 4.2.5, indican que los cambios fraccionales del volumen total y del volumen de poros de las rocas Boise, Berea y Bandera correspondientes al incremento de temperatura de 30°C a 170°C tienen aproximadamente los siguientes valores:

Roca	Porosidad Inicial (%)	Cambio Fraccional del Volumen Total (%)	Cambio Fraccional del Volumen de poros (%)
Boise	26.7	0.56	-3.0
Berea	24.3	0.30	-3.7
Bandera	20.0	0.60	-4.0

Substituyendo estos datos experimentales en la Ec. 4.2.1 se obtiene que el cambio fraccional del volumen del material sólido resulta ser 1.86% para la roca Boise, 1.58% para la roca Berea y 1.75% para la roca Bandera. Estos resultados implican que el valor medio del coeficiente volumétrico de expansión térmica del material sólido en el intervalo de 30°C a 170°C es $1.33 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para la roca Boise, $1.13 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para la roca Berea y $1.25 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para la roca Bandera.

Según Somerton [1980], de todos los minerales que comunmente se encuentran en las rocas areniscas el cuarzo es el que exhibe mayor expansión térmica. Por otra parte, de acuerdo a datos reportados por Clark [1966] resulta que el coeficiente volumétrico de expansión térmica del cuarzo en el intervalo de 30°C a 170°C es con mucha aproximación igual a $0.46 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Como puede apreciarse, los valores del coeficiente volumétrico de expansión térmica del material sólido de las rocas Boise, Berea y Bandera que resultan de considerar los datos experimentales de Greenwald et al. [1982] son mucho mayores de lo que cabría esperarse aún en el caso extremo en que las rocas mencionadas estuvieran constituidas únicamente por cuarzo, material que según Somerton [1980] es el que mayor expansión térmica exhibe de entre todos los minerales que comunmente constituyen a las rocas areniscas.

Con base en lo antes expuesto, se infiere que los resultados experimentales acerca de la expansión térmica lineal y de la contracción térmica del volumen de poro presentados por Greenwald et al. [1982] conducen a una incongruencia de tipo físico. A menos que pudiera ofrecerse una explicación satisfactoria al respecto, esta circunstancia impide que se les pueda otorgar confiabilidad a dichos resultados, así como a los datos sobre cambio fraccional de la porosidad con la temperatura que se calcularon a partir de ellos.

El material presentado en esta sección sintetiza lo más relevante de los trabajos que se han publicado reportando investigaciones acerca de la expansión térmica de las rocas areniscas y del efecto de la temperatura sobre la porosidad. La revisión de la literatura indica que en general es muy escasa la información que existe acerca de la expansión térmica de las rocas areniscas. Las investigaciones que se han realizado son muy limitadas en cuanto a extensión y variedad, habiendo muchos aspectos relacionados con la expansión térmica de las rocas cuyo estudio al parecer nunca se ha emprendido. Con objeto de contribuir al mejoramiento de este panorama, como parte del presente trabajo se incluyó la ejecución de un amplio programa experimental para obtener información acerca de diversos aspectos relacionados con la expansión térmica de las rocas areniscas y con el efecto de la temperatura sobre la porosidad. En las secciones 5.2 y 5.3 se describe la extensión de los estudios experimentales realizados al respecto, mientras que la presentación y discusión de los correspondientes resultados se encuentra en las secciones 7.2 y 7.3.

CAPITULO 5

EXTENSION DE LOS ESTUDIOS EXPERIMENTALES

5.1 MEDICIONES DE PERMEABILIDAD

Se efectuaron mediciones de permeabilidad en seis muestras de roca arenisca obtenidas de núcleos de perforación de los pozos M107, M127 y M129 del campo geotérmico Cerro Prieto. El objetivo principal de estas mediciones fue obtener datos y evidencias para investigar el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas en general. En cada muestra se midió la permeabilidad a varios valores de temperatura en el intervalo de 20°C a 280°C. Las mediciones se efectuaron empleando como fluidos de permeabilidad salmuera sintética de composición similar a la del yacimiento y agua destilada. En cuatro de las muestras se midió la permeabilidad empleando únicamente salmuera, en una muestra empleando únicamente agua y en la muestra restante empleando salmuera y agua destilada.

Puesto que el objetivo básico consistió en investigar la influencia de la temperatura sobre la permeabilidad, la mayor parte de las mediciones efectuadas en una muestra dada se realizaron manteniendo constantes la presión de confinamiento y la presión del fluido de permeabilidad, con la temperatura como el parámetro de variación. Sin embargo, con la finalidad de explorar el efecto de la presión, en algunos pocos casos también se midió la permeabilidad a diferentes presiones de confinamiento, manteniendo constante la temperatura. También se investigaron aspectos tales como la reproducibilidad de resultados y la reversibilidad del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad. Con este objeto, algunas de las mediciones se realizaron repetidamente para un mismo conjunto de condiciones experimentales.

En la Tabla 5.1.1 se proporciona detalladamente toda la información concerniente a la extensión con que se realizaron las mediciones de permeabilidad. Se indica el total de mediciones que se efectuaron en cada una de las muestras ensayadas, así como los datos descriptivos de las condiciones experimentales que se aplicaron a la roca en cada una de las mediciones individuales. Las condiciones experimentales de cada medición se describen mediante los valores de la temperatura, de la presión de confinamiento y de la presión media del fluido de poro.

Tabla 5.1.1 Extensión y Condiciones Experimentales de las Mediciones de Permeabilidad.

Espécimen	Fluido de Permeabilidad	Prueba Número	T (°C)	Pc (MPa)	Pp (MPa)
M107-V1	Agua	1	23	10	6.7
Pozo=M107	Salmuera	2	23	10	6.7
Prof=1602.5m	"	3	112	10	6.7
$\phi_o=21.2\%$	"	4	23	10	6.7
	"	5	210	10	6.7
	"	6	255	10	6.7
	"	7	255	22	14.1
	"	8	180	10	6.7
	"	9	24	10	6.7
	Agua	10	24	10	6.7
M107-H2	Salmuera	1	24	10	6.5
Pozo=M107		2	108	10	6.5
Prof=1602.5m		3	205	10	6.5
$\phi_o=20.0\%$		4	280	10	6.5
		5	25	10	6.5
		6	110	10	6.5
M107-V3	Agua	1	25	10	5.6
Pozo=M107		2	25	12	5.6
Prof=1602.5m		3	25	12	5.6
$\phi_o=22.3\%$		4	25	24	5.6
		5	105	12	5.6
		6	206	12	5.6
		7	260	12	5.6
		8	260	24	5.6
		9	25	12	5.6

Pc - Presión de confinamiento.

Pp - Presión del fluido de permeabilidad.

Tabla 5.1.1 (Continuación). Extensión y Condiciones Experimentales de las Mediciones de Permeabilidad.

Espécimen	Fluido de Permeabilidad	Prueba Número	T (°C)	Pc (MPa)	Pp (MPa)
M107-H4	Agua	1	25	12	5.4
Pozo=M107		2	120	12	5.4
Prof=1602.5m		3	200	12	5.4
$\phi_o=21.5\%$		4	265	12	5.4
M107-H4	Salmuera	1	66	10	6.3
Pozo=M107		2	94	10	6.3
Prof=1602.5m		3	130	10	6.3
$\phi_o=21.5\%$		4	186	10	6.3
		5	230	10	6.3
		6	270	10	6.3
		7	66	10	6.3
M127-V2	Salmuera	1	23	10	6.6
Pozo=M127		2	58	10	6.6
Prof=2195.6m		3	87	10	6.6
$\phi_o=19.9\%$		4	128	10	6.6
		5	158	10	6.6
		6	210	10	6.6
		7	270	10	6.6
		8	22	10	6.6
M129-V3	Salmuera	1	22	10	6.4
Pozo=M129		2	74	10	6.4
Prof=1601.5m		3	126	10	6.4
$\phi_o=20.4\%$		4	206	10	6.4
		5	270	10	6.4
		6	250	22	6.4
		7	25	10	6.4
		8	25	22	6.4
		9	25	34	6.4
		10	25	10	6.4

5.2 MEDICIONES DE EXPANSION TERMICA REALIZADAS CON EL OBJETO DE OBTENER DATOS PARA EVALUAR EL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA POROSIDAD

Se efectuó una serie de mediciones de expansión térmica lineal en muestras de rocas areniscas, expresamente con la finalidad de obtener datos experimentales con los cuales poder evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad. Este aspecto de la investigación se originó como parte de los estudios que en el contexto del presente trabajo se realizaron para tratar de determinar el origen y la naturaleza de los mecanismos responsables de la disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura, fenómeno el cual se observó en el transcurso de las mediciones de permeabilidad a alta temperatura que se efectuaron en la primera parte del trabajo experimental. La evaluación del efecto de la temperatura sobre la porosidad a partir de los datos de expansión térmica lineal se llevó a cabo empleando el método desarrollado en la sección 3.5 de este trabajo, el cual se basa en la relación que se demostró existe entre el efecto de la temperatura sobre la porosidad y la expansión térmica de un medio poroso.

Se efectuaron mediciones de expansión térmica lineal en el intervalo de 20°C a 280°C en cuatro muestras de rocas areniscas. Dos de las muestras se extrajeron de núcleos de perforación del campo geotérmico Cerro Prieto; una de un núcleo del pozo M94 y la otra de un núcleo del pozo M149. Las otras dos muestras se extrajeron de bloques comerciales de rocas areniscas típicas; una de un bloque de la roca denominada "Berea" y la otra de un bloque de la roca denominada "Colton".

En cada muestra se midió la expansión térmica lineal total y la expansión térmica lineal de matriz. Las condiciones experimentales que se aplicaron a las muestras de roca se eligieron con base al criterio de obtener los datos de expansión térmica adecuados para evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad para el caso de rocas sometidas a 20.7 MPa de presión de confinamiento y presión de poro nula. Con base en este criterio, las condiciones experimentales específicas para las mediciones en cada una de las muestras se determinaron de acuerdo con los conceptos expuestos en el capítulo 3.

Las mediciones de la expansión térmica total se efectuaron en todos los casos en las muestras de roca provistas de un recubrimiento impermeable y sometidas a una presión de confinamiento de 20.7 MPa y presión de poro nula. Por lo que concierne a las mediciones de expansión térmica de matriz, éstas se efectuaron en las muestras desprovistas de la cubierta impermeable (permitiendo con ello la entrada del fluido de confinamiento a los poros) y sometidas a la presión hidrostática confinante (P_h) dada por (ver Ec. 3.5.6)

$$P_h = \frac{P_c}{1 - \phi_o}$$

donde P_c es el valor de la presión de confinamiento aplicada a la roca durante la medición de expansión térmica total (20.7 MPa en todos los casos) y ϕ_o es la porosidad individual de cada muestra medida a condiciones ambiente.

En la Tabla 5.2.1 se resume la información concerniente a la extensión y condiciones experimentales de las mediciones de expansión térmica lineal que se efectuaron expresamente para obtener datos con los cuales evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad.

5.3 MEDICIONES REALIZADAS CON OBJETO DE INVESTIGAR DIVERSOS ASPECTOS RELACIONADOS CON LA EXPANSION TERMICA DE ROCAS

Empleando como procedimiento básico mediciones de expansión térmica lineal, se efectuaron una serie de estudios experimentales sobre diversos aspectos relacionados con la expansión térmica de rocas areniscas. Los principales aspectos acerca de los cuales se obtuvo información a partir de las investigaciones experimentales realizadas son los siguientes:

- (a) Aspectos asociados con la aplicación repetida de ciclos de temperatura: Reversibilidad y reproducibilidad de la expansión térmica.
- (b) Efecto de la rapidez de variación de la temperatura sobre la expansión térmica.
- (c) Efecto de la presión de confinamiento sobre la expansión térmica.
- (d) Isotropía de la expansión térmica de rocas areniscas.

El trabajo experimental que se efectuó en relación con las investigaciones antes descritas comprendió la ejecución de trece pruebas, las cuales consistieron esencialmente en medir la expansión térmica lineal en muestras de rocas areniscas que se sometieron a ciclos de calentamiento y enfriamiento en el intervalo de 25°C a 280°C. Las mediciones se efectuaron en un total de cinco especímenes de rocas areniscas, tres de ellos obtenidos de núcleos de perforación de pozos del campo geotérmico Cerro Prieto y los otros dos de un bloque comercial de la roca

arenisca típica denominada "Kayenta". Las mediciones realizadas admiten ser clasificadas en tres diferentes tipos de ensayos, según se describen a continuación.

Pruebas Tipo "A"

Se efectuaron para investigar la reversibilidad y la repetibilidad de la expansión térmica total en el caso de rocas sometidas a sucesivos ciclos de calentamiento y enfriamiento. Estas pruebas se llevaron a cabo en muestras de roca sometidas a 8 MPa de presión hidrostática confinante y sin presión de poro. Para impedir la entrada del fluido de confinamiento a los poros, las muestras se recubrieron con pasta de silicones y tubo de teflón. Se aplicaron a las muestras ensayadas dos ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento en el intervalo de 25°C a 280°C. En todo el proceso la temperatura se hizo variar con una rapidez uniforme de 2°C/min. Se tomaron registros simultáneos de la temperatura y de la dilatación longitudinal de la muestra de roca con una frecuencia de una vez por minuto. Se realizó este tipo de prueba en dos muestras de roca arenisca que se extrajeron de un núcleo de perforación del pozo M127 del campo geotérmico Cerro Prieto.

Pruebas Tipo "B"

Estas pruebas se realizaron con objeto de investigar el efecto combinado de la rapidez de calentamiento y del ciclado de temperatura sobre la expansión térmica total de las rocas. Las pruebas se efectuaron en muestras recubiertas, sometidas a 8 MPa de presión hidrostática confinante y sin presión de poro. Cada muestra ensayada se sometió a tres ciclos de calentamiento y enfriamiento en el intervalo de 25°C a 280°C. La temperatura se hizo variar con una rapidez de 1°C/min durante el primer ciclo, 2°C/min durante el segundo ciclo y 3°C/min durante el tercer ciclo. Se tomaron registros simultáneos de la temperatura y de la dilatación longitudinal de la muestra con una frecuencia de una vez por minuto. Se realizó este tipo de prueba en dos muestras de roca arenisca, una de ellas se obtuvo de un núcleo de perforación del pozo M149 del campo Cerro Prieto y la otra se obtuvo de un bloque comercial de la roca arenisca denominada "Kayenta".

Pruebas Tipo "C"

Se planearon para investigar el efecto combinado de la presión de confinamiento y del ciclado de temperatura sobre la expansión térmica de las rocas areniscas. Este tipo de prueba se efectuó en una muestra recubierta, sujeta a presión de confinamiento y sin presión de poro aplicada. La muestra se sometió a tres ciclos de calentamiento y enfriamiento en el intervalo de 25°C a 280°C, con rapidez de variación de la temperatura de 2°C/min en los tres ciclos. La presión de confinamiento aplicada fue de

Tabla 5.2.1 Extensión y Condiciones Experimentales de las Mediciones de Expansión Térmica Efectuadas para Evaluar el Efecto de la Temperatura sobre la Porosidad.

Espécimen	Prueba Número	Condición del Espécimen	Presión de Confinamiento (MPa)	Presión de Poros (MPa)	Rapidez de Calentamiento (°C/min)
M94-1 $\phi_o = 19.8\%$	1	Recubierto	20.7	0	2
	2	No Recubierto	25.8	25.8	2
M149-1 $\phi_o = 15.0\%$	1	Recubierto	20.7	0	2
	2	No Recubierto	24.4	24.4	2
Colton 1 $\phi_o = 10.9\%$	1	Recubierto	20.7	0	2
	2	No Recubierto	23.2	23.2	2
Berea - 1 $\phi_o = 18.5\%$	1	Recubierto	20.7	0	2
	2	No Recubierto	25.4	25.4	2

3 MPa durante el primer ciclo, de 17.2 MPa durante el segundo ciclo y de 34.4 MPa durante el tercer ciclo. La dilatación longitudinal y la temperatura de la muestra se registraron con una frecuencia de una vez por minuto. La muestra en la que se realizó esta prueba se obtuvo de un bloque comercial de roca arenisca "Kayenta".

En la Tabla 5.3.1 se resume toda la información relevante acerca de la extensión y de las condiciones experimentales de las mediciones de expansión térmica lineal antes descritas.

Tabla 5.3.1. Extensión y Condiciones Experimentales de las Mediciones Realizadas con Objeto de Investigar Diversos Aspectos Relacionados con la Expansión Térmica de Rocas Areniscas.

Prueba Num.	Tipo de Prueba	Muestra Num.	Presión de Confinamiento (MPa)	Historia de Temperatura (°C)	\dot{T} (°C/min)
1	A	M127-A	8	25-280-25	2
2	A	M127-A	8	25-280-25	2
3	A	M127-HA	8	25-280-25	2
4	A	M127-HA	8	25-280-25	2
5	B	M149-A	8	25-280-25	1
6	B	M149-A	8	25-280-25	2
7	B	M149-A	8	25-280-25	3
8	B	KAYENTA-1	8	25-280-25	1
9	B	KAYENTA-1	8	25-280-25	2
10	B	KAYENTA-1	8	25-280-25	3
11	C	KAYENTA-2	3	25-280-25	2
12	C	KAYENTA-2	17.2	25-280-25	2
13	C	KAYENTA-2	34.4	25-280-25	2

\dot{T} es la rapidez de variación de la temperatura.

CAPITULO 6

EQUIPO Y TECNICAS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presenta la descripción básica del equipo y de las técnicas experimentales que se emplearon para efectuar las mediciones de permeabilidad y de expansión térmica. El equipo experimental que se utilizó es en conjunto un sistema sumamente sofisticado, por lo que el presentar una descripción muy detallada del mismo está fuera del contexto de este trabajo de tesis. Se adopta por tanto el criterio de profundizar en la descripción solamente hasta el nivel de detalle requerido para poder exponer con claridad los principales aspectos de las técnicas experimentales empleadas.

6.1 CARACTERISTICAS GENERALES DEL EQUIPO

Todas las mediciones experimentales reportadas en este trabajo se efectuaron en el Laboratorio de Petrofísica del Departamento de Geotermia del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Se empleó un equipo con características tecnológicas muy avanzadas, el cual fue específicamente diseñado para efectuar investigaciones acerca de las propiedades mecánicas, térmicas y de transporte de rocas sometidas a condiciones de alta presión y alta temperatura. Al equipo se le conoce convencionalmente como "simulador geotérmico" y fue construido especialmente para el IIE por la compañía Terra Tek, localizada en Salt Lake City, E.U.A.

El simulador geotérmico tiene la capacidad para reproducir físicamente en especímenes de roca las condiciones de esfuerzo, presión y temperatura a que están sometidas las formaciones del subsuelo a profundidades de hasta aproximadamente diez kilómetros, incluyendo las condiciones correspondientes a zonas en donde existen yacimientos geotérmicos y petroleros. Además de simular físicamente las condiciones del subsuelo, el equipo cuenta con la capacidad para producir en los especímenes de roca diferentes tipos de eventos y perturbaciones tales como presurización hidrostática, aplicación de carga mecánica, establecimiento del flujo de un fluido, aplicación de diferencias de potencial térmico o eléctrico, etc. Por otra parte, el equipo cuenta con una amplia capacidad para monitorear, medir y registrar el desarrollo de estos eventos, incluyendo la correspondiente respuesta del espécimen en ensayo, con lo cual se obtiene la información necesaria para cuantificar las propiedades y el comportamiento de las rocas.

En la Tabla 6.1.1 se describe la capacidad experimental básica del simulador geotérmico y se indican los intervalos de presión y temperatura dentro de los cuales pueden efectuarse los diferentes tipos de mediciones. En la Fig. 6.1.1 se presenta el diagrama simplificado del equipo mostrando sus principales componentes, los cuales son: la estructura de carga, la fuente de potencia hidráulica, el actuador hidráulico de carga, el vaso de presión, intensificadores de presión para el fluido de confinamiento y el fluido de poro, el módulo de permeabilidad, el sistema de calentamiento de los fluidos de confinamiento y de poro, los sistemas de control y el sistema de adquisición de datos.

La estructura de carga y el actuador hidráulico son los elementos que se emplean para generar y regular la fuerza axial compresiva que se aplica a las rocas durante la ejecución de pruebas de comportamiento mecánico. La estructura de carga está constituida esencialmente por dos planchas de acero de 1.25 m de lado por 0.25 m de espesor y cuatro columnas de 0.20 m de diámetro; la distancia vertical entre las planchas es de 1.70 m. El actuador hidráulico de carga está instalado directamente encima de la plancha superior, mientras que el vaso de presión está sujeto mediante tornillos a la cara inferior de esta misma plancha. El actuador de carga consiste esencialmente de un sistema cilindro-pistón operado hidráulicamente. El funcionamiento del actuador de carga se gobierna mediante un servosistema electrohidráulico el cual puede operar con retroalimentación de esfuerzo o con retroalimentación de desplazamiento. Esta característica permite seleccionar ya sea la rapidez de deformación o la rapidez de aplicación de esfuerzo como la variable independiente en las pruebas de comportamiento mecánico. La carga compresiva máxima que puede aplicarse con el actuador hidráulico sobre una muestra de roca es de aproximadamente 430 toneladas.

La fuente de potencia hidráulica es el dispositivo que proporciona la potencia para accionar al actuador de carga, a los dos intensificadores de presión y a un actuador hidráulico de control manual que se emplea para mover el cierre del vaso de presión. La fuente de potencia consiste de una bomba de desplazamiento positivo de gasto variable, equipada con un compensador para proporcionar presión de descarga constante independientemente del gasto. La bomba es impulsada por un motor eléctrico de 40 H P y puede proporcionar una presión máxima de descarga de 210 bar con un gasto de 75 litros por minuto.

Los intensificadores de presión se emplean para generar y regular la presión de los fluidos de confinamiento y de poro. Estos dispositivos multiplican por un factor de diez la presión que se les suministra por medio de la fuente de potencia hidráulica. Su funcionamiento se gobierna mediante servosistemas electrohidráulicos que pueden operarse con retroalimentación de

TABLA 6.1 CAPACIDAD EXPERIMENTAL BASICA DEL SIMULADOR GEOTERMICO.

		RANGOS DE OPERACION		
	TIPO DE PRUEBA	TEMPERATURA °C	PRESION DE CONFINAMIENTO MPa	PRESION DE PORO MPa
COMPORTAMIENTO MECANICO	TRIAxIAL	20 - 380	0 - 104	0 - 104
	COMPRESION SIMPLE	20 - 380	0 - 104	0 - 104
	COMPRESION HIDROSTATICA	20 - 380	0 - 104	0 - 104
PROPIEDADES TERMICAS	EXPANSION TERMICA	20 - 380	0 - 104	0 - 104
	CONDUCTIVIDAD TERMICA	20 - 380	0 - 104	0 - 104
	DIFUSIVIDAD TERMICA	20 - 380	0 - 104	0 - 104
PERMEABILIDAD	METODO DE REGIMEN PERMANENTE BOMBA DE DESPLAZAMIENTO CONSTANTE Y MEDIDOR DE FLUJO. (1mD - 1D)	20 - 300	0 - 104	0 - 104
	METODO DE REGIMEN PERMANENTE PRESURIZACION CON ACUMULADORES HIDRAULICOS. (104D - 10mD)	20 - 300	0 - 104	0 - 41
	METODO DE REGIMEN TRANSITORIO (.14D - 2004D)	20	0 - 104	0 - 104
	CONDUCTIVIDAD DE FRACTURAS { HASTA 10D HASTA 500D	20 - 300	0 - 104	0 - 104 0 - 41

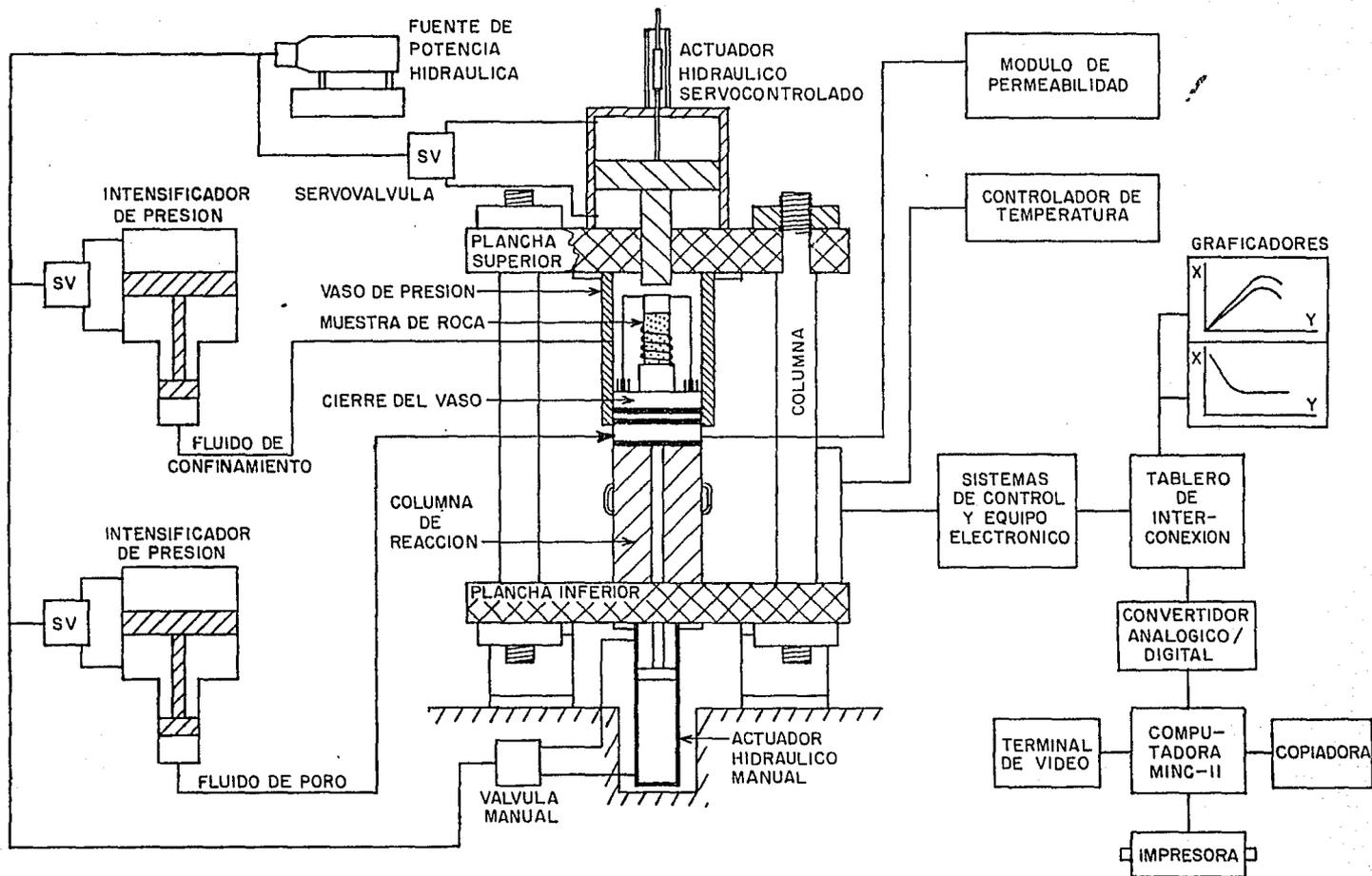


Fig. 6.1.1. Diagrama de conjunto del sistema experimental que se empleó para efectuar las mediciones de permeabilidad y de expansión térmica.

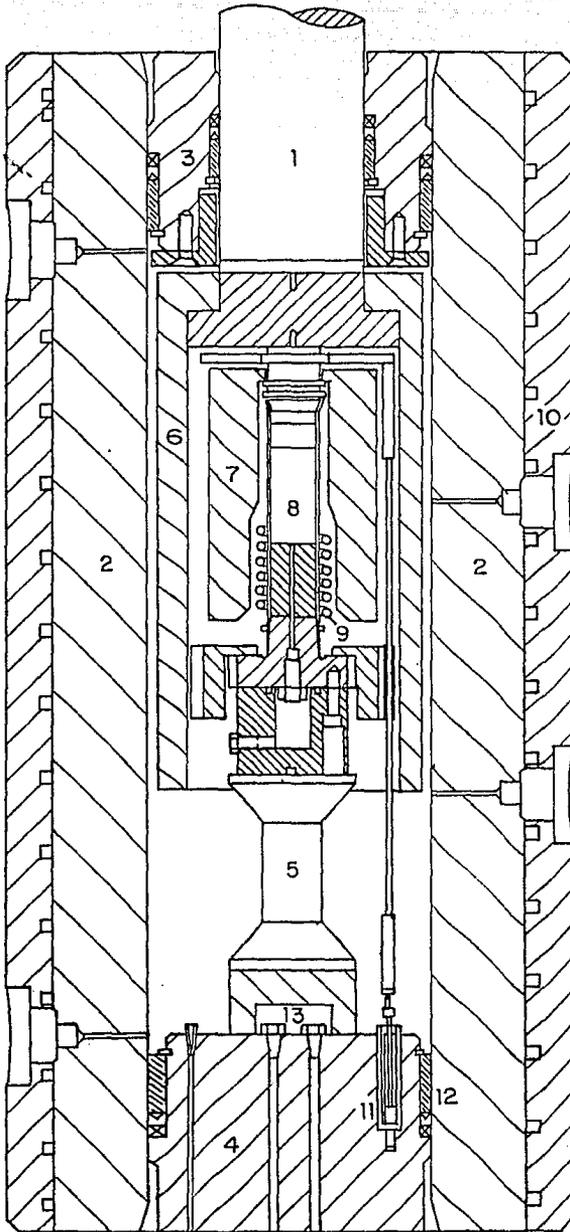
desplazamiento o con retroalimentación de presión.

El vaso de presión es el recipiente en el cual se conducen los ensayos de los especímenes. Dentro de este dispositivo se generan las condiciones de esfuerzo, presión y temperatura que simulan a aquellas existentes en el subsuelo. También dentro del vaso se desarrollan los principales eventos que conducen a determinar las propiedades y el comportamiento de las rocas. Es un cilindro de acero de 70 cm de longitud, 15 cm de diámetro interior y con paredes de 7 cm de espesor, capaz de soportar presiones de hasta 2000 bar. Dentro del vaso se aloja a los especímenes de roca adecuadamente instrumentados para monitorear, medir y registrar su comportamiento. El tipo de instrumentación y los componentes del arreglo experimental que quedan alojados dentro del vaso varían dependiendo del tipo de medición a realizarse. Como ejemplo ilustrativo, en la Fig. 6.1.2 se muestra el esquema detallado del vaso de presión con la configuración experimental y la instrumentación correspondiente a las pruebas de comportamiento mecánico. Las dimensiones del vaso permiten efectuar ensayos en especímenes de roca de hasta 10 cm de diámetro y 15 cm de longitud.

El esfuerzo litostático se simula aplicando al espécimen de roca carga axial compresiva mediante el pistón del actuador de carga. Los esfuerzos tectónicos horizontales, o bien una condición de esfuerzo hidrostático, se logran mediante la presurización del fluido de confinamiento con que se llena el vaso. La condición de presión de poro que se presenta en las rocas de formaciones que contienen fluidos se logra saturando el espécimen y presurizando el fluido contenido en sus poros.

La condición de alta temperatura se logra calentando la muestra de roca por medio de la energía calorífica que se genera con un calentador eléctrico, el cual se monta dentro del vaso, arrollado en espiral alrededor de la muestra. La energía se transmite del calentador al espécimen a través del fluido de confinamiento en que queda inmerso el arreglo experimental. El montaje interno del calentador evita los largos períodos de calentamiento y enfriamiento que son comunes cuando se emplean vasos calentados externamente. Además, se emplean cubiertas de material cerámico para restringir las corrientes convectivas y limitar la zona de alta temperatura al entorno alrededor de la muestra. Lo anterior hace posible que se alcancen temperaturas de hasta 400°C en el espécimen, a la vez que se mantiene el fluido de confinamiento a temperaturas inferiores a 100°C en las zonas en donde están ubicados los transductores y los sellos de presión.

El cierre del vaso de presión es la base de montaje sobre la cual se ensambla el arreglo experimental que queda alojado dentro del vaso. El cierre se coloca sobre la plancha inferior cuando se realizan las labores de ensamble e instrumentación del



- 1- PISTON DE CARGA
- 2- VASO DE PRESION
- 3- CIERRE SUPERIOR
- 4- CIERRE INFERIOR
- 5- CELDA DE CARGA
- 6- CUBIERTA EXTERIOR
- 7- CUBIERTA INTERIOR
- 8- MUESTRA DE ROCA
- 9- CALENTADOR
- 10- CAMISA DE ENFRIAMIENTO
- 11- MEDIDOR DE DEFORMACION AXIAL
- 12- SELLOS DE PRESION
- 13- PASAJES SELLADOS

Fig. 6.1.2 Esquema detallado del vaso de presión mostrando la configuración experimental y la instrumentación en pleadas en las determinaciones de comportamiento mecánico.

espécimen y se sitúa en la posición de prueba dentro del vaso por medio de un actuador hidráulico que se opera manualmente. A través del cierre del vaso se tienen 6 pasajes para conducción de fluidos y 18 pasajes para conducción de señales y energía eléctrica. Para soportar el cierre del vaso y transmitir las cargas mecánicas a los miembros estructurales se emplea una columna de reacción.

El módulo de permeabilidad consiste de un conjunto de dispositivos cuya función es hacer circular el fluido de trabajo a través del espécimen de roca cuando se efectúan mediciones de permeabilidad. Los componentes del módulo de permeabilidad son principalmente bombas, acumuladores hidroneumáticos, tanques de gas a presión, reguladores, manómetros, válvulas, etc.

Otra característica distintiva importante del simulador geotérmico consiste en que el proceso de adquisición de datos se lleva a cabo en forma totalmente automatizada bajo el control de un sistema computarizado. El sistema automático de captura de datos puede muestrear hasta 28 canales de información con una frecuencia de hasta 180 veces por minuto.

En las siguientes secciones de este capítulo se presentan descripciones detalladas de los componentes del simulador geotérmico que en particular se emplearon para efectuar las mediciones de permeabilidad y de expansión térmica que se reportan en este trabajo.

6.2 EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS QUE SE EMPLEARON PARA EFECTUAR LAS MEDICIONES DE PERMEABILIDAD

En la Fig. 6.2.1 se muestra el esquema simplificado del equipo que se empleó para efectuar las mediciones de permeabilidad. Los componentes básicos que conforman el equipo son: el vaso de presión conteniendo en su interior a la muestra de roca junto con la instrumentación correspondiente al caso, la fuente de potencia hidráulica y el intensificador de la presión del fluido de confinamiento, un sistema de flujo a base de acumuladores hidroneumáticos para hacer circular el fluido de permeabilidad a través del espécimen, dispositivos para calentar la muestra de roca y el fluido de permeabilidad, varios sistemas de medición integrados por transductores de diversos tipos junto con sus correspondientes acondicionadores y amplificadores electrónicos, graficadores para monitorear el desarrollo de las pruebas y un sistema computarizado de adquisición de datos. La descripción detallada de los componentes antes mencionados se presenta en las siguientes subsecciones.

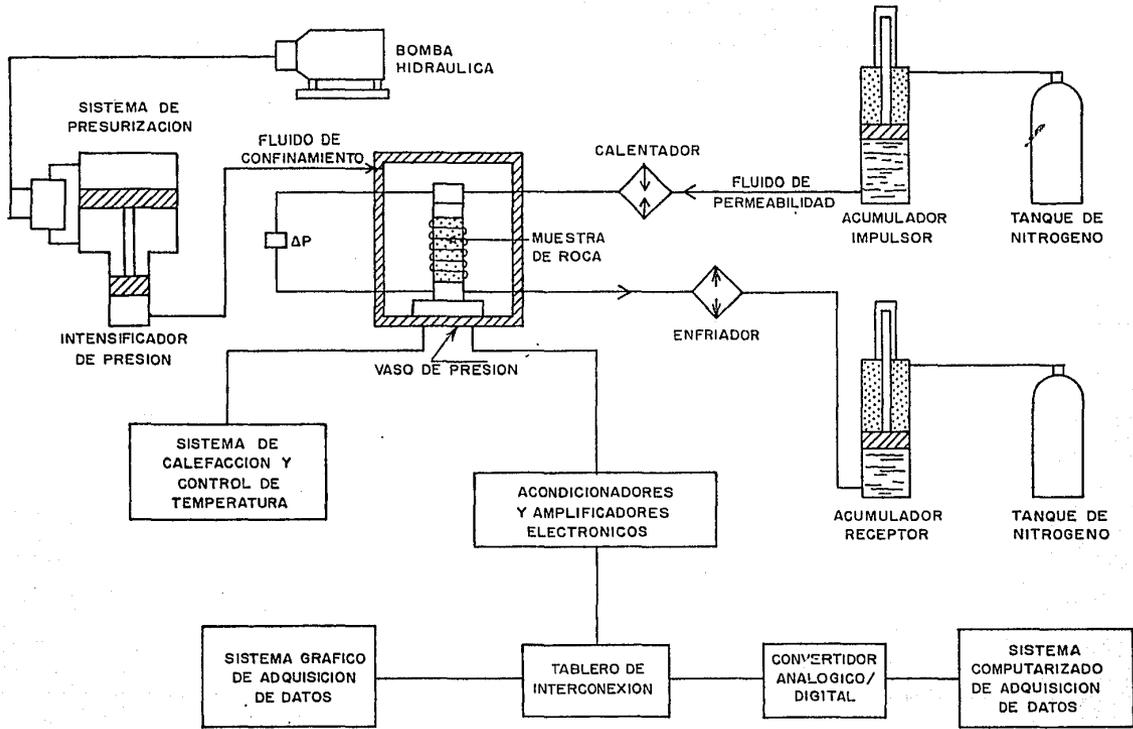


Fig. 6.2.1 Diagrama simplificado del sistema experimental empleado para efectuar las mediciones de permeabilidad.

6.2.1 Sistema de Flujo

En la Fig. 6.2.2 se muestra el diagrama del sistema de flujo que se empleó para hacer circular el fluido de trabajo a través de las muestras de roca durante la ejecución de las mediciones de permeabilidad. Este sistema es especialmente adecuado para aplicar la técnica de estado estable con diferencia de presión constante a través del espécimen. Su capacidad permite efectuar mediciones de permeabilidad en el rango de 10 microdarcys a 10 milidarcys, a presiones de poro de hasta 420 bar y temperaturas de hasta 300 °C. Se trata en esencia de un sistema de flujo lineal del tipo que se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.5.1. Los principios fundamentales de la técnica experimental que se emplea para efectuar mediciones de permeabilidad con este sistema de flujo están descritos en la sección 2.5.

Se emplean acumuladores de separación presurizados con nitrógeno para presurizar el fluido de permeabilidad a ambos lados de la muestra de roca. La presión del fluido y la diferencia de presión a través de la muestra se establecen mediante reguladores de precisión con los cuales se fija la presión del nitrógeno en cada uno de los acumuladores de separación. Generalmente la diferencia de presiones se establece de manera que el flujo se desarrolle en el sentido indicado en la Fig. 6.2.2, aunque también es factible inducir el flujo en el sentido opuesto si se invierte la diferencia de presión. Esta característica del sistema de flujo es importante para estudiar aspectos relacionados con el bloqueo de los conductos de la roca cuando ocurre migración y depositación de partículas finas dentro de la estructura porosa. La diferencia de presión que se aplica a través de la muestra de roca se mide con un transductor diferencial de presión de tipo diafragma, cuyas ramas se conectan a la línea de conducción del fluido en secciones inmediatamente antes e inmediatamente después del espécimen.

La capacidad de cada acumulador es de 527 cm³, su sección transversal es de 5.08 cm y la longitud de la carrera del pistón de separación es de 25.4 cm. Ambos acumuladores están provistos con transductores de desplazamiento lineal tipo LVDT (linearly variable differential transformer) para indicar la posición de sus respectivos pistones de separación. El registro de la posición del pistón de separación de cada acumulador como función del tiempo transcurrido desde el inicio del flujo provee la información suficiente para calcular el gasto de fluido que circula a través de la roca. La comparación del gasto medido con cada acumulador proporciona información útil para verificar las condiciones del flujo e incluso para detectar fugas en el sistema.

