

01163

lej.
3

DISEÑO DE ALMACENAMIENTOS EN DOMOS SALINAS

JUAN MANUEL MARTINEZ RODRIGUEZ

TESIS

Presentada a la División de Estudios de

Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener

el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(Mecánica de Suelos)

CIUDAD UNIVERSITARIA, Julio de 1986





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.

DISEÑO DE ALMACENAMIENTOS EN DOMOS SALINAS

RESUMEN

Los domos salinos son cuerpos intrusivos compuestos principalmente por cloruro de sodio. Se utilizan como fuente de materiales, como almacenamiento subterráneo de gases y líquidos y como depósitos de desperdicios tóxicos.

En el presente trabajo se estudia la factibilidad técnica de un proyecto de almacenamiento de hidrocarburos, desde el punto de vista de Mecánica de Rocas, en un domo salino. Con tal fin se hicieron pruebas de laboratorio, para obtener parámetros de comportamiento de la sal, y se desarrolló un modelo matemático para predecir el comportamiento de la sal al construir y operar las cavidades.

DISEÑO DE ALMACENAMIENTOS EN DOMOS SALINAS

INDICE

Página

1. INTRODUCCION	1
2. PROPIEDADES REOLOGICAS DE LA SAL	
2.1. PRUEBAS DE LABORATORIO	
2.1.1. OBTENCION DE LAS MUESTRAS	3
2.1.2. EQUIPO DE LABORATORIO	
2.1.2.1. Clasificación del Material	3
2.1.2.2. Relajación (DREI)	4
2.1.2.3. Fluencia en extensión triaxial	6
2.1.3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	7
2.1.3.1. Clasificación	8
2.1.3.2. Relajación (DREI)	8
2.1.3.3. Fluencia en extensión triaxial	9
2.2. INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS	11
2.2.1. ETAPA HIDROSTATICA	11
2.2.2. RELAJACION	12
2.2.3. FLUENCIA	
2.2.3.1. Antecedentes	15

	Página
2.2.3.2. Interpretación de las pruebas de fluencia en extensión triaxial	19
2.2.4. CONCLUSIONES DE LA INTERPRETACION	22
3. MODELO MATEMATICO DEL ESTADO DE ESFUERZOS Y DE DEFORMACIONES EN EL CONTORNO DE LA CAVIDAD	24
3.1. HIPOTESIS DEL MODELO ANALITICO	24
3.2. CAVIDAD CILINDRICA	26
3.3. CAVIDAD ESFERICA	30
4. RECOMENDACIONES DE DISEÑO	32
4.1. ZONA DE INFLUENCIA DE LA CAVERNA	32
4.2. REDUCCION DEL DIAMETRO DE LA CAVERNA	33
4.3. VARIACION DEL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO	33
4.4. VARIACION DE LOS ESFUERZOS CON EL TIEMPO	34
4.5. ESTABILIDAD DE LAS PAREDES DE LA CAVERNA	34
5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	36
6. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA	39
7. FIGURAS	44

ANEXO 1. PROCEDIMIENTOS Y ANOTACIONES PARA EL MANEJO DE LA CAMARA TRIAXIAL DE ALTA PRESION	85
ANEXO 2. CORRELACION DE ESFUERZOS TECTONICOS Y TAMAÑO DE SUBGRANOS EN LOS CRISTALES DE SAL	96

1. INTRODUCCION:

Los domos salinos son cuerpos intrusivos de sal que penetran a través de grandes espesores de rocas sedimentarias suprayacentes. Se pueden diferenciar de otras formaciones geológicas que involucran sal, por la forma burdamente circular o elíptica que tienen en sección horizontal y por tener sus dimensiones horizontales del mismo orden de magnitud o menor, que las verticales, como se ilustra en la figura 1.1.

Tienen como componente principal el Cloruro de Sodio o Halita (NaCl); otros componentes, aunque menos abundantes, son la Silvita (KCl) y la Carnalita ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Además es común que presenten inclusiones de goethita o hematita, lo mismo que intercalaciones de anhidrita, arcillas o materia carbonosa.

En las dos últimas décadas se ha incrementado la utilización de cavidades creadas por lixiviación en domos salinos, además de fuente de materiales, como almacenamiento subterráneo de gases y líquidos, y como depósitos de desperdicios tóxicos, principalmente radioactivos.

Desde el punto de vista de almacenamiento ofrecen características muy especiales:

-Son particularmente impermeables a los hidrocarburos, debido a la deformabilidad plástica que presentan en un amplio rango de presiones, temperaturas y velocidades de deformación; esta propiedad evita que se abran grietas o que, de producirse, permanezcan abiertas.

-El sistema constructivo es relativamente simple ya que se generan cavidades mediante disolución de la sal, circulando agua dulce a través de un pozo y recuperando la salmuera, tal como se muestra en la figura 1.2.

-Con respecto a los almacenamientos superficiales, en tanques, requieren de menores instalaciones para su operación; esta operación, como puede verse en la figura 1.3, es sencilla.

-Se generan cavernas de gran volumen (100.000 a 1'000.000 de metros cúbicos), en áreas reducidas.

-Son menos vulnerables a los riesgos de explosiones, incendios y huracanes.

El objetivo del presente trabajo es obtener los parámetros de diseño para predecir, a través de un modelo matemático, el comportamiento de la sal, bajo diferentes condiciones de esfuerzo y de deformación, así como su variación con el tiempo, al construir y operar cavidades utilizadas en el almacenamiento de hidrocarburos.

Los principales aspectos que interesa conocer son: la reducción del volumen de la caverna con el tiempo, la distribución de esfuerzos en el contorno del almacenamiento para distintos tiempos, la zona de influencia de la excavación, la distancia mínima entre cavernas y la deformación a largo plazo de la zona central entre cavernas.

La investigación comprende dos partes principales:

- Estudio de las propiedades reológicas de la sal por medio de pruebas de laboratorio: fluencia en compresión simple, fluencia en pruebas triaxiales de extensión y ensayos de relajación. Para la realización de las pruebas fue necesario hacer algunas modificaciones y adaptaciones al equipo con que contaba el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en cuyas instalaciones se llevó a cabo el estudio experimental.

- Desarrollo de un modelo matemático a partir de consideraciones propias de la caverna, con algunas simplificaciones geométricas y de carga y de acuerdo con los resultados de las pruebas de laboratorio.

Los resultados de las pruebas de fluencia en compresión simple no se incluyen en el presente trabajo porque pertenecen a un estudio paralelo que se lleva a cabo en el Instituto de Ingeniería (Rodríguez Cuevas 1986).

2. PROPIEDADES REOLOGICAS DE LA SAL

2.1 PRUEBAS DE LABORATORIO

2.1.1 OBTENCION DE LAS MUESTRAS

Con el fin de estudiar la factibilidad técnica de un proyecto de almacenamiento de petróleo, PEMEX y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), perforaron el pozo exploratorio Tuzandepetl #300, en el domo salino Tuzandepetl, localizado al sur de Coatzacoalcos, Veracruz, y dentro de la cuenca salina del sureste de México.