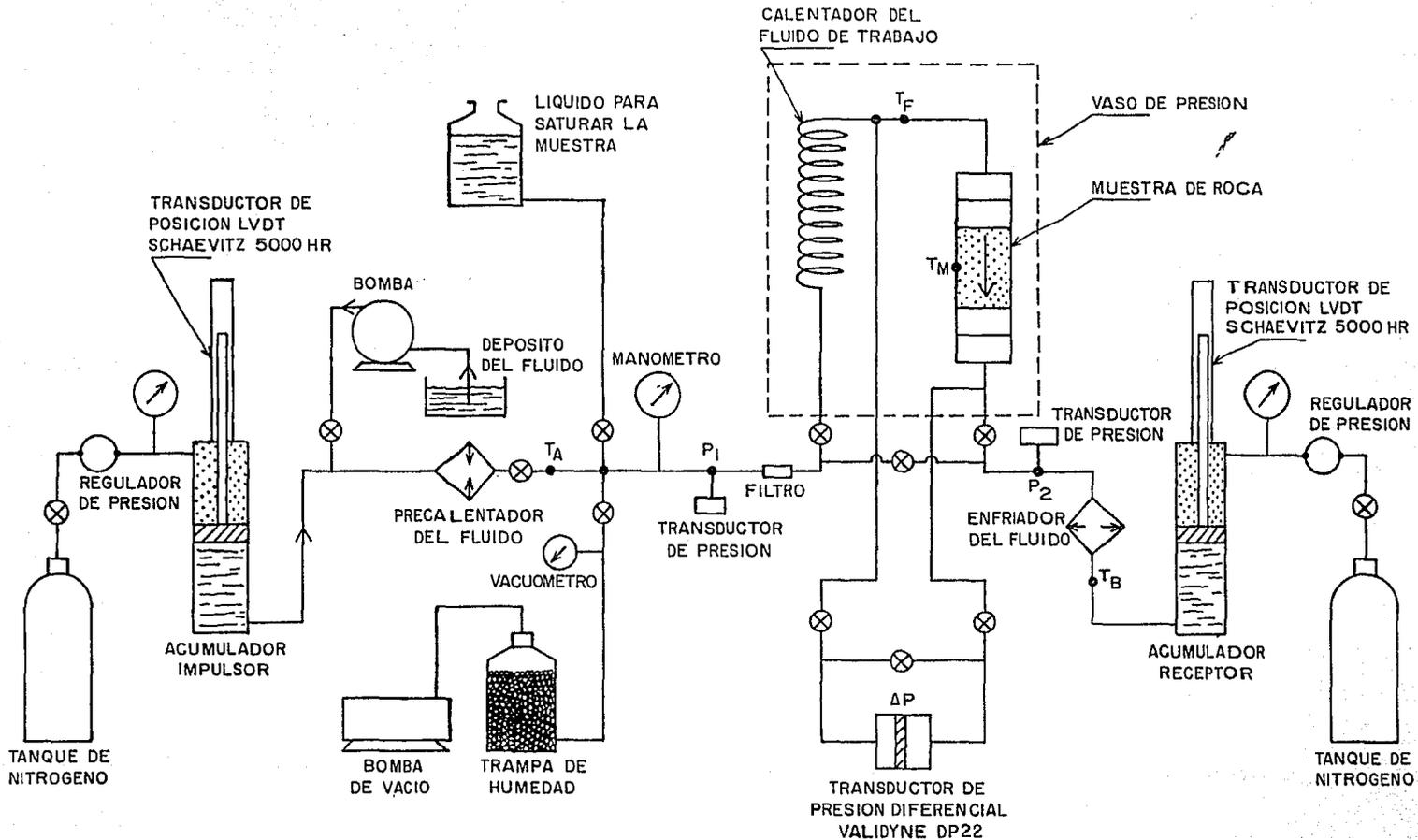


Fig. 6.2.2 Diagrama del sistema de flujo que se empleó para hacer circular el fluido de trabajo a través de las muestras de roca durante la ejecución de las mediciones de permeabilidad.

En su trayecto desde el acumulador impulsor hasta el acumulador receptor, el fluido de permeabilidad circula a través de varios dispositivos periféricos en la forma en que se describe a continuación. Al salir del acumulador impulsor el fluido se hace pasar por un calentador eléctrico, identificado como precalentador del fluido en la Fig. 6.2.2. El precalentador se opera con un sistema de control automático, el cual se programa para incrementar la temperatura del fluido hasta un valor igual o ligeramente mayor que la temperatura a la cual se haya elegido efectuar la medición de permeabilidad, y que debe corresponder a la temperatura de la muestra de roca dentro del vaso de presión. Al salir del precalentador el fluido se conduce hasta el vaso de presión por medio de tuberías recubiertas con aislante térmico para minimizar las pérdidas de calor. A continuación, ya dentro del vaso, el fluido se hace pasar a través de un serpentín consistente en 20 espiras de aproximadamente 7 cm de diámetro de tubo de acero de 1/8" de diámetro interno. El serpentín está arrollado alrededor de la muestra, inmerso en el fluido de confinamiento cuya temperatura en dicha zona alcanza valores muy semejantes a la temperatura de la muestra. El objetivo de hacer pasar el fluido a través del serpentín es compensar la disminución de temperatura que pudiera ocurrir en el trayecto desde el precalentador. Cualquier diferencia significativa entre la temperatura de la muestra y la temperatura del fluido al salir del serpentín puede reducirse a límites aceptables variando el comando del precalentador eléctrico para aumentar o disminuir la temperatura del fluido a la salida de este dispositivo. A continuación el fluido pasa a través de la roca y al salir del vaso de presión se hace pasar a través de un enfriador, en donde se le reduce la temperatura hasta un valor prácticamente igual a la temperatura del fluido en el acumulador impulsor. Después de la etapa de enfriamiento el fluido se recoge en el acumulador receptor, con lo cual finaliza su trayecto a través del sistema de flujo.

Otros componentes directamente relacionados con el sistema de flujo y que se muestran en la Fig. 6.2.2 son la bomba para cargar el acumulador impulsor, el sistema de vacío para evacuar las líneas de conducción del fluido y la muestra de roca, y un recipiente conteniendo el fluido para saturar el sistema de flujo y el espécimen una vez que han sido evacuados.

En la Fig. 6.2.2 se indican con literales las variables que se miden con objeto de monitorear el desarrollo de los experimentos y cuantificar la permeabilidad de los especímenes ensayados. También en la Fig. 6.2.2 se muestra la ubicación de los transductores y dispositivos de medición instalados en el circuito del sistema de flujo. La nomenclatura correspondiente a las literales empleadas es como sigue:

- T_A - Temperatura del fluido a la salida del precalentador.
- T_F - Temperatura del fluido antes de entrar a la muestra.
- T_B - Temperatura del fluido a la salida del enfriador.
- T_M - Temperatura de la muestra de roca.
- P_1 - Presión del fluido antes de entrar al vaso de presión.
- P_2 - Presión del fluido a la salida del vaso de presión.
- ΔP - Diferencia de presión del fluido a través de la muestra.
- L_1 - Posición del émbolo de separación del acumulador impulsor.
- L_2 - Posición del émbolo de separación del acumulador receptor.

6.2.2 Configuración de los Componentes Dentro del Vaso de Presión

En la Fig. 6.2.3 se muestra el esquema del arreglo de los componentes del sistema experimental para medir permeabilidad que quedan alojados dentro del vaso de presión. En la parte central del arreglo está ubicada la muestra de roca, cuyas dimensiones estandar son 5 cm de diámetro por 5 cm de longitud. La muestra está montada entre dos bases de forma cilíndrica, cada una integrada por un cabezal de acero inoxidable, un espaciador de material cerámico y un disco de difusión, los cuales están unidos entre sí con un adhesivo capaz de resistir temperaturas de hasta 350 °C. La muestra de roca y sus dos bases de montaje conforman una pieza cilíndrica de aproximadamente 30 cm de longitud por 5 cm de diámetro, alrededor de la cual se instalan los demás elementos del arreglo

Ambos cabezales tienen dos orificios roscados interconectados. Un orificio de cada cabezal se emplea para efectuar la conexión del ensamble de la muestra con las tuberías del sistema de flujo. Los otros dos orificios se emplean para conectar las tuberías que transmiten al transductor diferencial de presión los valores de la presión del fluido de permeabilidad corriente arriba y corriente abajo del espécimen de roca. Los espaciadores de las bases de montaje son piezas cilíndricas de material cerámico de muy bajo coeficiente de conductividad térmica, los cuales se instalan entre la muestra de roca y los cabezales de acero para minimizar los gradientes de temperatura longitudinales en la propia muestra. Los discos de difusión son dispositivos cuya finalidad es distribuir uniformemente el flujo

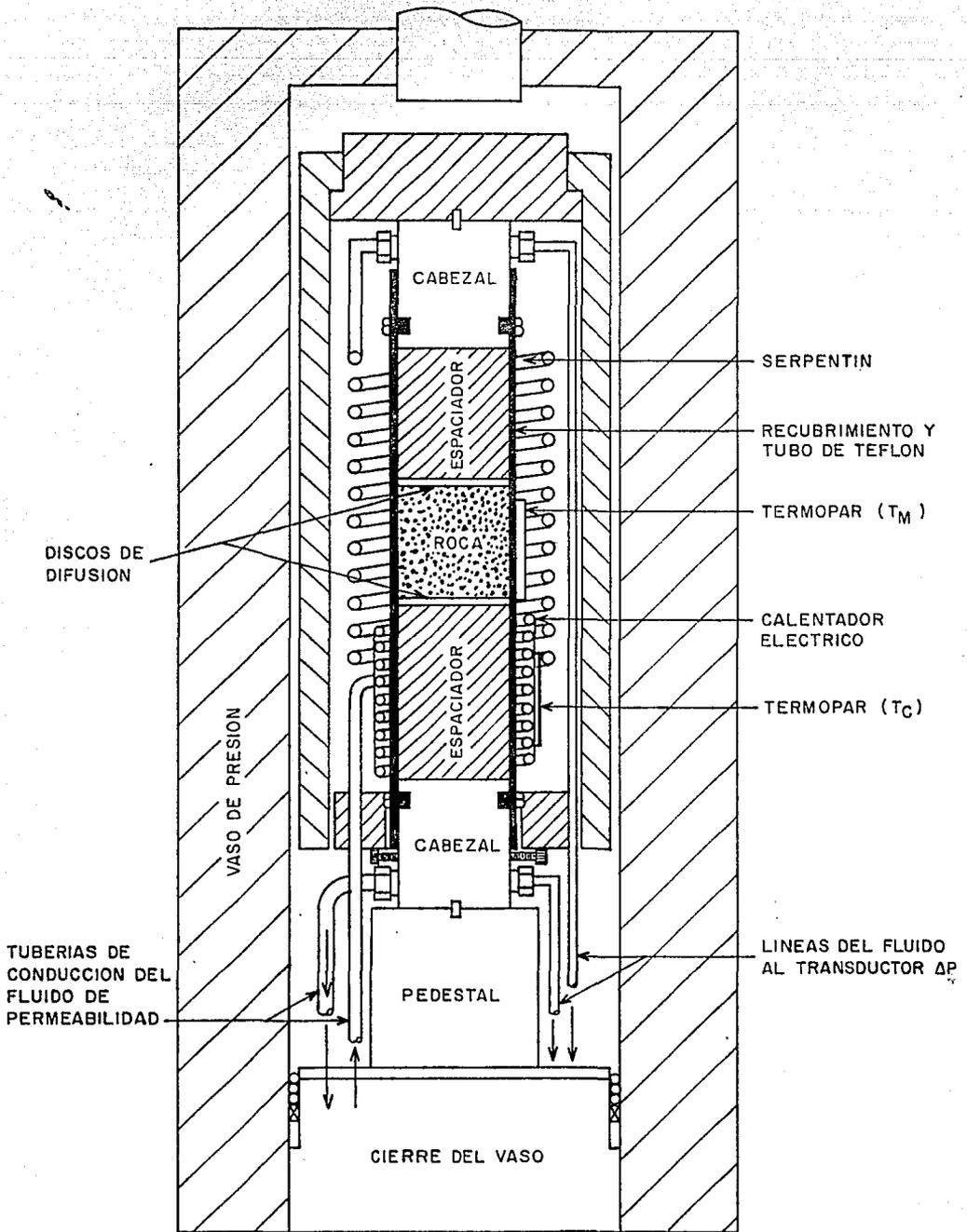


Fig. 6.2.3 Esquema detallado del vaso de presión mostrando la disposición de los componentes del arreglo experimental que se empleó para efectuar las mediciones de permeabilidad.

en toda la sección transversal de la muestra de roca.

La superficie externa del conjunto conformado por la muestra de roca y sus dos bases de montaje está recubierta con un compuesto ahulado y tubo de teflón. El objetivo del recubrimiento es aislar el fluido de permeabilidad del fluido de confinamiento y evitar que ocurra flujo del fluido de permeabilidad a lo largo de la superficie externa de la muestra. Este tipo de recubrimiento puede soportar temperaturas de hasta 300 °C.

Alrededor del espaciador inferior y arrollado sobre un tubo de cobre se tiene un calentador eléctrico de 3 Kw de capacidad. Este dispositivo proporciona la energía calorífica necesaria para calentar el fluido de confinamiento y la muestra de roca. Soldado al tubo de cobre se tiene un termopar mediante el cual se monitorea la temperatura del calentador y se genera la señal de retroalimentación para un dispositivo de control que gobierna el funcionamiento del sistema de calefacción. Para medir la temperatura de la muestra de roca se tiene otro termopar situado a la altura de la parte media de la muestra y directamente en contacto con el recubrimiento de teflón.

El fluido de permeabilidad entra al ensamble de la muestra por el cabezal superior y sale por el cabezal inferior. La línea que conduce al fluido de permeabilidad al cabezal superior incluye una sección en forma de serpentín, la cual está planeada para igualar las temperaturas del fluido de permeabilidad y de la muestra de roca. El serpentín consiste de aproximadamente 20 espiras de tubería de 1/8" de diámetro interno, arrolladas alrededor del conjunto formado por el calentador y el ensamble de la muestra. A la salida del serpentín se tiene un termopar para medir la temperatura del fluido de permeabilidad justo antes de que empiece a circular a través del espécimen.

El ensamble de la muestra, el calentador eléctrico y el serpentín están rodeados por cubiertas de material cerámico cuya finalidad es restringir las corrientes de convección del fluido y limitar la zona de alta temperatura a la vecindad alrededor de la muestra. De esta manera el calentamiento puede efectuarse en forma mas rápida y eficiente, a la vez que se logra mantener por debajo de 100 °C la temperatura del fluido de confinamiento en la porción inferior donde se localizan los sellos del vaso de presión.

6.2.3 Sistema de Presurización

La función del sistema de presurización consiste en llenar el vaso de presión con fluido de confinamiento, presurizarlo y proporcionar control preciso de la presión. En la Fig. 6.2.4 se muestra el diagrama de este sistema, cuyos principales

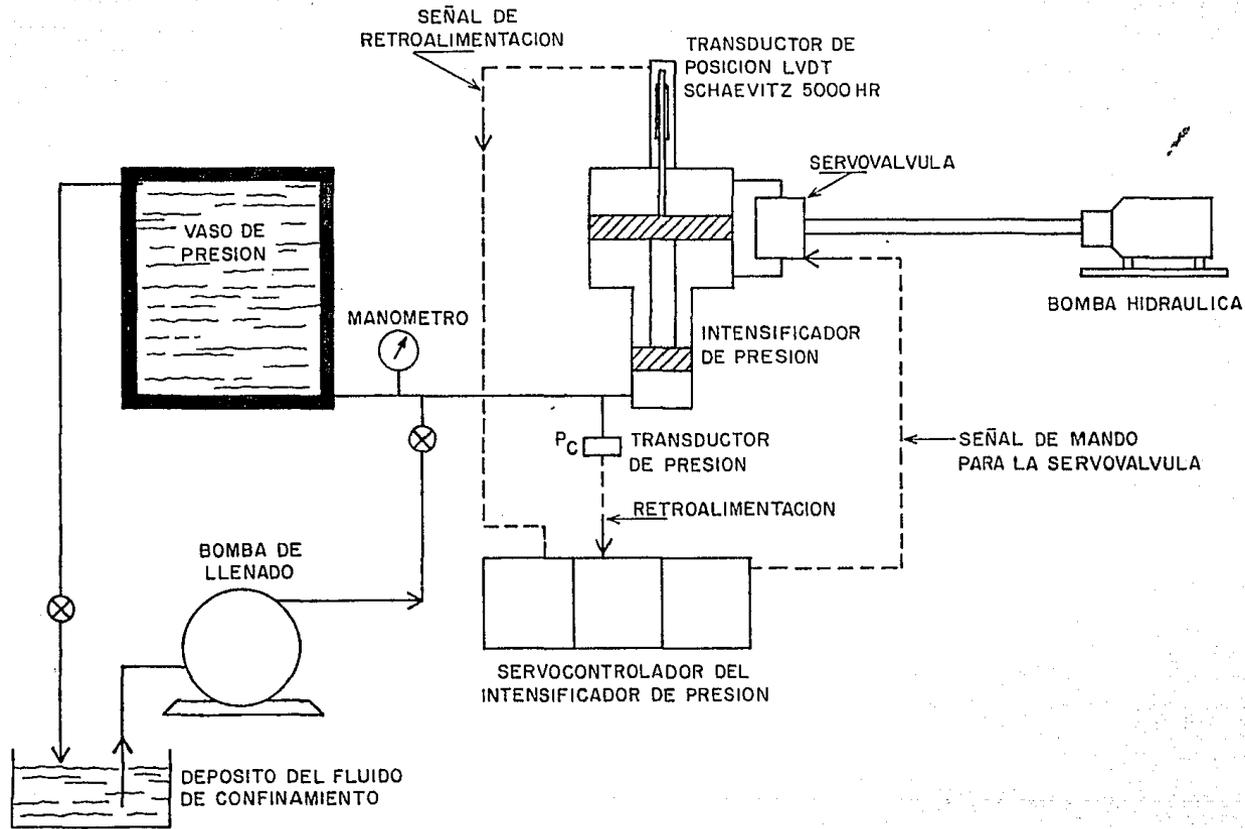


Fig. 6.2.4 Diagrama del sistema de presurización.

componentes son el vaso de presión, la fuente de potencia hidráulica, un intensificador de presión, una servoválvula y un servocontrolador electrónico. El intensificador es accionado por el fluido hidráulico que recibe de la fuente de potencia a presiones de hasta 100 bar. Por la relación de diámetros de sus cilindros, el intensificador tiene la capacidad de presurizar el fluido de confinamiento a presiones de hasta 1000 bar. La operación del intensificador se regula por medio de un sistema automático de control conformado por la servoválvula, por el controlador electrónico y por transductores que retroalimentan al sistema de control la posición de los émbolos del intensificador y la magnitud de la presión de confinamiento. La servoválvula gobierna la dirección, el caudal y la presión del flujo que actúa sobre ambos lados del émbolo de la sección de baja presión del intensificador. La operación de la servoválvula responde a la intensidad y a la polaridad de una señal de corriente directa que le es enviada por el servocontrolador. El servocontrolador compara continuamente la señal de mando con la señal de retroalimentación procedente del transductor de presión o del transductor de desplazamiento, según el modo de operación que se haya elegido, y dependiendo de la diferencia entre ambas genera la señal correctora que actúa sobre la servoválvula para tratar de anular la diferencia entre el valor deseado y el valor obtenido de la variable controlada.

Durante la ejecución de mediciones de permeabilidad y de expansión térmica es necesario mantener constante la presión de confinamiento aplicada a la roca. Esta condición se logra eligiendo la retroalimentación de presión para el sistema de control y ajustando manualmente el comando del servocontrolador hasta obtener la presión elegida para la prueba. Una vez fijado el punto de comando el sistema de control se encarga de mantener constante la presión de confinamiento, compensando automáticamente los efectos de perturbaciones tales como el calentamiento del fluido dentro del vaso de presión y pequeñas fugas en el sistema de presurización. El sistema de control es capaz de mantener constante la presión de confinamiento alrededor de un valor dado con una exactitud de ± 0.1 bar.

6.2.4 Sistema de Calentamiento y Control de Temperatura

En la Fig. 6.2.5 se muestra el diagrama del sistema de calentamiento y control de temperatura, cuya función consiste en calentar bajo condiciones controladas la muestra de roca y el fluido de permeabilidad y mantener constante sus temperaturas una vez que se hayan alcanzado los valores establecidos para las mediciones. El sistema de calentamiento consiste de dos secciones independientes, una se emplea para controlar la temperatura de la muestra de roca y la otra para regular la temperatura del fluido de permeabilidad. Los componentes básicos del sistema son un controlador programable Honeywell DCP-7700 de

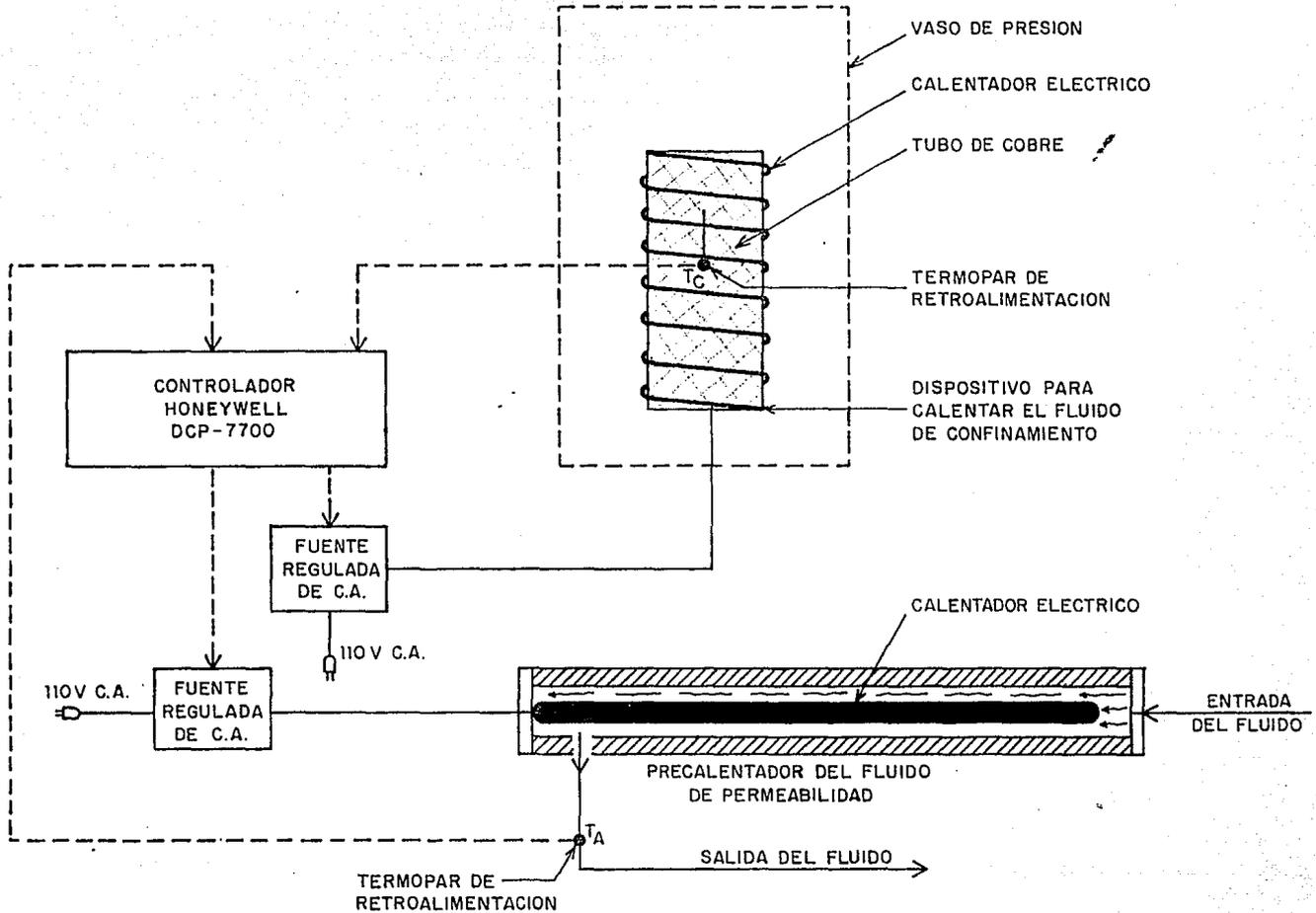


Fig. 6.2.5 Diagrama del sistema de calentamiento y control de la temperatura.

dos canales, dos fuentes de potencia eléctrica de control proporcional, calentadores eléctricos y termopares como dispositivos de retroalimentación para el controlador.

Los calentadores eléctricos se hacen funcionar mediante pulsos de corriente alterna que se les suministran por medio de las fuentes de potencia de control proporcional. La frecuencia de los pulsos de corriente alterna depende de la señal de mando que el controlador envía a cada una de las fuentes de potencia. El controlador Honeywell sensa continuamente la diferencia entre la temperatura de comando de cada canal y la temperatura detectada por el correspondiente termopar de retroalimentación. Dependiendo de la diferencia entre ambas temperaturas, el controlador transmite una señal de mando a la respectiva fuente de potencia para que se modifique la frecuencia de los pulsos de corriente alterna en la forma conveniente para tratar de anular la diferencia entre la temperatura de comando y la temperatura de proceso. Con el sistema de control antes descrito, la temperatura del espécimen de roca y la temperatura del fluido de permeabilidad pueden controlarse alrededor de un valor predeterminado con una exactitud dentro de ± 1 °C. Ambos canales del controlador pueden programarse independientemente para que la temperatura de comando varíe automáticamente con el tiempo conforme a alguna función preestablecida. Esta característica permite controlar en forma muy precisa el proceso de calentamiento de los especímenes de roca y del fluido de permeabilidad, y proporciona en general una gran flexibilidad en el diseño de pruebas a temperaturas elevadas.

6.2.5 Sistemas de Medición

En la Fig. 6.2.6 se muestra en forma simplificada el diagrama de conjunto de los sistemas de medición que se emplearon para medir las variables físicas necesarias para monitorear el desarrollo de las pruebas y para cuantificar la permeabilidad de las muestras de roca. Se emplearon sistemas de medición de desplazamiento lineal, sistemas de medición de temperatura y sistemas de medición de presión.

El conjunto de los sistemas de medición está constituido por tres diferentes etapas con características y funciones bien definidas. La primera etapa está integrada por un grupo de dispositivos sensores-transductores, los cuales detectan la variables físicas y efectúan transformaciones para convertirlas en señales más manejables. Los componentes de la primera etapa son dos transformadores diferenciales linealmente variables, varios termopares, tres transductores de presión y un transductor diferencial de presión.

TRANSDUCTORES DE DESPLAZAMIENTO LINEAL SCHAEVITZ 5000HR

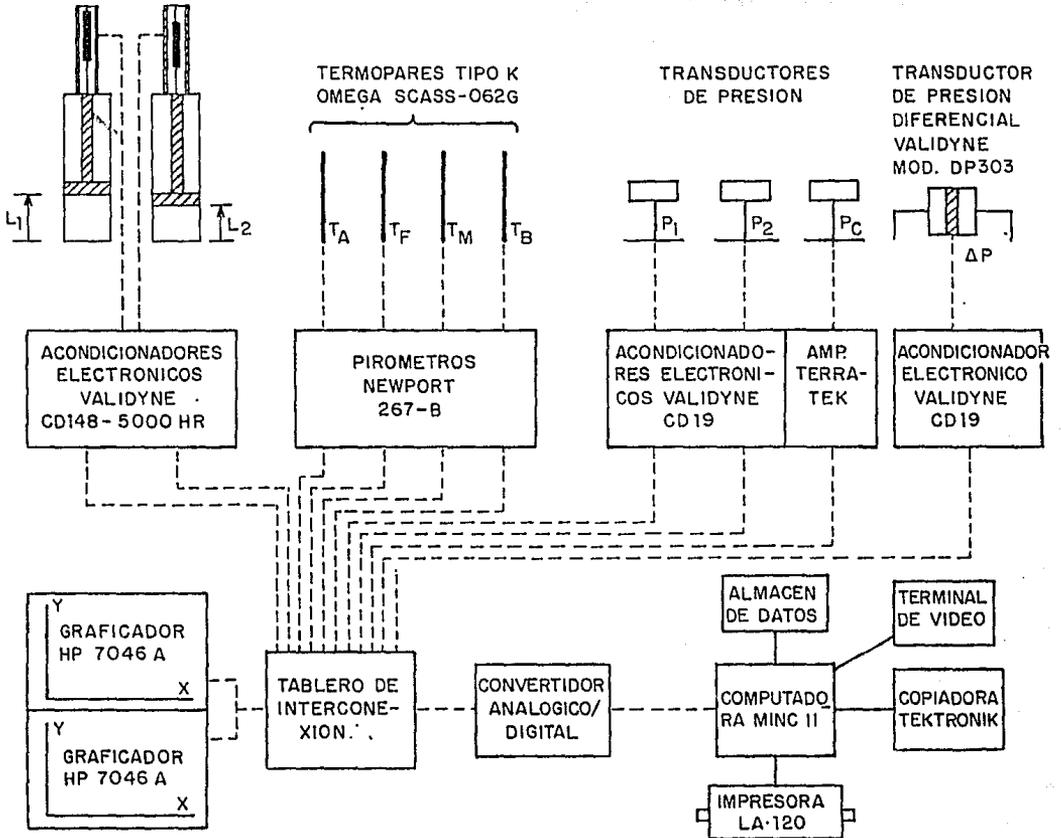


Fig. 6.2.6 Diagrama simplificado de los sistemas de medición que se emplearon para medir las variables físicas requeridas para cuantificar la permeabilidad y monitorear el desarrollo de las pruebas.

La segunda etapa está constituida por un conjunto de dispositivos electrónicos cuya función es acondicionar las señales eléctricas provenientes de los transductores, ya sea por amplificación, filtrado, demodulación u otros medios para obtener el tipo de salida deseada. Otra función de los dispositivos electrónicos es proveer voltajes de excitación a los transductores pasivos. En la segunda etapa se tienen amplificadores, demoduladores y pirómetros diversos, los cuales se describen posteriormente para cada tipo de sistema de medición.

La tercera etapa la integran los dispositivos que se emplean para leer, graficar, imprimir y grabar los valores de las variables medidas. Los componentes que constituyen la tercera etapa son dos graficadores, varios indicadores digitales y un sistema computarizado de adquisición de datos que incluye dispositivos para imprimir y grabar los datos experimentales. La descripción del sistema de adquisición de datos se presenta por separado en la siguiente subsección.

A continuación se describen los sistemas de medición que se emplearon para medir las variables directamente involucradas en el cálculo de la permeabilidad. Estas variables son el gasto volumétrico del fluido de trabajo, la diferencia de presiones aplicada entre los extremos de la muestra de roca y la temperatura. La temperatura no figura explícitamente en las ecuaciones que se emplean para calcular la permeabilidad a partir de datos experimentales. Sin embargo, la temperatura es la variable que determina los valores de la viscosidad y de la densidad del fluido, propiedades las cuales sí figuran explícitamente en las fórmulas de cálculo de la permeabilidad. Por consiguiente, la temperatura debe ser considerada como una de las tres variables directamente involucradas en la medición experimental de la permeabilidad.

Sistema de Medición del Gasto Volumétrico del Fluido de Permeabilidad

El gasto volumétrico del fluido de permeabilidad se midió por medio de los acumuladores hidroneumáticos del sistema de flujo. El procedimiento consiste esencialmente en efectuar el registro de la posición del émbolo de separación de cada acumulador como función del tiempo. Conociendo lo anterior, el gasto medio asociado a un intervalo dado de tiempo se determina fácilmente dividiendo el correspondiente desplazamiento volumétrico del émbolo entre el lapso considerado.

En la Fig. 6.2.7 se muestra el esquema del sistema que se empleó para determinar la posición del émbolo de separación de cada uno de los acumuladores hidroneumáticos. El transductor del sistema es un transformador diferencial linealmente variable

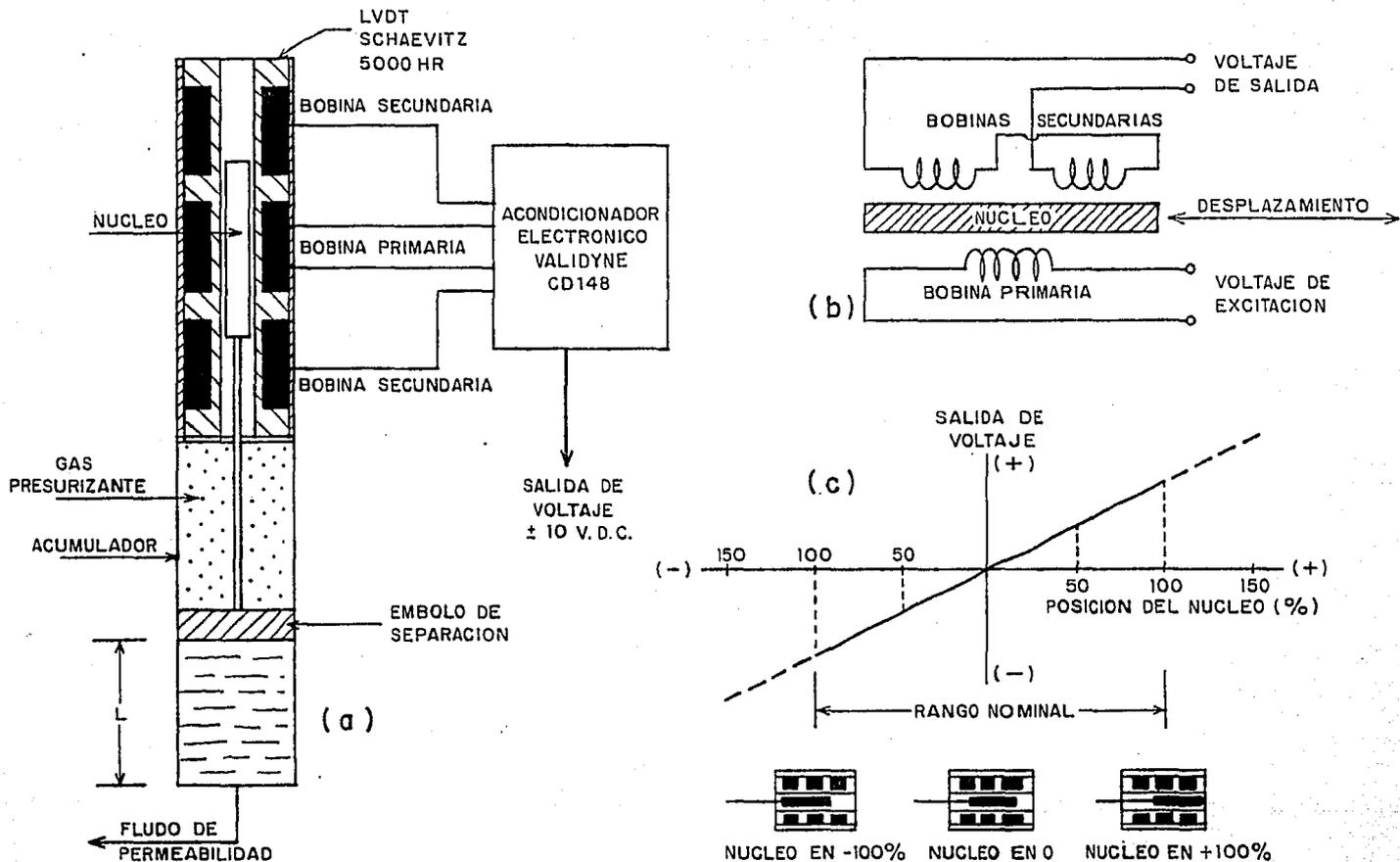


Fig. 6.2.7 (a) Esquema del sistema de medición de la posición del émbolo de separación de los acumuladores hidroneumáticos.
 (b) Diagrama eléctrico de un LVDT.
 (c) Características de la salida de voltaje de un LVDT.

(LVDT) marca Schaevitz, modelo 5000HR, mientras que el acondicionador electrónico asociado es un amplificador-demodulador marca Validyne, modelo CD148.

La construcción y el principio de funcionamiento de un LVDT se ilustra también en la Fig. 6.2.7. Este tipo de transductor consiste de una bobina primaria y dos bobinas secundarias simétricamente espaciadas en una disposición lineal, conformando un cuerpo cilíndrico dentro del cual se desplaza un núcleo magnético independiente. A la bobina primaria se le aplica una excitación en la forma de voltaje de corriente alterna, lo cual da como resultado que en las dos bobinas secundarias se induzcan voltajes cuyas respectivas magnitudes dependen del acoplamiento magnético del conjunto, condición que su vez está determinada por la posición del núcleo. Las bobinas secundarias están conectadas en serie-oposición, de manera que los voltajes inducidos en ellas son de polaridad opuesta. Por consiguiente, la salida neta del transductor es la diferencia entre los voltajes inducidos en las bobinas secundarias. La salida del transductor es cero cuando el núcleo se encuentra al centro del arreglo en lo que se conoce como posición nula, la cual corresponde a la condición en que es igual el acoplamiento magnético entre la bobina primaria y cada una de las bobinas secundarias. Cuando el núcleo se desplaza de la posición nula, se incrementa el voltaje en la bobina hacia la cual se mueve el núcleo, mientras que se reduce el voltaje inducido en la bobina ubicada en el extremo contrario.

Dentro de un cierto intervalo de desplazamiento hacia ambos lados de la posición nula se verifica que la salida de voltaje de un LVDT es con muy alto grado de exactitud una función lineal de la posición del núcleo. A este intervalo de desplazamiento se le denomina como el rango lineal nominal del transductor. El comportamiento de un LVDT dentro de su rango lineal nominal se especifica mediante un valor de linealidad. La linealidad se define como la desviación máxima de la salida del transductor con respecto a la recta que mejor ajusta los valores de calibración de desplazamiento del núcleo contra voltaje de salida dentro del rango lineal nominal. Definida de esta manera, la linealidad representa la incertidumbre con que pueden efectuarse determinaciones de desplazamiento lineal a partir de mediciones del voltaje de salida del LVDT, siempre y cuando dicho transductor se opere dentro de su rango lineal nominal.

El rango lineal nominal de los transductores LVDT que se emplearon para determinar la posición de los émbolos de los acumuladores es de ± 12.5 cm. Su linealidad es de $\pm 0.05\%$ de la salida de voltaje correspondiente al máximo desplazamiento del núcleo dentro del rango lineal nominal. Esto significa que la posición de los émbolos separadores puede determinarse a partir de las mediciones del voltaje de salida de los LVDT con una exactitud dentro de ± 0.01 cm.

Se emplearon acondicionadores electrónicos marca Validyne, modelo CD148, para suministrar la señal de excitación a los transductores LVDT, así como para amplificar y demodular sus voltajes de salida. Los acondicionadores proporcionan una salida de voltaje de corriente directa de ± 10 volts. Su ganancia puede ser ajustada para lograr que el voltaje de salida a plena escala sea cualquier valor deseado dentro del rango antes indicado.

La exactitud con que pueden efectuarse las mediciones de gasto con este método depende de la combinación de dos factores. Uno de ellos es la incertidumbre con la cual puede determinarse la posición del émbolo de separación y el otro es la magnitud del desplazamiento lineal que experimenta el propio émbolo en el intervalo de tiempo considerado para el cálculo del gasto. Si durante el lapso considerado ocurre que el desplazamiento lineal del émbolo es del mismo orden de magnitud que la incertidumbre en la determinación de su posición, resultará entonces que la incertidumbre en la medición del gasto será también del mismo orden de magnitud que el propio valor determinado para el gasto, o sea que se tendrá un error experimental de 100%. Si el desplazamiento del émbolo en el lapso considerado es dos órdenes de magnitud mayor que la incertidumbre en la determinación de su posición, entonces el error experimental asociado a la medición del gasto será del orden de 1%, etc. Por otra parte, si en el lapso de referencia considerado ocurre un desplazamiento muy grande del émbolo, el valor determinado para el gasto representará únicamente un comportamiento promedio del flujo y no se podrán apreciar los detalles relativos a la variación del gasto con el tiempo; es decir, la resolución de la medición del gasto será muy pobre. La discusión anterior provee los elementos necesarios para elegir adecuadamente el lapso de referencia para el cálculo del gasto, de modo que se pueda establecer un compromiso entre exactitud y resolución que satisfaga los requerimientos particulares de cada caso.

Sistema de Medición de la Presión Diferencial

En la Fig. 6.2.8 se muestra el esquema del sistema que se empleó para medir la diferencia de presiones entre los extremos de la muestra de roca. Los componentes básicos del sistema de medición son un transductor diferencial de presión modelo DP303 y un acondicionador electrónico modelo CD19, ambos de la marca Validyne.

En la Fig. 6.2.8 también se ilustran las principales características constructivas del transductor de presión diferencial. Este dispositivo consiste de dos bloques de acero inoxidable entre los cuales se sujeta un diafragma de acero permeable al flujo magnético. En cada bloque está empotrada una bobina de inductancia, arrollada sobre un núcleo en forma de "E".

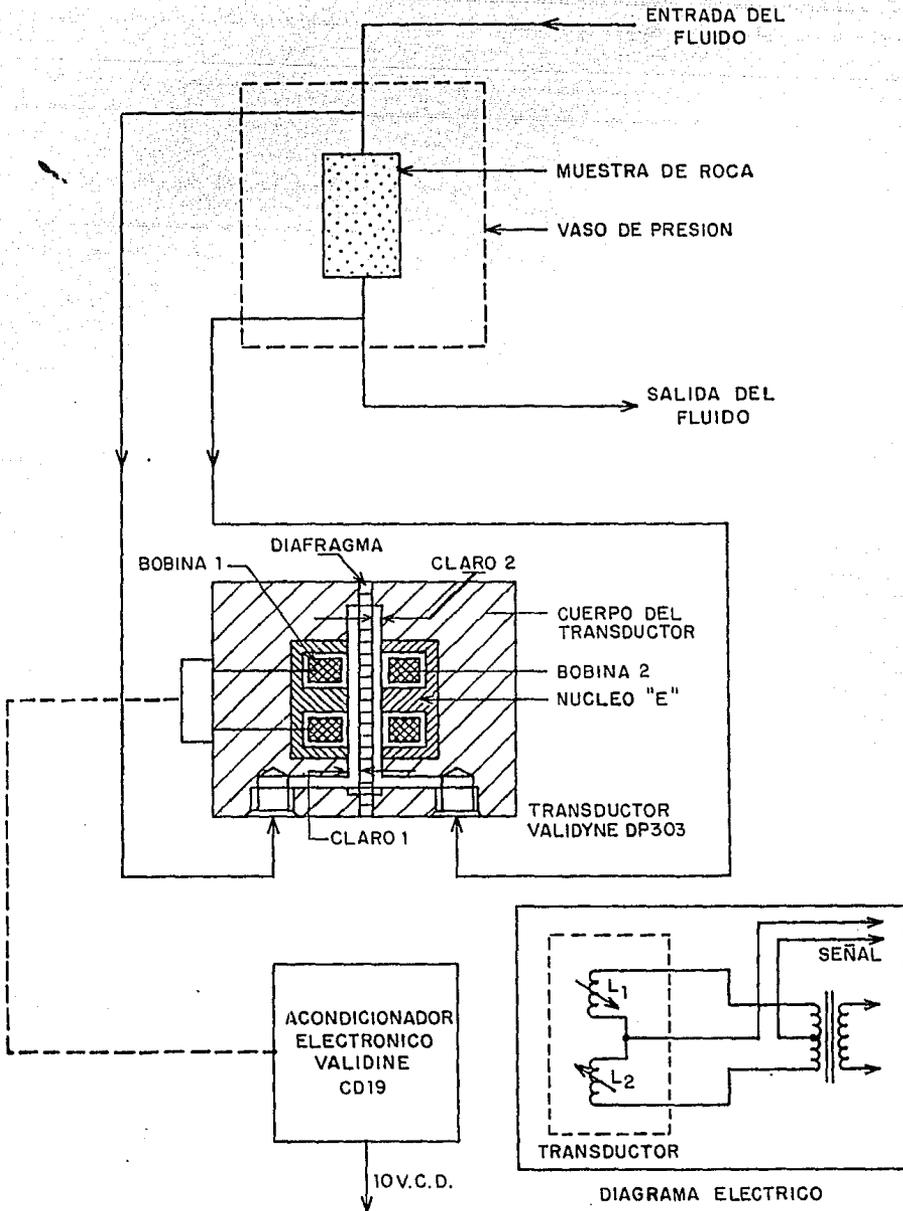


Fig. 6.2.8 Diagrama del sistema que se empleó para medir la diferencia de presiones entre los extremos de la muestra de roca.

A cada lado del diafragma se tienen cavidades independientes que se presurizan con las presiones que tiene el fluido de permeabilidad en secciones corriente arriba y corriente abajo de la muestra de roca. Cuando ambas cavidades están sometidas a la misma presión, la distancia entre el diafragma y los núcleos de las bobinas (claro de la cavidad) es igual en ambos lados, lo cual proporciona igual reluctancia para las trayectorias del flujo magnético de cada bobina. Cuando se aplica una diferencia de presiones, el diafragma se deflexiona hacia la cavidad en donde la presión es menor, lo cual dá lugar a que disminuya el claro de la cavidad en un lado del diafragma y a que aumente en el lado opuesto. Debido a que la reluctancia magnética varía con el tamaño del claro y determina el valor de la inductancia de cada bobina, el efecto final de la deflexión del diafragma es incrementar la magnitud del voltaje inducido en una de las bobinas y disminuir el voltaje inducido en la bobina del lado opuesto.

El transductor se conecta en un circuito puente de corriente alterna, tal como se muestra en la Fig. 6.2.8. Las bobinas del transductor forman una de las mitades del puente, mientras que la otra mitad está integrada por dos derivaciones simétricas del devanado secundario de un transformador de excitación localizado en el acondicionador electrónico. La salida del circuito puente es una señal de voltaje de corriente alterna cuya magnitud es función lineal de la deflexión del diafragma. El acondicionador electrónico amplifica y demodula la señal de salida del circuito puente, proporcionando al final del proceso de acondicionamiento una salida de voltaje de corriente directa. La ganancia del acondicionador puede ajustarse para obtener valores del voltaje de salida a plena escala en el rango de ± 10 volts.

Con el transductor DP303 pueden efectuarse mediciones de presiones diferenciales en el rango desde prácticamente 0 bar hasta 350 bar. Esto se logra empleando el transductor en combinación con 24 diferentes diafragmas, los cuales tienen rangos nominales de capacidad de medición que van desde 0.0086 bar hasta 350 bar.

La exactitud de las mediciones de presión diferencial con el transductor DP303 está dentro de $\pm 1\%$ de la capacidad nominal del diafragma que se instale en el transductor. Por consiguiente, para minimizar la significancia relativa de la incertidumbre de las mediciones en cada caso particular es necesario seleccionar un diafragma cuya capacidad nominal sea acorde con la magnitud de la presión diferencial a medirse. De no observarse esta precaución, la incertidumbre de las mediciones puede representar un porcentaje muy alto del valor determinado para la variable. Por ejemplo, si se emplea un diafragma con una capacidad nominal de 0-100 bar para medir una diferencia de presiones de 5 bar, resulta entonces que la incertidumbre de la medición será de ± 1 bar, lo cual representa un inaceptable $\pm 20\%$ del valor real de la variable.

Sistema de Medición de Temperaturas

Todas las mediciones de temperatura se efectuaron con termopares tipo K (cromel-alumel) marca Omega, modelo SCASS-062G. Las señales de salida de los termopares se procesaron en pirómetros digitales marca Newport, modelo 267-B. Los pirómetros compensan automáticamente por medios electrónicos las desviaciones de linealidad inherentes al tipo particular de termopar empleado como sensor-transductor del sistema de medición y proporcionan una salida de voltaje de corriente directa que es función lineal de la temperatura a que se somete la junta caliente del termopar. Los pirómetros también proporcionan los valores de temperatura por medio de indicadores digitales. De acuerdo a las especificaciones proporcionadas por el fabricante de los pirómetros, la incertidumbre en las mediciones de temperatura empleando los elementos antes mencionados está dentro de ± 1 °C.

6.2.6 Sistema de Adquisición de Datos

El proceso de adquisición de los datos experimentales se llevó a cabo mediante un sistema computarizado el cual opera en forma completamente automática. El sistema tiene la capacidad de capturar los datos de hasta 28 canales de información con una frecuencia de hasta 180 veces por minuto. El componente central del sistema de adquisición de datos es una computadora Digital PDP 11/03 de 16 bits, con una capacidad de memoria principal de 65K bytes. Integrado a la computadora se tiene un convertidor analógico/digital, el cual transforma las señales analógicas de voltaje provenientes de los sistemas de medición en códigos digitales identificables por la computadora. También formando parte integral de la computadora se tiene un dispositivo de lectura y grabación de información en discos flexibles. Como dispositivo principal de entrada-salida para interaccionar con la computadora se tiene una terminal gráfica de video Digital VT105. Completando el sistema se tienen dos dispositivos adicionales de salida: una terminal Digital LA120, la cual funciona como la impresora del sistema y una copiadora Tektronix 4632, la cual permite obtener copias en papel fotográfico de las imágenes alfa-numéricas y gráficas de la pantalla de video.

Los datos experimentales que se capturan durante la ejecución de las pruebas se almacenan en discos para posteriormente ser procesados y analizados. También se tiene la capacidad de obtener en tiempo real listados impresos de los datos experimentales conforme se van generando. Otra opción del sistema de adquisición de datos permite leer en la pantalla de la terminal de video los valores instantáneos de las variables experimentales. Estas características son muy útiles, ya que proporcionan los elementos necesarios para monitorear el desarrollo del trabajo experimental.

La computadora y los demás elementos periféricos del sistema de adquisición de datos también se emplean muy ventajosamente en las labores de calibración de los transductores e instrumentos de medición propios del simulador geotérmico, así como en la reducción y análisis de los datos experimentales primarios.

Dentro del contexto de sistema de adquisición de datos se cuenta también con dos graficadores Hewlett-Packard 7046A. Cada graficador tiene capacidad para manejar tres variables, una en el eje de las abscisas y dos en el eje de las ordenadas. Los graficadores funcionan directamente con las salidas de voltaje proporcionadas por los amplificadores electrónicos de los sistemas de medición. La principal utilidad de los graficadores no es como sistema de adquisición de datos que puedan emplearse con fines analíticos, sino como excelentes dispositivos para monitorear el desarrollo de las mediciones experimentales.

6.3 EQUIPO Y PROCEDIMIENTOS QUE SE EMPLEARON PARA EFECTUAR LAS MEDICIONES DE EXPANSION TERMICA

En la Fig. 6.3.1 se muestra el diagrama de conjunto del equipo experimental que se empleó para efectuar las mediciones de expansión térmica. Este equipo está conformado esencialmente por los mismos componentes integrantes del conjunto experimental que se empleó para efectuar las mediciones de permeabilidad, con la excepción del sistema de flujo, el cual no interviene en las mediciones de expansión térmica. Además del sistema de flujo, otra diferencia importante entre ambos esquemas experimentales consiste obviamente en el tipo de instrumentación que se aplica a la muestra de roca y en la configuración de los componentes que quedan alojados dentro del vaso de presión.

Los sistemas principales del equipo (vaso de presión, fuente de potencia hidráulica, intensificador de la presión de confinamiento, sistema de calentamiento y sistema de adquisición de datos) desempeñan durante las mediciones de expansión térmica las mismas funciones que ya se describieron en la sección anterior para el caso de las mediciones de permeabilidad. Por esta razón, en lo que resta de esta sección se describen exclusivamente los aspectos distintivos del equipo, o sea el montaje e instrumentación de la muestra de roca correspondiente a la configuración que se empleó para efectuar las mediciones de expansión térmica.

En la Fig. 6.3.2 se muestran los detalles del montaje e instrumentación de la muestra de roca, así como la forma en que se disponen los componentes dentro del vaso de presión. La muestra se monta entre dos cabezales manufacturados de cuarzo fundido o acero invar, materiales los cuales tienen coeficientes de expansión térmica muy pequeños en comparación con los

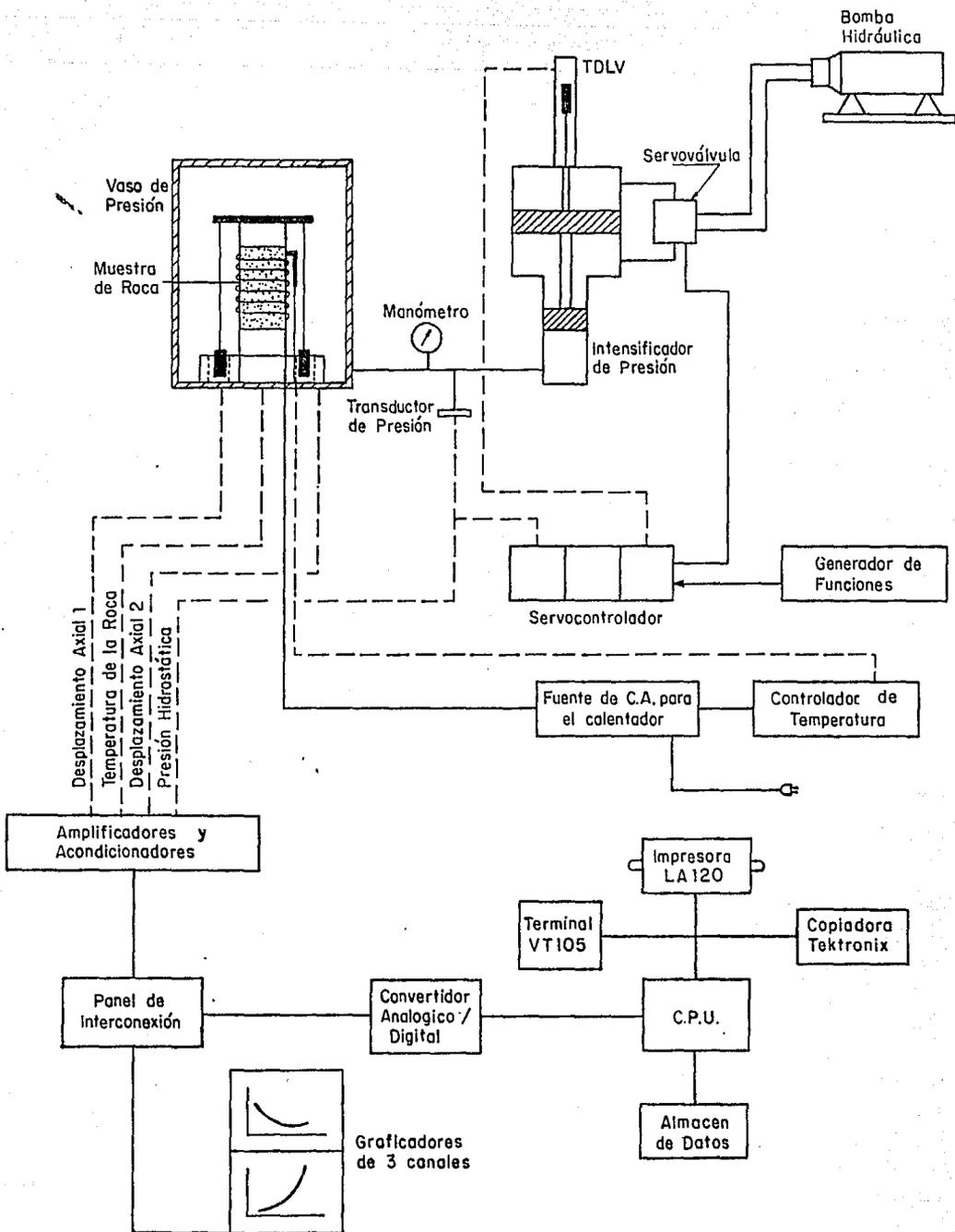
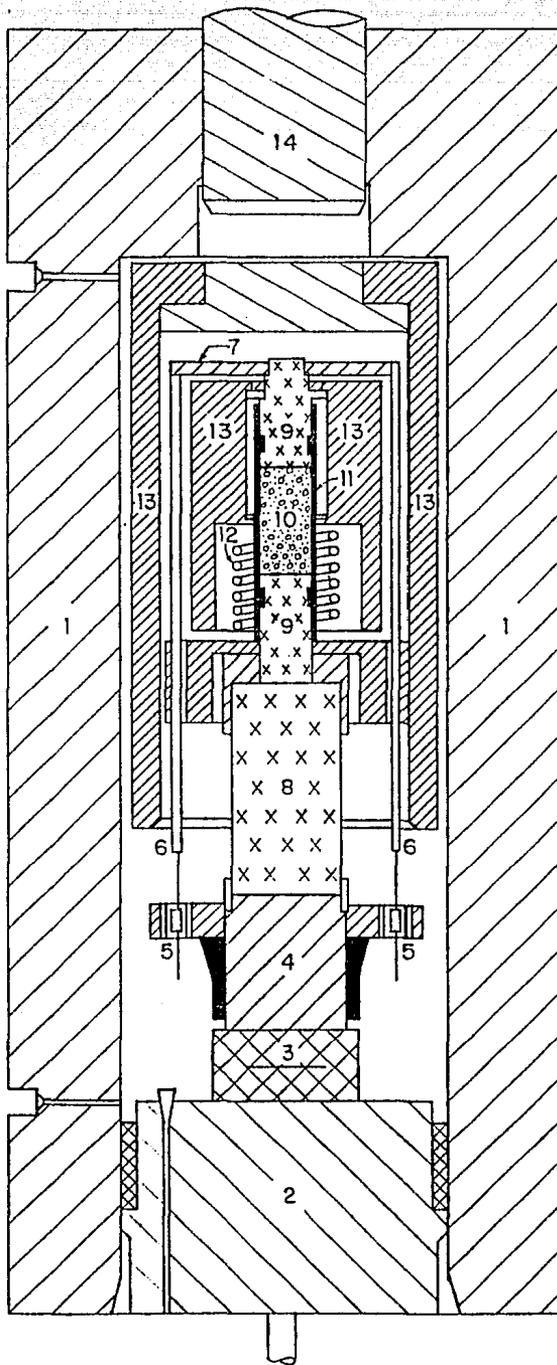


Fig. 6.3.1 Diagrama de conjunto del equipo experimental que se empleó para efectuar las mediciones de expansión térmica.



- 1.- VASO DE PRESION
- 2.- SELLO DEL VASO
- 3.- BASE
- 4.- SOPORTE DE LOS LVDT'S
- 5.- TRANSDUCTORES (LVDT) DE DESPLAZAMIENTO LINEAL
- 6.- VARILLAS DE CUARZO
- 7.- SENSOR DE DILATACION TERMICA LONGITUDINAL
- 8.- PEDESTAL DE CUARZO
- 9.- CABEZALES DE CUARZO
- 10.- MUESTRA DE ROCA
- 11.- CUBIERTA DE TEFLON
- 12.- CALENTADOR ELECTRICO
- 13.- CUBIERTA DE CERAMICA
- 14.- PISTON DE CARGA

Fig. 6.3.2 Esquema del montaje de la muestra de roca dentro del vaso de presión para la medición de expansión térmica.

coeficientes de expansión de las rocas en general. Si se desea impedir la entrada del fluido de confinamiento a los poros de la roca, el conjunto formado por la muestra y los dos cabezales se recubre con un compuesto ahulado a base de silicones y con tubo de teflón. Este tipo de recubrimiento soporta temperaturas de hasta 300°C.

El calentamiento de la roca se efectúa por medio del calor generado por un calentador eléctrico de 3 Kw, el cual está arrollado alrededor del cabezal inferior del ensamble de la muestra. Un termopar soldado al calentador provee la señal de retroalimentación para el sistema de control de la temperatura. Rodeando a la muestra y al calentador están dos cubiertas de material cerámico dispuestas concéntricamente. Como ya se ha mencionado, la función de las cubiertas consiste en restringir las corrientes de convección del fluido de confinamiento. Con esta medida se concentra el calor en la zona alrededor de la muestra, lo cual permite efectuar el proceso de calentamiento en forma más eficiente y con mejor control. Mediante el empleo de las cubiertas de cerámica pueden alcanzarse temperaturas más elevadas en la muestra de roca, a la vez que se reduce el consumo de energía eléctrica al impedir en gran medida las pérdidas de calor a través de las paredes metálicas del vaso. Por otra parte, se logra que la temperatura de la muestra responda con mayor sensibilidad y prontitud a los cambios en la potencia eléctrica disipada por el calentador. Todo lo anterior se traduce en un control más preciso de la temperatura de la muestra, ya sea que se trate de mantener constante dicha temperatura o de variarla con una rapidez determinada.

En la Fig. 6.3.3 se muestra el esquema detallado de la instrumentación que se aplicó a las muestras de roca para efectos de medir la expansión térmica. El trabajo realizado consistió básicamente en medir en función de la temperatura la expansión lineal en la dirección longitudinal de las muestras. Los detalles del sistema que se empleó para medir la expansión lineal se ilustran en la misma Fig. 6.3.3. Los elementos sensores-transductores de la expansión son dos transformadores diferenciales linealmente variables (LVDT) marca Schaevitz, modelo MHR010. Cuando son operados dentro de su rango lineal nominal, con estos transductores pueden efectuarse mediciones de desplazamiento de hasta ± 0.025 cm con una exactitud de ± 0.00006 cm (0.15% del rango lineal nominal). Cada transductor LVDT funciona en combinación con un acondicionador electrónico marca Validyne, modelo CD148. Los acondicionadores suministran los voltajes de excitación para los transductores y también amplifican y demodulan sus señales de salida. Al final del proceso cada acondicionador proporciona una salida de voltaje de corriente directa, cuya magnitud es una función lineal de la posición en que se encuentra el núcleo del transductor respectivo. Empleando los datos de calibración de cada conjunto transductor-acondicionador, las salidas de voltaje pueden

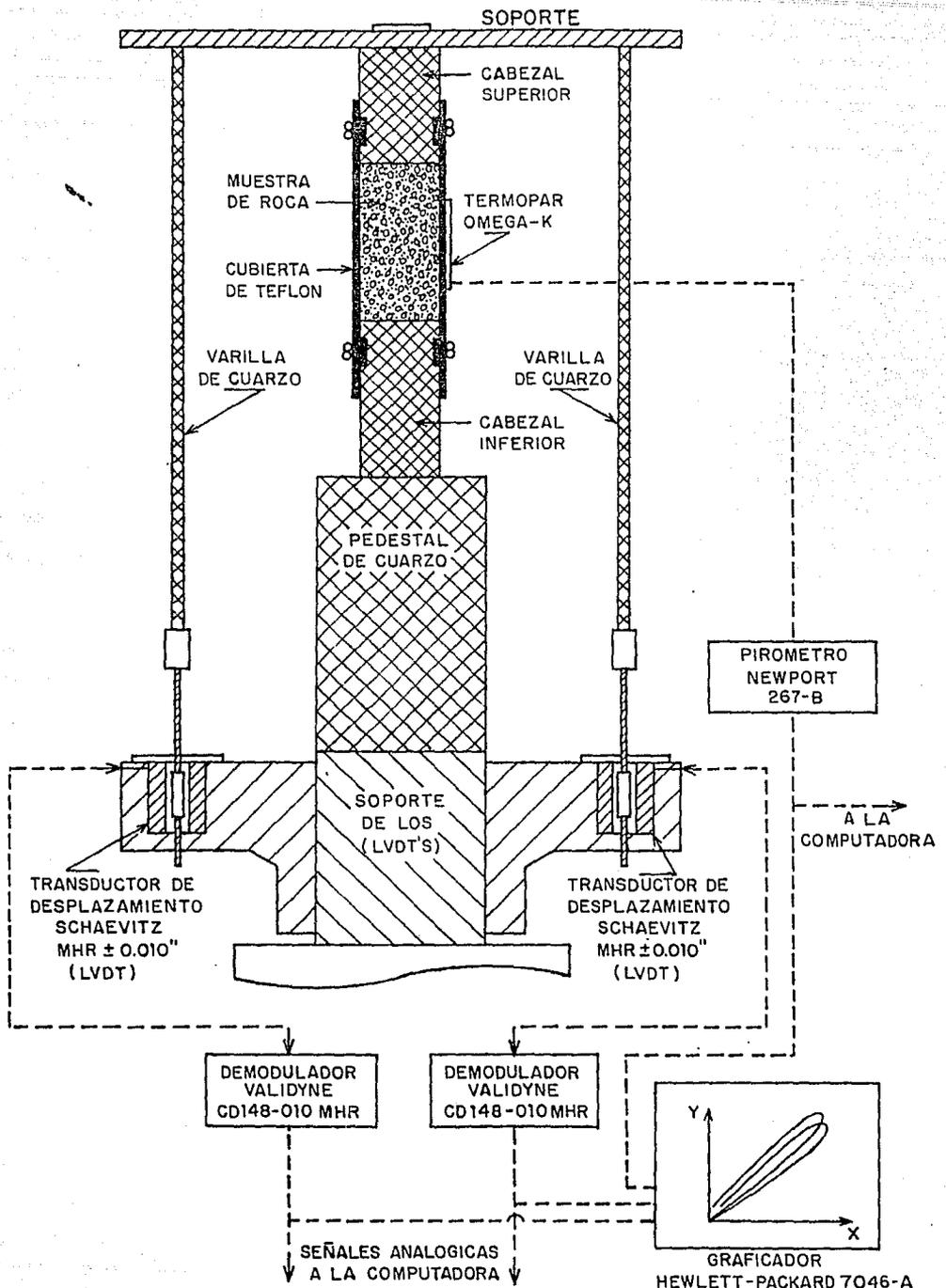


Fig. 6.3.3 Esquema detallado de la instrumentación que se empleó para medir la dilatación térmica de las muestras de roca.

interpretarse en términos de desplazamiento de los núcleos con respecto a posiciones de referencia.

La forma en que están suspendidos los núcleos de los transductores LVDT está planeada especialmente para medir la expansión lineal de la muestra de roca a lo largo de su eje longitudinal (ver Fig. 6.3.3). Sin embargo, es fácil advertir que los cambios de longitud que detectan los transductores LVDT con sus núcleos suspendidos en la forma mostrada son la suma de la expansión lineal de la roca y la expansión lineal del sistema de medición mismo. La expansión del sistema de medición es la resultante de las expansiones del pedestal, de los dos cabezales y de las varillas de las cuales penden los núcleos. La expansión de las varillas tiende a compensarse con la expansión de los cabezales y la del pedestal, excepto por la expansión de un tramo de varilla de longitud igual a aquella a de la muestra de roca.

El pedestal, los cabezales y las varillas están hechas de cuarzo fundido. Este material tiene un coeficiente de expansión térmica ($0.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) el cual es aproximadamente veinte veces menor que los coeficientes de expansión térmica esperados para las rocas. Esto significa que la expansión del sistema de medición es pequeña con respecto a la expansión esperada para las muestras de roca (en relación aproximada de 1 a 20). Sin embargo, para obtener resultados más exactos es recomendable evaluar la expansión del sistema de medición por medio de una prueba de calibración directa. Para efectuar esta prueba se coloca en el lugar de la muestra de roca una pieza de calibración de iguales dimensiones, que esté hecha de algún material cuyas características de expansión térmica sean conocidas. A continuación se efectúa el calentamiento del conjunto y se registra la expansión lineal total detectada por los transductores LVDT en función de la temperatura medida en la pieza de calibración. La expansión del sistema de medición para cada valor de temperatura se determina como la diferencia entre la expansión lineal total medida y la expansión correspondiente a la pieza de calibración. La expansión del sistema debe restarse de la expansión total medida en una prueba normal para así obtener la expansión lineal neta correspondiente a la muestra de roca ensayada.

Los valores de expansión lineal detectados por ambos transductores LVDT deben normalmente ser iguales. Sin embargo, el soporte de las varillas de las cuales penden los núcleos puede llegar a bascular en un plano vertical alrededor de su apoyo. En este caso, la expansión registrada por uno de los LVDT excederá al valor real en una cierta cantidad, mientras que la expansión registrada por el otro LVDT será menor que el valor real en la misma cantidad. El procedimiento para anular esta posible fuente de error consiste en promediar algebraicamente los valores de expansión lineal obtenidos con ambos transductores. El valor de expansión así resultante estará exento de la influencia de

cualquier perturbación originada por efectos de basculamiento del soporte, y por tanto debe ser interpretado como el valor real de la suma de las expansiones de la muestra de roca y del sistema de medición.

La temperatura de la muestra se midió con un sistema de medición integrado por un termopar tipo K (cromel-alumel) y un pirómetro digital. El funcionamiento básico de este tipo de sistema se describió en la sección precedente.

Las salidas de voltaje de los dos acondicionadores y del pirómetro son captadas periódicamente por el sistema de adquisición de datos, en donde bajo el control de un programa de computadora se convierten en valores de expansión y de temperatura expresados en unidades convencionales para estas variables. Las salidas de voltaje también pueden emplearse en combinación con un graficador debidamente calibrado para obtener en tiempo real gráficas de expansión lineal contra temperatura.

CAPITULO 7

PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

7.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PERMEABILIDAD

En esta sección se discuten los resultados de las mediciones de permeabilidad que se efectuaron en las muestras de roca arenisca del campo geotérmico Cerro Prieto. Tal como se mencionó en la sección 5.1, el objetivo principal de estas mediciones fue obtener evidencias experimentales para tratar de avanzar la frontera del conocimiento en lo que respecta a la caracterización y entendimiento del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas en general. Se observó que el flujo de soluciones acuosas a través de rocas areniscas es en sí mismo un fenómeno muy complejo, cuya ocurrencia puede simultáneamente dar lugar a la generación de eventos asociados que tienen el potencial de producir alteraciones en la red de conductos de flujo de la estructura porosa, propiciando con ello cambios de permeabilidad susceptibles de ser erróneamente atribuidos al efecto directo de la temperatura. La determinación de los cambios de permeabilidad que pueden ser directamente atribuidos al efecto de la temperatura se manifestó como una labor ardua de realizar. El principal obstáculo para lograr dicha determinación radica en la dificultad para hacer la distinción entre los cambios de permeabilidad directamente atribuibles al efecto de la temperatura y los cambios asociados con fenómenos de disolución de minerales y con otras interacciones originadas por desequilibrios de tipo químico entre el fluido de medición y los minerales de la roca. Sin embargo, los datos correspondientes a mediciones para las que razonablemente puede inferirse que la permeabilidad no fue significativamente afectada por fenómenos de disolución de minerales indican en forma consistente que la permeabilidad de las rocas areniscas se reduce con el aumento de la temperatura. Se encontró además que esta reducción de permeabilidad directamente atribuible al efecto de la temperatura es reversible y se apega con mucha aproximación a un modelo de variación lineal en coordenadas logarítmicas.

7.1.1 Análisis de los Resultados Experimentales

En las Tablas 7.1.1 a 7.1.7 se muestran en forma numérica los resultados del total de las mediciones de permeabilidad que se efectuaron en las seis muestras de roca arenisca del campo geotérmico Cerro Prieto. Empleando la teoría básica de

propagación de errores en mediciones experimentales (ver por ej. Holman [1977]), se determinó que la incertidumbre de los valores reportados no excede de ±4%. Para facilitar el análisis y la interpretación de los resultados, en las Tablas 7.1.1 a 7.1.7 también se incluyen los datos relativos a las condiciones experimentales correspondientes a cada una de las mediciones realizadas. Para algunas de las mediciones individuales se reportan como resultado dos diferentes valores de permeabilidad, lo cual se debe a que en el transcurso de dichas mediciones se produjeron cambios en la permeabilidad del correspondiente espécimen de roca. En estos casos, el valor de permeabilidad que se registró al final de la medición se reporta abajo del valor observado al inicio.

Uno de los principales aspectos que se derivan del análisis de los resultados experimentales es el hecho de que se obtienen evidencias que indican que el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas de Cerro Prieto está caracterizado por la expresión

$$\frac{k}{k_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-b} \quad (7.1.1)$$

donde k es la permeabilidad a la temperatura T , k_0 es la permeabilidad correspondiente a la temperatura T_0 , siendo T_0 una temperatura arbitraria de referencia, y b es una constante positiva. Es procedente enfatizar de antemano que la Ec. 8.1.1 caracteriza solamente el efecto puramente atribuible a la temperatura, no incluyendo la influencia de fenómenos asociados indirectamente a la variación de este parámetro, tales como la disolución de minerales constituyentes de la roca debido a desequilibrios de tipo químico entre dichos minerales y el fluido de trabajo que se hace circular a través de la roca durante el proceso de medición. Si la Ec. 7.1.1 describe correctamente la relación entre la permeabilidad y la temperatura, queda entonces implícito que los datos experimentales deben quedar ajustados conforme a una línea recta en un diagrama bidimensional de coordenadas $\log k$ contra $\log T$.

A continuación se analizan en detalle los resultados que se obtuvieron en cada una de las muestras ensayadas.

Resultados de las Mediciones en la Muestra M107-V3

Los resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M107-V3 se muestran numéricamente en la Tabla 7.1.1 y gráficamente en la Fig. 7.1.1. En esta figura, al igual que en todas las gráficas subsecuentes del mismo tipo que se presentan para mostrar el efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad, se

incluyen solamente los puntos experimentales que corresponden a un mismo valor de presión de confinamiento y de presión de poro. Esta medida se adopta con objeto de separar el efecto que sobre la permeabilidad pueden ejercer los cambios de presión, facilitando con ello la comparación de resultados así como el análisis del efecto de la temperatura. Cuando el caso lo amerita, el efecto de la presión sobre la permeabilidad, a temperatura constante, se muestra en gráficas independientes. Los números con que se identifican los puntos experimentales en todas las gráficas de esta sección están en concordancia con la numeración asignada a las mediciones individuales de permeabilidad en la Tabla 5.1.1, en la cual se describe la extensión y las condiciones experimentales de las mediciones, y en las Tablas 7.1.1 a 7.1.7, en las cuales se presentan los resultados del total de mediciones efectuadas en cada una de las muestras.

En las Fig. 7.1.2 se muestra la gráfica $\log k - \log T$ correspondiente a los datos numéricos presentados en la Tabla 7.1.1 para la muestra M107-V3. La línea recta mostrada, al igual que las demás líneas rectas que aparecen en todas las gráficas $\log k - \log T$ subsiguientes, representa el resultado del ajuste lineal por mínimos cuadrados de algunos de los datos experimentales. Para el ajuste de los datos correspondientes a esta muestra se consideraron únicamente los puntos identificados con los números 2, 3, 5, 6 y 7. El ajuste es excelente, tal como lo demuestra el respectivo coeficiente de correlación, el cual resultó ser igual a -0.984 .

Los puntos 1, 4 y 8 fueron excluidos de la correlación por corresponder a presiones de confinamiento distintas a la presión de base elegida para la prueba (ver Tabla 7.1.1). El punto 9, de control, también fue excluido de la correlación, ya que indicó un incremento de la permeabilidad como efecto neto del ciclado de temperatura a que fue sometido el espécimen. Tomando en cuenta que se empleó agua destilada como fluido de trabajo, es razonable atribuir el incremento neto de la permeabilidad a la disolución de algunos de los componentes de la roca, probablemente sílice. Si este es el caso, se tiene entonces que la diferencia entre la permeabilidad del punto 9 y la del punto 3 no representa cambios irreversibles de permeabilidad asociados puramente al efecto de la temperatura sobre la estructura de la roca, sino que refleja alteraciones irreversibles producidas en el espécimen por el propio fluido de trabajo que se empleó en el proceso de medición. Este análisis sugiere que al evaluar experimentalmente el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad debe tenerse muy en cuenta que el propio método de medición puede provocar alteraciones significantes en la permeabilidad del material, lo que de no considerarse puede conducir a apreciaciones incorrectas acerca del efecto puramente atribuible a la temperatura. Es de notarse que la reducción de la permeabilidad a altas temperaturas se produjo no obstante la supuesta disolución de algún

componente (suposición fundamentada por el incremento neto de permeabilidad que se produjo al completarse el ciclo de calentamiento y enfriamiento). En los siguientes párrafos se amplía la discusión a este respecto.

La reducción máxima de permeabilidad que se observó en la muestra M107-V3 fue de 39.5% con el incremento de temperatura de 25°C a 206°C; esta reducción se produjo empleando agua destilada como fluido de trabajo y con la muestra sometida a 12 MPa de presión de confinamiento y 6.9 Mpa de presión media de poro. Con el incremento final de 206°C a 260°C el efecto aparente de la temperatura sobre la permeabilidad se invirtió ligeramente, observándose un pequeño incremento de 0.022 md a 0.023 md. Si bien este aumento es poco significativo y está dentro de los límites de error de las mediciones, es importante tratar de encontrar una explicación al cambio de tendencia en el efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad.

En los resultados numéricos de la Tabla 7.1.1 y en la gráfica mostrada en Fig. 7.1.1 se aprecia que para los niveles más bajos de temperatura, cuando la solubilidad de la sílice en agua es pequeña, al incrementarse la temperatura se reduce la permeabilidad (en forma más significativa mientras más bajo es el nivel en que se produce el incremento). Por otra parte, a altas temperaturas, cuando la solubilidad del cuarzo aumenta muy rápidamente, al incrementarse la temperatura aumenta la permeabilidad. Este planteamiento, en conjunción con el resultado de la medición de control (punto 9), puede razonablemente ser interpretado como un indicio de que al menos dos factores están involucrados en el efecto aparente de la temperatura sobre la permeabilidad: un mecanismo que produce disminución de la permeabilidad al aumentar la temperatura y cuyo efecto es reversible, y otro mecanismo irreversible, presuntamente asociado a la disolución de componentes de la roca, el cual produce aumento de la permeabilidad con el incremento de la temperatura.

Por consiguiente, dependiendo de cual de los dos mecanismos antes mencionados es el dominante para un nivel de temperatura dado, se producirá en la roca un aumento o una disminución de la permeabilidad como consecuencia de un incremento de la temperatura. Desde el punto de vista de los resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M107-V3 puede decirse que a bajas temperaturas dominó el mecanismo que reduce la permeabilidad, mientras que a altas temperaturas dominó el mecanismo que produce aumento de la permeabilidad, lo cual es compatible con la hipótesis de que el mecanismo irreversible tiene su origen en la disolución de sílice de la roca.

El efecto de la presión efectiva (diferencia entre la presión de confinamiento y la presión media del fluido de trabajo) sobre la permeabilidad, a temperatura constante, se

aprecia en el caso de la muestra M107-V3 considerando los resultados de las mediciones 1, 2 y 4, que se efectuaron a la temperatura de 25°C, y los resultados de las mediciones 7 y 8, que se efectuaron a la temperatura de 260°C. Estos resultados se muestran en la Fig. 7.1.3. Se aprecia que el incremento en la presión efectiva tuvo el efecto de reducir significativamente la permeabilidad a bajas temperaturas, siendo en cambio muy pequeño dicho efecto a altas temperaturas. A la temperatura de 25°C el incremento de presión efectiva de 4.4 MPa a 18.4 MPa produjo una disminución de permeabilidad de 23.4%, mientras que a 260°C el incremento de presión efectiva de 6.4 MPa a 18.4 MPa produjo una reducción de permeabilidad de tan sólo 4.3%. Este comportamiento es explicable si se tiene en cuenta que a mayor temperatura la estructura de la roca debe ser más compacta debido a la expansión térmica del material sólido.

Resultados de las Mediciones Efectuadas en la Muestra M129-V3

En la Tabla 7.1.2 se presentan los datos numéricos correspondientes a los resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M129-V3, mientras que en la Fig. 7.1.4 se muestra gráficamente la relación entre los valores de permeabilidad y temperatura. Por otra parte, en la Fig. 7.1.5 se muestra la gráfica log k-log T correspondiente al total de valores numéricos reportados en la Tabla 7.1.2. Se consideraron en la correlación los puntos identificados con los números 1, 2, 3, 4 y 5, habiéndose excluido los puntos 6, 8 y 9 por no corresponder a la presión de confinamiento elegida como base para la prueba (ver Tabla 7.1.2). Los puntos 7 y 10, de control, también se excluyeron de la correlación por mostrar disminuciones de permeabilidad razonablemente atribuibles al efecto residual de la elevada presión de confinamiento que se aplicó al espécimen en las mediciones inmediatamente precedentes (ver Tabla 7.1.2). También en este caso se tuvo una excelente correlación lineal entre los valores logarítmicos de la permeabilidad y de la temperatura, habiendo resultado un coeficiente de correlación de -0.989.

La reducción máxima de permeabilidad que se observó en la muestra M129-V3 fue de 18.2% con el incremento de temperatura de 22°C a 270°C; esta reducción se produjo empleando salmuera como fluido de trabajo y con la muestra sometida a 10 MPa de presión de confinamiento y 6.4 MPa de presión media de poro. La medición número 7 se efectuó con carácter de prueba de control para averiguar la reversibilidad del efecto de la temperatura. Se encontró que al completarse el ciclo de temperatura la permeabilidad disminuyó de 1.65 md a 1.43 md, ésto en contraposición de lo observado en el caso de la muestra M107-V3. Esta diferencia de comportamiento puede explicarse por una parte considerando el hecho de que en el caso de la muestra M129-V3 se empleó como fluido de trabajo salmuera "Cerro Prieto" saturada

con sílice, lo cual pudo haber reducido la intensidad de la disolución de los minerales componentes de la roca. Esta explicación es compatible con el hecho de que en esta misma muestra no se observó ningún cambio en la tendencia del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad a altos valores de temperatura. Por otra parte, es altamente probable que la elevada presión de confinamiento que se aplicó al espécimen en la medición precedente a alta temperatura (punto 6), haya dado lugar a cambios irreversibles en la estructura de la roca, originando con ello una componente irreversible de reducción de la permeabilidad. No obstante la diferencia antes discutida, es interesante observar que en el caso de la muestra M129-V3 el efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad durante la fase de calentamiento exhibió el mismo patrón que en la muestra M107-V3; es decir, la reducción de permeabilidad con el incremento de temperatura fue más significativa a bajos niveles de temperatura, siendo prácticamente nulo el efecto asociado al último incremento de temperatura (de 206 °C a 260 °C en el caso de la muestra M107-V3 y de 206 °C a 270 °C en el caso de la muestra M129-V3).

El patrón de influencia de la presión sobre la permeabilidad en el caso de la muestra M129-V3 fue esencialmente el mismo que se observó en la muestra M107-V3, es decir, el efecto de la presión fue más significativa a baja temperatura. A la temperatura de 25 °C el incremento de presión efectiva de 4.6 MPa a 16.6 MPa dió lugar a una reducción de permeabilidad de 13.3%, mientras que a la temperatura de 270 °C el mismo incremento de presión efectiva sólo dió lugar a una reducción de 5.2%.