El IMP comisionó al Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), la extracción de núcleos de las muestras provenientes de campo. Los especímenes utilizados en las pruebas fueron entregados por el IMP al Instituto de Ingeniería de la UNAM (II), ya cortados en forma cilíndrica, con sus caras perpendiculares a la generatriz longitudinal del cilindro y con las superficies de las caras aceptablemente terminadas. Este trabajo lo realizó el IIE siguiendo las normas establecidas por la International Society of Rock Mechanics (ISRM), (IIE, 1985). Las muestras cilíndricas tenían aproximadamente 5.1 cm de diámetro y de 10 a 13 cm de longitud.

2.1.2 EQUIPO DE LABORATORIO

2.1.2.1 Clasificación del Material

En todas las probetas se realizó la medición de la velocidad de onda de compresión, a temperatura ambiente y sin presión de confinamiento. A las probetas utilizadas en las diferentes pruebas se les hizo una nueva medición de velocidad una vez finalizado el ensayo. Antes de cada medición se verificó la calibración

del dispositivo utilizado: un generador de ondas (V-meter), de propiedad del I.I.

En todos los especímenes se estimó su peso volumétrico, calculando el volumen a partir de sus dimensiones físicas, medidas con calibrador de 0.005 cm de resolución y tomando el peso en balanza de 0.01 gr de sensibilidad.

2.1.2.2 Relajación (Prueba DRBI)

El objetivo del dispositivo de relajación biaxial isotérmica (DRBI) es poner en evidencia las características de elasticidad, plasticidad y viscosidad de la sal. Consiste en aplicar una presión radial (de cámara), en aumento, y determinar la presión axial necesaria para que la longitud del espécimen cilíndrico se mantenga constante.

Todas las pruebas, al igual que las de fluencia en extensión triaxial, se efectuaron en la celda triaxial de alta presión (II, 1976) del laboratorio de enrocamientos. En la figura 2.1 se muestra un esquema de la celda.

Alrededor del cuerpo de la celda triaxial se colocó un recinto de madera, con el fin de mantener la temperatura constante con un error de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Las pruebas se efectuaron a 49°C . El incremento de temperatura se logró mediante dos focos de 100 watts; el control de la temperatura se tuvo mediante un sensor electrónico. Adicionalmente se colocó un ventilador en una pared de la caja para hacer circular el aire interior y lograr homogeneidad en la temperatura. El control real de temperatura que se tuvo fue de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ para todas las pruebas de relajación y las de las muestras 14 y 15 de fluencia; en las pruebas de las muestras 13 y 20 se tuvo un control de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. La primera de éstas por su corta duración y la segunda, por que se le implementó un regulador de voltage y se aisló el motor del ventilador del control de temperatura.

Como se ilustra en el esquema de carga de la figura 2.2 la presión de la cámara se obtiene mediante presión de aceite inducida por un sistema neumático de bombas y se registra en un manómetro. Se pueden alcanzar hasta 700 kg/cm^2 , con aproximación de 1 kg/cm^2 .

El sistema de carga axial original se modificó con el fin de tener control independiente durante las pruebas: la celda de presión axial se conectó a un dispositivo de presión Amsler. Así mismo se modificó la celda triaxial con objeto de medir directamente con transductores de presión, la presión actuante en la cabeza de la muestra. Durante la realización de las pruebas de fluencia de las muestras 13, 14 y 15 el sistema Amsler exigió control manual para mantener la carga constante; por ser manual se desconectó durante la noche, lo que implicó una variación de la carga axial de 25%. Para evitar tal variación se le adaptó un servo-mecanismo que permitió un control constante y estricto del esfuerzo vertical aplicado durante todo el tiempo de la prueba 20, resultando que en este caso la variación en el esfuerzo vertical no sobrepasó el 3%. La deformación axial se midió con micrómetro de 0.0001" (0.000254 cm) de resolución, que equivale a una deformación de 0.0025%. La celda triaxial no tiene sistema para medir deformación radial. En cada lectura se tomaron datos de tiempo, temperatura, carga axial, presión de cámara y desplazamiento axial.

La calibración del equipo se llevó a cabo antes de iniciar las pruebas (se incluye dentro del Anexo 1). Se calculó la fricción que afecta la presión axial, generada por el rozamiento de los aros del gato. Se montó la cámara sin muestra pero llena de aceite; al dar presión de cámara se observó la presión generada en el aceite del gato utilizando la lectura del transductor de presión. Se debían igualar ambas presiones (de cámara y de gato); su diferencia corresponde al efecto de fricción. Se estimó el máximo valor que se alcanza en 14 kg/cm².

Para aislar las muestras del aceite de la cámara se utilizó una membrana de hule de 0.2 cm de espesor.

PROCEDIMIENTO

Las pruebas DREI comprendieron tres etapas a partir del montaje de la muestra y del momento en que el conjunto alcanza su equilibrio con respecto a la temperatura, que también fue de 49°C.

En la primera etapa se sometió a la muestra a un estado de esfuerzos hidrostático, hasta alcanzar 50 kg/cm² y a una tasa de 100 kg/cm²/hr para las muestras 6, 10 y 11 y de 50 kg/cm²/hr para la muestra 5.

En la segunda etapa se incrementa la carga radial o de cámara, al tiempo que se da la presión axial necesaria para mantener la longitud de la muestra constante. Se utilizó la misma tasa de carga descrita para la primera etapa. La presión axial se varió mediante el dispositivo de presión Amsler. Se alcanzó una presión radial máxima de 300 kg/cm² en las cuatro pruebas.

En la tercera etapa, al llegar la presión radial a 300 kg/cm², se realizó un último incremento de la misma a 325 kg/cm², de tal manera que se indujo un esfuerzo desviador y una pequeña deformación instantáneos. Se dejó el conjunto en este estado el tiempo (días) suficiente para observar la relajación de los esfuerzos.

2.1.2.3 Fluencia en Extensión Triaxial

El objeto de esta prueba es conocer el comportamiento de la sal con el tiempo, cuando tiene el esfuerzo confinante y el esfuerzo desviador constantes (ensayo de creep). Una muestra se sometió a varias etapas de esfuerzo incrementando el esfuerzo desviador (ensayo múltiple).

La celda triaxial que se utilizó en estas pruebas es la misma mencionada en los ensayos de DRBI. Por lo tanto las anotaciones con respecto al equipo (control de temperatura, sistema de carga, modificaciones, sistema de medida, calibración, etc.) son válidas también para estas pruebas.

Los ensayos triaxiales de fluencia fueron conducidos en extensión:

$$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3, \quad \sigma_1 = 200 \text{ kg/cm}^2 \text{ y } 38 \leq \sigma_3 \leq 120 \text{ kg/cm}^2$$

Se decidió hacer ensayos en extensión con el fin de simular las condiciones que se presentan en el contorno de la caverna. Estas pruebas tienen la ventaja adicional de evitar el efecto de rigidez de la membrana.