Resultados de las Mediciones Efectuadas en la Muestra M107-V1

En la Tabla 7.1.3 se presentan los datos numéricos de los resultados obtenidos de las mediciones efectuadas en la muestra M107-V1, mientras que en la Fig. 7.1.5 se muestra gráficamente la relación entre los valores de permeabilidad y temperatura que pueden ser sujetos de comparación y análisis por corresponder a un mismo valor de presión de confinamiento y de presión de poro.

La medición número 1 se llevó a cabo a la temperatura constante de 25 °C empleando agua destilada como fluido de trabajo. En el transcurso de esta medición la permeabilidad disminuyó muy drásticamente en un intervalo de tiempo relativamente corto. Se observó reducción de 0.038 md a 0.006 md en el lapso de aproximadamente 3 horas en que se mantuvo la circulación del fluido a través de la muestra de roca. En la Fig. 7.1.7 se muestra la evolución de la permeabilidad como función del tiempo transcurrido a partir del inicio del flujo. Existen en la literatura algunas referencias que describen este tipo de comportamiento (por ej. Jones [1964] y Mungan [1965]), el cual se atribuye al hinchamiento que pueden

experimentar cierto tipo de arcillas presentes en la roca al entrar en contacto con el agua destilada o en general con cualquiera otra solución acuosa cuya salinidad sea menor a la correspondiente al fluido con que la roca se haya encontrado previamente en equilibrio. El hinchamiento de las arcillas dá lugar a la obstrucción de los conductos de flujo y produce como efecto último una cierta reducción de la permeabilidad.

De acuerdo con Jones [1964] y Mungan [1965], algunos tipos de arcillas, denominadas genéricamente como arcillas activas y que comunmente están presentes en las rocas areniscas como materiales cementantes o formando parte de la matriz, tienen la habilidad de retener agua dentro de su estructura molecular, así como la propiedad de intercambiar cationes (tales como iones de hidrógeno, sodio, potasio y calcio) con el fluido con que se encuentran en contacto. Se sabe que la capacidad que tienen estas arcillas para absorber y retener agua, fenómeno el cual origina el hinchamiento o cambio de volumen, varía inversamente con su contenido catiónico. Si una salmuera con una determinada concentración de iones está en equilibrio con los minerales arcillosos de una roca y a continuación es substituida por otra salmuera con un diferente contenido iónico, ocurrirá entonces un intercambio iónico entre el fluido y los minerales arcillosos hasta que se alcance una nueva condición de equilibrio, produciéndose con ello también un cambio en la características de expansividad de las arcillas. En particular, si una roca que contiene arcillas hidratables y que previamente ha estado en equilibrio con un fluido de determinado contenido catiónico se satura con agua pura, las arcillas de la roca deberán ceder algunos de sus iones positivos al agua hasta que se establezca una nueva condición de equilibrio. Si el agua es reemplazada continuamente, tal como ocurre durante el proceso de medición de permeabilidad, ocurrirá entonces una reducción progresiva del contenido catiónico de las arcillas y un correspondiente aumento en su hidratabilidad. Este mecanismo a su vez propiciará el aumento progresivo en el volumen de las arcillas y la consecuente reducción en el volumen de los poros y en el área transversal de los conductos de flujo. Por consiguiente, la permeabilidad medida con agua pura en un espécimen de roca que contiene arcillas hidratables y que previamente ha estado en equilibrio con una cierta salmuera, tal como ocurre comunmente en las rocas de un yacimiento geotérmico, será menor que la permeabilidad correspondiente a las condiciones del sitio de donde fue extraída. En general, al emplear como fluido de medición cualquier salmuera que contenga menor concentración catiónica que el fluido de la formación de donde proviene un espécimen se obtendrá un menor registro de permeabilidad. También se presenta, cuando menos hasta un cierto límite, el caso en que los registros de permeabilidad resultan ser mayores cuando el contenido catiónico del fluido de medición es mayor que el correspondiente al fluido en la formación de origen del espécimen de roca. Todo lo anterior indica que para obtener resultados

representativos de permeabilidad en rocas que contienen arcillas expansivas debe emplearse como fluido de medición una salmuera de composición similar a la del fluido de la formación de donde se extrae la roca.

Con base en lo expuesto en el párrafo anterior se determinó que los resultados de mediciones adicionales en la muestra M107-V1 empleando agua destilada como fluido de trabajo no serían representativos de la permeabilidad correspondiente a las condiciones originales de la roca en el yacimiento. Por consiguiente, la muestra se sometió a un proceso de secado en un horno a 105°C durante un lapso de 18 horas para vaporizar la humedad y deshidratar las arcillas activas que, de acuerdo a la evidencia aportada por la medición número 1, ocasionaron la reducción de la permeabilidad. Para proseguir con las mediciones de permeabilidad la muestra se saturó a continuación con salmuera de composición similar a la existente en el campo geotérmico Cerro Prieto. Las mediciones numeradas del 2 al 9 se efectuaron empleando esta salmuera como fluido de trabajo, a la cual además se le agregó, en un esfuerzo por reducir efectos de disolución, una cantidad de sílice igual a la concentración de equilibrio correspondiente a la temperatura de cada una de las mediciones.

La permeabilidad que se registró en la medición número 2 (1.270 md) resultó ser muy superior a la que se registró en la medición número 1 (0.006 md), aun cuando en ambas mediciones se aplicaron prácticamente las mismas condiciones de presión y de temperatura. Durante el lapso en que se mantuvo el flujo de salmuera a través de la muestra (aproximadamente 4 horas) no se observó que la permeabilidad manifestara tendencia a disminuir con el transcurso del tiempo, habiendo alcanzado un valor estable rápidamente. Lo anterior constituye evidencia de que en la medición número 1 hubo una fuerte interacción entre la roca y el agua pura que se empleó como fluido de trabajo. Lo antes expuesto pone de manifiesto que para caracterizar adecuadamente la capacidad de las rocas para conducir fluidos, así como para interpretar correctamente los datos de permeabilidad obtenidos experimentalmente, es de primordial importancia tener en cuenta los efectos derivados de posibles interacciones entre la roca y el fluido, los cuales pueden dar lugar a alteraciones en los conductos de flujo y afectar significativamente la permeabilidad. La comparación de los resultados obtenidos de las mediciones 1 y 2 también proporciona una buena idea de lo que podría pasar con la permeabilidad, a nivel de la explotación de un yacimiento, si en una formación que ha estado en equilibrio con un fluido de determinada salinidad se inyectara agua pura o un fluido de menor salinidad.

La medición número 3 se efectuó a la temperatura de 112°C. Se empleó como fluido de permeabilidad salmuera saturada con sílice, con lo cual se pretendió poder aislar el efecto únicamente atribuible a la temperatura de los efectos asociados

con la disolución de sílice y con la hidratación de las arcillas de la roca. Con el incremento de la temperatura de 24 °C a 112 °C se observó una drástica disminución de permeabilidad de 1.27 md a 0.044 md, lo que en términos porcentuales representa una reducción de 96.5%.

La naturaleza de la significativa reducción de permeabilidad observada entre 24 °C y 112 °C se investigó mediante la ejecución de una medición de control (la medición número 4) a la temperatura de 24 °C. Se partió de la base de que el hinchamiento de las arcillas activas solamente se puede revertir mediante el secado de la roca y de que la disolución de minerales es un proceso físico irreversible. Con esta base se hizo el planteamiento de que si la permeabilidad de la muestra en la medición de control resultara igual a la permeabilidad que se registró en la medición número 2, también efectuada a 24 °C, entonces la reducción de permeabilidad observada como consecuencia del incremento de temperatura de 24 °C a 112 °C podría ser atribuida únicamente a un mecanismo de tipo reversible directamente asociado con la temperatura. La permeabilidad que se registró en la medición de control resultó ser de 1.19 md, valor muy similar al que se había obtenido en la medición número 2 (1.27 md), con lo cual se comprobó que la reducción de permeabilidad no tuvo su origen en el hinchamiento de las arcillas (en cuyo caso la reducción no se hubiera revertido al disminuir la temperatura). La similitud de resultados también excluyó el hecho de que se hubiera presentado disolución significativa de los minerales de la roca, en cuyo caso se habría originado un aumento de la permeabilidad. Por tanto, puede razonablemente concluirse que la reducción de permeabilidad asociada al incremento de temperatura de 24 °C a 112 °C tuvo su origen en un mecanismo esencialmente reversible directamente dependiente de la temperatura.

Después de la medición de control se incrementó la temperatura de la muestra hasta 210 °C, habiéndose efectuado en estas condiciones la medición número 5. La permeabilidad correspondiente a esta medición resultó ser igual a 0.01 md, lo que representa una reducción de 99.6% con respecto a la permeabilidad registrada en la medición inmediata anterior, efectuada a la temperatura de 24 °C.

A continuación se incrementó la temperatura del espécimen hasta 255 °C y en esas condiciones se efectuó la medición número 6. La permeabilidad que se registró a esta temperatura (0.15 md) resultó ser mayor que la que se midió a la temperatura de 210 °C (0.01 md), esto en contraposición con la tendencia que se había observado en las mediciones previas en esta misma muestra. La probable explicación de esta tendencia opuesta es que en el intervalo de 210 °C a 255 °C pudo ocurrir cierta disolución de los minerales de la roca y que el efecto que esto ejerció sobre la permeabilidad fue más importante que el mecanismo reversible

dependiente directamente de la temperatura. Apoyando esta explicación se tiene el hecho de que en la medición número 8, efectuada a 180°C, la permeabilidad (0.15 md) también resultó ser mayor que la que previamente se había observado a 112°C (0.04 md) en la medición número 3. Además, durante el tiempo que duró la medición número 6 a 255°C se observó que la permeabilidad aumentó de .01 md a 0.16 md, lo cual respalda la hipótesis acerca de la disolución de algunos de los minerales constituyentes de la roca, muy probablemente sílice.

La medición número 9 se efectuó con carácter de prueba de control para evaluar globalmente el grado de reversibilidad de los cambios sufridos por la permeabilidad de la roca como consecuencia del incremento de temperatura hasta 255°C. Con tal objeto, esta medición se efectuó a las mismas condiciones de presión y temperatura a las que se había efectuado la medición previa al inicio del calentamiento. La permeabilidad que se registró en la medición de control resultó ser igual a 1.60 md, valor muy superior a aquel que se obtuvo en la medición efectuada previamente al inicio del calentamiento (1.19 md). Lo anterior indica que al completarse el ciclo de calentamiento se produjo un aumento significativo de la permeabilidad, lo cual aporta evidencia adicional en el sentido de que en el intervalo de temperatura de 210°C a 255°C tuvo lugar la disolución de uno o más de los minerales constituyentes de la roca. Como la solubilidad del cuarzo se incrementa muy rápidamente a altas temperaturas, puede razonablemente suponerse que este mineral es uno de los que se disolvieron. El análisis químico detallado del efluente indudablemente que hubiera aportado evidencias más conclusivas en este respecto. Desafortunadamente, este tipo de investigación colateral no se realizó metódicamente debido a que no se visualizó oportunamente su importancia en relación con el análisis de los resultados de las mediciones de permeabilidad a alta temperatura. Se efectuaron solamente unas cuantas mediciones aisladas del contenido de SiO_2 en muestras de efluente correspondientes a mediciones realizadas a temperaturas superiores a 200°C, habiéndose encontrado en dichos casos un contenido de sílice significativamente mayor que la cantidad que de este elemento se había agregado a la salmuera para obtener en el fluido de trabajo una concentración igual a la solubilidad del cuarzo reportada en la literatura. (No se encontró una explicación para el hecho de que hubiera ocurrido disolución de sílice de la roca no obstante haber agregado a la salmuera este elemento en una cantidad igual a la concentración de equilibrio correspondiente a cada temperatura). Sin embargo, ahora resulta claro que éste es un aspecto importante que debe tenerse en cuenta al planear futuras investigaciones experimentales acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad.

Finalmente se efectuó la medición número 10 empleando nuevamente agua destilada como fluido de trabajo. A la temperatura constante de 24°C se hizo pasar agua a través de la

muestra de roca durante aproximadamente 3 horas. Durante este lapso la permeabilidad disminuyó de 1.6 md a 1.0 md; además, al darse por concluido el experimento se apreciaba una clara tendencia de la permeabilidad a seguir disminuyendo. El resultado de esta última medición permite enfatizar, una vez más, la importancia de tener en cuenta las interacciones entre la roca y el fluido de trabajo tanto al generar como al interpretar datos de permeabilidad.

Considerando en conjunto los resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M107-V1 empleando salmuera como fluido de trabajo se aprecia que el efecto global o aparente de la temperatura sobre la permeabilidad exhibe esencialmente el mismo patrón que el efecto global observado en el caso de la muestra M107-V3 (en la cual se empleó agua destilada como fluido de trabajo). En el incremento de temperatura aplicado en primer lugar de 24°C a 112°C así como en el incremento aplicado en segundo lugar de 24°C a 210°C dominó el mecanismo que reduce reversiblemente la permeabilidad, mientras que en el incremento de 210°C a 255°C dominó el mecanismo que produce aumento irreversible de la permeabilidad. El aumento irreversible de permeabilidad, ampliamente demostrado por el resultado de la medición número 9, junto con el hecho de que en el efluente de algunas de las mediciones se detectó sílice en mayor cantidad que la que se había agregado a la salmuera, pueden interpretarse en forma concluyente como evidencias indicativas de que los fenómenos de disolución de los minerales de la roca intervienen en la configuración del efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad. Así mismo, las evidencias indican que la influencia de los fenómenos de disolución se manifiesta con mayor intensidad a altas temperaturas, coincidiendo esto con el patrón de solubilidad del cuarzo, mineral constituyente de las rocas areniscas en muy alta proporción.

Por lo que concierne a la correlación en Coordenadas $\log k - \log T$ de los datos de permeabilidad contra temperatura, para el caso de la muestra M107-V1 solamente se consideraron los resultados de las mediciones número 2, 3, 4 y 5. En conformidad con las discusiones presentadas en los párrafos anteriores, se dejaron fuera de consideración los datos correspondientes a las mediciones en las que razonablemente se pudo inferir que la permeabilidad había sido afectada en forma significativa por fenómenos de disolución de minerales. De esta manera se pretendió involucrar en la correlación únicamente el efecto directamente atribuible a la temperatura. En la Fig. 7.1.8 se muestra la gráfica logarítmica de los resultados que se tomaron en cuenta para la correlación. El coeficiente de correlación del ajuste lineal por mínimos cuadrados resultó ser igual a -0.994.

**Resultados de las Mediciones Efectuadas en la Muestra M107-H4
Empleando Agua Destilada Como Fluido de Medición**

En la Tabla 7.1.4 se presentan los valores numéricos de los resultados correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M107-H4 empleando agua destilada como fluido de trabajo (en esta muestra también se efectuaron mediciones empleando salmuera). Para su mejor apreciación, estos mismos resultados se muestran gráficamente en la Fig. 7.1.9. Se observa que el efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad exhibe el mismo patrón que en los casos de las muestras M107-V3 y M107-V1. Para el incremento de temperatura de 25°C a 120°C se tuvo una reducción de permeabilidad de 24.5%, para el incremento de 120°C a 200°C la reducción fue de 9.5 % y la reducción global asociada al incremento de 25°C a 200°C fue de 31.8%. Por otra parte, con el incremento de temperatura de 200°C a 265°C la permeabilidad aumentó en 14.5%. Manteniendo constante la temperatura en 265°C se incrementó la presión efectiva de 6.6 MPa a 18.6 MPa, lo cual dió lugar a una reducción de permeabilidad de 15.6%. Los comentarios y observaciones adicionales a que dá lugar el análisis de los datos permeabilidad-temperatura obtenidos en la muestra M107-H4 ya están contenidos en las discusiones previas de esta sección, por lo cual no es necesario repetirlos. Es conveniente únicamente destacar que se confirma la tendencia de que a bajos niveles de temperatura domina el mecanismo que produce reducción de la permeabilidad, mientras que a altos niveles de temperatura domina el mecanismo que propicia que dicha propiedad se incremente.

En la Fig. 7.1.10 se muestra la gráfica logarítmica de los resultados de las mediciones susceptibles de comparación en lo que se refiere al efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad. En el ajuste lineal por mínimos cuadrados se incluyeron únicamente los puntos 1, 2 y 3, resultando así un coeficiente de correlación de -0.998. El punto 4 no se tomó en cuenta debido a que involucra un aumento de permeabilidad que se consideró estaba asociado con fenómenos de disolución de minerales de la roca.

Resultados de las Mediciones Efectuadas en la Muestra M107-H4 Empleando Salmuera Como Fluido de Medición

En la Tabla 7.1.5 se presentan los valores numéricos de los resultados correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M107-H4 empleando salmuera saturada con sílice como fluido de trabajo. Con objeto de apreciar más fácilmente el patrón del efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad, en la Fig. 7.1.11 se muestran gráficamente estos mismos resultados. Se efectuaron siete mediciones en el intervalo de temperatura de 66°C a 270°C, todas ellas a un mismo valor de presión de confinamiento y de presión de poro, por lo que todos los resultados obtenidos son utilizables desde el punto de vista del análisis del efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad.

La permeabilidad correspondiente a la medición número 1 resultó ser de 0.40 md. Este valor es aproximadamente un orden de magnitud mayor que los valores de permeabilidad que resultaron de las mediciones que se efectuaron en la misma muestra empleando agua destilada como fluido de trabajo (0.040 md a 25°C, 0.030 md a 120°C, etc. Ver Tabla 7.1.4). La diferencia entre los valores obtenidos en la misma muestra con uno y otro fluido es una evidencia más que demuestra la importancia de tener en cuenta las interacciones fluido-roca cuando se trate de generar, interpretar o aplicar datos de permeabilidad.

El efecto global de la temperatura sobre la permeabilidad exhibe en general el mismo patrón que en los casos de las muestras M107-V3, M107-V1 y que en el de la propia muestra M107-H4 para los resultados de las mediciones efectuadas con agua como fluido de trabajo. Para el incremento de temperatura de 66°C a 94°C la permeabilidad se redujo en 20.0%, mientras que para el incremento de temperatura de 94°C a 130°C la reducción fue de 13.4%. En el transcurso de las mediciones a 94°C y 130°C se observaron ligeros incrementos en la permeabilidad, los cuales pueden interpretarse como indicios de que durante dichas mediciones empezaron a ocurrir fenómenos de disolución. Para cada uno de los incrementos de temperatura subsecuentes (de 130°C a 186°C, de 186°C a 230°C y de 230°C a 270°C) se observaron aumentos muy significantes de la permeabilidad, al grado de que la permeabilidad que se midió a la temperatura de 270°C resultó ser un poco mayor que la que se había medido a 66°C (0.42 md contra 0.40 md, respectivamente). Después de la medición a 270°C se efectuó una nueva medición a 66°C con objeto de investigar el efecto global del ciclo de calentamiento sobre la permeabilidad. En esta medición de control se registró un valor de permeabilidad de 0.46 md, el cual es significativamente mayor que el valor que se registró en la primera medición a la misma temperatura de 66°C (0.40 md). El aumento neto de permeabilidad al completarse el ciclo de calentamiento indica que aunque se haya empleado salmuera saturada con sílice como fluido de trabajo persistió el fenómeno de disolución de uno o más de los minerales componentes de la roca.

Las evidencias discutidas en el párrafo anterior indican que para valores de temperatura mayores que 130°C el efecto aparente de este parámetro sobre la permeabilidad estuvo severamente influenciado por fenómenos de disolución de minerales, de manera que los valores de permeabilidad que se registraron en las mediciones número 4, 5, 6 y 7 incluyen una componente de cambio que no es atribuible directamente al efecto de la temperatura, sino a desequilibrio químico entre el fluido de medición y los minerales de la roca. Por consiguiente, para fines de caracterizar los cambios de permeabilidad atribuibles directamente al efecto de la temperatura sólo se tomaron en cuenta los resultados de las mediciones número 1, 2 y 3. En la Fig. 7.1.12 se muestran graficados estos resultados en

coordenadas logarítmicas, mostrándose también la recta correspondiente al ajuste lineal por mínimos cuadrados. Para los puntos 2 y 3 se emplearon los valores de permeabilidad que se registraron al inicio de las correspondientes mediciones. De esta manera, el coeficiente de correlación del ajuste lineal resultó ser igual a -0.989 .

Resultados de las Mediciones Efectuadas en la Muestra M107-H2

En la Tabla 7.1.6 se presentan los valores numéricos correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M107-H2, mientras que en la Fig. 7.1.13 se muestran gráficamente estos mismos resultados en coordenadas lineales permeabilidad-temperatura. Se efectuaron seis mediciones a diferentes temperaturas en el intervalo de 24°C a 280°C , habiéndose aplicado en todas ellas un mismo valor de presión de confinamiento (10 MPa) y un mismo valor de presión de poro (6.5 MPa). En todas las mediciones se empleó salmuera saturada con sílice como fluido de trabajo.

Con el incremento de temperatura de 24°C a 108°C la permeabilidad del espécimen cambió de 12.2 md a 3.2 md , lo cual en términos porcentuales representa una reducción de 73.8% . Por lo contrario, con el incremento de temperatura de 108°C a 205°C la permeabilidad aumentó de 3.2 md a 10.3 md . En la medición que a continuación se efectuó a 280°C se registró una permeabilidad inicial de 9.9 md ; sin embargo, durante el desarrollo de esta medición la permeabilidad se redujo hasta 1.7 md en un lapso aproximado de 100 minutos, habiéndose observado incluso una ligera tendencia a seguir disminuyendo al darse por concluida esta medición.

Con objeto de investigar la posible causa de la reducción de permeabilidad observada en el transcurso de la medición a 280°C se procedió a invertir la dirección del flujo a través del espécimen de roca, habiéndose observado como consecuencia de ello un recobro significativo de la permeabilidad, aunque no total. Lo anterior puede interpretarse como indicio de que la reducción de permeabilidad durante el flujo a temperatura constante tuvo su origen, al menos en parte, en algún fenómeno de tipo mecánico, tal como la oclusión de los conductos de flujo por depositación de partículas finas. Todo esto sugiere la posible existencia de otro mecanismo causante de variaciones de permeabilidad susceptibles de atribuirse erróneamente al efecto de la temperatura.

A continuación se dejó enfriar la muestra y se efectuó una medición de control a la temperatura de 25°C con objeto de determinar el cambio sufrido por la permeabilidad como consecuencia del calentamiento previo hasta 280°C . Se detectó un ligero aumento con respecto al valor que se había registrado en

la medición inicial a 24°C (14.5 md contra 12.2 md). Este aumento neto de la permeabilidad al completarse el ciclo de calentamiento puede atribuirse a la disolución de minerales de la roca en las mediciones que se efectuaron previamente a altas temperaturas.

Se aplicó finalmente un nuevo incremento de temperatura de 25°C a 110°C, habiéndose producido como consecuencia de ello una reducción de permeabilidad de 14.5 md a 1.9 md, favorablemente comparable a la que ocurrió con el primer incremento de temperatura entre 24°C y 108°C (de 12.2 md a 3.2 md).

Es difícil encontrar una explicación razonable al incremento de permeabilidad que se produjo al incrementarse la temperatura de 108°C a 205°C. Si este notable incremento se hubiera producido únicamente debido a la disolución de minerales de la roca, entonces la permeabilidad correspondiente a la medición número 5, de control, debería haber sido mucho mayor que el valor registrado. Si junto con la anterior se considera la posibilidad de que hubiera ocurrido un fenómeno de tipo mecánico que pudo dar lugar a la oclusión de los conductos de flujo, es fácil entonces percatarse de la dificultad que conlleva en este caso poder arribar a conclusiones razonables acerca de cuales son los cambios de permeabilidad que sí pueden atribuirse directamente y en forma razonable a los cambios de temperatura. Por consiguiente, no se hizo el intento de correlacionar valores para tratar de caracterizar el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de acuerdo al modelo logarítmico. Quizá el mayor beneficio que se obtiene de los resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M107-H2 es a manera de ejemplo ilustrativo de los múltiples aspectos que pueden influir sobre el flujo de fluidos en rocas areniscas, así como de las dificultades involucradas en la obtención de conclusiones razonables acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad a partir de la interpretación de datos experimentales.

Resultados de las Mediciones Efectuadas en la Muestra M127-V2

Los resultados de las mediciones efectuadas en la muestra M127-V2 se muestran numéricamente en la Tabla 7.1.7 y gráficamente en la Fig. 7.1.14. Se efectuaron siete mediciones en el intervalo de 22°C a 270°C, habiéndose aplicado en todas ellas una misma presión de confinamiento y una misma presión de poro.

Según se aprecia en la Fig. 7.1.14, el efecto aparente de la temperatura sobre la permeabilidad exhibe un patrón similar al de la mayoría de las muestras previamente analizadas. Una vez más las evidencias experimentales indican que este patrón es la resultante de dos mecanismos: uno cuyo efecto es reducir la permeabilidad con el aumento de temperatura y otro cuyo efecto se manifiesta en el sentido opuesto. El notable incremento de

permeabilidad que se detectó al completarse el ciclo de calentamiento entre los límites de 23°C y 270°C sugiere fuertemente que el mecanismo que dió lugar al incremento de la permeabilidad está directamente relacionado con fenómenos de disolución de minerales de la muestra de roca. Con el incremento de temperatura de 23°C a 58°C la permeabilidad se redujo inicialmente de 1.68 md a 1.38 md; sin embargo, durante el transcurso de la medición a 58°C la permeabilidad se incrementó hasta 1.83 md, sobrepasando con ello la permeabilidad que se había medido a 23°C. Este mismo comportamiento se observó en relación con los siguientes tres incrementos de temperatura y con las correspondientes mediciones a las temperaturas de 87°C, 128°C y 158°C. En los dos últimos incrementos de temperatura (de 158°C a 210°C y de 210°C a 270°C) la permeabilidad ya ni siquiera exhibió una reducción inicial, sino un bien definido aumento. Debido a que no fue posible discernir algunos cambios de permeabilidad atribuibles directamente a la temperatura, tampoco en este caso se intentó correlacionar valores para tratar de caracterizar el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de acuerdo al modelo logarítmico.

7.1.2 Discusión Acerca de la Caracterización de los Cambios de Permeabilidad Directamente Atribuibles al Efecto de la Temperatura

En esta subsección se discuten algunos aspectos adicionales relacionados con la ecuación que en la subsección precedente se propuso como modelo empírico representativo del efecto directo de la temperatura sobre la permeabilidad. Se presentan evidencias experimentales independientes que respaldan su validez, se presenta una tabla resumiendo los parámetros que describen el grado de ajuste de los datos experimentales con respecto a la expresión matemática y finalmente se presenta una breve discusión acerca de las aplicaciones prácticas de dicha correlación empírica.

En la Fig. 7.1.15 se muestra gráficamente los resultados que se obtienen al ajustar linealmente por mínimos cuadrados los valores logarítmicos de algunos datos experimentales permeabilidad-temperatura que fueron reportados por Casse [1974] y Aruna [1977]. Los datos de Casse [1974] corresponden a mediciones de permeabilidad en muestras de las rocas areniscas "Boise" y "Bandera", mientras que los datos de Aruna [1977] corresponden a mediciones en una muestra de roca arenisca "Masillon". Ambos autores realizaron las mediciones en el intervalo de temperatura de 25°C a 150°C, empleando agua destilada como fluido de trabajo. Las líneas rectas que aparecen graficadas en la Fig. 7.1.15 representan el mejor ajuste de los datos experimentales conforme al modelo de variación lineal en coordenadas logarítmicas. Se aprecia que en los tres casos el ajuste es excelente, lo que en términos cuantitativos está demostrado por los respectivos coeficientes de correlación, los

cuales resultaron ser igual a -0.991 para la muestra BOISE-7, -0.973 para la muestra BEREAL-2 y -0.997 para la muestra MASILLON-3.

Parece razonable suponer que la reducción de permeabilidad con el aumento de temperatura que se aprecia en los datos de Casse [1974] y de Aruna [1977] no está afectada en forma significativa por fenómenos de disolución de minerales, ya que las mediciones se efectuaron dentro de un intervalo de temperatura en el cual, de acuerdo a las evidencias mostradas en la subsección precedente, este tipo de fenómenos ocurren solamente en pequeña escala. Por consiguiente, los datos de Casse [1974] y de Aruna [1977] pueden ser considerados como evidencia independiente que respalda la validez de la Ec. 7.1.1 en su carácter de expresión representativa de los cambios de permeabilidad susceptibles de ser atribuidos al efecto directo de la temperatura.

Los parámetros que se requieren para describir adecuadamente el ajuste de los datos experimentales permeabilidad-temperatura conforme al modelo de correlación lineal en coordenadas logarítmicas son el coeficiente de la correlación (cc), el parámetro b y la permeabilidad k_0 que de acuerdo al ajuste corresponde a una temperatura arbitraria de referencia T_0 (ver Ec. 7.1.1). La pendiente de la recta que mejor se ajusta a los datos experimentales está dada por $-b$, de manera que la reducción de la permeabilidad con el aumento de la temperatura será más acentuada a medida que sea mayor el valor del parámetro b . En la Tabla 7.1.8 se muestran los valores de los parámetros cc , b y k_0 correspondientes a los ajustes de datos experimentales de las rocas areniscas de Cerro Prieto, los cuales se discutieron en la subsección precedente, así como los correspondientes a los ajustes de los datos reportados por Casse [1974] y por Aruna [1977]. Los valores de k_0 que figuran en la Tabla 7.1.8 son los valores de permeabilidad que conforme al respectivo ajuste corresponden a la temperatura de 25°C . En los casos de las muestras M107-H2 y M127-V2, para las cuales no fue posible generar ajustes de los datos, el valor reportado para k_0 no tiene el significado antes descrito, sino que corresponde al valor de permeabilidad que se registró en dichas muestras en la medición a temperatura ambiente (aproximadamente 25°C) antes del ciclo de calentamiento. La inclusión de estos valores en la Tabla 7.1.8 permite hacer una comparación más completa de la permeabilidad del grupo de muestras de roca arenisca involucradas en el presente estudio y facilita la exposición de algunos comentarios subsecuentes.

Con la finalidad de poder apreciar en forma más objetiva la magnitud y las diferencias del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad en las diferentes muestras, en la Tabla 7.1.8 también se incluyen los valores de la reducción porcentual de permeabilidad que de acuerdo al ajuste de los datos experimentales corresponde al incremento de temperatura de 25°C a

200°C. Tomando como base de comparación estos valores se aprecia que el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad se manifiesta en una gama muy amplia de intensidades. Ocupando los extremos del espectro de influencia de la temperatura se tiene por una parte el caso de la muestra M129-V3, para la cual corresponde el valor mínimo de reducción de permeabilidad (16.2%), mientras que en el extremo opuesto se tiene el caso de la muestra M107-V1, para la cual la reducción adquiere el valor máximo (99.3%). Como antes se indicó, la intensidad del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad está caracterizada, aunque no en forma directamente proporcional, por el parámetro empírico b .

Con objeto de proporcionar la visión de conjunto del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad dentro del contexto de la correlación empírica bajo discusión, en la Fig. 2.1.16 se muestran las gráficas de la Ec. 7.1.1 para los valores de b que resultaron del ajuste de los datos experimentales de las muestras de las rocas areniscas Cerro Prieto, Boise, Berea y Masillon. Las gráficas cubren el intervalo de temperatura de 25°C a 300°C y la permeabilidad se representa por medio de valores normalizados con respecto a la permeabilidad que según el ajuste de datos corresponde a la temperatura de 25°C. En esta figura pueden apreciarse en toda su extensión los detalles relativos a la magnitud y a las diferencias del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las muestras de roca arenisca consideradas en el presente estudio. Los resultados mostrados indican en forma bastante conclusiva que los datos de permeabilidad derivados de mediciones de laboratorio en especímenes sometidos a temperatura ambiente pueden diferir en forma muy significativa de la permeabilidad de las rocas a las condiciones de alta temperatura existentes en un yacimiento.

La correlación empírica que según las evidencias experimentales hasta aquí mostradas y discutidas existe entre la permeabilidad y la temperatura de las rocas areniscas puede tener importantes aplicaciones prácticas como algoritmo de interpolación o de extrapolación, tanto en lo que se refiere a la planeación del trabajo de laboratorio para caracterizar la permeabilidad de las rocas como en lo que respecta al desarrollo de actividades relacionadas con la evaluación y modelación de los yacimientos geotérmicos y petroleros. La utilidad de la correlación sería máxima en el caso hipotético de que el parámetro b pudiera ser fácilmente determinado en forma independiente, ya que entonces bastaría que se efectuara una sola medición a condiciones ambiente para determinar la permeabilidad de la roca como función de la temperatura. Puesto que parece poco probable que se pueda llegar a desarrollar una técnica confiable para determinar el parámetro b en forma independiente y con relativa facilidad, se requiere entonces de efectuar al menos dos mediciones de permeabilidad a diferentes temperaturas para evaluar directamente dicho parámetro b y caracterizar de esa

manera el efecto de la temperatura.

Volviendo de nuevo la atención a la Tabla 7.1.8 y examinando los valores de k_0 se aprecia que existen grandes diferencias entre la permeabilidad de las muestras M107-V1, M107-H2, M107-V3 y M107-H4, no obstante que

todas ellas se extrajeron del mismo fragmento de un núcleo de perforación del pozo M107 de Cerro Prieto. Las diferencias de permeabilidad antes aludidas pueden atribuirse parcialmente al hecho de que en algunas de estas muestras las mediciones se efectuaron empleando agua destilada como fluido de trabajo, mientras que en otras las mediciones se efectuaron empleando salmuera. Debido a lo anterior y teniendo en cuenta que las interacciones fluido-roca pueden ser muy diferentes dependiendo de si se emplea agua o salmuera como fluido de medición, resulta entonces que se carece de una buena base para hacer una comparación global de los resultados. Las diferencias entre la permeabilidad de las muestras en las cuales las mediciones se efectuaron empleando salmuera pueden atribuirse a dos razones básicas, según se discute a continuación. Una de ellas es que en las rocas areniscas la permeabilidad en la dirección paralela al plano de depositación (dirección en la cual se aplicó el flujo en el caso de las muestras M107-H2 y M107-H4) tiende generalmente a ser mayor que la permeabilidad en la dirección perpendicular a dicho plano (dirección en la cual se aplicó el flujo en el caso de las muestras M107-V1 y M107-V3). La otra razón es que el fragmento de núcleo del cual se extrajeron las muestras exhibía variaciones petrológicas muy significantes a lo largo de sus aproximadamente 30 cm de longitud. Se pudo apreciar a simple vista que el tamaño de los granos decrecía drásticamente desde un extremo del núcleo, en donde se tenía la textura de una roca arenisca típica, hacia el extremo opuesto en donde se observó la presencia de un contacto arenisca lutita con una textura muy fina, similar a la de un cemento de construcción. La muestra M107-V1 se extrajo del extremo que exhibía las características típicas de las areniscas, mientras que la muestra M107-H4 fue extraída del extremo que presentaba el contacto arenisca-lutita. Por su parte, las muestras M107-H2 y M107-H4 fueron extraídas respectivamente de la porción adyacente al extremo con características bien definidas de arenisca y de la porción adyacente al extremo donde se tenía el contacto arenisca-lutita. Las diferencias entre las permeabilidades de las muestras del núcleo del pozo M107 son ilustrativas de los cambios que se dan en las propiedades físicas de las rocas en la vecindad de una zona donde existe transición de las características litológicas de la formación.

Tabla 7.1.1. Resultados de las Mediciones de Permeabilidad

MUESTRA M107-V3

Fluido de Permeabilidad: Agua Destilada
 Porosidad de la Muestra: 22.3 %

MEDICION NUMERO	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPa)	PRESION DE PORO MEDIA (MPa)	PERMEABILIDAD ABSOLUTA (milidarcys)
1	25	10	5.6	0.047
2	25	12	5.6	0.038
3	25	12	5.6	0.041
4	25	24	5.6	0.036
5	105	12	5.6	0.029
6	206	12	5.6	0.022
7	260	12	5.6	0.023
8	260	24	5.6	0.022
9	25	12	5.6	0.057

Tabla 7.1.2. Resultados de las Mediciones de Permeabilidad

MUESTRA M129-V3

Fluido de Permeabilidad: Salmuera "Cerro Prieto"
 Porosidad de la Muestra: 20.4%

MEDICION NUMERO	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPa)	PRESION DE PORO MEDIA (MPa)	PERMEABILIDAD ABSOLUTA (mildarcys)
1	22	10	6.4	1.65
2	74	10	6.4	1.49
3	126	10	6.4	1.44
4	206	10	6.4	1.34
5	270	10	6.4	1.35
6	250	22	6.4	1.28
7	25	10	6.4	1.43
8	25	22	6.4	1.24
9	25	34	6.4	1.13
10	25	10	6.4	1.37

Tabla 7.1.3. Resultados de las Mediciones de Permeabilidad

MUESTRA M107-V1

Fluido de Permeabilidad: Salmuera "Cerro Prieto"
 Porosidad de la Muestra: 21.2%

MEDICION NUMERO	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPa)	PRESION DE PORO MEDIA (MPa)	PERMEABILIDAD ABSOLUTA (milidarcys)
1†	23	10	6.7	0.038 0.006
2	23	10	6.7	1.27
3	112	10	6.7	0.04
4	23	10	6.7	1.19
5	210	10	6.7	0.01
6	255	10	6.7	0.01 0.16
7	255	22	14.1	0.15
8	180	10	6.7	0.15
9	24	10	6.7	1.60
10†	24	10	6.7	0.88

† En estas mediciones se empleó agua destilada como fluido de permeabilidad.

Tabla 7.1.4: Resultados de las Mediciones de Permeabilidad

MUESTRA M107-H4

Fluido de Permeabilidad: Agua Destilada

Porosidad de la Muestra: 21.5%

MEDICION NUMERO	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPa)	PRESION DE PORO MEDIA (MPa)	PERMEABILIDAD ABSOLUTA (milidarcys)
1	25	12	5.4	0.040
2	120	12	5.4	0.030
3	200	12	5.4	0.028
4	265	12	5.4	0.032
5	265	24	5.4	0.027

Tabla 7.1.5. Resultados de las Mediciones de Permeabilidad

MUESTRA M107-H4

 Fluido de Permeabilidad: Salmuera "Cerro Prieto"
 Porosidad de la Muestra: 21.5%

MEDICION NUMERO	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPa)	PRESION DE PORO MEDIA (MPa)	PERMEABILIDAD ABSOLUTA (milidarcys)
1	66	10	6.3	0.40
2	94	10	6.3	0.32 0.33
3	130	10	6.3	0.29 0.30
4	186	10	6.3	0.34 0.36
5	230	10	6.3	0.41
6	270	10	6.3	0.42
7	66	10	6.3	0.46

Tabla 7.1.6. Resultados de las Mediciones de Permeabilidad

MUESTRA M107-H2

Fluido de Permeabilidad: Salmuera "Cerro Prieto"
 Porosidad de la Muestra: 20.0%

MEDICION NUMERO	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPa)	PRESION DE PORO MEDIA (MPa)	PERMEABILIDAD ABSOLUTA (mildarcys)
1	24	10	6.5	12.2
2	108	10	6.5	3.2
3	205	10	6.5	10.3
4	280	10	6.5	8.7 2.1
5	25	10	6.5	14.5
6	110	10	6.5	1.9

Tabla 7.1.7. Resultados de las Mediciones de Permeabilidad

MUESTRA M127-V2

 Fluido de Permeabilidad: Salmuera "Cerro Prieto"
 Porosidad de la Muestra: 19.9%

MEDICION NUMERO	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPa)	PRESION DE PORO MEDIA (MPa)	PERMEABILIDAD ABSOLUTA (milidarcys)
1	23	10	6.6	1.68
2	58	10	6.6	1.38 1.83
3	87	10	6.6	1.76 1.90
4	128	10	6.6	1.57 1.70
5	158	10	6.6	1.65
6	210	10	6.6	1.97
7	270	10	6.6	2.02
8	22	10	6.6	2.76

Tabla 7.1.8. Resumen de los Parámetros Descriptivos del Ajuste Lineal de los Valores Logarítmicos de los Datos Experimentales Permeabilidad-Temperatura.

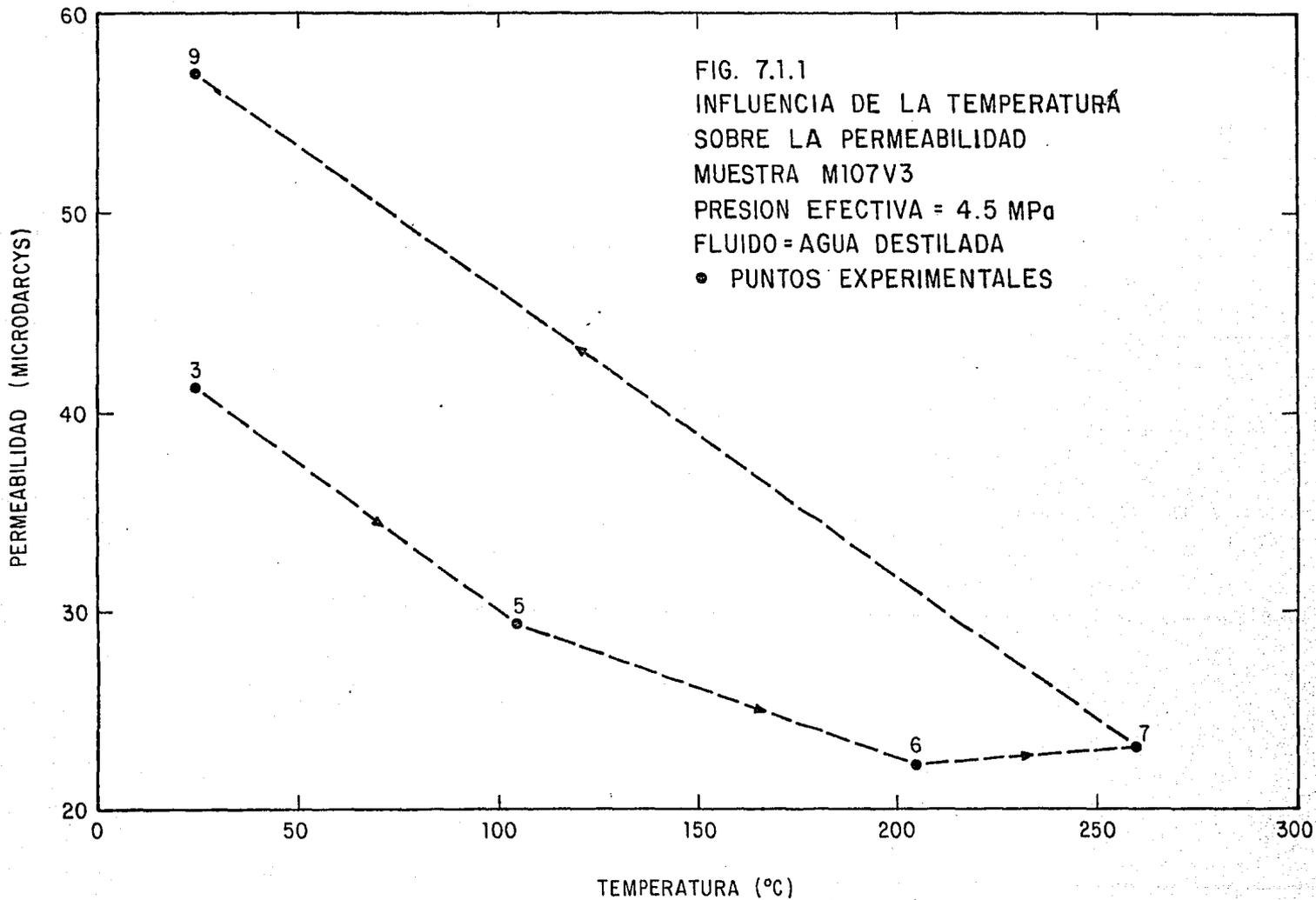
Muestra	Fluido	Coefficiente de Correlación	k_0 (md)	b	$\Delta k/k_0$ (%)
M107-V1	Salmuera	-0.994	1.09	2.400	-99.3
M107-H2	Salmuera	-----	12.2	-----	-----
M107-V3	Agua	-0.984	0.04	0.247	-40.2
M107-H4	Agua	-0.998	0.04	0.174	-30.3
M107-H4	Salmuera	-0.989	0.65	0.513	-65.6
M127-V2	Salmuera	-----	1.59	-----	-----
M129-V3	Salmuera	-0.989	1.63	0.085	-16.2
BOISE-7*	Agua	-0.991	1.39	0.517	-34.1
BEREA-12*	Agua	-0.973	0.11	0.316	-48.2
MASILLON-3†	Agua	-0.997	0.70	0.417	-58.0

(*) Según datos permeabilidad-temperatura reportados por Casse [1974].

(†) Según datos permeabilidad-temperatura reportados por Aruna [1977]

k_0 es la permeabilidad que conforme al ajuste corresponde a $T=25^\circ\text{C}$.

$\Delta k/k_0$ es el cambio de permeabilidad que conforme al ajuste corresponde al incremento de temperatura de 25°C a 300°C .



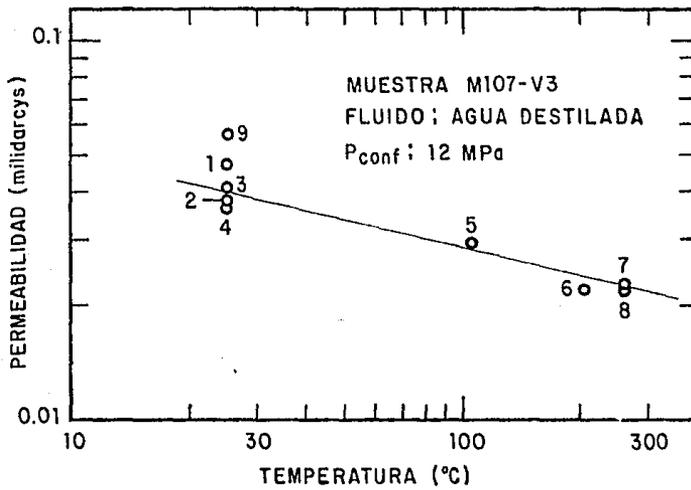
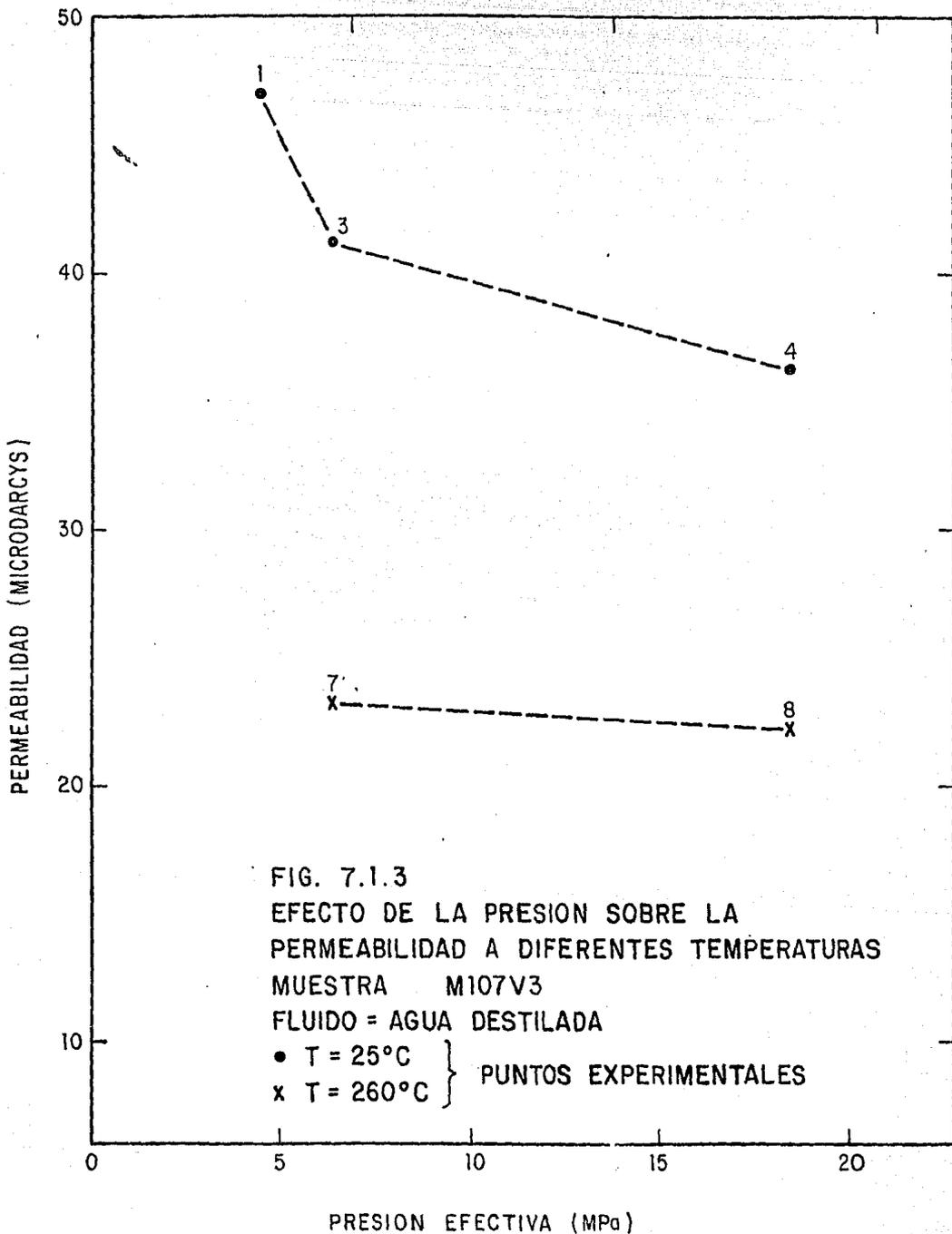
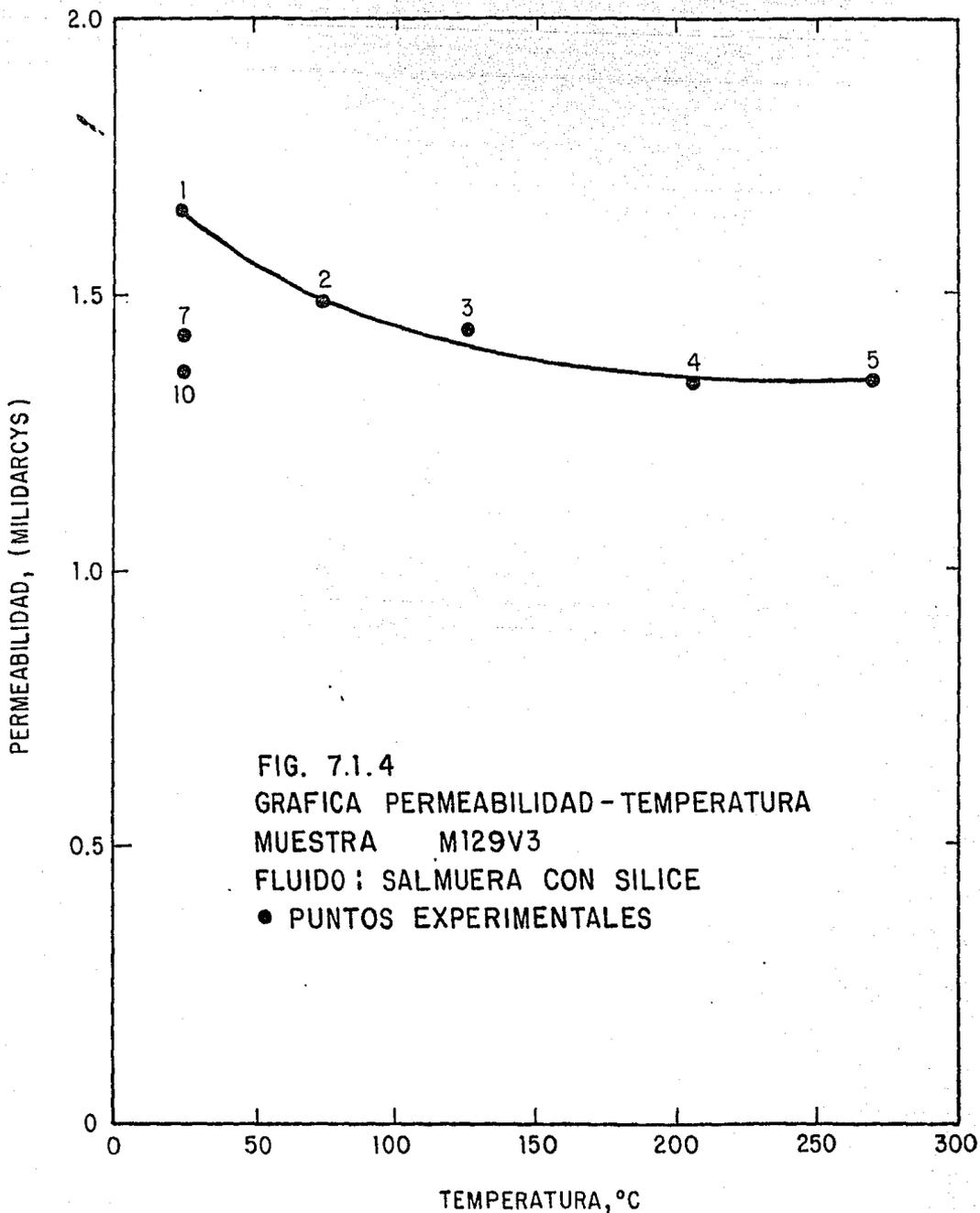


Fig. 7.1.2 Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-V3.





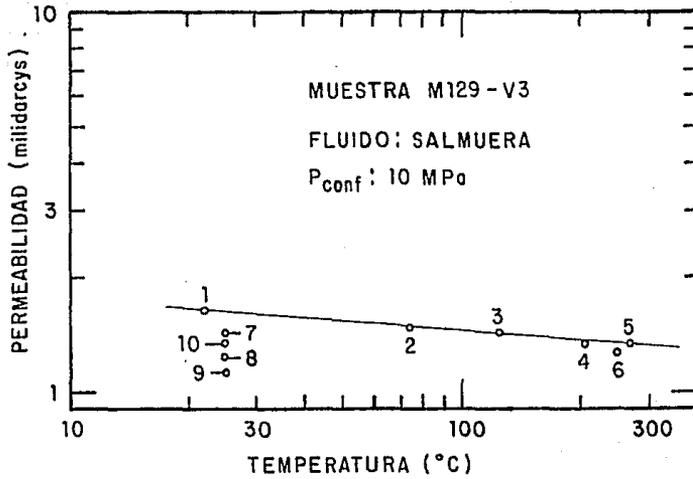
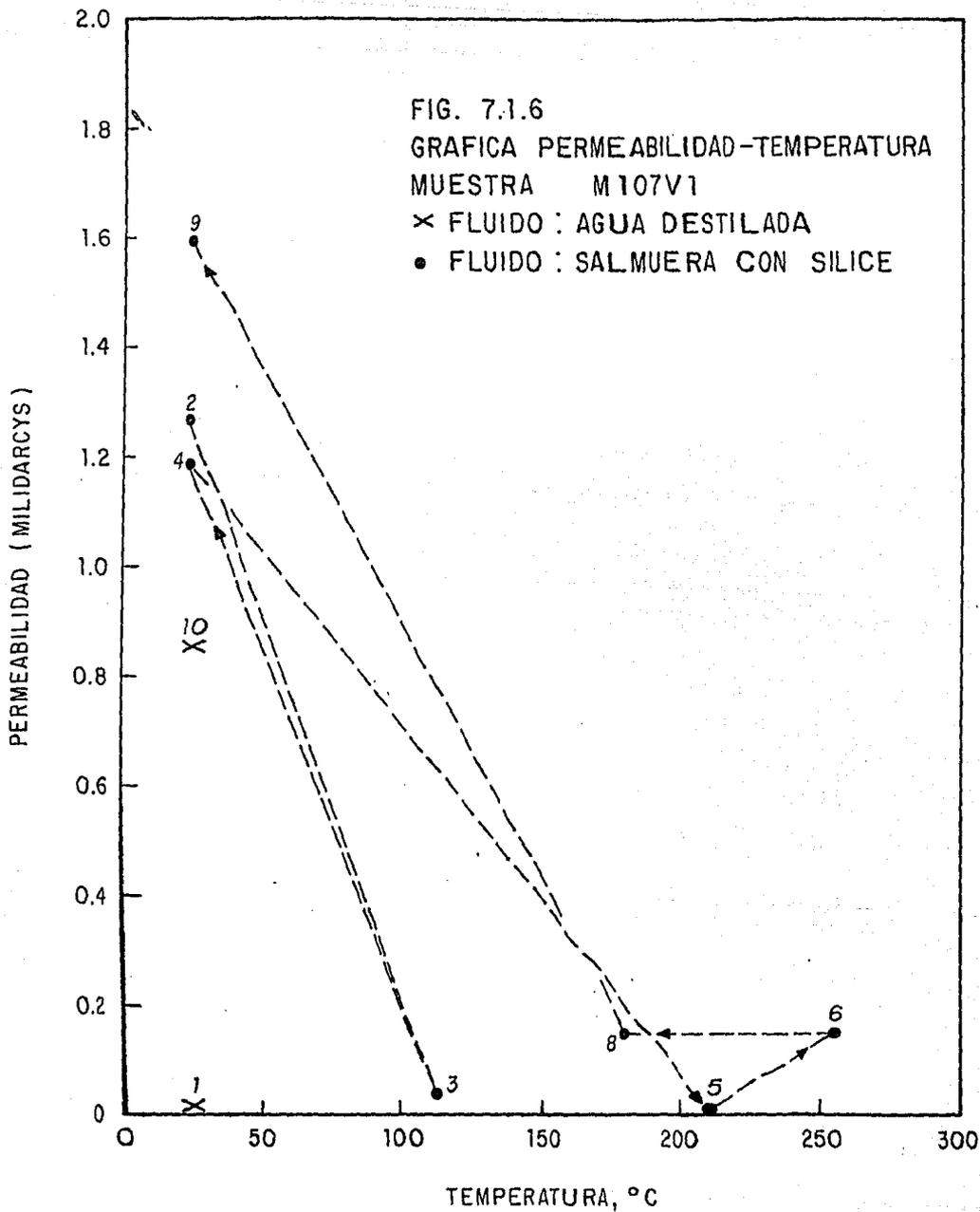
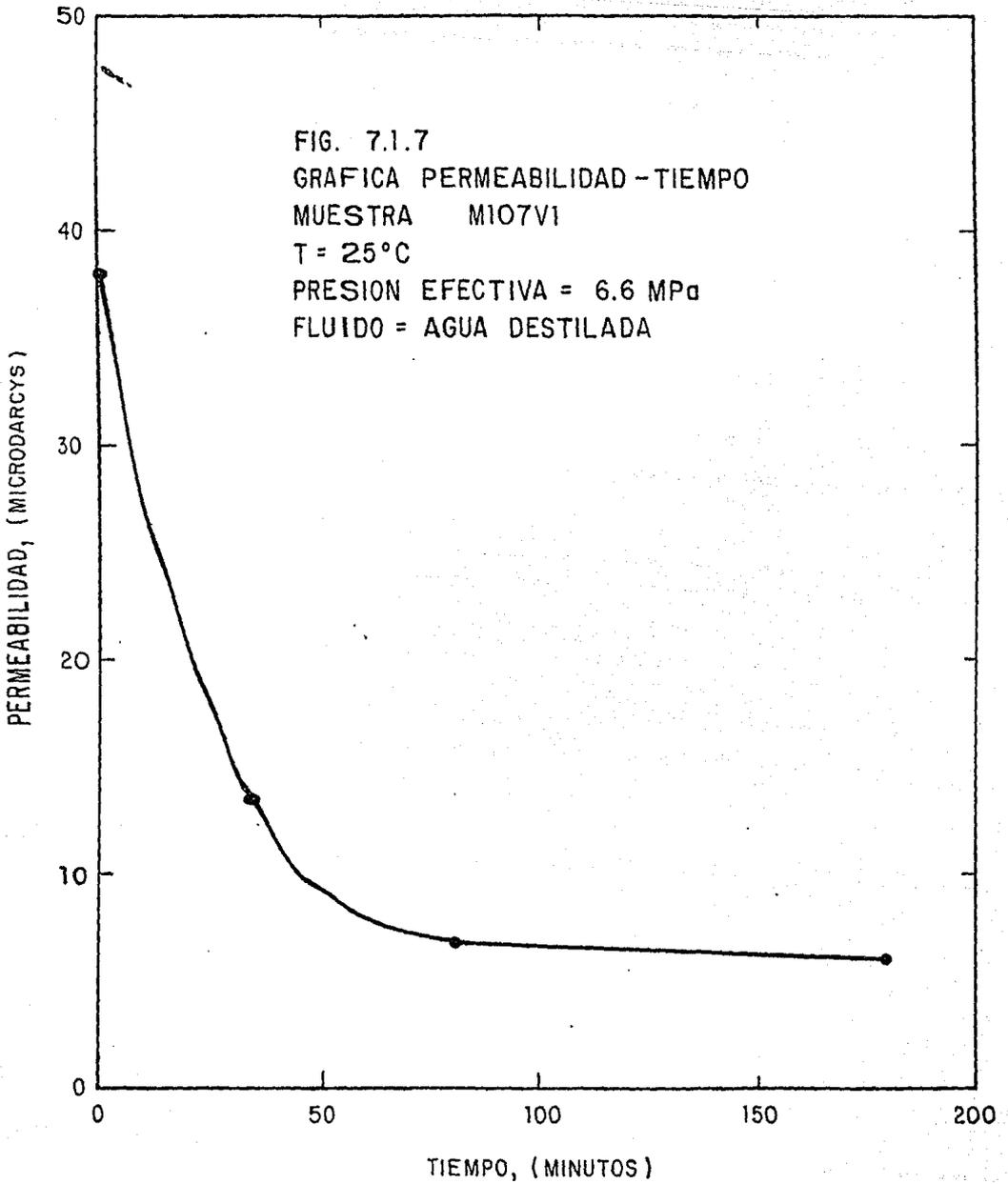


Fig. 7.1.5 Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M129-V3.





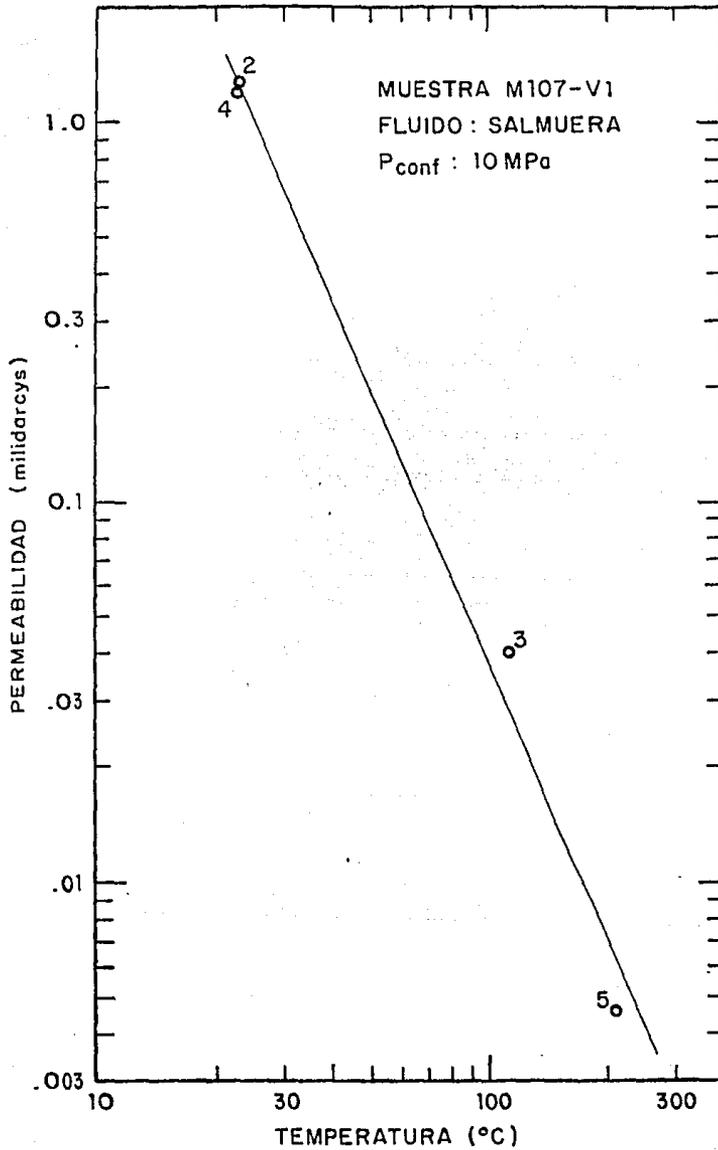
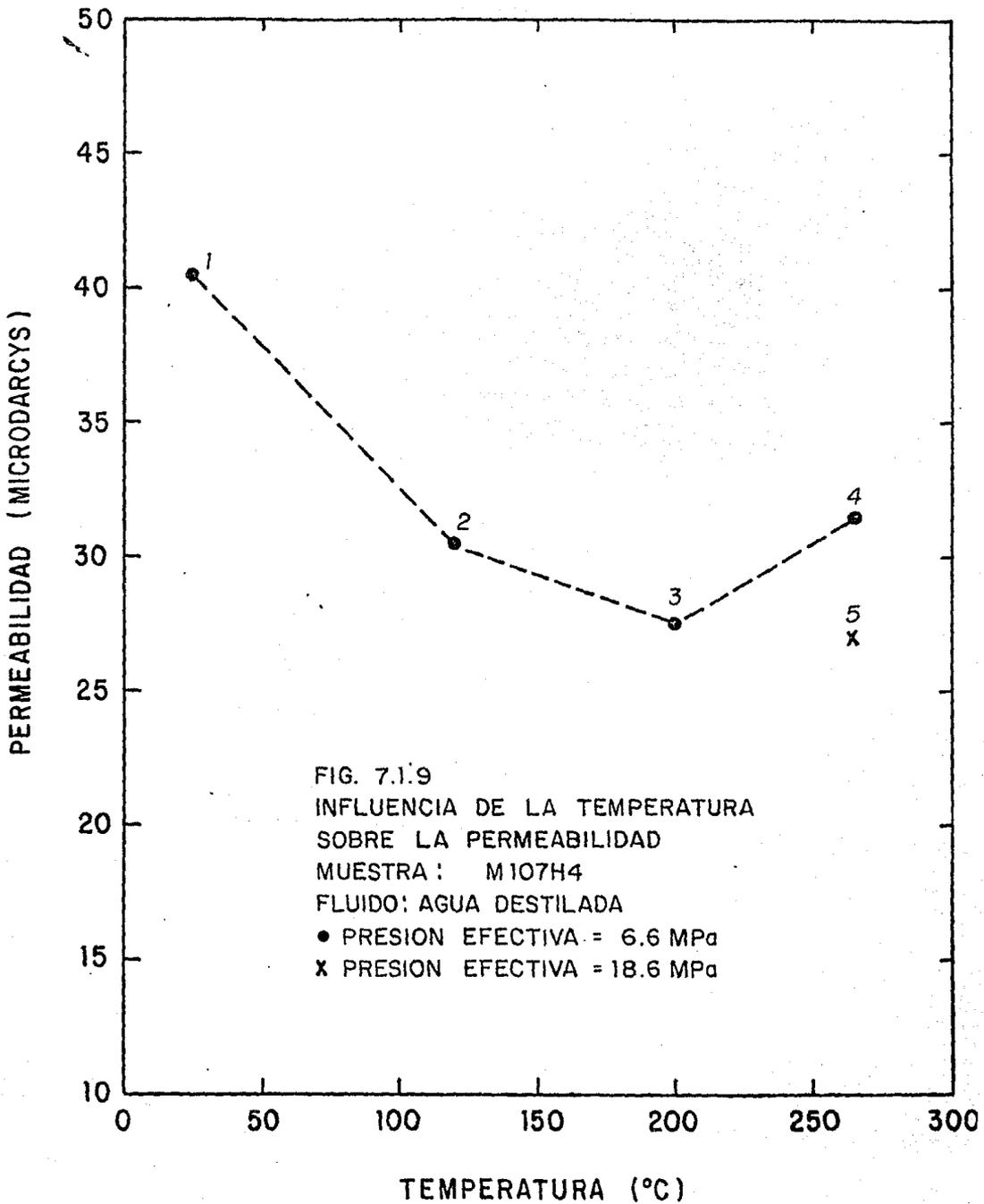


Fig. 7.1.8 Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-V1.



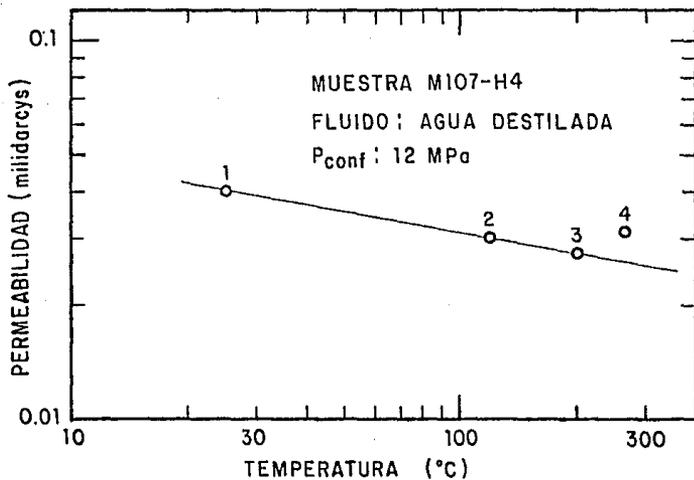
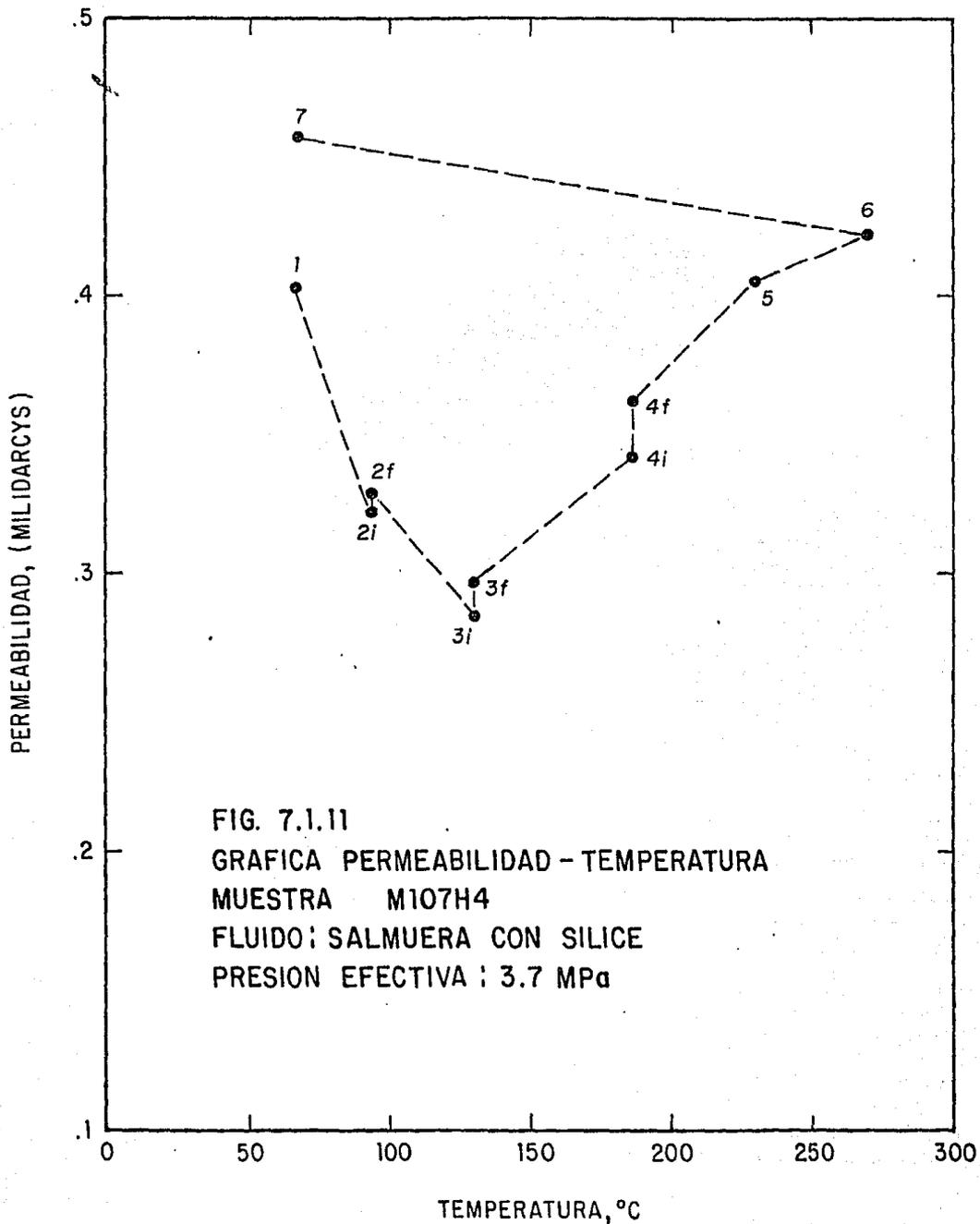


Fig. 7.1.10 Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-H4 (con agua como fluido de trabajo).



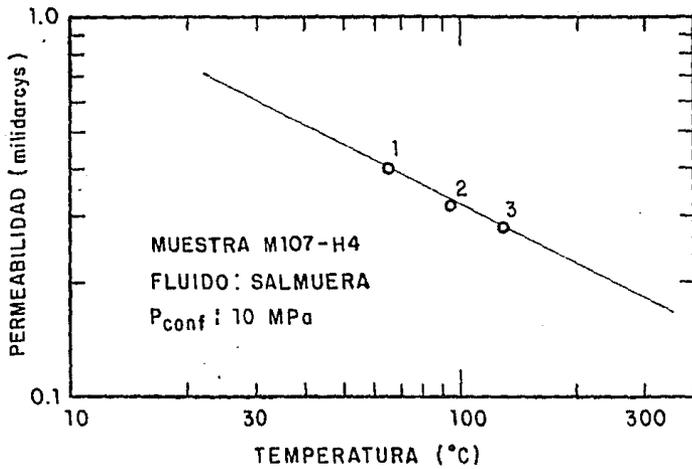
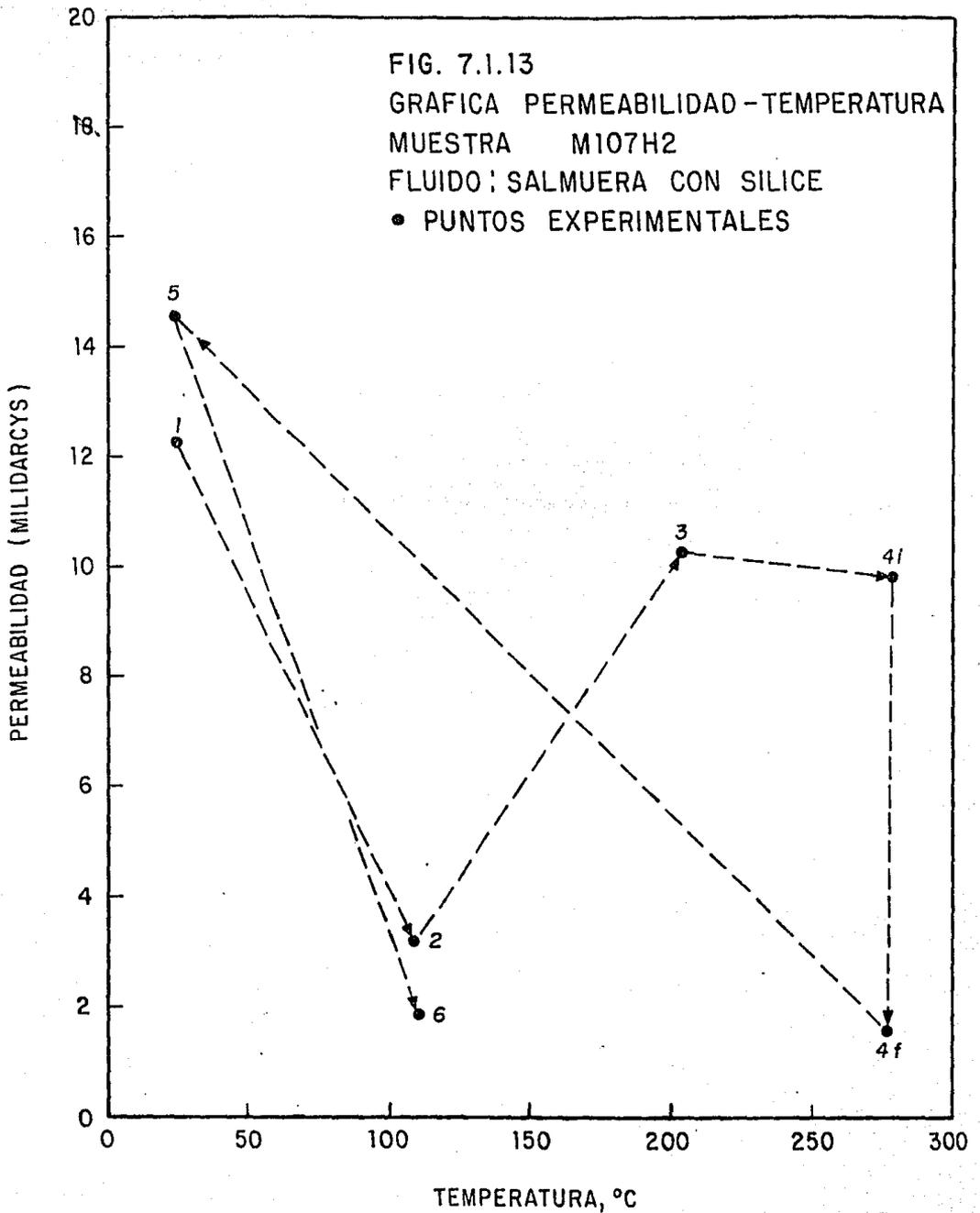


Fig. 7.1.12 Gráfica logarítmica de resultados de las mediciones de permeabilidad efectuadas en la muestra M107-H4 (con salmuera como fluido de trabajo).