PROCEDIMIENTO

El procedimiento seguido, en términos generales, fue el

siguiente: se montó el espécimen y se dejó un mínimo de dos días hasta que se estabilizó la temperatura. Luego, se sometió a un estado de esfuerzos hidrostático incrementando la presión con una tasa de 50 kg/cm² cada veinte minutos, hasta alcanzar la presión de confinamiento. Se dejó reposar para que alcanzara su nuevo punto de equilibrio.

Por medio del sistema Amsler se redujo la carga axial para inducir instantáneamente el esfuerzo desviador midiéndose la deformación al cabo de un minuto. Al inicio de la prueba se tomaron lecturas cada minuto, mas adelante se espaciaron. En el caso de la prueba múltiple el cambio en el esfuerzo desviador se hizo reduciendo aun más el esfuerzo axial.

El esfuerzo axial se corrigió eventualmente, de acuerdo con la deformación axial de la muestra; la necesidad y frecuencia de las correcciones dependieron de la tasa de deformación de espécimen. Suponiendo que mantiene su forma cilíndrica y suponiendo incompresibilidad ($\epsilon_p = -\epsilon_a/2$), el área corregida será

$$A_r = A_o (1 - 0.5 \epsilon_a)^2$$

donde: A_r : Área corregida de la muestra.
 A_o : Área inicial de la muestra.
 ϵ_a : Deformación axial unitaria
 ϵ_p : Deformación radial unitaria.

En los casos en que, debido al menor diámetro de la probeta, se utilizó relleno, el área corregida esta dada por

$$A_r = \pi/4 (D_o - 0.5 \epsilon_a D_p)^2$$

donde: A_r : Área corregida de la muestra.
 D_o : Diámetro de la cabeza y base.
 D_p : Diámetro inicial de la muestra.

2.1.3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.

El IMP entregó al IL, 20 muestras del pozo Tuzandepet1#300, particularmente de los núcleos 6, 7, 13 y 14 que corresponden aproximadamente a profundidades de 750, 850, 1200 y 1300 m respectivamente.

En total se realizaron seis pruebas de fluencia en compresión simple, cuatro pruebas de fluencia en extensión triaxial y cuatro de relajación.

2.1.3.1. Clasificación.

En la tabla 2.1 se presentan las principales características de las muestras utilizadas en las pruebas mecánicas.

La composición mineralógica de la sal no se analizó en el presente estudio. Con base en los datos del IMP, 1985, que por tratarse de una correlación geofísica debe manejarse con cautela, del registro de perforación del pozo (Geostok, 1985) y de las observaciones directas de las muestras se puede estimar que:

- Entre 700 y 980 m el domo está compuesto principalmente por halita, en un 75 a 85%, de cristales pequeños, intercalado con anhidrita, presentando estratificación inclinada.
- Luego de un estrato de anhidrita (980 a 1000m), la halita se presenta en cristales medianos a grandes, sin que se tenga la estratificación observada arriba. El contenido de halita es mayor (85 a 95%).

Se encontró que tanto el peso volumétrico como la medida de velocidad de onda son similares para ambas unidades. El peso volumétrico varía de 2.10 a 2.19 gm/cm³. La velocidad de ondas longitudinales medida antes de efectuar las pruebas varía entre 3.08 y 3.90 km/seg; la reducida velocidad de propagación de ondas de las muestras del núcleo 13 no se tomó en cuenta por ser poco confiable, ya que por efecto del fracturamiento no se logró buen contacto entre las muestras y el generador de ondas. Al finalizar las pruebas se midió de nuevo la velocidad de ondas longitudinales encontrándose una variación entre 3.52 y 4.33 km/seg que muestra claramente el efecto de las presiones aplicadas en el cierre de las fisuras en dirección vertical.

2.1.3.2 Relajación (Prueba DRBI).

Se realizaron las pruebas de DRBI con las muestras 5, 6, 10 y 11; las dos primeras pertenecen al núcleo 7 y las otras al núcleo 14 de la perforación.

El comportamiento de las muestras durante la primera etapa de la prueba (hidrostática) se muestra en las curvas de la figura 2.3.

El comportamiento del material en la segunda y tercera etapas se ilustra así: en las figuras 2.4 a 2.7 se muestra la variación con el tiempo de los esfuerzos aplicados y en las figuras 2.8 a 2.11 la variación del esfuerzo axial en función del esfuerzo radial.

2.1.3.3 Fluencia en Extensión Triaxial.

Se realizaron las pruebas de fluencia en extensión triaxial con las muestras 13, 14, 15 y 20, todas correspondientes al núcleo 6 de la perforación.

En la figura 2.3 se muestran las curvas esfuerzo-deformación en la etapa de compresión hidrostática. En las figuras 2.12 a 2.15 se presentan los resultados de las pruebas. Todas se efectuaron con una presión confinante de 200 kg/cm² que se asemeja a la presión tectónica hidrostática que actúa a 900m de profundidad. La duración de las pruebas fue de 260 min., 28 días, 3 días y 32 días para las muestras 13, 14, 15 y 20 respectivamente. En las figuras 2.16 a 2.19 se ilustra el comportamiento esfuerzo-deformación del material en cada prueba y la variación de la carga.

Cabe señalar que la prueba de la muestra 13 se suspendió a los 260 minutos por falla de la membrana de la muestra.

A la muestra 14, luego de 28 días de fluencia, se le redujo rápidamente el esfuerzo desviador con objeto de medir la deformación en descarga. La curva de este proceso se presenta en la figura 2.20.

La muestra 15 se mantuvo con un esfuerzo desviador de 38 kg/cm² durante los primeros tres días; luego se incrementó instantáneamente hasta 120 kg/cm² y se mantuvo constante hasta el día 25. A partir de ese día se permitió la relajación del esfuerzo desviador manteniendo la deformación de la muestra constante hasta el día 42 como se ilustra en la figura 2.21.