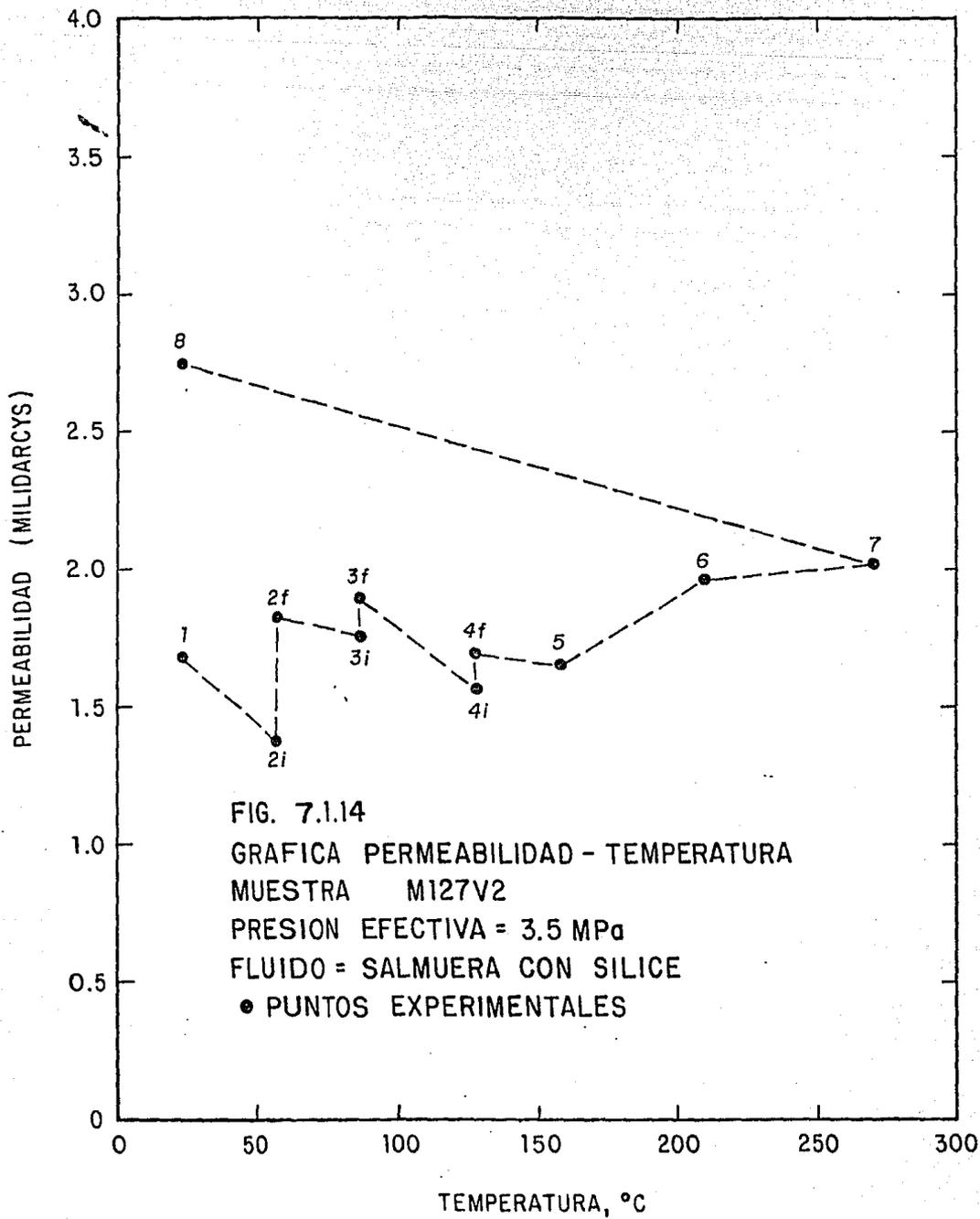


FIG. 7.1.14
 GRAFICA PERMEABILIDAD - TEMPERATURA
 MUESTRA M127V2
 PRESION EFECTIVA = 3.5 MPa
 FLUIDO = SALMUERA CON SILICE
 ● PUNTOS EXPERIMENTALES

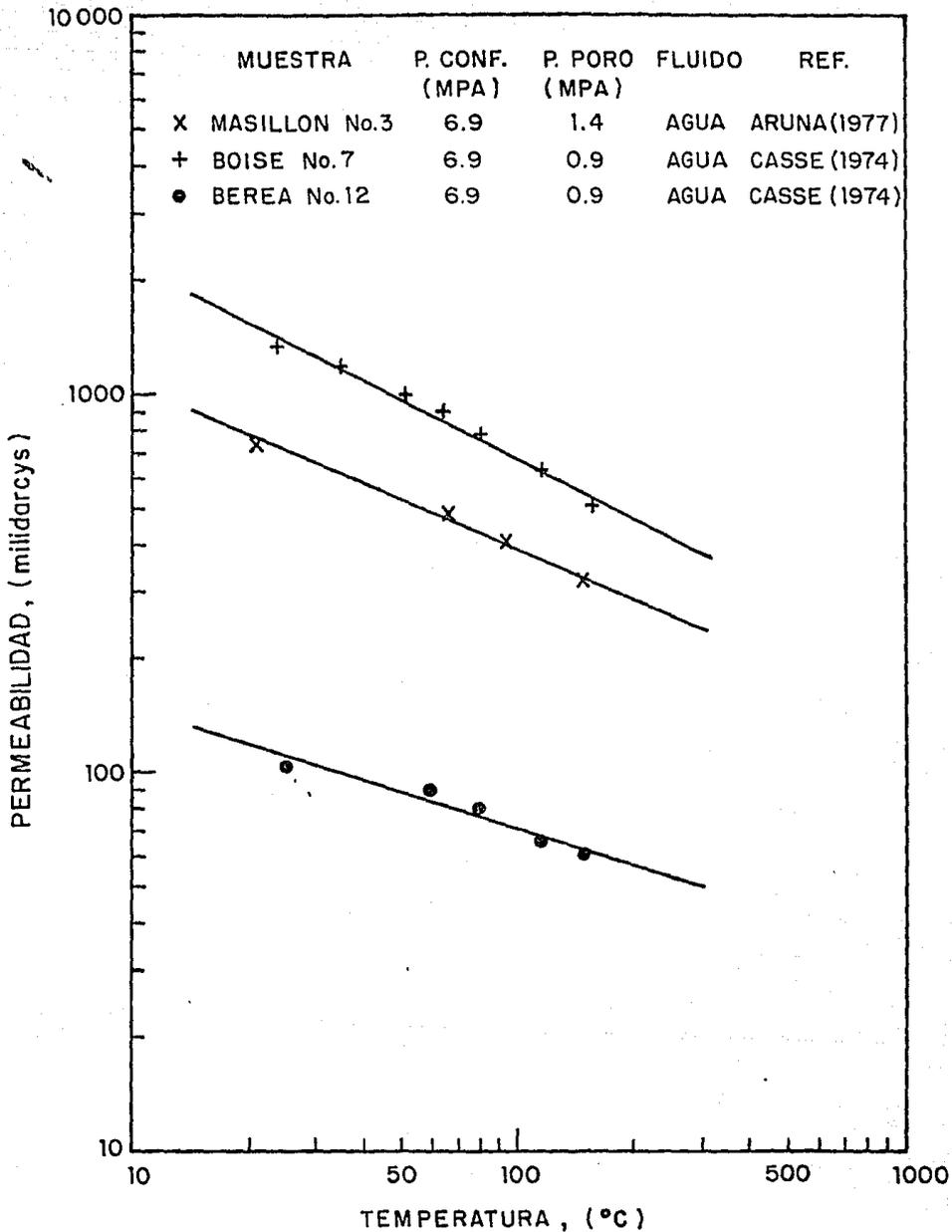


Fig. 7.1.15 Efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de algunas rocas areniscas. (Según datos de Casse [1974] y Aruna [1977]).

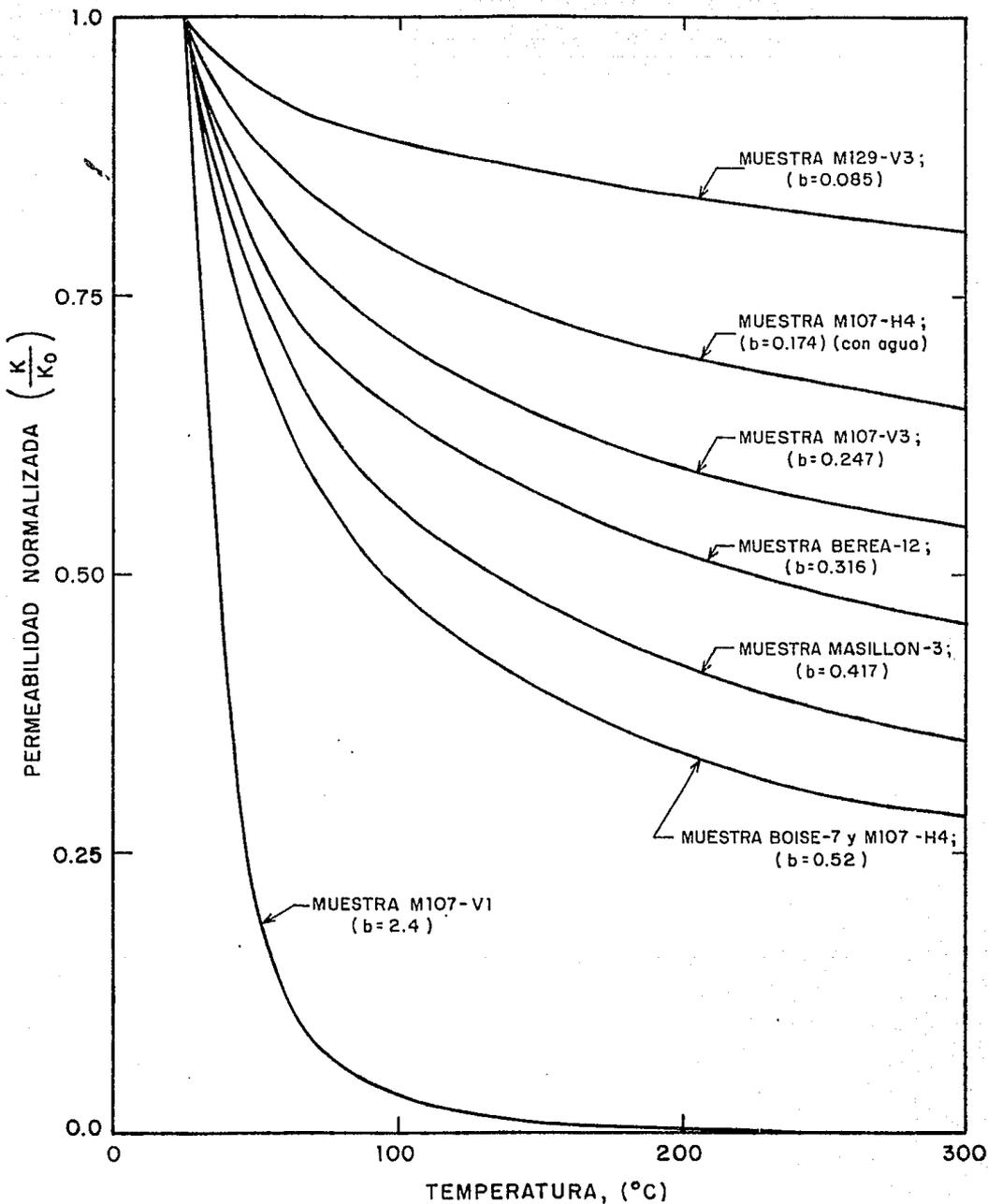


Fig. 7.1.16 Efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas según el ajuste lineal en coordenadas logarítmicas de datos experimentales (K_0 es la permeabilidad ajustada a 25°C).

7.2 ESTUDIOS PARA INVESTIGAR EL ORIGEN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA PERMEABILIDAD

En esta sección se presentan los resultados de los estudios experimentales y analíticos que como parte de este trabajo se realizaron con objeto de investigar el origen del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas, fenómeno cuya ocurrencia quedó demostrada por medio de las evidencias experimentales que fueron presentadas y discutidas en la sección precedente. Como parte integral de lo anterior se trató de encontrar alguna posible razón que permitiera explicar y conciliar las inconsistencias que tradicionalmente han caracterizado a los resultados de las investigaciones sobre este tópico. Los estudios se enfocaron por una parte a determinar el grado en que la disminución de permeabilidad asociada al aumento de la temperatura podía ser atribuida a una supuesta reducción de la porosidad de la roca propiciada por el propio incremento de la temperatura. En este respecto se llegó a la conclusión de que la reducción de porosidad derivada de la expansión térmica de los materiales constituyentes de las rocas areniscas no es el mecanismo principal que dá origen a la reducción de la permeabilidad. Otra línea de la investigación se desarrolló atendiendo a la hipótesis planteada por algunos autores en el sentido de que la disminución de permeabilidad puede tener su origen en una interacción física entre el cuarzo de la roca y el agua, fenómeno el cual presuntamente daría lugar a la reducción del área efectiva de los poros y conductos de flujo (por ej. Aruna [1977] y Danesh et al. [1978]). Analizando diversos aspectos que se derivan de considerar su ocurrencia en un modelo simple de un medio poroso se llegó a la conclusión de que este fenómeno tiene el potencial de producir cambios de permeabilidad cuya significancia depende inversamente del diámetro de los conductos de flujo. Esta conclusión, aunque proviene del análisis del fenómeno en un modelo muy simplificado, puede constituir la base para explicar las diferencias e inconsistencias de los resultados experimentales que se han reportado en la literatura acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad.

7.2.1 Estudios Para Investigar la Vinculación Entre la Reducción de la Permeabilidad y la Reducción de la Porosidad

Aunque la existencia de una correlación generalizada entre la permeabilidad y la porosidad de los medios porosos es algo que está fuera de consideración debido a la gran diversidad de configuraciones geométricas que en la práctica puede adoptar una estructura porosa, los resultados emanados de teorías tales como la de Kozeny y la del modelo básico de tubos capilares indican en forma bastante concluyente, al menos desde el punto de vista

cualitativo, que estas dos propiedades están relacionadas entre sí y con otras propiedades directamente vinculadas con la configuración geométrica de la estructura porosa (ver sección 2.3). Por consiguiente, al emprender la tarea de investigar el origen del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad parece lógico que uno de los principales aspectos que deben de considerarse es el que se refiere a determinar el grado en que la disminución de permeabilidad puede atribuirse a posibles reducciones de porosidad derivadas del propio incremento de la temperatura. La ejecución de este aspecto de la investigación requiere que en primer lugar se evalúe el efecto de la temperatura sobre la porosidad y que en segundo lugar se haga la estimación del grado en que la reducción de la permeabilidad puede atribuirse a los cambios de porosidad que hayan sido detectados.

A continuación se presentan los resultados que como parte del presente trabajo se obtuvieron en lo que respecta a la cuantificación del efecto de la temperatura sobre la porosidad y a la valoración del grado en que la reducción de la permeabilidad puede atribuirse a los cambios de porosidad.

Efecto de la Temperatura Sobre la Porosidad

Se determinó el efecto de la temperatura sobre la porosidad en cuatro especímenes de rocas areniscas, habiéndose cubierto en cada uno de los casos el intervalo de temperatura de 20°C a 280°C. Dos de las muestras fueron obtenidas de núcleos de perforación del campo geotérmico Cerro Prieto, una de un núcleo del pozo M94 y la otra de un núcleo del pozo M149. Las otras dos muestras fueron extraídas de bloques comerciales de rocas areniscas típicas, una de un bloque de la roca denominada "Berea" y la otra de un bloque de la roca denominada "Colton". Los datos obtenidos representan el efecto de la temperatura sobre la porosidad de las muestras de roca para el caso particular de una diferencia de 20.7 MPa entre la presión de confinamiento y la presión de poro.

La evaluación del efecto de la temperatura sobre la porosidad se llevó a cabo empleando la Ec. 3.5.19. Los datos experimentales que se requirieron para aplicar esta ecuación se obtuvieron por medio de las mediciones de expansión térmica lineal que se describieron en la sección 5.2. En las Figs. 7.2.1 a 7.2.4 se muestran los resultados de estas mediciones en forma de gráficas de expansión térmica lineal unitaria contra temperatura. En las Tablas 7.2.1 a 7.2.4 se proporcionan a intervalos de 20°C los datos numéricos de estos mismos resultados, junto con los correspondientes valores descriptivos del efecto de la temperatura sobre la porosidad que se calcularon por medio de la Ec. 3.5.19. En la Fig. 7.2.5 se muestra gráficamente el resumen del efecto de la temperatura sobre la

porosidad para las cuatro muestras de roca consideradas en el estudio.

Los resultados obtenidos indican que con el incremento de temperatura de 20°C a 280°C la porosidad de las muestras M149-1, BEREA-1 y COLTON-1 se redujo en 1.6%, mientras que la porosidad de la muestra M94-1 se redujo en 2.0%. Estos valores están dentro de los límites impuestos por la física del fenómeno, es decir, son menores que la reducción de porosidad correspondiente al caso extremo en que las rocas estuvieran constituidas únicamente por cuarzo y que el total de la expansión del material sólido ocurriera únicamente a expensas del volumen de los poros. Aplicando la Ec. 3.4.1.b en la misma forma como se procedió en el caso de los ejemplos de la subsección 3.4.1 se obtiene que la máxima reducción de porosidad que podría esperarse con el incremento de temperatura de 20°C a 280°C sería de 4.8% para la muestra M94-1, de 6.7% para la muestra M149-1, de 9.6% para la muestra COLTON-1 y de 5.2% para la muestra BEREA-1.

Los únicos datos encontrados en la literatura que se pueden emplear con fines de comparación son los publicados por Greenwald et al. [1982], (ver sección 4.2). Estos autores reportaron los siguientes valores de reducción de porosidad con el incremento de temperatura de 30°C a 170°C para el caso de tres muestras de rocas areniscas sometidas a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 6.9 MPa de presión de poro: 3.0% en una muestra de roca Boise ($\phi_0=0.267$), 3.8% en una muestra de roca Berea ($\phi_0=0.243$) y 4.4% en una muestra de roca Bandera ($\phi_0=0.200$). Aplicando nuevamente la Ec. 3.4.1.b se obtiene que la reducción máxima de porosidad que podría esperarse para estas muestras con el incremento de temperatura de 30°C a 170°C sería de 1.7% para la muestra de roca Boise, de 2.0% para la muestra de roca Berea y de 2.5% para la muestra de roca Bandera. Se tiene entonces que los datos reportados por Greenwald et al. [1982] están fuera de los límites impuestos por la física del fenómeno de expansión térmica en un medio poroso, por lo cual puede considerarse que no representan con buena exactitud la magnitud real del efecto de la temperatura sobre la porosidad y por tanto no constituyen una buena referencia para hacer comparaciones.

En las Figs. 7.2.1 a 7.2.4 se muestran con fines de comparación algunos datos acerca de la expansión térmica lineal del cuarzo reportados por Clark [1966]. Se aprecia en todos los casos que la expansión lineal del material sólido de las rocas (expansión térmica lineal de matriz) sigue aproximadamente la tendencia marcada por la expansión lineal del cuarzo en la dirección perpendicular al eje C, lo cual concuerda con lo reportado por Somerton y Selim [1961] al respecto de que la expansión térmica lineal medida en muestras de las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera sometidas a presión atmosférica resultó ser muy similar a la expansión del cuarzo en la dirección

perpendicular al eje C. En este punto es oportuno recordar que los resultados experimentales de Greenwald et al. [1982] acerca del efecto de la temperatura sobre la porosidad implican que las rocas areniscas Berea, Boise y Bandera están constituidas por minerales cuya expansión térmica es aproximadamente tres veces mayor que la correspondiente al cuarzo (por esta razón las reducciones de porosidad con el incremento de temperatura que reportaron Greenwald et al. [1982] están fuera de los límites impuestos por la física del fenómeno para el caso de rocas constituidas únicamente por cuarzo).

En la Tabla 7.2.5 se proporcionan datos acerca de los coeficientes de expansión térmica lineal correspondientes a los resultados mostrados en las Figs. 7.2.1 y 7.2.4 y en las Tablas 7.2.1 a 7.2.4. Se reportan los valores del coeficiente de expansión térmica lineal para los intervalos de temperatura de 40°C a 70°C, de 140°C a 170°C y de 240°C a 270°C. Estos valores fueron obtenidos tomando en cuenta para cada uno de los intervalos de temperatura señalados al menos ocho parejas de datos de expansión térmica lineal unitaria contra temperatura; estos datos se ajustaron conforme a un esquema de regresión lineal por mínimos cuadrados y a la pendiente de la recta de mejor ajuste se le consideró como el coeficiente de expansión térmica lineal en el intervalo de temperatura correspondiente (en todos los casos el coeficiente de la correlación resultó ser mayor que 0.99).

Estimación del Grado en que la Reducción de Porosidad Originada por el Incremento de la Temperatura Puede Influir Sobre la Permeabilidad

(a) Valoración a Partir de la Correlación Entre la Permeabilidad y la Porosidad Conforme al Modelo de Tubos Capilares.

Con referencia a las Ecs. 2.3.2 y 2.3.5, si el valor de d^2 dado por la primera ecuación se substituye en la segunda, se obtiene la siguiente expresión para la relación entre la permeabilidad y la porosidad del modelo básico de tubos capilares

$$K = \frac{\phi^2 R^2}{8N} \quad (7.2.1)$$

donde N es el número total de capilares de que consta el modelo y R es el radio de la sección transversal del modelo (bajo el supuesto de que esta sección es circular).

Supóngase ahora que sobre el modelo actúa algún tipo de perturbación que produce cambios en el área de la sección transversal y en el diámetro de los conductos de flujo. De la

ecuación anterior fácilmente se deduce que la relación entre los cambios de porosidad y los cambios de permeabilidad en el modelo está dada por

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 \left(\frac{R}{R_0}\right)^2 \quad (7.2.2)$$

donde k_0 , ϕ_0 y R_0 son los valores correspondientes a una condición de referencia arbitraria, mientras que k , ϕ y R son los valores correspondientes a una nueva condición.

Para el caso particular en que la perturbación propuesta sea un cambio de temperatura ΔT , se tiene que

$$\frac{R}{R_0} = (1 + \alpha_L \Delta T) \quad (7.2.3)$$

donde α_L es el valor medio del coeficiente de expansión térmica lineal del modelo (en la dirección paralela a la sección transversal) en el intervalo de temperatura correspondiente al incremento ΔT .

Substituyendo la Ec. 7.2.3 en la Ec. 7.2.2 se obtiene la expresión

$$\frac{K}{K_0} = (1 + \alpha_L \Delta T) \left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^2 \quad (7.2.4)$$

Esta última ecuación expresa explícitamente, para el caso del modelo básico de tubos capilares, la relación que existe entre los cambios de porosidad y los cambios de permeabilidad cuando el modelo experimenta un cambio de temperatura.

Con fundamento en lo discutido en la sección 2.3 puede afirmarse que la Ec. 7.2.4 no constituye en general una buena representación de la correlación entre los cambios de permeabilidad y de porosidad que es de esperarse ocurran por efecto de la temperatura en los medios porosos reales. Sin embargo, el empleo de esta ecuación parece ser la única alternativa viable para estimar analíticamente, con buen sentido práctico, cual es el orden de importancia del efecto que una determinada reducción de porosidad puede ejercer sobre la permeabilidad de un medio poroso. El tratar de emplear con este objeto ecuaciones más complejas, como las ecuaciones tipo Kozeny, implica enfrentarse a problemas prácticamente imposibles de superarse, tales como la determinación del área superficial

específica (S), del factor de tortuosidad (τ) y de la constante de Kozeny (γ) del medio poroso en cuestión. El problema en este caso no sólo se limita a determinar experimentalmente los valores de S, τ y γ en una cierta condición de referencia, sino que también implica poder determinar los cambios que sufren estos parámetros con el propio cambio de la porosidad, o equivalentemente, con el agente que origina este cambio (variación de la temperatura, de la presión, etc).

Aplicando entonces la Ec. 7.2.4, resulta que una reducción de porosidad del orden de 2%, como la que se observó en las muestras de roca arenisca M94-1, M149-1, COLTON-1 y BEREAS-1 con el incremento de temperatura de 20 C a 280 C, dá lugar a una reducción de permeabilidad de 5.9% (al aplicar la Ec. 7.2.4 para efectuar este cálculo se asumió que $\alpha_L = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; este valor es representativo, de acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 7.2.5, del coeficiente de expansión térmica lineal de las rocas areniscas cuando éstas se encuentran sometidas a una diferencia significativa entre la presión de confinamiento y la presión de poro). Esta reducción de permeabilidad de 5.9% para el intervalo de temperatura de 20°C a 280°C es aproximadamente un orden de magnitud menor que los valores de reducción de permeabilidad atribuibles al efecto de la temperatura en el mismo intervalo, ésto según los resultados mostrados en la Fig. 7.1.16 y en la Tabla 7.1.8. Por otra parte, aplicando nuevamente la Ec. 7.2.4 se deduce que para que la permeabilidad se redujera en 50%, aproximadamente el valor medio de las reducciones de permeabilidad en el intervalo de 20°C a 280°C según los resultados antes mencionados, se requeriría una reducción de porosidad de 30%, siendo este valor aproximadamente 15 veces mayor que los valores de reducción de porosidad determinados experimentalmente.

Aunque se basa en la consideración de un modelo muy simplificado, el análisis expuesto en el párrafo anterior sugiere en primera aproximación que la reducción de porosidad asociada con el cambio de temperatura no es el principal mecanismo que origina la reducción de la permeabilidad de las rocas areniscas.

(b) Valoración a Partir de la Consideración de Evidencias Experimentales Acerca de Cambios de Permeabilidad y Porosidad Producidos por Cambios de Presión.

Wyble [1958] reportó resultados de investigaciones experimentales acerca del efecto de la presión de confinamiento sobre la porosidad y la permeabilidad de un grupo de 16 muestras de rocas areniscas (las porosidades de estas muestras fluctuaban entre 9.8% y 18.7%, mientras que las permeabilidades fluctuaban entre 0.5 md y 34.8 md). Los datos experimentales de este autor indican, tomando en cuenta los resultados de las 16 muestras, que con el incremento de la presión de confinamiento de 0 MPa a

35 MPa se produjeron reducciones de porosidad cuyo valor promedio fue de aproximadamente 10% del promedio de los valores iniciales, mientras que el valor promedio de las reducciones de la permeabilidad fue de aproximadamente 55% del promedio de los correspondientes valores iniciales (nótese que esta última cifra es muy similar al promedio de reducción de permeabilidad asociado al incremento de temperatura de 20°C a 280°C, según los resultados mostrados en la Tabla 7.1.8 y en la Fig. 7.1.16).

Teniendo en cuenta los resultados del presente trabajo en lo referente a que la reducción de la porosidad de las rocas areniscas con el incremento de temperatura de 20°C a 280°C fue de tan sólo 2% (aproximadamente), los datos experimentales descritos en el párrafo anterior pueden interpretarse como evidencia adicional de que la reducción de la permeabilidad con el aumento de la temperatura es sólo parcialmente una consecuencia de la reducción de la porosidad. Además, puesto que el 2% de reducción de porosidad asociado al incremento de temperatura de 20°C a 280°C es significativamente menor que el 10% de reducción de porosidad correspondiente al incremento de la presión de confinamiento, habiéndose producido en ambos casos reducciones de permeabilidad equiparables, es razonable concluir que en la configuración del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas participa algún otro mecanismo cuya influencia es más importante que la que ejerce la reducción de la porosidad.

7.2.2 Estudio Acerca del Efecto de la Reducción del Área de la Sección Transversal de los Conductos de Flujo Sobre la Permeabilidad

Este estudio se efectuó en relación con la hipótesis propuesta por Aruna et al. [1977] y Danesh et al. [1978] al respecto de que en las rocas areniscas la reducción de la permeabilidad con el incremento de la temperatura se debe a interacciones entre el cuarzo de la roca y las moléculas de agua, lo cual supuestamente dá lugar a que se reduzca el área efectiva de la sección transversal de los conductos de flujo.

Supóngase que en un modelo básico de tubos capilares ocurre algún evento que trae como consecuencia la reducción uniforme del diámetro efectivo de los conductos de flujo, pero sin producir cambios en el área total de la sección transversal del modelo (por ejemplo: obstrucción de los conductos debido al depósito de partículas o generación de una capa adyacente a la superficie de los conductos en la cual la movilidad de las partículas del fluido es nula). Substituyendo la expresión para ϕ según la Ec. 2.3.2 en la Ec. 2.3.5, se deduce fácilmente que el cambio de permeabilidad asociado al evento antes propuesto está dado por

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^4$$

o en forma equivalente

$$\frac{K}{K_0} = \left(1 - \frac{\Delta r}{r_0}\right)^4$$

donde k_0 y r_0 son respectivamente la permeabilidad y el radio de los conductos de flujo antes de la ocurrencia del evento propuesto, k y r denotan los correspondientes valores de estos parámetros después de la ocurrencia del evento y Δr es la magnitud en que se reduce el radio de los conductos de flujo.

En la Fig. 7.2.6 se muestra gráficamente la relación funcional entre (k/k_0) y Δr para diferentes valores del parámetro r_0 , según la Ec. 7.2.6. Se aprecia que para una determinada disminución absoluta del radio de los conductos de flujo resulta que el cambio relativo de la permeabilidad es más importante a medida que es menor el radio inicial de los propios conductos. Por ejemplo, si el radio de los conductos de flujo se reduce en 3 micras, resulta que la reducción de permeabilidad es de 11.5% para el caso en que el radio inicial sea de 100 micras, mientras que la reducción de permeabilidad es de 76% para el caso en que el radio inicial sea de 10 micras.

No obstante que proviene del análisis en un modelo simplificado, el resultado descrito en el párrafo anterior sugiere que también en el caso de un medio poroso real debe verificarse un efecto similar, ésto es, que la ocurrencia de cualquier fenómeno que origine una determinada reducción en las dimensiones lineales de la sección transversal de los conductos de flujo producirá reducciones de permeabilidad que serán más significantes a medida que sea menor el tamaño de los poros del medio. Este tipo de comportamiento puede constituir la base para explicar y conciliar, aunque sea parcialmente, los resultados inconsistentes y hasta contradictorios que se han reportado en la literatura acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad. Por ejemplo, si la propuesta interacción cuarzo-agua se desarrolla por efecto de la temperatura cubriendo un espesor dado independiente del tamaño de los poros, se tiene entonces un mecanismo susceptible de originar reducciones de permeabilidad cuya significancia puede ser mayor o menor dependiendo del tamaño de los poros de la roca considerada.

Desde otro punto de vista, si se consideran desde la perspectiva de este estudio los resultados aparentemente inconsistentes reportados en la literatura acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad, se concluye que la

interacción cuarzo-agua es un probable mecanismo de contribución a la reducción de la permeabilidad, con la característica de que esta interacción comprende un espesor dado que no depende del tamaño de los poros de la roca.

Los anteriores planteamientos indican con bastante claridad que la interpretación y la comparación de resultados experimentales acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas son aspectos que deben realizarse teniendo en cuenta la posibilidad de que el tamaño de los poros desempeñe un papel importante en la configuración de dicho efecto.

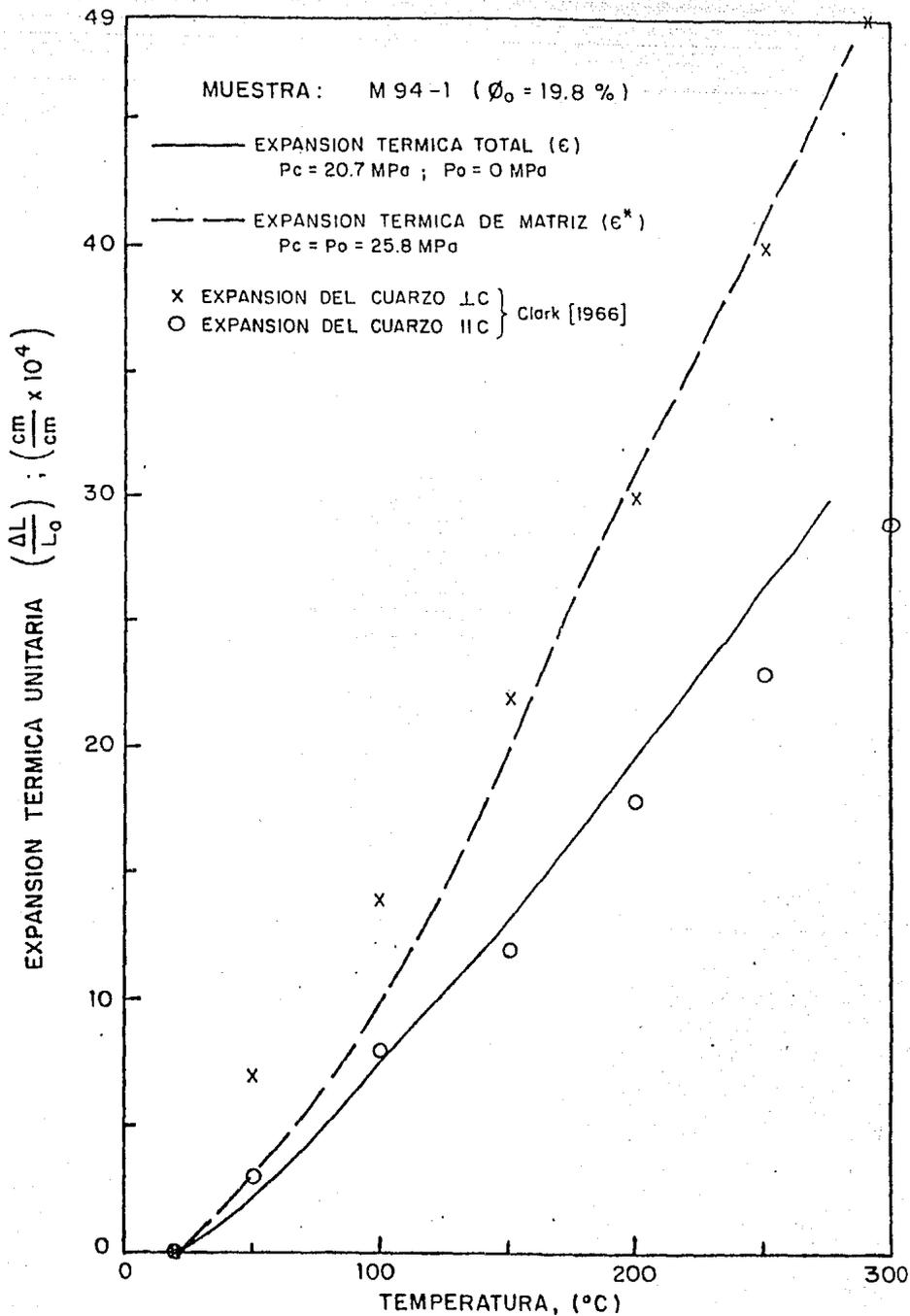


Fig. 7.2.1 Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra M94-1 sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y presión de poro nula.

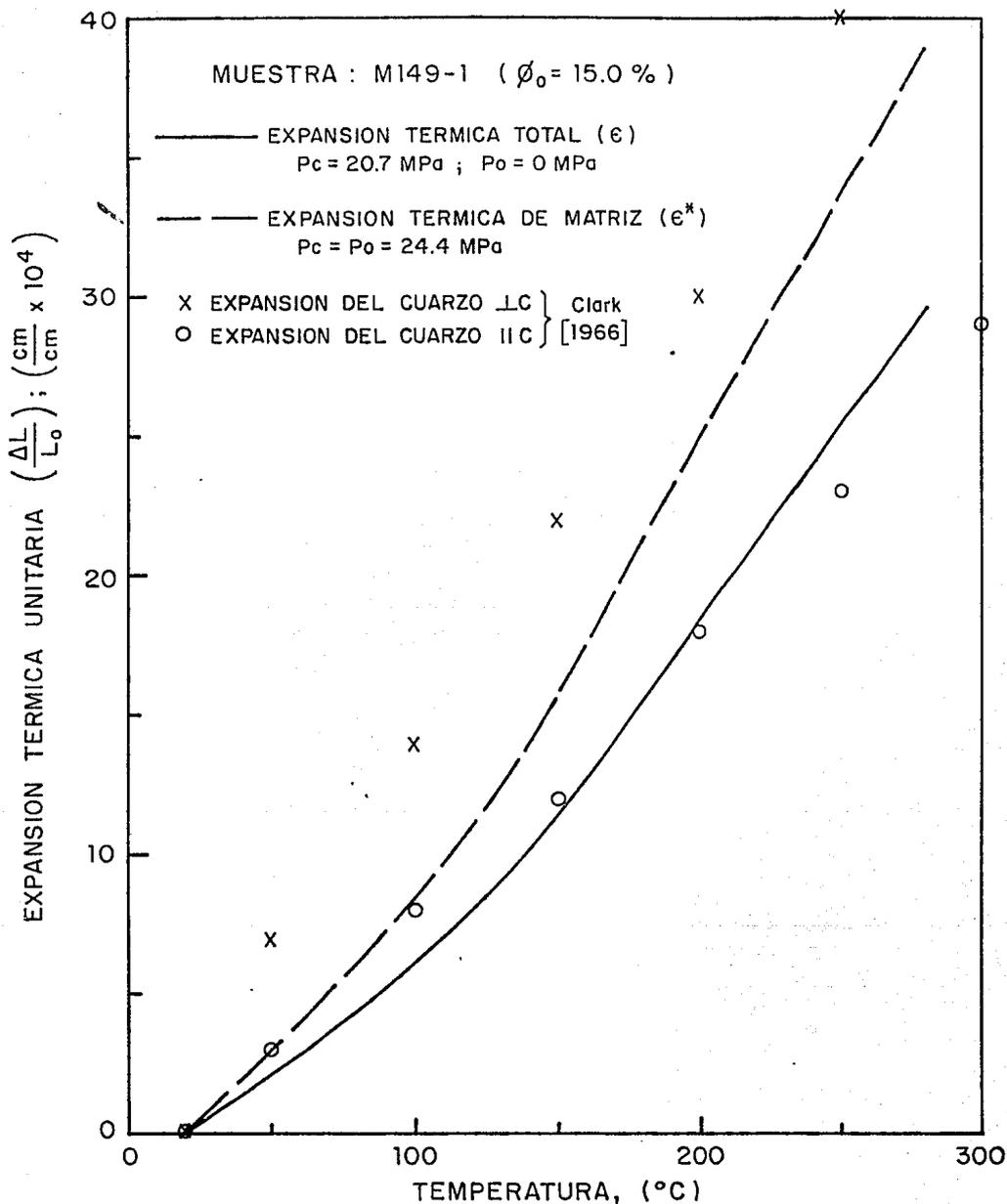


Fig. 7.2.2 Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra M149-1 sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y presión de poro nula.

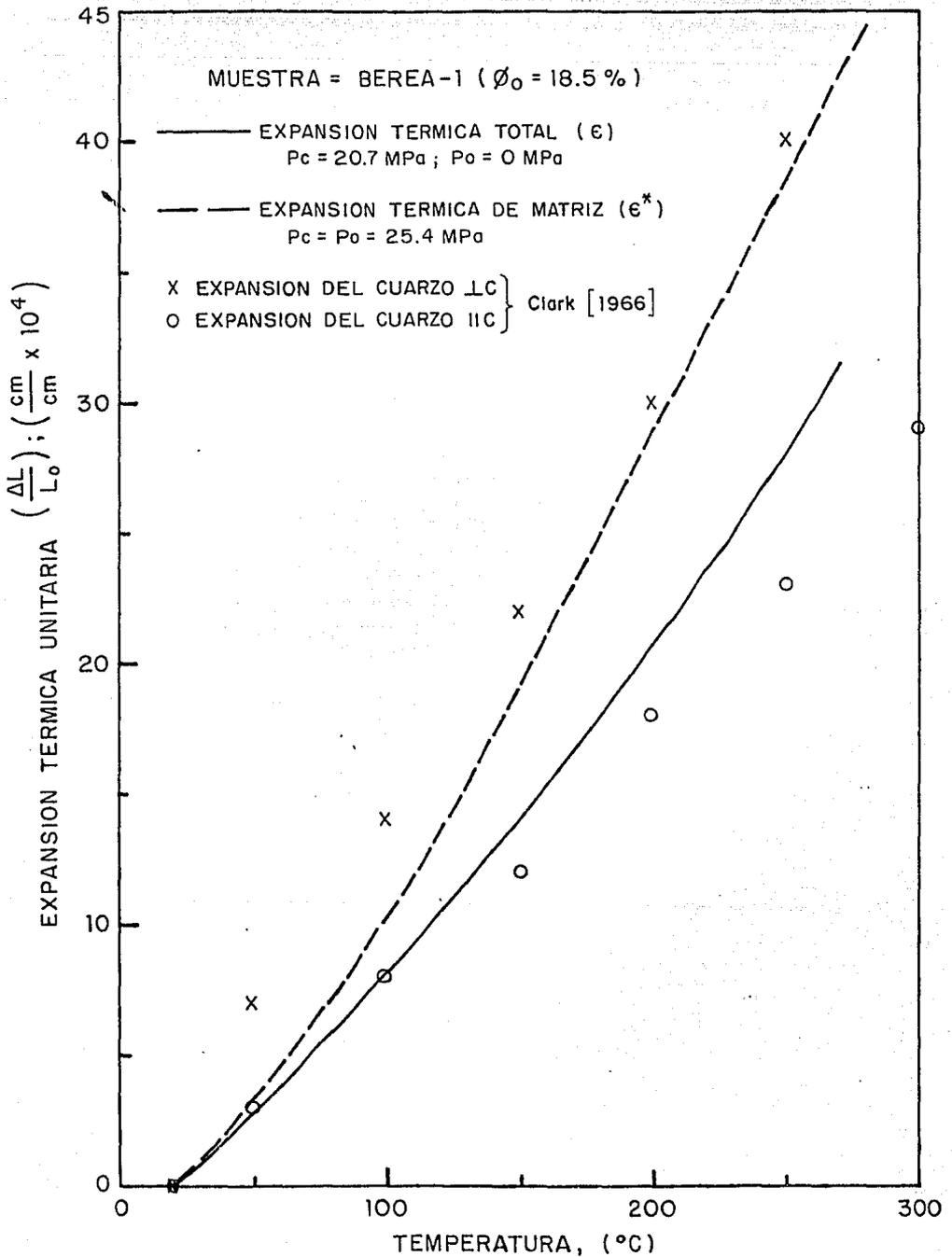


Fig. 7.2.3 Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra BERE-1 sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y presión de poro nula.

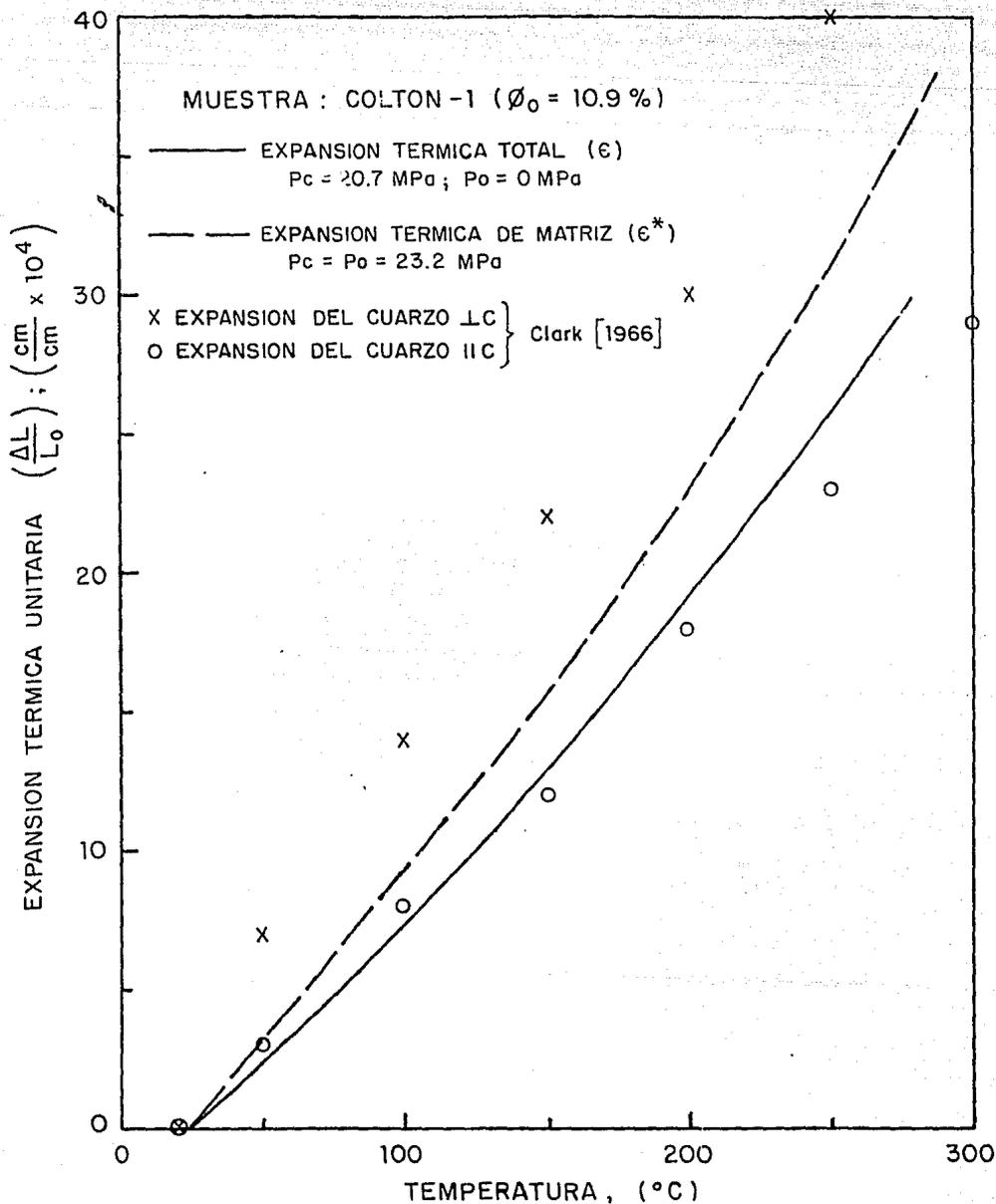


Fig. 7.2.4 Expansión térmica lineal, total y de matriz, correspondientes a la muestra COLTON-1 sometida a 20.7 Mpa de presión de confinamiento y presión de poro nula.

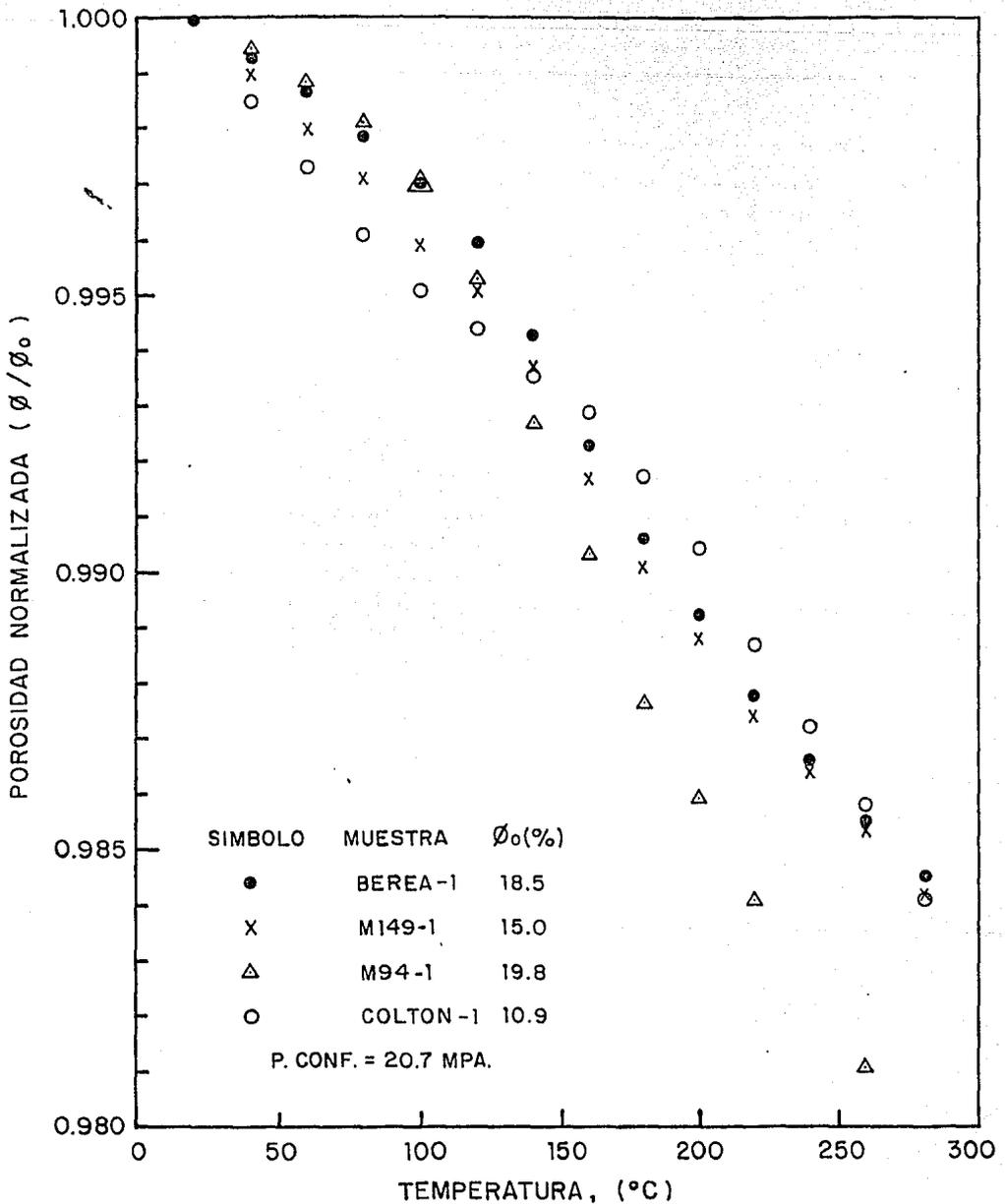


Fig. 7.2.5 Efecto de la temperatura sobre la porosidad de las muestras de roca arenisca M94-1, M149-1, BEREA-1 y COLTON-1 sometidas a 20.7 MPa de presión de confinamiento y presión de poro nula. (Efecto determinado a partir de los datos de expansión térmica lineal reportados en las tablas 7.2.1 a 7.2.4).

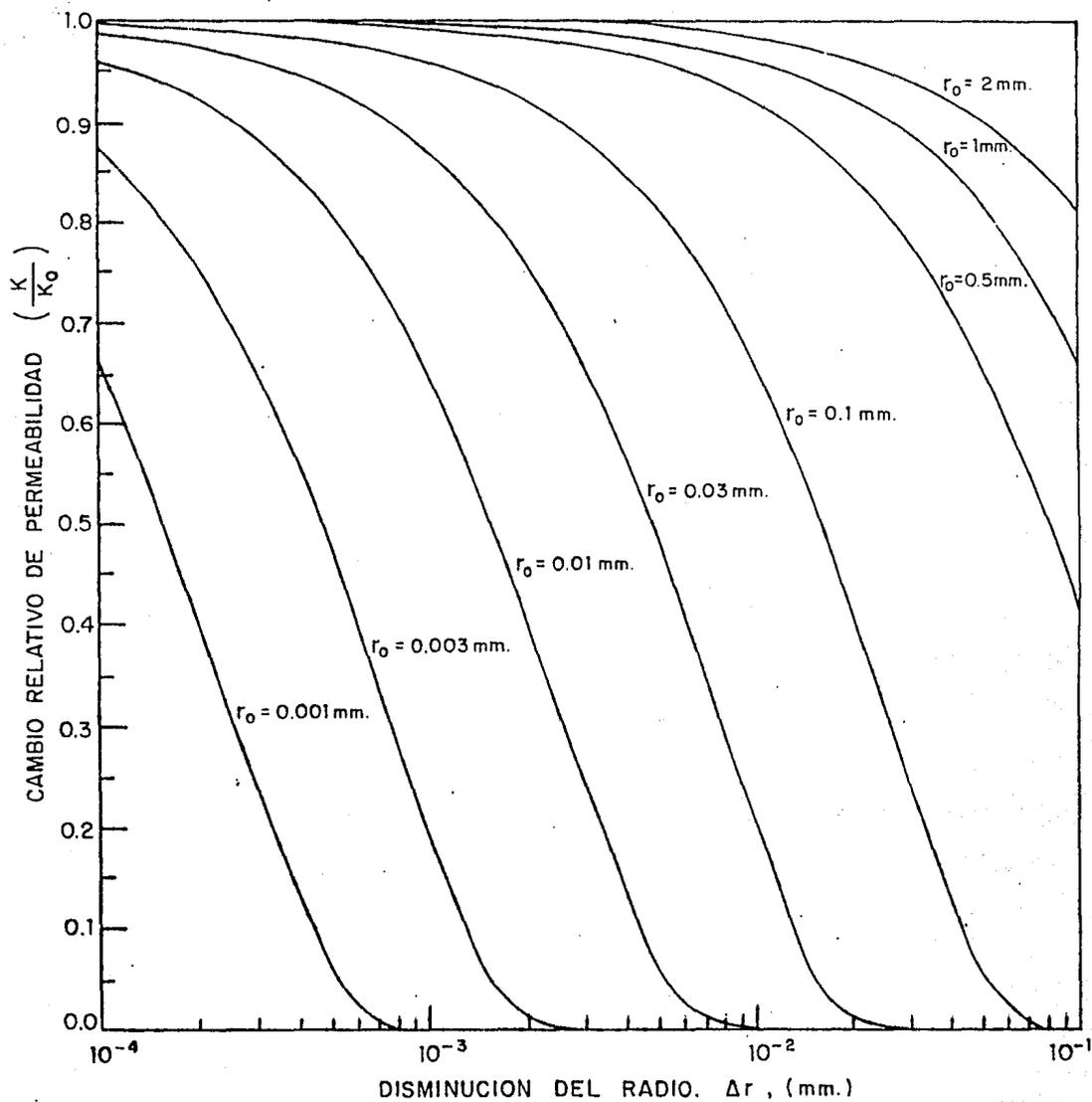


Fig. 7.2.6 Efecto de la reducción del radio de los conductos de flujo sobre la permeabilidad de un modelo de tubos capilares.

Tabla 7.2.1. Efecto de la Temperatura Sobre la Porosidad Calculado a Partir de Datos Experimentales de Expansión Térmica Lineal.

MUESTRA M94-1 ($\phi_0=19.8\%$)

TEMPERATURA (°C)	ϵ (cm/cm)x10 ⁴	ϵ^* (cm/cm)x10 ⁴	$\phi(T)/\phi_0$
20	0.0	0.0	1.0000
40	1.5	2.0	0.9994
60	3.4	4.4	0.9988
80	5.4	7.0	0.9981
100	7.5	10.0	0.9970
120	9.6	13.5	0.9953
140	11.8	17.8	0.9927
160	14.3	22.3	0.9903
180	16.8	27.0	0.9876
200	19.4	31.0	0.9859
220	22.1	35.2	0.9841
240	24.9	39.1	0.9827
260	27.7	43.2	0.9812
280	30.5	47.2	0.9797

ϕ_0 es la porosidad del espécimen medida a condiciones ambiente.

ϵ es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal total).

ϵ^* es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 25.8 MPa de presión de confinamiento y a 25.8 MPa de presión de poro; representa la expansión lineal unitaria del material sólido de la muestra de roca cuando ésta se encuentra sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal de matriz).

Tabla 7.2.2. Efecto de la Temperatura Sobre la Porosidad Calculado a Partir de Datos Experimentales de Expansión Térmica Lineal.

MUESTRA M149-1 ($\phi_0=15.0\%$)			
TEMPERATURA (°C)	ϵ (cm/cm) x 10^4	ϵ^* (cm/cm) x 10^4	$\phi(T)/\phi_0$
20	0.0	0.0	1.0000
40	1.4	2.0	0.9990
60	2.8	4.0	0.9980
80	4.3	6.0	0.9971
100	6.0	8.4	0.9959
120	8.0	10.9	0.9951
140	10.2	13.9	0.9937
160	12.7	17.6	0.9917
180	15.5	21.3	0.9901
200	18.3	24.9	0.9888
220	21.1	28.5	0.9874
240	24.0	32.0	0.9864
260	26.8	35.4	0.9854
280	29.7	39.0	0.9842

ϕ_0 es la porosidad del espécimen medida a condiciones ambiente.

ϵ es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal total).

ϵ^* es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 24.4 MPa de presión de confinamiento y a 24.4 MPa de presión de poro; representa la expansión lineal unitaria del material sólido de la muestra de roca cuando ésta se encuentra sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal de matriz).

Tabla 7.2.3. Efecto de la Temperatura Sobre la Porosidad Calculado a Partir de Datos Experimentales de Expansión Térmica Lineal.

MUESTRA COLTON-1 ($\phi_0=10.9\%$)

TEMPERATURA (°C)	ϵ (cm/cm)x10 ⁴	ϵ^* (cm/cm)x10 ⁴	$\phi(T)/\phi_0$
20	0.0	0.0	1.0000
40	1.4	2.0	0.9985
60	3.3	4.4	0.9973
80	5.3	6.9	0.9961
100	7.3	9.3	0.9951
120	9.4	11.7	0.9944
140	11.7	14.3	0.9936
160	14.1	17.0	0.9929
180	16.6	20.0	0.9917
200	19.1	23.0	0.9904
220	21.6	26.2	0.9887
240	24.3	29.5	0.9872
260	27.1	32.9	0.9858
280	30.0	36.5	0.9841

ϕ_0 es la porosidad del espécimen medida a condiciones ambiente.

ϵ es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal total).

ϵ^* es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 23.2 MPa de presión de confinamiento y a 23.2 Mpa de presión de poro; representa la expansión lineal unitaria del material sólido de la muestra de roca cuando ésta se encuentra sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal de matriz).

Tabla 7.2.4. Efecto de la Temperatura Sobre la Porosidad Calculado a Partir de Datos Experimentales de Expansión Térmica Lineal.

MUESTRA BERE A-1 ($\phi_0=18.5\%$)			
TEMPERATURA (°C)	ϵ (cm/cm)x10 ⁴	ϵ^* (cm/cm)x10 ⁴	$\phi(T)/\phi_0$
20	0.0	0.0	1.0000
40	1.6	2.1	0.9993
60	3.5	4.5	0.9987
80	5.7	7.3	0.9979
100	7.9	10.2	0.9970
120	10.3	13.4	0.9959
140	12.8	17.1	0.9943
160	15.2	21.0	0.9923
180	17.8	24.9	0.9906
200	20.6	28.8	0.9892
220	23.5	32.7	0.9878
240	26.5	36.6	0.9867
260	29.6	41.5	0.9843
280	32.7	44.4	0.9845

ϕ_0 es la porosidad del espécimen medida a condiciones ambiente.

ϵ es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal total).

ϵ^* es la expansión térmica lineal unitaria medida en la muestra de roca sometida a 25.4 MPa de presión de confinamiento y a 25.4 MPa de presión de poro; representa la expansión lineal unitaria del material sólido de la muestra de roca cuando ésta se encuentra sometida a 20.7 MPa de presión de confinamiento y a 0 MPa de presión de poro (expansión lineal de matriz).

Tabla 7.2.5. Coeficientes de Expansión Térmica Lineal de las Muestras de Roca Arenisca M94-1, M149-1, COLTON-1 y BERE-1.

MUESTRA	PRESION DE CONFINAMIENTO (MPA)	PRESION DE PORO (MPA)	COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA LINEAL ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^6$)		
			INTERVALO DE TEMPERATURA		
			40 $^{\circ}\text{C}$ -70 $^{\circ}\text{C}$	140 $^{\circ}\text{C}$ -170 $^{\circ}\text{C}$	240 $^{\circ}\text{C}$ -270 $^{\circ}\text{C}$
M94-1	20.7	0.0	10.2	12.2	14.2
	25.8	25.8	12.1	22.9	20.3
M149-1	20.7	0.0	7.3	13.2	13.8
	24.4	24.4	9.9	18.6	16.6
COLTON-1	20.7	0.0	9.8	12.5	13.6
	23.2	23.2	12.7	14.8	17.2
BEREA-1	20.7	0.0	10.4	12.9	15.7
	25.4	25.4	13.1	19.6	18.4

7.3 ESTUDIOS SOBRE DIVERSOS ASPECTOS DE LA EXPANSION TERMICA DE ROCAS ARENISCAS

7.3.1 Reversibilidad y Repetibilidad de la Expansión Térmica

En las Figs. 7.3.1 y 7.3.2 se muestran respectivamente los resultados que se obtuvieron al someter las muestras M127-A y M127-HA a dos ciclos sucesivos de temperatura. En cada una de estas figuras se muestran traslapadas y con el mismo origen las gráficas de expansión térmica correspondientes a los dos ciclos de temperatura aplicados a cada muestra.

Es muy similar el comportamiento expansión térmica-temperatura exhibido por ambas muestras. Para el primer ciclo de temperatura, el segmento de gráfica correspondiente a la etapa de calentamiento difiere significativamente del segmento correspondiente a la etapa de enfriamiento, con este último segmento yaciendo por debajo del primero casi en todo el intervalo de temperatura. Lo anterior resulta en una deformación negativa, o compactación longitudinal de la roca, al completarse el primer ciclo. Por el contrario, para el segundo ciclo se observa que la expansión térmica es muy reversible, ya que los segmentos de las etapas de calentamiento y de enfriamiento son altamente coincidentes. Además, la compactación experimentada por las muestras de roca durante el segundo ciclo es mucho más pequeña que la compactación correspondiente al primer ciclo. Mediante las acotaciones de expansión térmica unitaria indicadas en las Figs. 7.3.1 y 7.3.2 también se aprecia que en ambas muestras se verifica que la suma aritmética de la dilatación térmica correspondiente a la etapa de calentamiento (ϵ_T) y de la compactación (ϵ_C) es muy aproximadamente igual para cada uno de los dos ciclos de temperatura. La suma aritmética mencionada representa la contracción térmica experimentada por la roca durante la etapa de enfriamiento.

Las evidencias experimentales discutidas en el párrafo anterior soportan la proposición de que las rocas se estabilizan termomecánicamente al ser sometidas a un número reducido de ciclos de temperatura, y que después de ello no sufren compactación al ser sometidas a subsecuentes ciclos. Además, los segmentos de calentamiento y de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica son altamente coincidentes entre sí, confiriendo con ello características de reversibilidad sin histéresis a la expansión térmica de las rocas estabilizadas.

Por otra parte, es interesante notar que el segmento de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica parece que no depende de la historia de temperatura a que haya sido sometida la roca, mientras que el segmento de la etapa de calentamiento sí sufre modificaciones con la historia térmica. Este aspecto es importante, ya que su validez permitiría determinar la expansión

térmica correspondiente a una roca estabilizada sin tener que llevarla primero a esta condición. Sería suficiente para tal objeto obtener el segmento de enfriamiento de la gráfica de expansión contra temperatura de un ciclo cualquiera, aún el primero. Lo anterior tiene aplicación inmediata en la planeación del trabajo experimental, así como en el análisis y aplicación de datos sobre expansión térmica de rocas.

7.3.2 Efecto de la Rapidez de Variación de la Temperatura

Los resultados de las pruebas que se dedicaron para investigar el efecto de la rapidez de calentamiento sobre la expansión térmica se muestran conjuntamente en la Fig. 7.3.3 para la muestra M149-A, y en la Fig. 7.3.4 para la muestra KAYENTA-1. En ambas muestras se observa que para el primer ciclo de temperatura los segmentos de calentamiento y de enfriamiento de la gráfica de expansión térmica difieren entre sí, y que al concluirse el ciclo resulta una deformación negativa o compactación de la roca (la cual es mucho más significativa para la muestra KAYENTA-1).

Las gráficas del segundo y tercer ciclos difieren notablemente de la gráfica del primer ciclo; sin embargo, las discrepancias entre las gráficas de los ciclos segundo y tercero son prácticamente indiscernibles. Esto indica que el cambio en la rapidez de variación de la temperatura de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ no afecta al patrón de expansión térmica de la roca. Por otra parte, la similitud entre las gráficas de los ciclos segundo y tercero aporta evidencia en el sentido de que la compactación de la roca ocurre principalmente durante el primer ciclo de calentamiento, y que después de ello el patrón de expansión térmica es altamente repetible. Además, para el caso de los dos últimos ciclos se tiene que los segmentos de calentamiento y de enfriamiento de la gráfica de expansión térmica son altamente coincidentes, pudiendo apreciarse solamente un pequeño lazo de histéresis.

Debido a que el cambio en la rapidez de variación de la temperatura de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ no afectó al patrón de expansión térmica de las rocas, puede razonablemente suponerse que las discrepancias con respecto al patrón del primer ciclo no se originan en la diferencia de la rapidez de variación de la temperatura, sino que son producto del fenómeno de compactación que experimenta la roca durante el primer ciclo. Por consiguiente, puede establecerse la conclusión de que el cambio en la rapidez de variación de la temperatura entre $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ no influye sobre el patrón de expansión térmica de las rocas areniscas.

También en el caso de las gráficas mostradas en las Figs. 7.3.3 y 7.3.4 se aprecia que los segmentos de enfriamiento de una misma muestra son iguales para los tres ciclos. Esta

característica no se cumple en el caso de los segmentos de calentamiento, los cuales difieren de uno a otro ciclo, especialmente entre el primero y el segundo. Lo anterior indica que la compactación de la roca se presenta únicamente durante la etapa de calentamiento del primer ciclo de temperatura.

7.3.3 Invariabilidad de los Segmentos de Enfriamiento de las Gráficas de Expansión Térmica

En las Figs. 7.3.5 a 7.3.8 se muestran dibujados a partir de un origen común a 280°C los segmentos de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a los resultados previamente mostrados en las Figs. 7.3.1 a 7.3.4, respectivamente. Es notable la semejanza que existe entre los segmentos de enfriamiento de una misma muestra de roca, no obstante que corresponden a diferentes ciclos de aplicación de temperatura. Tomando en consideración que a partir del segundo ciclo de temperatura son coincidentes los segmentos de calentamiento y de enfriamiento, la característica de invariabilidad de los segmentos de enfriamiento implica que toda la información acerca del patrón de expansión térmica de la roca, a una presión de confinamiento dada, puede obtenerse de la gráfica de expansión térmica del primer ciclo de temperatura.

7.3.4 Efecto de la Presión de Confinamiento Sobre la Expansión Térmica

En la Fig. 7.3.9 se presentan los resultados de las pruebas que se efectuaron en la muestra KAYENTA-2 para investigar el efecto de la presión de confinamiento sobre la expansión térmica. Las gráficas temperatura-deformación de los tres ciclos de temperatura, que se aplicaron bajo diferentes condiciones de esfuerzo hidrostático, se muestran dibujadas con un origen común a 25°C.

Anteriormente se observó para el caso de las muestras M149-A y KAYENTA-1 que el patrón de expansión térmica difiere de uno a otro ciclo de temperatura, aún en el caso de que la presión de confinamiento se mantenga constante. Con base en ello, puede establecerse que las diferencias entre gráficas de expansión térmica correspondientes a ciclos de temperatura aplicados a diferentes condiciones de presión son en general la suma de dos componentes: una que se debe a la diferencia de las presiones, y otra que proviene de los cambios que se dan en el comportamiento de la roca por el hecho mismo de ser sometida a sucesivos ciclos de temperatura. Por tanto, a partir de las gráficas mostradas en la Fig. 7.3.9 no es factible discernir cual es el efecto atribuible únicamente a la presión.

Por otra parte, se observó que los segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica no dependen de la historia de temperatura a que haya sido sometida la roca. Por consiguiente, los segmentos de enfriamiento pueden emplearse para aislar el efecto de la presión de confinamiento sobre la expansión térmica.

En las Fig. 7.3.10 se muestran traslapados y con el mismo origen a 25°C los segmentos de las etapas de enfriamiento de las gráficas previamente mostradas en la Fig. 7.3.9, apreciándose que la expansión térmica de la roca disminuye al incrementarse la presión de confinamiento.

7.4.5 Isotropía de la Expansión Térmica

En la Fig. 7.3.11 se muestran superpuestas las gráficas de expansión térmica correspondientes al segundo ciclo de aplicación de temperatura a que se sometieron las muestras M127-A y M127-HA. Estas muestras se cortaron de porciones adyacentes de la misma pieza de núcleo, con sus ejes longitudinales mutuamente perpendiculares. Por consiguiente, los resultados de la Fig. 7.3.11 aportan evidencia de que la expansión térmica de las rocas areniscas puede tener considerable dependencia direccional. En el caso estudiado resultó ser mayor la expansión térmica que se midió en la dirección perpendicular al plano de depósito de los sedimentos.

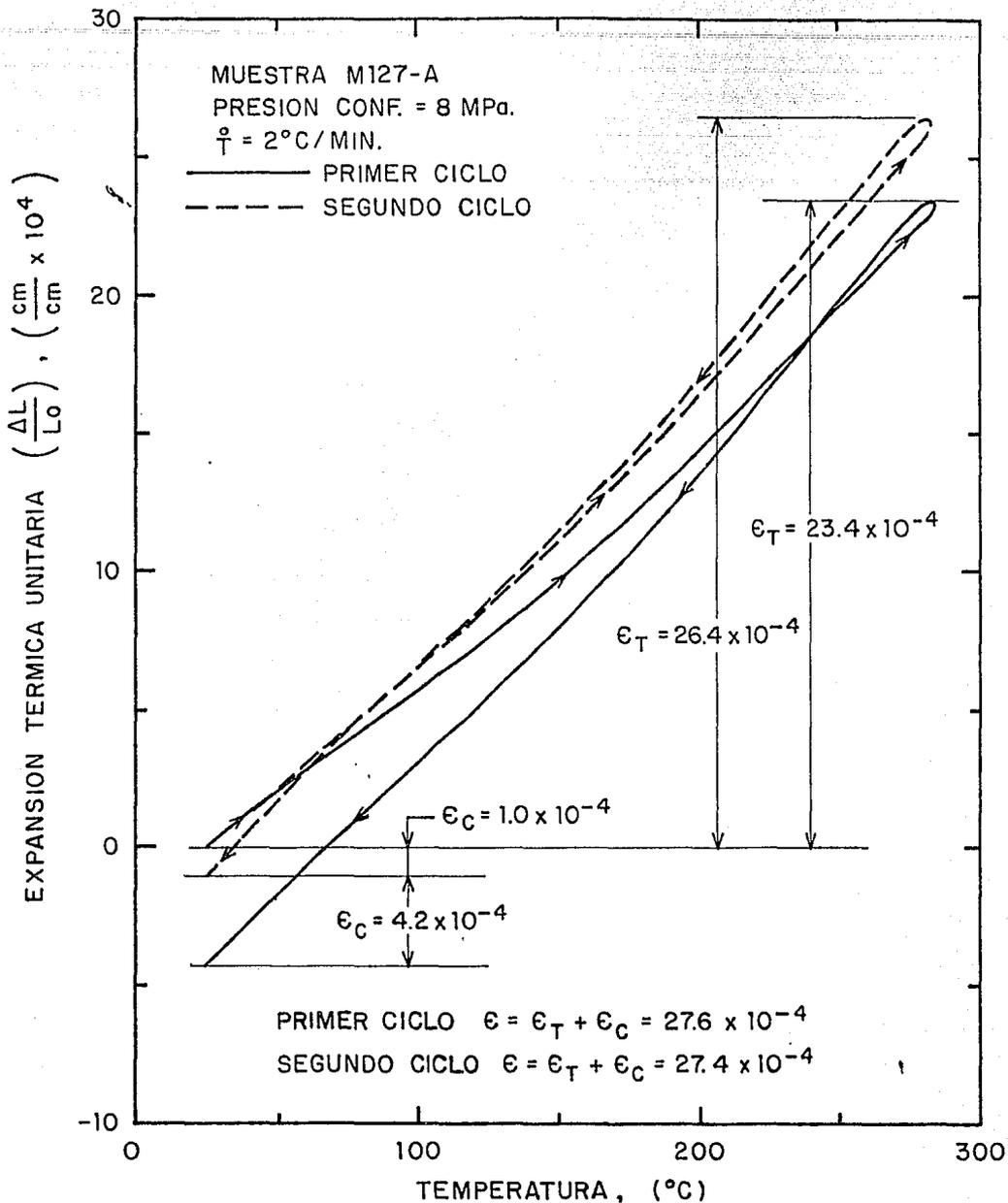


Fig. 7.3.1 Reversibilidad y repetibilidad de la expansión térmica: gráficas correspondientes a los dos ciclos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra M127-A.

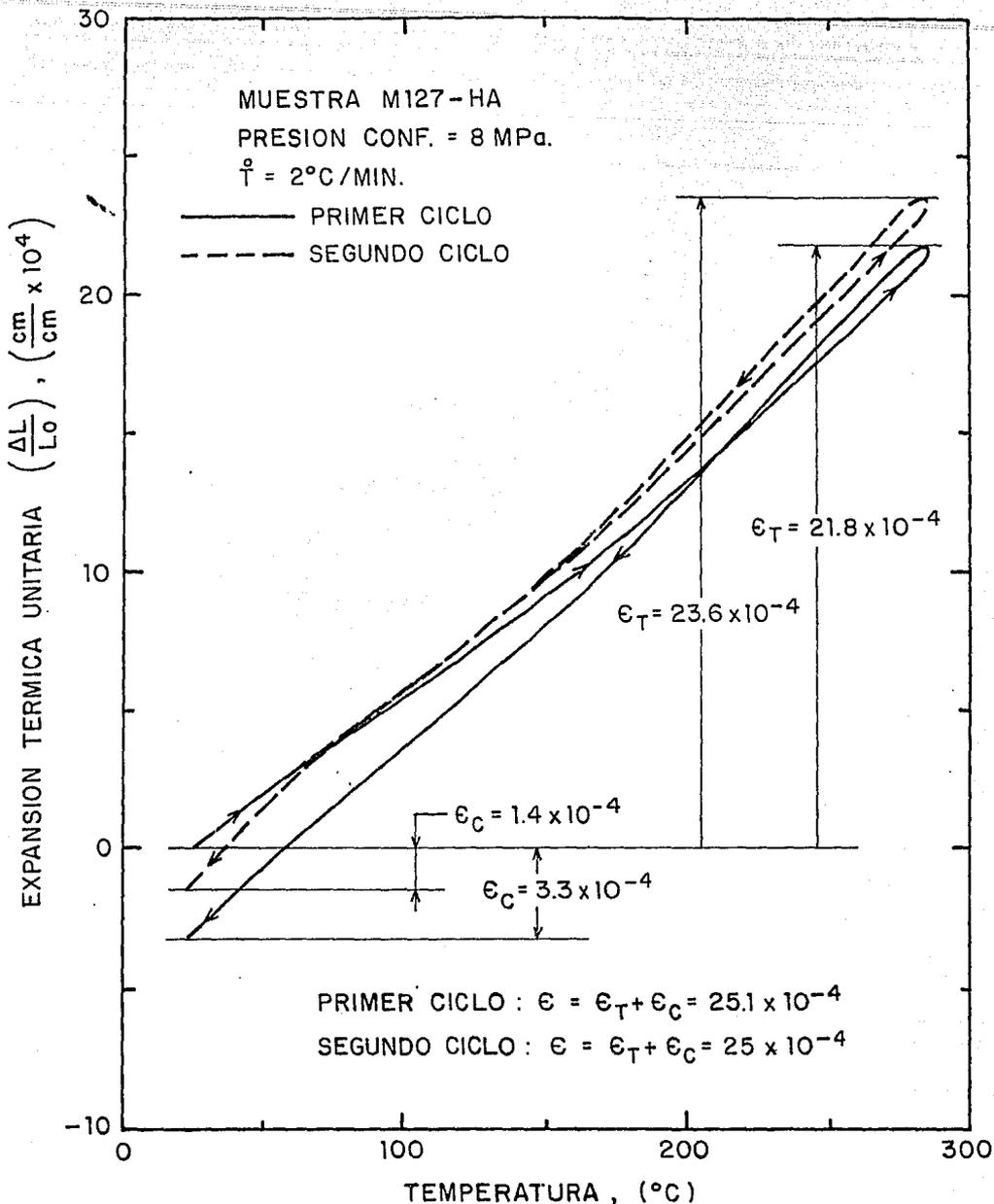


Fig. 7.3.2 Reversibilidad y repetibilidad de la expansión térmica: gráficas correspondientes a los dos ciclos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra M-127-HA.

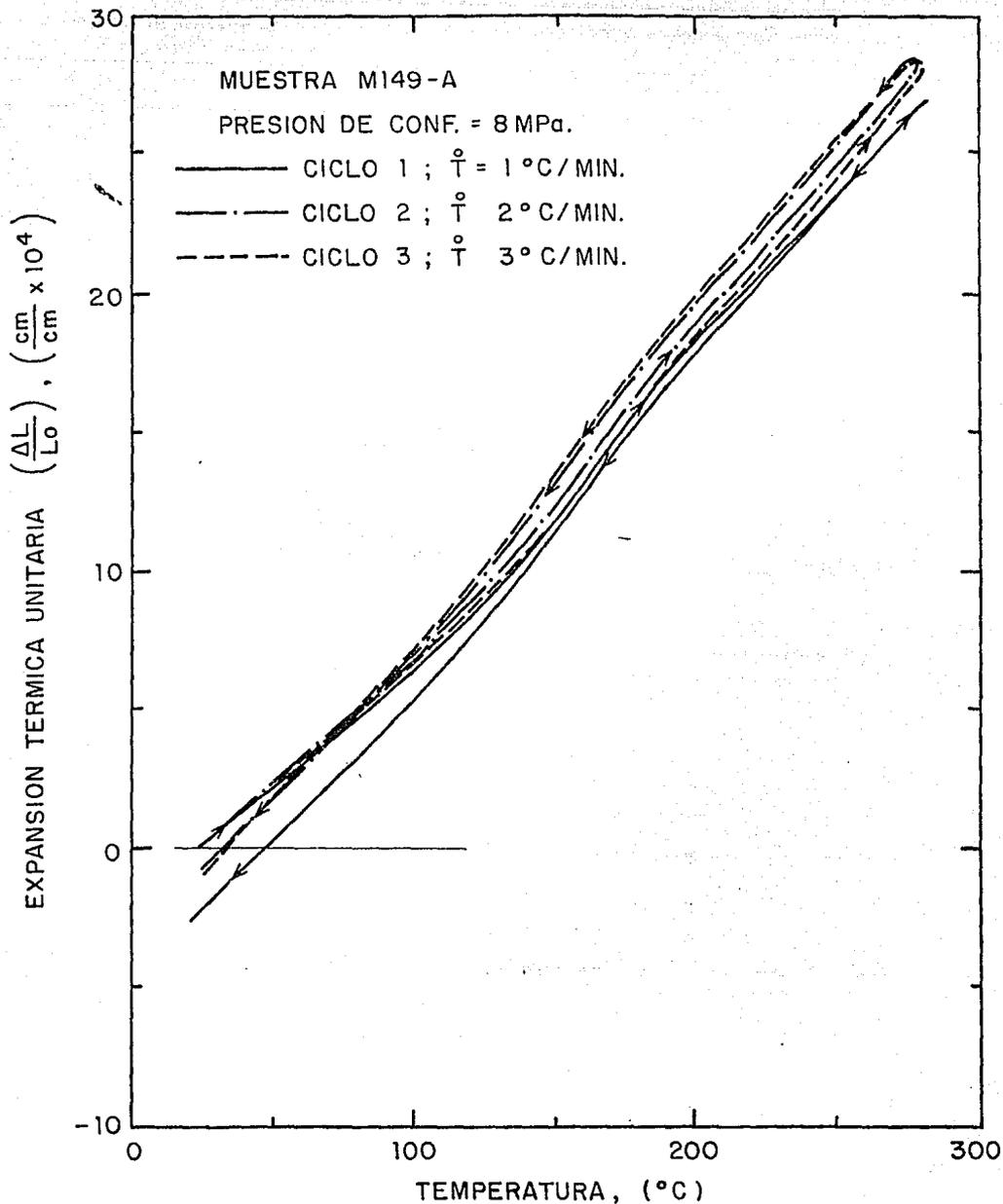
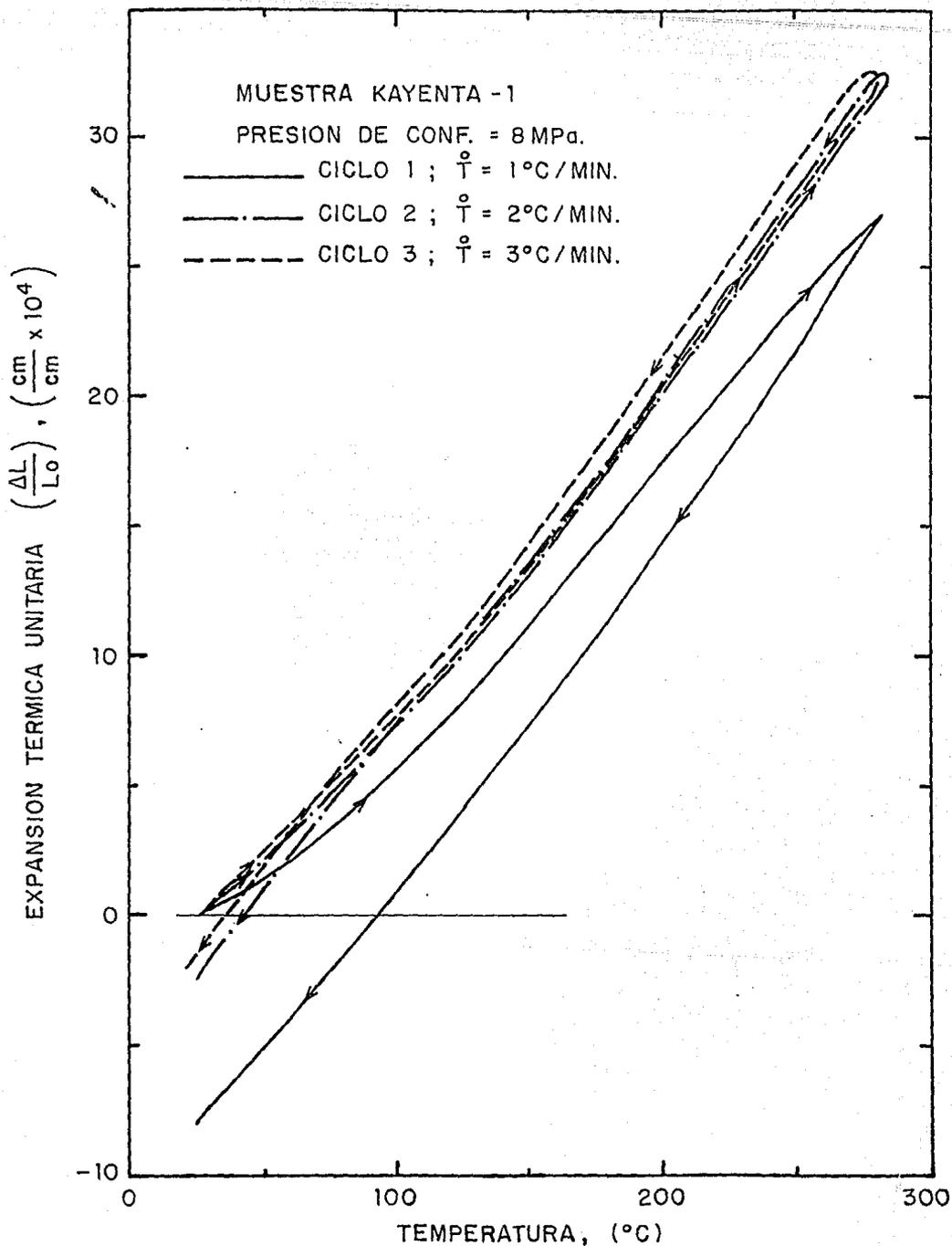
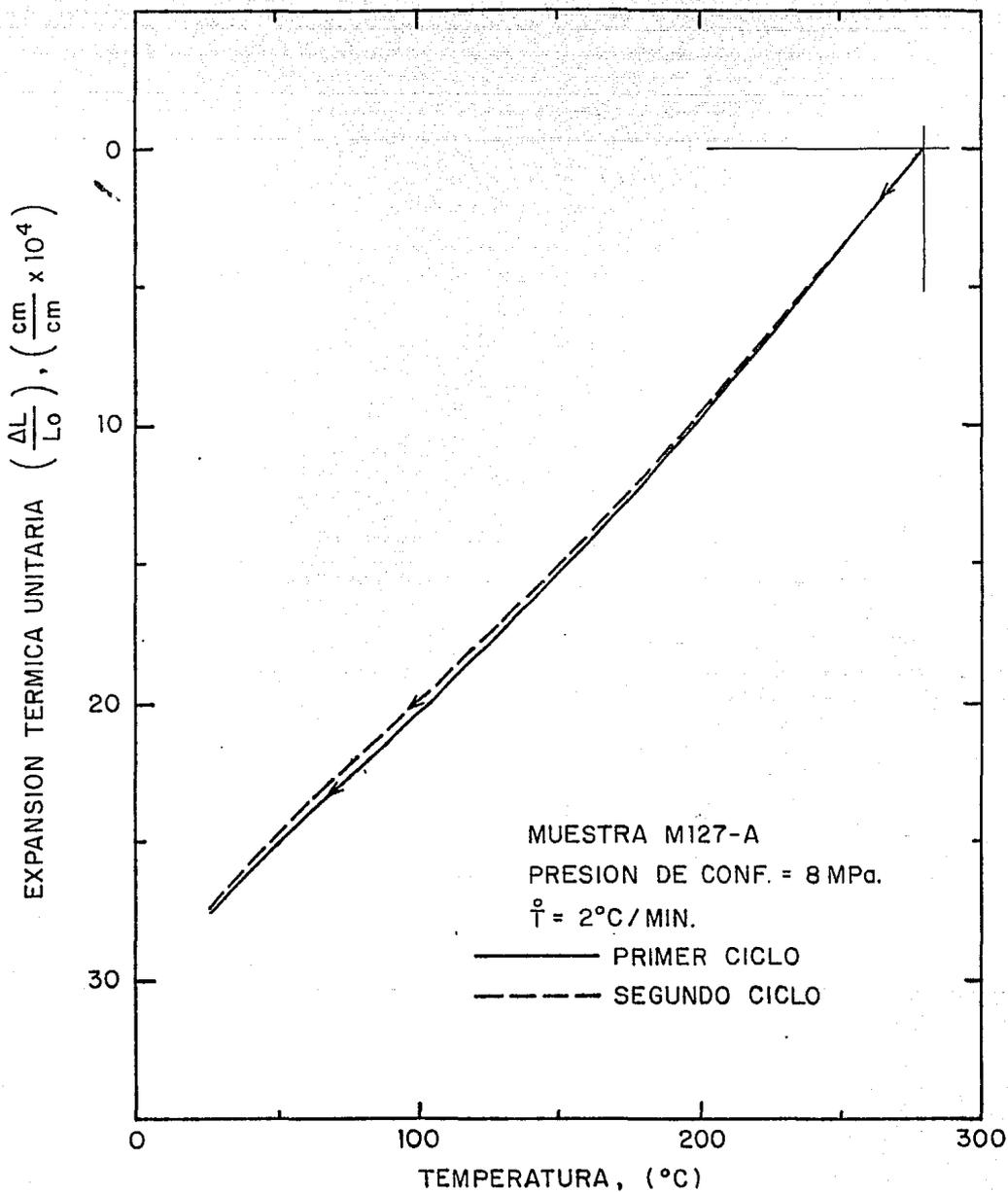


Fig. 7.3.3 Gráficas de expansión térmica correspondientes a tres ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra M149-A con diferente rapidez de variación de la temperatura.