TABLA 2.1 Identificación de muestras

Muestra	Profundidad (m)	Núcleo	Parte	Altura (cm)	Diam. (cm)	Peso Vol. g/cm ³	1) Vel onda km/s antes después		2) Ensayo	3) T °C	4) σ_c kg/cm ²	4.3) σ_a kg/cm ²	Observaciones
20	750.	6	9	10.107	5.110	2.18	3.57	4.01	FC	49.0	200	125	Presentan estratificación inclinada Cristales pequeños
15	750.30	6	9	10.247	5.110	2.19	3.42	3.82	FC	49.0	200	162 y 80	
14	751.30	6	10	13.047	5.108	2.17	3.58	3.88	FC	49.0	200	80	
13	752.0	6	10	10.040	5.108	2.18	3.26	3.76	FC	48.7	200	24	
6	848.33	7	10	10.530	5.078	2.17	3.46	4.12	DRBI	48.5			La muestra 8 presenta un conducto de disolución
5	848.45	7	10	10.430	5.100	2.16	3.53	4.33	DRBI	49.5			
7	848.95	7	10	10.393	5.095	2.18	3.83		FI		0	2.58	
8	849.10	7	10	10.330	5.088	2.17	3.90		FI		0	4.84	
1	849.60	7	11	10.417	5.100	2.16	3.69		FI		0	2.58	Opacas, de cristales medianos. Presentan fracturamiento.
2	849.95	7	11	10.492	5.095	2.17	3.62		FI		0	6.79	
19	1198.15	13	8	11.852	5.110	2.13	1.49						
18	1198.45	13	8	10.392	5.112	2.14	2.11						
17	1201.0	13	13	10.612	5.112	2.10	1.22						No se logró buen contacto para medir velocidad de onda.
16	1201.45	13	13	12.183	5.110	2.15	2.78						
3	1299.75	14	6	10.403	5.092	2.15	3.36		FI		0	6.79	Opacas, de cristales medianos a grandes. Presentan fracturamiento, pero no estratificación.
4	1300.0	14	6	10.545	5.092	2.15	3.08						
12	1301.75	14	10	10.217	5.090	2.15	3.50						
11	1301.90	14	10	10.243	5.105	2.15	3.44	4.36	DRBI	48.8			
9	1302.05	14	10	10.217	5.093	2.15	3.10		FI		0	4.84	
10	1302.15	14	10	10.388	5.097	2.14	2.86	3.52	DRBI	49.0			

1) Velocidad de onda de compresión medida "antes" y "después" del ensayo

2) Ensayos: FI: fluencia un compresión simple
FC: fluencia confinada, ensayo de extensión
DRBI: dispositivo de relajación biaxial isotérmica

3) Temperatura a la que se hizo el ensayo

4) σ_c presión confinante

σ_a presión axial

5) Doble numeración indica varias etapas del ensayo

2.2 INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

El comportamiento de la sal es notablemente variable de acuerdo con la temperatura y el nivel de esfuerzos a que esté sometida: para bajas temperaturas y bajos esfuerzos su comportamiento es frágil; al ir incrementando estos factores el mecanismo de deformación cambia y eventualmente llega a ser predominante la deformación dúctil.

Cuando la estructura del mineral no cambia, como en el caso de tener bajas temperaturas y bajos niveles de esfuerzo, la deformación que se produce puede interpretarse por medio de la teoría lineal de la elasticidad. A medida que se incrementan el nivel de esfuerzos y la temperatura, la estructura del mineral es alterada, bien sea en el contacto entre granos o bien dentro de los cristales mismos (mecanismos intragranulares) y la respuesta de la sal adquiere un carácter no lineal. Adicionalmente, la no linealidad se destaca al producirse el fenómeno de fluencia cuando se mantiene constante en el tiempo, un esfuerzo desviador aplicado.

2.2.1 ETAPA HIDROSTATICA

De la etapa confinada de las pruebas de DRBI se puede deducir los valores del módulo de Young E, suponiendo que el material es elástico lineal e isótropo y que la relación de Poisson es igual a la calculada durante los primeros incrementos de esfuerzo de la segunda etapa de la prueba ($\nu = 0.3$). Los valores del módulo de Young se presentan en la tabla 2.3, calculados con la expresión

$$E = \frac{\sigma_c}{\epsilon_a} (1 - 2\nu) \quad (1)$$

siendo ϵ_a la deformación axial y σ_c el esfuerzo de confinamiento

TABLA 2.3

MUESTRA	E (kg/cm ²)
5	10 880
6	21 060
10	17 320
11	11 380

En comparación con los valores reportados en la literatura (Hansen et.al.1984), los valores de la tabla 2.3 son notablemente inferiores. La diferencia puede ser real, tratándose entonces de una sal particularmente blanda, o deberse a alteraciones de la sal durante su muestreo, transporte y/o almacenamiento.

En la figura 2.22 se presentan las curvas esfuerzo-deformación volumétrica para la etapa hidrostática de las pruebas de fluencia confinada, suponiendo que el material es isotrópico. Durante esta etapa de la prueba

$$\epsilon_v = 3 \epsilon_a \quad (2)$$

siendo ϵ_v la deformación volumétrica y ϵ_a la deformación axial.

De acuerdo con el criterio de Walsh (1965) se puede establecer la porosidad de fisuración del material prolongando el tramo recto de la curva que en este caso pareciera desarrollarse para una presión confinante algo mayor de 150 kg/cm². Se encontró que el volumen de las fisuras varía entre 0.2 y 1.1% del volumen total del material.

2.2.2 RELAJACION

Etapa II: Incremento de σ_c , sin deformación axial

Al incrementar el esfuerzo radial o de cámara σ_c , sin permitir deformación axial se trabaja con esfuerzos cercanos al confinante, de tal manera que los esfuerzos desviadores aplicados son tan bajos que no se altera la estructura cristalina de la sal y resulta válido determinar parámetros elásticos a partir de los resultados de esta etapa de la prueba.

La deformación axial esta dada por

$$\epsilon_a = \frac{1}{E} (\sigma_a - \nu(\sigma_x + \sigma_y)) \quad (3)$$

para este caso:

σ_a = esfuerzo axial

$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$ = esfuerzo radial o de cámara.

ϵ_a = 0, deformación axial nula.

por lo que de la ecuación (3) resulta

$$\sigma_a = \nu (2 \sigma_r)$$

y la relación de Poisson se calcula como

$$\nu = \frac{\sigma_a}{2 \sigma_r} \quad (4)$$

En las figuras 2.8 a 2.11 se aprecia que la variación del esfuerzo axial σ_a , no es proporcional a la del esfuerzo radial σ_r . Por tanto la relación de Poisson varía con el nivel de esfuerzos: desde 0.2 para esfuerzos confinantes pequeños hasta 0.6 para esfuerzos confinantes medios y alcanza el valor de 0.5 para esfuerzos confinantes altos.

Para calcular, con base en esta prueba, las constantes mecánicas de la sal se considera el criterio de falla de Mohr-Coulomb. De la gráfica σ_a vs. σ_r (figura 2.23a) se tiene una curva cuya ecuación es

$$\sigma_a = a \sigma_r + b \quad (5)$$

para el caso en que $\sigma_a < \sigma_r$.

Del círculo de Mohr (figura 2.23b) se tiene

$$\tan \phi = \frac{c}{k}$$

$$\text{Sen } \phi = \frac{R}{k + \frac{\sigma_r + \sigma_a}{2}}$$

$$\text{Sen } \phi = \frac{\frac{\sigma_r - \sigma_a}{2}}{\frac{c}{\tan \phi} + \frac{\sigma_r + \sigma_a}{2}}$$

siendo c la cohesión y ϕ el ángulo de fricción interno del material. Despejando σ_a de la última ecuación se llega a

$$\sigma_a = \frac{1 - \text{sen } \phi}{1 + \text{sen } \phi} \sigma_r - \frac{2c \cos \phi}{1 + \text{sen } \phi} \quad (6)$$

Comparando (5) y (6) se obtiene

$$a = \frac{1 - \operatorname{sen} \phi}{1 + \operatorname{sen} \phi} = \tan^2 (45 - \phi/2) \quad (7)$$

$$b = -\frac{2c \operatorname{cos} \phi}{1 + \operatorname{sen} \phi}$$

De tal manera que de la curva 2.23a se determina a y b y por medio de las ecuaciones (7) se obtienen los valores de ϕ y c .

Para el caso en que $\sigma_a > \sigma_c$ la interpretación da como resultado

$$a = \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} = \tan^2 (45 + \phi/2)$$

$$b = -\frac{2c \operatorname{cos} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} \quad (8)$$

Con la interpretación descrita, las constantes mecánicas obtenidas en las pruebas son las que se presentan en la tabla 2.4

TABLA 2.4.

MUESTRA No.	COHESION MAXIMA(kg/cm ²)	COHESION FINAL(kg/cm ²)	ANGULO DE FRICCION
5	5	0	1.5
6	12	0	2.0
10	13	5	6.0
11	12	5	1.0

Etapa III : Relajación a σ_c constante:

El esfuerzo desviador en las pruebas de DRBI y al cabo de 1700 minutos de relajación no sobrepasa una magnitud de 2 kg/cm² en el caso de las muestras 5, 6 y 10 y de 15 kg/cm² en la muestra 11.

Al finalizar la prueba de fluencia de la muestra 15, se efectuó una etapa de relajación a deformación constante (figura 2.21) .La cohesión última obtenida fue de 17.5 kg/cm².

En consecuencia la cohesión a largo plazo de esta sal varía entre 0 y 17.5 kg/cm² de acuerdo con las diferentes pruebas efectuadas.

2.2.3 FLUENCIA

2.2.3.1 Antecedentes

El comportamiento de la fluencia en los metales, que ha sido aplicado también en mecánica de rocas (Jaeger y Cook, 1979), se ha planteado como se ilustra en la figura 2.24: al aplicar un esfuerzo desviador constante al material aparece la deformación instantánea, ϵ_i , que es seguida por una etapa de fluencia transitoria (I) con la velocidad de la deformación disminuyendo con el tiempo. Luego, aparece una etapa de fluencia constante (II) o rango en el que la velocidad de deformación permanece constante. Por último, la etapa final (III) en la que la velocidad de deformación se incrementa alcanzando la ruptura.

Para el caso de la sal, comparando las variadas leyes de fluencia (Hansen 1977, Horseman et. al. 1984, Jaeger et.al. 1979, Langer 1984, Lindner et.al.1984, Ode 1968, Stagg et.al.1968) existen discrepancias respecto a la existencia o no de la etapa de fluencia constante (II). Se plantean así dos tipos de comportamiento: el primero supone que la sal fluye siguiendo todas las etapas descritas para los metales; el segundo supone que la fluencia de la sal solo tiene etapa transitoria lo que implica que la velocidad de deformación siempre disminuye con el tiempo. Los resultados de las pruebas de "corta duración" (menos de un año) son igualmente ajustables a ambos conceptos. El impacto de la diferencia en la respuesta de los dos tipos de modelo comienzan a ser importantes para largos períodos de tiempo donde las predicciones divergen significativamente.

En los resultados de las pruebas de fluencia en extensión triaxial no se definió claramente la etapa de fluencia constante por lo que la interpretación de los resultados se hace suponiendo que al aplicar carga sobre la muestra se produce la deformación instantánea ϵ_i , seguida de una deformación diferida ϵ_d , siempre decreciente con el tiempo.

LEYES DE FLUENCIA

El comportamiento de la sal ha sido representado por numerosas ecuaciones matemáticas que se pueden agrupar básicamente en (1) reológicas, (2) empíricas y (3) fenomenológicas.

LEYES REOLOGICAS

La teoría lineal de la reología involucra el uso de varios elementos simples, solos o combinados, para tener en cuenta el comportamiento elástico, inelástico y viscoso del material. Los elementos representan relaciones entre deformación, velocidad de deformación y/o velocidad de aplicación de carga y pueden ser combinados para formar una ecuación constitutiva general. La selección de los elementos apropiados para formar modelos del material está basada en resultados empíricos. Cuando se han determinado los valores de cada parámetro se podrá predecir la respuesta bajo diferentes condiciones de esfuerzo y deformación.

Adicionalmente, un modelo complejo puede ser fácilmente subdividido con respecto a los tipos de comportamiento (elástico, plástico, etc.) para permitir la conceptualización. Por lo tanto, el procedimiento no es totalmente empírico ni fenomenológico, sino una combinación de ambos.

Se han construido modelos reológicos de variada complejidad (figura 2.25) aplicables cuando las relaciones esfuerzo-deformación son lineales, es decir para bajos niveles de esfuerzo y bajas temperaturas donde la estructura de los cristales de halita no es alterada. Tal es el caso de las pruebas de fluencia en compresión simple, realizadas con las muestras del pozo Tuzandepetl 300 (Rodríguez Cuevas 1986).

LEYES EMPIRICAS

Fueron desarrolladas en el estudio de la fluencia en metales basándose en observaciones experimentales. Para la sal, se han reportado multitud de leyes empíricas de fluencia (Hansen et al. 1980, Horseman et al. 1984, Le Compte 1965, Lindner et al. 1984, Nair et al. 1970, Ode 1968, Stagg et al. 1968) con características similares como:

-Las principales variables que influyen en la respuesta a la fluencia son el esfuerzo desviador y la temperatura; en ambos casos su incidencia en el comportamiento es altamente no lineal.

-La velocidad de deformación decae con el tiempo.

-La variable de referencia para expresar estas leyes es generalmente tomada como tiempo, pero podría ser expresada en términos de deformación.

Así, se tiene que una ley empírica general aplicable a los casos en que la fluencia de la sal tenga un comportamiento no lineal es del tipo:

$$\epsilon_d = f_1(\sigma_1 - \sigma_3) f_2(t) f_3(T) \quad (9)$$

siendo ϵ_d la deformación diferida y f_1 , f_2 y f_3 funciones no lineales del esfuerzo desviador, el tiempo y la temperatura respectivamente. La función del tiempo, $f_2(t)$, proporciona la descripción de la curva de respuesta del material con el tiempo. En términos matemáticos representa la integral con respecto al tiempo de una expresión de la velocidad de deformación para cualquier instante, t .

Los funciones f_1 , f_2 , f_3 que más se han utilizado son las de potencia, de tal suerte que una expresión muy común es

$$\epsilon_d = k (\sigma_1 - \sigma_3)^n t^a T^m \quad (10)$$

siendo ϵ_d : deformación diferida

$\sigma_1 - \sigma_3$: esfuerzo desviador constante aplicado

t : tiempo

T : temperatura absoluta

k, n, a, m : constantes propias del material.

Por último cabe señalar que para la etapa de fluencia transitoria los modelos basados en las leyes empíricas presentan un muy buen ajuste de los puntos experimentales con respecto a la expresión matemática.