7.3.4 Gráficas de expansión térmica correspondientes a tres ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra KAYENTA-1 con diferente rapidez de variación de la temperatura.



7.3.5 Segmento de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M127-A.

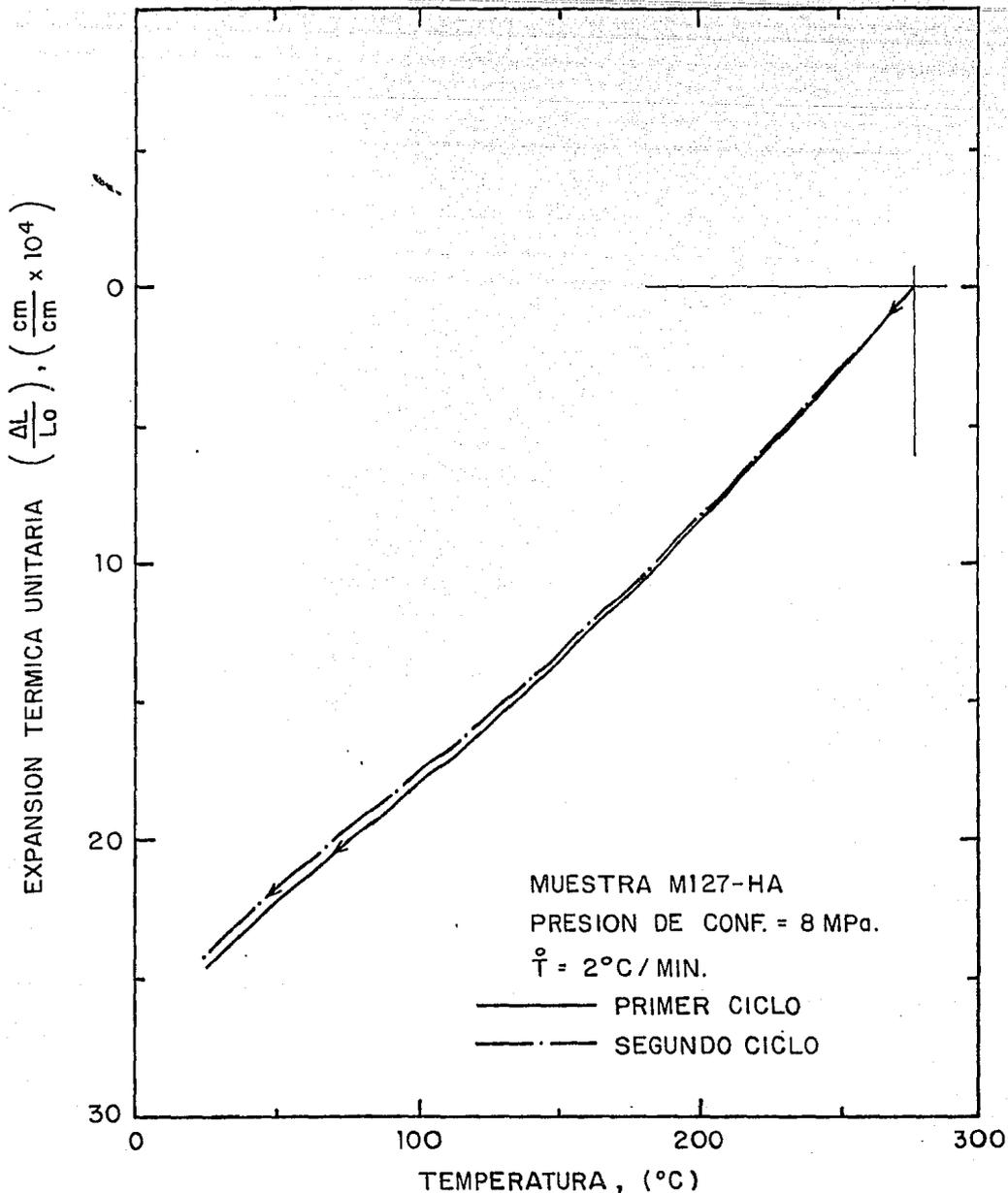


Fig. 7.3.6 Segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M127-HA.

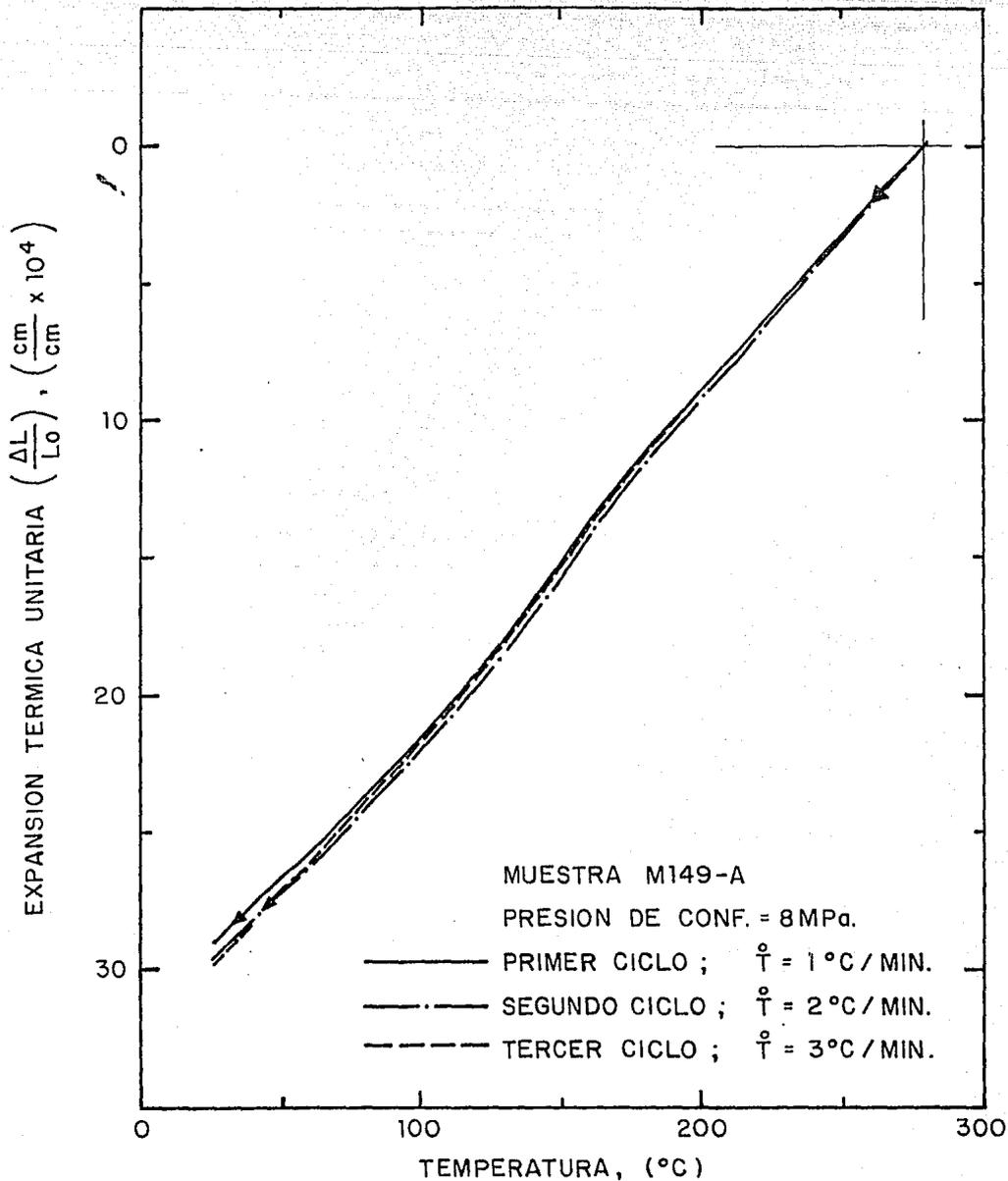


Fig. 7.3.7 Segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra M149-A.

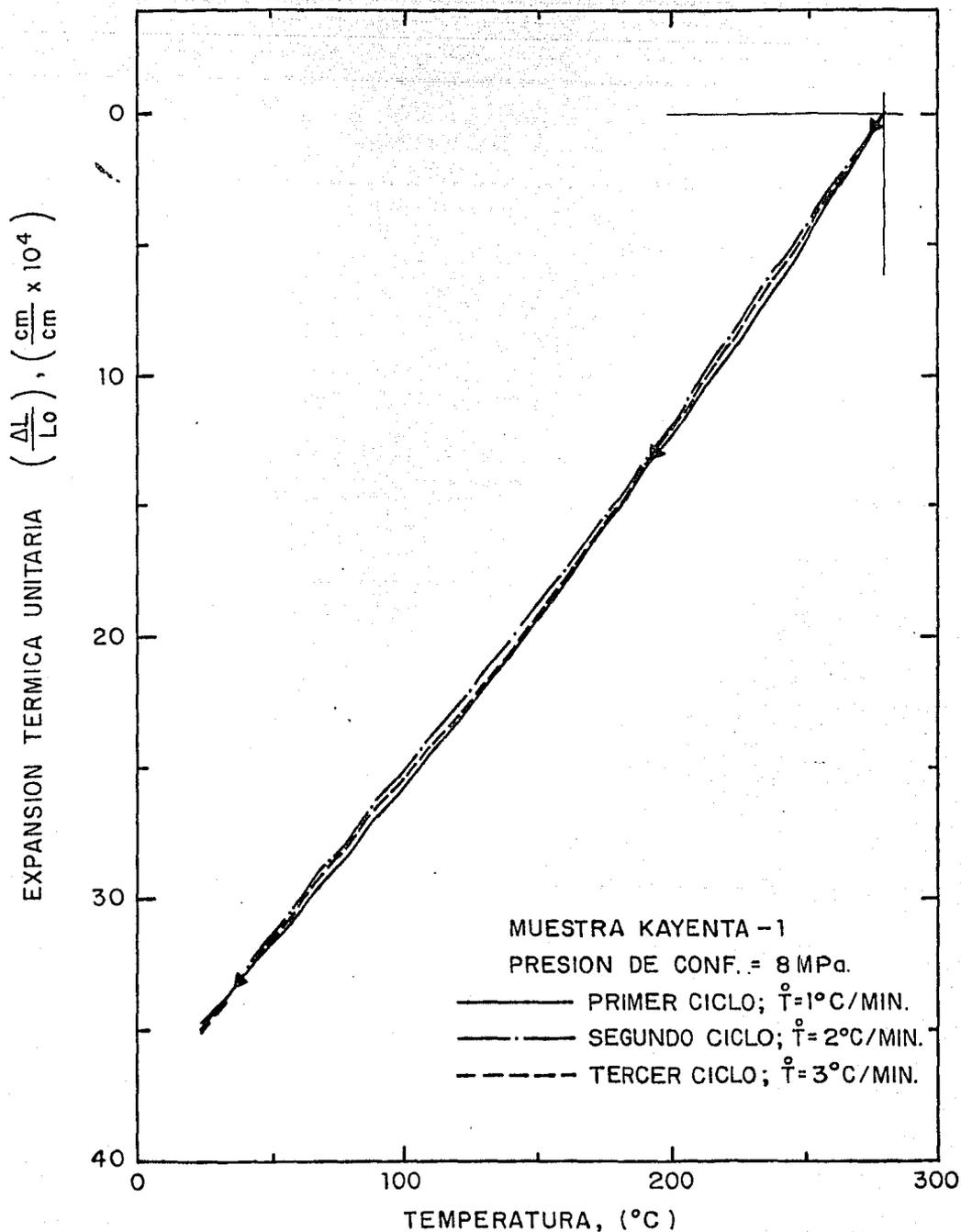


Fig. 7.3.8 Segmentos de la etapa de enfriamiento de las gráficas de expansión térmica correspondientes a las mediciones efectuadas en la muestra KAYENTA-1.

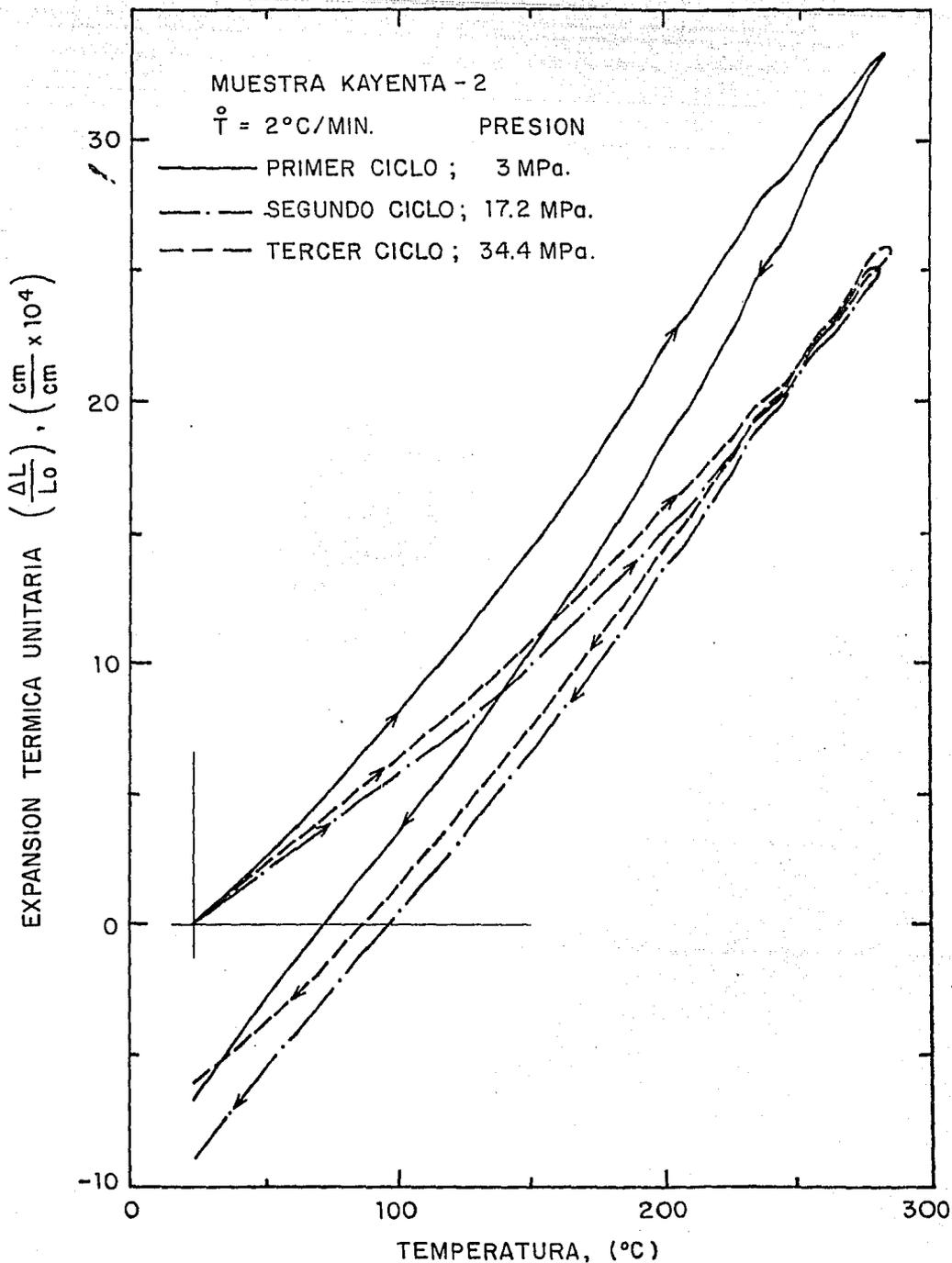


Fig. 7.3.9 Efecto aparente de la presión de confinamiento sobre la expansión térmica: gráficas correspondientes a tres ciclos sucesivos de calentamiento y enfriamiento que se aplicaron a la muestra KAYENTA-2 a diferentes presiones

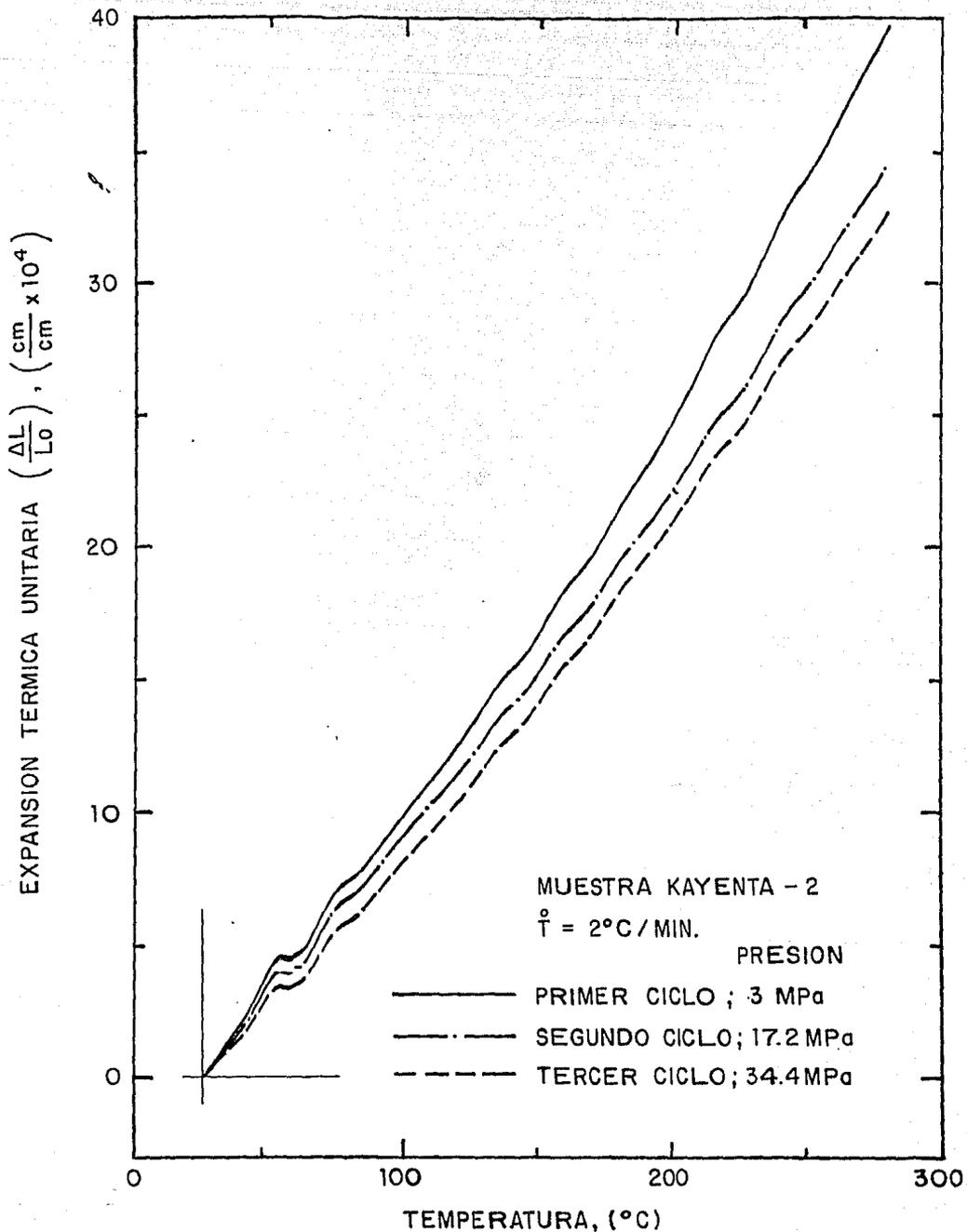


Fig. 7.3.10 Efecto real de la presión de confinamiento sobre la expansión térmica de la muestra KAYENTA-2, de acuerdo a los segmentos de enfriamiento de las gráficas mostradas en la Fig. 7. 3.9.

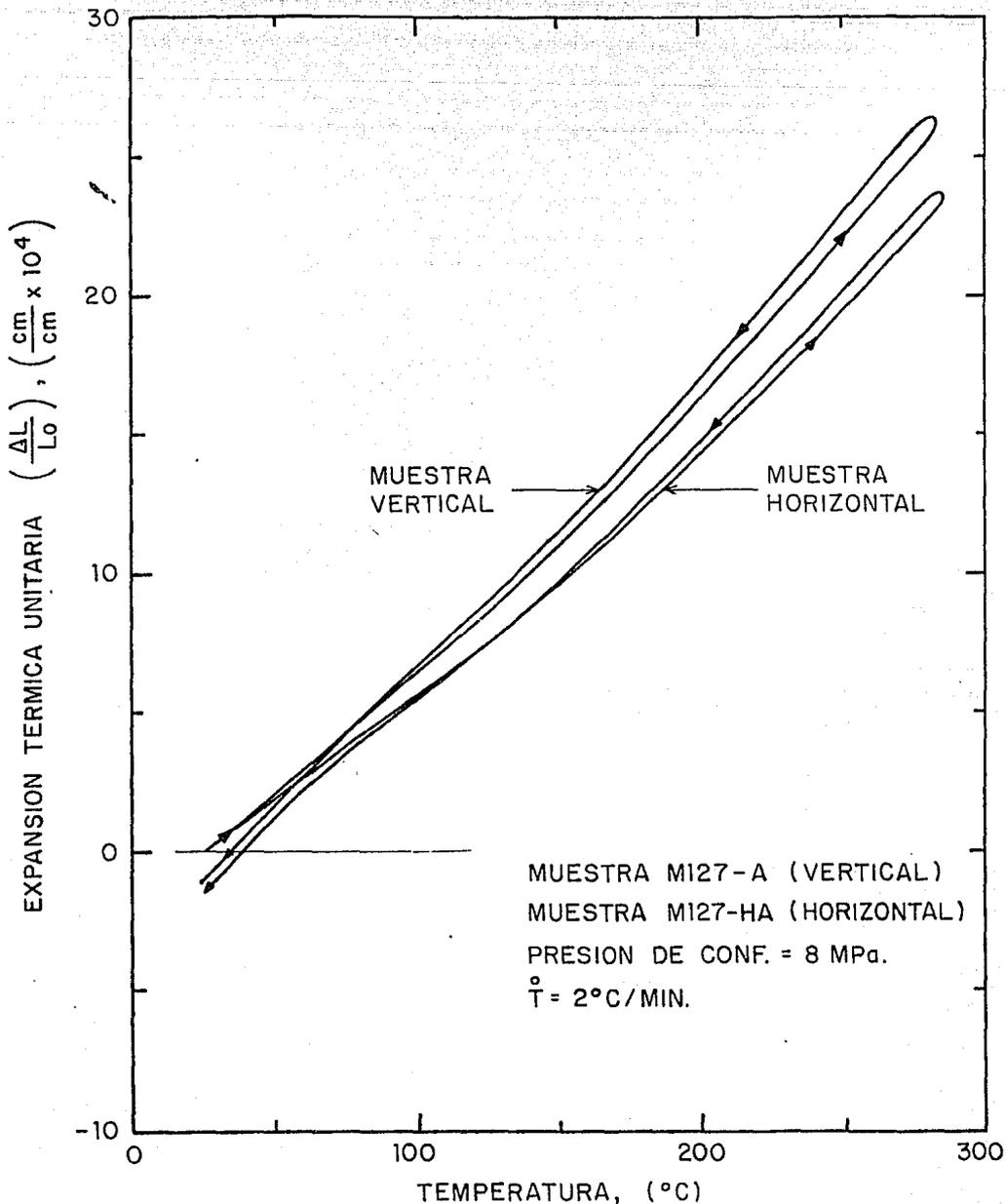


Fig. 7.3.11 Anisotropía de la expansión térmica de rocas areniscas: gráficas correspondientes a mediciones efectuadas en la dirección longitudinal de dos muestras cilíndricas que fueron cortadas del mismo núcleo en direcciones mutuamente perpendiculares.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES

El flujo de agua pura o salmuera a través de rocas areniscas es en sí mismo un fenómeno muy complejo, cuya ocurrencia puede simultáneamente dar lugar a la generación de eventos asociados que tienen el potencial de producir alteraciones en la red de conductos de flujo de la estructura porosa, propiciando con ello la posibilidad de que se produzcan cambios de permeabilidad susceptibles de ser erróneamente atribuidos al efecto directo de la temperatura. Algunos ejemplos de estos eventos asociados al fenómeno de flujo son la hidratación e hinchamiento de arcillas activas, la disolución de minerales y la obstrucción de los conductos de flujo por deposición de partículas finas de material sólido. Por consiguiente, cuando se trate de evaluar el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad a partir de mediciones experimentales debe tenerse en cuenta que el propio método de medición puede inducir alteraciones significantes en esta propiedad, lo que de no considerarse puede conducir a apreciaciones incorrectas acerca del efecto de la temperatura.

Las evidencias experimentales obtenidas indican que el efecto aparente de la temperatura sobre la permeabilidad es la resultante de la acción que conjuntamente ejercen dos diferentes factores: un mecanismo de origen aún no determinado que produce disminución de la permeabilidad con el aumento de la temperatura y cuyo efecto es reversible, y otro mecanismo de tipo irreversible, presuntamente asociado a la disolución de minerales de la roca, el cual produce aumento de la permeabilidad con el incremento de temperatura. El efecto aparente así configurado puede diferir mucho del efecto puramente atribuible a la temperatura.

Se obtuvieron evidencias que indican con bastante claridad que el fenómeno de disolución de minerales de la roca desempeña un papel relevante en la configuración del efecto aparente de la temperatura; por ejemplo, el incremento neto de permeabilidad que se observó en varias de las muestras al completarse el ciclo de calentamiento y enfriamiento. Así mismo, las evidencias indican que el fenómeno de disolución de minerales se manifiesta con mayor intensidad a medida que es mayor la temperatura, tendencia la cual concuerda con el patrón de solubilidad del cuarzo, mineral constituyente de las rocas areniscas en muy alta proporción.

Con el incremento de la temperatura hasta valores de aproximadamente 210 °C se observaron en general reducciones notables de la permeabilidad. Sin embargo, con el incremento de la temperatura a valores más elevados no se produjeron reducciones adicionales de la permeabilidad, sino incrementos muy significativos. En congruencia con lo último, al volver las rocas a la temperatura original se registraron valores de permeabilidad mayores que los medidos al inicio del calentamiento.

La determinación de los cambios de permeabilidad susceptibles de atribuirse en forma directa al efecto de la temperatura se manifiesta como una labor muy difícil de realizar. El principal obstáculo para lograrlo radica en la dificultad para diferenciar los cambios de permeabilidad directamente atribuibles al efecto de la temperatura de los cambios relacionados con fenómenos de disolución y con otras interacciones originadas por desequilibrios de tipo químico entre el fluido de medición y los minerales de la roca. Desde otro punto de vista, para determinar cual es el efecto sobre la permeabilidad que puede atribuirse directamente a la temperatura es necesario lograr la condición de no interacción entre el fluido de medición y los minerales de la roca. Sin embargo, las evidencias indican que esta condición debe ser muy difícil de alcanzarse, especialmente en el caso de mediciones a temperaturas elevadas y bajo condiciones de esfuerzo, ya que en estas circunstancias puede ser prácticamente imposible controlar los procesos de disolución de los minerales constituyentes de la roca.

Al considerar los datos de mediciones en las que razonablemente pudo inferirse que la permeabilidad no fue afectada en forma significativa por fenómenos de disolución de minerales, se encontró que la relación funcional entre la permeabilidad y la temperatura está representada muy aproximadamente por la expresión

$$K/K_0 = (T/T_0)^{-b}$$

donde k es la permeabilidad a la temperatura T , k_0 es la permeabilidad a la temperatura T_0 , siendo T_0 una temperatura de referencia arbitraria, y b es una constante positiva. Las evidencias experimentales indican que la expresión anterior es válida tanto para agua como para salmuera. Esta correlación puede tener importantes aplicaciones prácticas como algoritmo de interpolación y de extrapolación, tanto en lo que se refiere a la planeación del trabajo de laboratorio como en lo que respecta al desarrollo de actividades relacionadas con ingeniería de yacimientos geotérmicos y petroleros.

Se observó que el efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas se manifiesta en una gama muy amplia de intensidades. Los datos experimentales ajustados conforme a la correlación dada en el párrafo anterior exhiben reducciones de permeabilidad entre 16% y 99% con el incremento de la temperatura de 25°C a 200°C. Con fundamento en estos resultados se concluye que los datos de permeabilidad obtenidos mediante mediciones de laboratorio en especímenes sometidos a temperatura ambiente pueden diferir significativamente de la permeabilidad de las rocas a las condiciones de alta temperatura típicas de los yacimientos geotérmicos y de los yacimientos petroleros muy profundos.

Se efectuó un análisis físico-matemático del fenómeno de expansión térmica en un medio poroso. Se definieron tres coeficientes volumétricos de expansión térmica para un medio poroso y se demostró que dichos coeficientes están directamente vinculados con el efecto de la temperatura sobre la porosidad. Se determinó que al aumentar la temperatura de un medio poroso confinado se produce en general una reducción de la porosidad, lo cual se debe a que el material sólido se expande preferencialmente hacia el interior de los poros. También se dedujo que la intensidad del efecto de la temperatura sobre la porosidad depende de las condiciones de confinamiento a las cuales se encuentra sometido el medio poroso: a medida que aumenta la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro se incrementa el efecto de la temperatura sobre la porosidad, alcanzando su manifestación máxima en el caso hipotético de un medio poroso sujeto a un confinamiento totalmente rígido, mientras que el efecto es nulo en el caso en que la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales. Por otra parte, se determinó que la reducción proporcional de porosidad asociada al aumento de la temperatura es más significativa a medida que es menor la porosidad intrínseca del medio poroso. Se demostró que la dilatación térmica del volumen total de un medio poroso depende de las condiciones de confinamiento actuando sobre el medio: la dilatación del volumen total es máxima y proporcionalmente igual a la dilatación volumétrica del material sólido en el caso en que la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales, mientras que es nula en el caso extremo en que el medio se encuentra sujeto a un confinamiento totalmente rígido. También se demostró que el volumen de los poros puede aumentar o disminuir con el incremento de la temperatura, dependiendo ello de la diferencia entre la presión de confinamiento y la presión de poro: el cambio en el volumen de los poros es máximo y proporcionalmente igual a la dilatación volumétrica del material sólido cuando la presión de confinamiento y la presión de poro son iguales, mientras que su valor mínimo corresponde al caso en que el medio está sujeto a un confinamiento rígido.

Se establecieron las bases conceptuales y analíticas de un método experimental original que permite evaluar el efecto de la temperatura sobre la porosidad a partir de mediciones de expansión térmica lineal en un medio poroso. Dentro del contexto de las investigaciones que se efectuaron para tratar de determinar el origen del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad se aplicó este método experimental para cuantificar el efecto de la temperatura sobre la porosidad de las rocas areniscas. Los resultados de mediciones efectuadas en cuatro especímenes de rocas areniscas sometidas a 20.7 Mpa de presión de confinamiento y presión de poro nula mostraron que con el incremento de temperatura de 20°C a 280°C se produjeron reducciones de porosidad de aproximadamente 2%.

Se efectuaron algunos estudios con objeto de investigar el origen del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad. Estos estudios se enfocaron por una parte a determinar el grado en que la disminución de permeabilidad asociada al aumento de la temperatura podía ser atribuida a reducciones de porosidad del orden de magnitud de las reducciones que se observaron en los especímenes en los cuales se evaluó el efecto de la temperatura sobre la porosidad. En este respecto se concluyó que en la configuración del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas participa algún otro mecanismo cuya influencia es más importante que la que ejerce la reducción de la porosidad.

Por otra parte, a partir del análisis en un modelo de tubos capilares se demostró que la ocurrencia de cualquier fenómeno que origine una determinada reducción del diámetro de los conductos de flujo producirá reducciones de permeabilidad que serán más significantes a medida que sea menor el tamaño de los poros de un medio poroso. Este resultado pone de manifiesto que la interpretación y la comparación de resultados experimentales acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas son aspectos que deben realizarse teniendo en cuenta la posibilidad de que el tamaño de los poros desempeñe un papel preponderante en la conformación de dicho efecto. De esta manera, los resultados obtenidos en muestras de rocas de diferente tamaño de poro pueden no ser directamente comparables, constituyendo ésto una posible explicación a los resultados inconsistentes que se encuentran reportados en la literatura acerca del efecto de la temperatura sobre la permeabilidad de las rocas areniscas.

Se efectuaron estudios experimentales sobre diversos aspectos relacionados con la expansión térmica de las rocas areniscas. Se considera que la información que se obtuvo de estos estudios constituye una contribución original al conocimiento del comportamiento de este tipo de rocas. Se observó que en el intervalo de 20°C a 280°C la expansión térmica de las rocas areniscas es esencialmente reversible, sin

histéresis y repetible, exceptuando el primer ciclado de temperatura, durante el cual se apreció que las rocas sufren un proceso de compactación. Se concluyó que el cambio en la rapidez de variación de la temperatura entre $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ y $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ no influye en forma discernible sobre el patrón de la expansión térmica. Se observó, en conformidad con lo que era de esperarse en base a los conceptos expuestos en la sección 3.4, que la expansión térmica de una muestra de roca arenisca disminuyó al incrementarse la presión de confinamiento. Finalmente, se obtuvieron evidencias que sugieren que la expansión térmica de las rocas areniscas puede tener considerable dependencia direccional.

REFERENCIAS

Amyx, J. W., Bass, D. M. y Whiting, R. L., [1960], "Petroleum Reservoir Engineering", McGraw-Hill, New York.

Archie, G. E., [1942], "The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics" AIME Transactions, Vol. 146, pag. 54-61.

Aruna, M., Arihara, N. y Ramey, H. J., [1977], "The Effect of Temperature and Stress on the Absolute Permeability of Sandstones and Limestones", Paper Presented at the American Nuclear Society Topical Meeting, April 1977.

Ashqar, P. I., [1979], "Thermal Expansion of Porous Rocks Under Stress", Master of Science Project Report, Berkeley, University of California, Department of Mechanical Engineering.

Casse, F. J., [1974], "The Effect of Temperature and Confining Pressure on Fluid Flow Properties of Consolidated Rocks", Ph. D. Dissertation, Stanford University.

Clark, S. J. (Editor), [1966], "Handbook of Physical Constants", The Geological Society of America, Inc. Memoir 97, New York.

Collins, R. E., [1976], "The Flow of Fluids Through Porous Materials", The Petroleum Publishing Company, Tulsa, Oklahoma.

Danesh, A., Ehlig-Economides, C. and Ramey H. J., [1978], "The Effect of Temperature Level on Absolute Permeability of Unconsolidated Silica and Stainless Steel", Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 2, pag. 137-139.

Darcy, H., [1856], "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon", (referencia citada por Hubbert [1956]).

Fancher, G. H., Lewis, J. A. and Barnes, K. B., [1933], "Some Physical Characteristics of Oil Sands", Pennsylvania State College Mineral Industries Experimental Station Bull. No. 12, pag. 65-171.

Gobran, B. D., Brigham, W. E. y Sanyal S. K., [1980], "The Temperature Dependence of Permeability", Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 4, 397-400.

Gobran, B. D., Brigham, W. E. y Ramey, H. J., [1981], "Absolute Permeability as a Function of Confining Pressure, Pore Pressure and Temperature", Society of Petroleum Engineers Paper No. 10156.

Greenwald, R. F., Ashqar, P. I. y Somerton, W. H., [1982], "Thermal Expansion Behavior of Porous Rocks Under Stress", Proceedings of the Thermal Expansion Conference No. 7, 173-183, Plenum Press, David C. Larsen, Editor.

Holman, J. P., [1978], "Métodos Experimentales Para Ingenieros", McGraw-Hill, México.

Hubbert, K. M., [1956], "Darcy's Law and the Field Equations of the Flow of Underground Fluids", Journal of Petroleum Transactions of AIME, Vol. 207, pag. 222-239.

Janah, A., [1980], "Pore Volume Variation With Temperature For Porous Rocks Under Stress", Berkeley, University of California, Department of Mechanical Engineering.

Jones, F. O., [1964], "Influence of Chemical Composition of Water on Clay Blocking of Permeability", Journal of Petroleum Technology, (April, 1964), 441-446.

Martinez, L. F., [1978], "Thermal Conductivity of Core Samples from the Cerro Prieto Geothermal Field: Experimental Results and an Improved Prediction Method", Proceedings, 1st. Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, pag. 342-351.

Mungan, N., [1965], "Permeability Reduction Through Changes in pH and Salinity", Journal of Petroleum Technology, (December, 1965), 1449-1453.

Potter, J. M., Dibble, W. E. y Nur, A., [1981], "Effects of Temperature and Solution Composition on the Permeability of St. Peters Sandstone - Role of Iron (III)", Journal of Petroleum Technology, (May 1981), 905-907.

Reddy, M. S., [1977], "Estimating the Thermal Conductivity of Rocks: an Analytical Approach", Proceedings, 7th Symposium on Thermophysical Properties, Committee on Thermophysical Properties: High Temperature Division of ASME, pag. 404-411.

Sears, F. W. y Zemansky, M. W., [1957], "Física General", Cuarta Edición, Editorial Aguilar, Madrid, España.

Scheiddeger, A. E., [1960], "The Physics of Flow Through Porous Media", University of Toronto Press, Toronto, Canada.

Somerton, W. H. y Selim, M. A., [1961], "Additional Thermal Data for Porous Rocks-Thermal Expansion and Heat of Reaction", Society of Petroleum Engineers Journal (Dec. 1961), 249-253.

Somerton, W. H., [1980], "The Behavior of Rock-Fluid Systems at Elevated Temperatures and Pressures", Annual Report 1980, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 34-40.

Somerton, W. H., [1982], "Porous Rock-Fluid Systems at Elevated Temperatures and Pressures", In Recent Trends in Hydrogeology, Denver, Col., The Geological Society of America Special Paper 189.

Weinbrandt, R. M., Ramey, H. J. y Casse, F. J., "The Effect of Temperature on Relative and Absolute Permeability of Sandstones", Society of Petroleum Engineers Journal, (Oct. 1975), 376-384.

Winsauer, W. O., Shearin, A. M., Masson, P. H. y Williams, M., [1952], "Resistivity of Brine-Saturated Sands in Relation to Pore Geometry", Am. Assoc. Petrol. Geologists Bull., Vol. 36, No. 1, pag. 253.

Wyble, D. O., [1958], "Effect of Applied Pressure on the Conductivity, Porosity and Permeability of Sandstones", Petroleum Transactions of AIME, Vol. 213, pag. 430-432.

Wyllie, M. R., Gregory, A. R. y Gardner, L. W., [1956], "Elastic Wave Velocities in Heterogeneous and Porous Media", Geophysics, Vol XXI, No. 1, pag. 41-70.