LEYES FENOMENOLOGICAS

Parten de la suposición de que los mecanismos intragranulares dominan la fluencia y que deben ser inicializados aplicando cierta cantidad de energía.

El mecanismo intragranular que mejor ha explicado el proceso de deformación es la teoría de las dislocaciones que se expone a continuación.

Los cristales de Cloruro de Sodio difícilmente se presentan perfectos: contienen numerosos defectos que a su vez son los encargados de darle algunas de sus características físicas al cristal (deformación plástica, fluencia, color, etc.). Las dislocaciones son imperfecciones muy importantes pues determinan, con su movimiento e interacción, el comportamiento de fluencia de los cristales. Se distinguen dos tipos de dislocaciones que se ilustran en la figura 2.26:

(1) Dislocación de borde que es equivalente a una capa parcial extra de iones en la estructura cristalina.

(2) Dislocación de tornillo que es equivalente a un plano parcial de corte.

Al presentarse de manera conjunta los dos tipos de dislocaciones, se le llama circuito de dislocación. Si un cristal es sometido a esfuerzo cortante se produce movimiento de las dislocaciones denominado "deslizamiento" (figura 2.27). Cada deslizamiento contribuye con pequeños incrementos a la deformación inelástica del cristal.

La atracción existente entre cada átomo en un plano y su vecino inmediato en el plano adyacente se cuantifica con la energía de activación. Para romper tal atracción y producir un deslizamiento se hace necesario aplicar cierta cantidad de energía equivalente a la de activación.

Cuando el esfuerzo aplicado supera a la energía de activación, las dislocaciones se propagan sobre distancias relativamente grandes llegando a acercarse unas con otras, cruzándose o combinándose, es decir interaccionando. A medida que aumenta la deformación aumenta a su vez la densidad de dislocaciones por lo que se requiere un esfuerzo creciente para seguir deformando el material; este mecanismo se denomina endurecimiento por deformación. Simultáneamente se producen procesos de recuperación o ablandamiento que provocan un efecto opuesto al de endurecimiento. Para temperaturas bajas, la recuperación del material se explica por el "deslizamiento cruzado", que consiste en desviaciones de la dirección del movimiento de la dislocación, mecanismo que evita obstáculos en el plano de deslizamiento o aniquila dislocaciones al cruzarse dos de ellas y anular cada una el efecto de la otra (Hayden et al. 1968).

En suma, la velocidad de deformación resulta ser un balance entre los procesos de endurecimiento y los de recuperación, que depende del esfuerzo aplicado, de manera no lineal. Se puede expresar de la forma

$$\dot{\epsilon} = A e^{-\frac{U_0 - B(\sigma_1 - \sigma_3)}{RT}} \quad (11)$$

con U_0 : energía de activación bajo esfuerzo desviador nulo
 R : constante universal de los gases
 T : temperatura absoluta
 A, B : constantes propias del material.

El numerador de la exponencial representa la energía necesaria para que las dislocaciones venzan obstáculos fijos que encuentran (por ejemplo impurezas). Sin embargo conforme la deformación progresa las dislocaciones se acumulan en ciertos puntos agolpándose en contra de obstáculos infranqueables, creándose esfuerzos internos que se oponen al esfuerzo actuante. Este efecto se puede traducir en un término que depende de la magnitud de la deformación diferida y que ha de restarse del relativo al esfuerzo actuante, obteniéndose la ecuación

$$\dot{\epsilon} = A e^{-\frac{U_0 - B(\sigma_1 - \sigma_3) + g(\epsilon_d)}{RT}} \quad (12)$$

siendo $g(\epsilon_d)$ una función de la deformación diferida alcanzada

$$\epsilon_d = \epsilon - \epsilon_i$$

donde ϵ_i es la deformación instantánea y ϵ la deformación total.

2.3.2 Interpretación de las Pruebas de Fluencia en Extensión Triaxial

Considerando que el nivel de esfuerzos con que se ha trabajado en las pruebas, simulando las condiciones de las cavernas ($\sigma_1 - \sigma_3 = 70$ a 90 kg/cm²), es alto, por lo que se presentan cambios estructurales, se decidió hacer la interpretación de los ensayos por medio de una ley fenomenológica, derivando a la postre una ecuación similar a las de tipo empírico.

Partiendo de la ecuación (12) y tomando $g(\epsilon_d)$ proporcional a la deformación

$$g(\epsilon_d) = g(\epsilon - \epsilon_i) = c(\epsilon - \epsilon_i)$$

con C constante, la ecuación (12) se torna en

$$\dot{\epsilon} = A e^{-\frac{U_0 - B(\sigma_1 - \sigma_3) + a(\epsilon - \epsilon_i)}{RT}} \quad (13)$$

integrando esta ecuación, suponiendo que ni el esfuerzo desviador ni la temperatura varían con el tiempo, se obtiene

$$\epsilon = \epsilon_i + a \ln(bt + c) \quad (14)$$

En caso de tomar $g(\epsilon_d) = \ln(\epsilon - \epsilon_i)^Y$ se obtiene por integración de (13)

$$\epsilon = \epsilon_i + \beta t^\alpha \quad (15)$$

Por su forma de potencia se decidió trabajar con la ecuación (15), cuyos términos se han valorado de la siguiente manera:

- La deformación instantánea ϵ_i , de acuerdo con los resultados de los ensayos 13, 14, 15 y 20 no es proporcional a los esfuerzos desviadores aplicados, pues ϵ_i es igual a 0.022, 0.185, 0.492 y 0.058 por ciento para esfuerzos desviadores aplicados de 38, 120, 176 y 76 kg/cm². En consecuencia se establece

$$\epsilon_i = k (\sigma_1 - \sigma_3)^n \quad (16)$$

con K comprendido entre 1.2 y 4.0 x 10E-9 y n igual a 2.7. El valor de n se obtuvo de la figura 2.28 en la que se expresaron los valores de la ecuación (16) en forma logarítmica. Los valores de K y n en extensión triaxial se confirman al analizar la curva esfuerzo-deformación de descarga de la muestra 14 (figura 2.12) cuyos cálculos se muestran en la tabla 2.5.

Otro par de valores que se pueden ajustar a la ecuación (16) son K entre 0.6 y 1.5 x 10E-9 y n igual a 3.0. Estos valores se incluyeron dentro del análisis paramétrico que se menciona mas adelante.

- En numerosas pruebas de fluencia sobre materiales viscoplásticos (Norlier 1966) se ha notado que

$$\dot{\epsilon} = B \epsilon_i \quad (17)$$

siendo B una constante. La ecuación (15) queda entonces

$$\epsilon = k(\sigma_1 - \sigma_3)^n + B k (\sigma_1 - \sigma_3)^n t^\alpha \quad (18)$$

por lo que el término

$$cd = B k (\sigma_1 - \sigma_3)^n t^a \quad (19)$$

corresponde a la deformación diferida que a su vez tiene la forma de la ley empírica (10) expresada de manera general en la ecuación (9) y particularizada en este caso al suponer la temperatura constante durante todo el tiempo de fluencia.

Al comparar la deformación instantánea de las muestras 14, 15 y 20 con su deformación diferida a un día resulta, al expresar t en días

$$e_1 dfa - e_i = B$$

y por tanto

$$B = \frac{e_1 dfa - e_i}{e_i}$$

De los datos experimentales resulta que B varía entre 2 y 4.

La constante a de la expresión (15) puede obtenerse experimentalmente escribiendo que

$$\text{Log}(e - e_i) = \text{Log } B e_i + a \text{ Log } t$$

en papel doblemente logarítmico la relación $(e - e_i)$ versus t queda representada en forma recta (figura 2.29), para cada una de las pruebas de fluencia. El análisis de las rectas presentadas en la figura 2.4 permite determinar el valor de a que en el caso de las muestras 13, 14, 15 y 20 vale respectivamente 0.27, 0.32, 0.43 y 0.48. Conviene recordar que los resultados correspondientes a las muestras 13 y 20 (en su parte inicial) son los más confiables porque la variación del esfuerzo desviador es insignificante. Opuestamente las notables variaciones en la magnitud del esfuerzo desviador aplicado a las muestras 14 y 15 ocasiona errores apreciables en la valoración del coeficiente a .

TABLA 2.5 Descarga de la muestra 14

$(\sigma_v - \sigma_v \text{ inicial})$ kg/cm ²	ϵ_a , %	$(\epsilon_a \text{ inicial} - \epsilon_a)$	$K = \frac{\epsilon_a \text{ inicial} - \epsilon_a}{(\sigma_v - \sigma_v \text{ inicial})^n}$
73	2.24	0.04	3.7×10^{-9}
96	2.23	0.05	2.2×10^{-9}
145	2.17	0.11	1.6×10^{-9}
167	2.13	0.15	1.5×10^{-9}
195	2.06	0.22	1.4×10^{-9}
213	1.95	0.33	1.7×10^{-9}
240	1.95	0.33	1.2×10^{-9}
257	1.76	0.52	1.6×10^{-9}
284	1.60	0.68	1.6×10^{-9}
313	1.10	1.18	2.2×10^{-9}
331	0.73	1.55	2.4×10^{-9}
355	0.39	1.89	2.5×10^{-9}

NOTA : $\sigma_v \text{ inicial} = 85 \text{ kg/cm}$
 $\epsilon_a \text{ inicial} = 2.28 \%$
 $n = 2.7$

2.2.4 CONCLUSIONES DE LA INTERPRETACION

De acuerdo con las pruebas de laboratorio efectuadas se obtienen los siguientes intervalos de variación de los parámetros representativos del comportamiento de la sal del pozo Tuzandepetl 300.

(1) Cohesión última C_0 , de 0 a 17.5 kg/cm²
 Angulo de fricción interna 0

(2) Deformación total

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_i + \epsilon_d \\ \epsilon &= k (\sigma_1 - \sigma_3)^n (1 + Bt^\alpha) \end{aligned} \quad (20)$$

con k : coeficiente que varía entre 1.2 y 4 $\times 10E-9$ o entre 0.6 y 1.5 $\times 10E-9$
 $\sigma_1 - \sigma_3$: esfuerzo desviador máximo, en kg/cm²
 n : coeficiente igual a 2.7 o a 3.0
 t : tiempo en días
 α : parámetro cuya magnitud varía entre 0.27 y 0.43
 B : coeficiente variable entre 2 y 4

(3) Tomando en consideración los errores experimentales, variables, de una prueba a otra, los valores más probables de estos parámetros son:

$$\begin{aligned} C_0 &= 13 \text{ kg/cm}^2 \\ k &= 3 \times 10E-9 \\ n &= 2.7 \\ B &= 3.5 \\ \alpha &= 0.27 \end{aligned}$$

Sin embargo en el capítulo 4 se efectuará un análisis paramétrico que permita valorar la importancia en el diseño de la obra, de la variabilidad de estos parámetros.

3. MODELO MATEMATICO DEL ESTADO DE ESFUERZOS Y DE DEFORMACIONES EN EL CONTORNO DE LA CAVIDAD

El estado de esfuerzos y de deformaciones en el contorno de la cavidad, así como su variación con el tiempo, puede ser analizado de dos formas:

1. Mediante una solución analítica explícita.
2. Mediante métodos numéricos (elemento finito).

La solución analítica presenta en este caso algunas ventajas:

- Permite analizar fácilmente varios casos modificando los parámetros del comportamiento mecánico de la sal, las dimensiones de la cavidad y las presiones actuantes sobre las paredes de la misma. Puede efectuarse, por tanto, un estudio paramétrico del problema evidenciando las magnitudes físicas más relevantes.
- Resulta fácil considerar el caso de deformaciones grandes.
- No requiere definir arbitrariamente las fronteras laterales de la masa de sal analizada.

Estas ventajas se consideraron para justificar la adopción del enfoque analítico.

3.1 HIPÓTESIS DEL MODELO ANALITICO

Para establecer el modelo analítico se requiere considerar el comportamiento mecánico de la sal, la geometría de la caverna y las condiciones iniciales.

El comportamiento mecánico de la sal, de acuerdo con la interpretación de las pruebas efectuadas (capítulo anterior) se caracteriza por:

1. Variación volumétrica nula al variar el esfuerzo desviador, cuando el nivel de esfuerzo confinante es alto (del orden de 200 kg/cm²).

2. Deformación del material siguiendo la ley

$$\epsilon = k (\sigma_1 - \sigma_3)^n [1 + f(t)] \quad (21)$$

con $f(t) = 0$, para $t = 0$

Recordando que $f(t)$ se interpretó como

$$f(t) = Bt^a$$

y que la deformación se divide en su parte instantánea, ϵ_i

$$\epsilon_i = k (\sigma_1 - \sigma_3)^n$$

y su parte diferida, ϵ_d

$$\epsilon_d = k (\sigma_1 - \sigma_3)^n f(t)$$

3. La resistencia a largo plazo de la sal es puramente cohesiva, siendo nulo el ángulo de fricción interna.

La geometría de la cavidad se ha idealizado así:

4. En la cercanía de la parte central se supone que la cavidad es cilíndrica y el estado de deformaciones es plano. En las partes superior e inferior de la misma se supone que la caverna es esférica (figura 3.1)

Las condiciones iniciales del problema son:

- Estado de esfuerzos horizontales iniciales similares en todas las direcciones (q en la figura 3.2). Adicionalmente se encontró, como se describe en el Anexo 2, que el estado tectónico inicial de la masa es hidrostático.

- El proceso de excavación se idealiza suponiendo que se mantiene, durante todo el proceso de lixiviación y hasta alcanzar la geometría inicial de la cavidad, una presión interna de la cavi-

dad igual a la presión tectónica hidrostática q . Se considera entonces, una reducción brusca de la presión interna del fluido de q a p (figura 3.2). El momento en que se reduce la presión del fluido se considera como origen del tiempo.

3.2 CAVIDAD CILINDRICA

En coordenadas polares y con la notación presentada en la figura 3.2, las velocidades de deformación radial y tangencial son, en el caso general:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_t &= \frac{\dot{u}_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{u}_\theta}{\partial \theta}\end{aligned}$$

Como se trata de un problema axisimétrico, los desplazamientos radial y tangencial son independientes del ángulo polar, de donde

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}_r &= \frac{\partial \dot{u}_r}{\partial r} \\ \dot{\epsilon}_t &= \frac{\dot{u}_r}{r}\end{aligned}\tag{22}$$

En virtud de las ecuaciones (22) puede escribirse:

$$r \frac{\partial \dot{\epsilon}_t}{\partial r} + \dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_r = 0\tag{23}$$

al introducir las hipótesis aceptadas

$$\dot{\epsilon}_\nu = \dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_t + \dot{\epsilon}_z = 0 \quad (\epsilon_\nu = 0)$$

$$\dot{\epsilon}_z = 0$$

resulta

$$\frac{\partial \dot{\epsilon}_t}{\partial r} = -2 \frac{\dot{\epsilon}_t}{r}$$

e integrando

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{A(t)}{r^2} = \frac{\dot{u}_r}{r}\tag{24}$$

como $\dot{u}_r \rightarrow 0$ cuando $r \rightarrow \infty$

$$\dot{u}_r = \frac{A(t)}{r} \quad (25)$$

$$\dot{\epsilon}_t = -\dot{\epsilon}_r = \frac{A(t)}{r^2} \quad (26)$$

De acuerdo con la ley de deformación de la sal

$$\epsilon_t = k(\sigma_t - \sigma_r)^n (1 + f(t))$$

se obtiene

$$\dot{\epsilon}_t = kn(\sigma_t - \sigma_r)^{n-1} (1 + f(t)) (\dot{\sigma}_t - \dot{\sigma}_r) + k(\sigma_t - \sigma_r)^n f'(t) \quad (27)$$

Igualando (26) y (27)

$$\frac{A(t)}{r^2} = k(\sigma_t - \sigma_r)^{n-1} [n(\dot{\sigma}_t - \dot{\sigma}_r) (1 + f(t)) + (\sigma_t - \sigma_r) f'(t)] \quad (28)$$

De acuerdo con las condiciones de equilibrio

$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_t = 0 \quad (29)$$

de donde

$$\sigma_t - \sigma_r = r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \quad (30)$$

e introduciendo (30) en (28)

$$\frac{A(t)}{r^2} = K \left(r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right)^{n-1} \left[n \left(r \frac{\partial \dot{\sigma}_r}{\partial r} \right) (1 + f(t)) + \left(r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right) f'(t) \right]$$

$$\therefore \frac{A(t)}{Kr^{2+n}} = n \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right)^{n-1} \left(\frac{\partial \dot{\sigma}_r}{\partial r} \right) (1 + f(t)) + \left(\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right)^n f'(t) \quad (31)$$

Para integrar la ecuación (31) se plantea

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{C(t)}{r^{2+n/n}}$$

(32)

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_r}{\partial r} = \frac{\dot{C}(t)}{r^{2+n/n}}$$

ahora la expresión (31) se transforma en:

$$\frac{A(t)}{kr^{2+n}} = n \frac{C^{n-1}(t)\dot{C}(t)}{r^{2+n}} (1 + f(t)) + \frac{C^n(t)}{r^{2+n}} f'(t) \quad (33)$$

$$\therefore A(t) = kn C^{n-1}(t)\dot{C}(t)(1 + f(t)) + k C^n(t) f'(t)$$

Integrando la ecuación (32)

$$\sigma_r = -\frac{n}{2} \frac{C(t)}{r^{2/n}} + D(t) \quad (34)$$

Las condiciones en la frontera del problema, de acuerdo con la solución elástica de Lamé, se expresa como:

- $\sigma_r = p$ para $r = a$ independientemente del tiempo, t
- $\sigma_r = q - C_0$ para $r = c$ independientemente del tiempo, t
- siendo p : presión del fluido sobre la pared de la cavidad
- q : esfuerzo tectónico hidrostático lejos de la cavidad
- C_0 : cohesión de la sal, a largo plazo
- a : radio de la cavidad cilíndrica, en el instante t
- c : radio de influencia de la excavación, definido en forma tal que para $r > c$ el comportamiento del material es elástico.

Introduciendo estas condiciones en la ecuación (34) resulta

$$p = -\frac{n}{2} \frac{C(t)}{a^{2/n}} + D(t)$$

de donde $q - C_0 = -\frac{n}{2} \frac{C(t)}{c^{2/n}} + D(t)$

$$C(t) = \frac{2}{n} (q - p - C_0) \frac{(ac)^{2/n}}{c^{2/n} - a^{2/n}} \quad (35)$$

$$D(t) = \frac{pa^{2/n} - (q - C_0)c^{2/n}}{a^{2/n} - c^{2/n}} \quad (36)$$

Combinando (34), (35) y (36) se obtiene

$$\sigma_r = \frac{a^{2/n}}{c^{2/n} - a^{2/n}} [(q - C_0 - p) (1 - (\frac{a}{r})^{2/n})] + p \quad (37)$$

y utilizando la ecuación (29)

$$\sigma_t = \frac{c^{2/n}}{c^{2/n} - a^{2/n}} [q - p - Co] \left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^{2/n} \left(1 + \frac{2}{n}\right) \right] + P \quad (38)$$

Para $r = c$, se debe tener, por definición del radio de influencia de la excavación

$$\sigma_t - \sigma_r = 2 Co \quad (39)$$

Introduciendo en esta expresión las ecuaciones (37), (38) se obtiene

$$c = a \left[\frac{q - p - Co(1-n)}{n Co} \right]^{n/2} \quad (40)$$

Combinando las expresiones (33), (35) y (40) se obtiene

$$C(t) = \frac{2}{n} (q - p - Co(1-n)) a^{2/n} \quad (41)$$

$$A(t) = \left(\frac{2}{n}\right)^n (q - p - Co(1-n))^n K [a f'(t) + 2\dot{a} (1+f(t))] a \quad (42)$$

De acuerdo con las expresiones (25) y (42), y tomando en cuenta que

$$\dot{u}_r = -\dot{a} \quad \text{para } r = a$$

resulta por integración

$$a = a_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2}{n}\right)^n (q - p - Co(1-n))^n 2K(1+f(t))}} \quad (43)$$

Siendo a_0 el radio inicial del cilindro, antes de reducir la presión interna del fluido de q a p .

De acuerdo con las expresiones (37), (38), (40) y (43) se obtiene, en resumen, para las magnitudes físicas de interés:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= p + [q - p - Co(1-n)] \left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^{2/n} \right] \\ \sigma_t &= p + [q - p - Co(1-n)] \left[1 - \left(\frac{a}{r}\right)^{2/n} \left(1 + \frac{2}{n}\right) \right] \\ c &= a \left[\frac{q - p - Co(1-n)}{n Co} \right]^{n/2} \end{aligned} \right\} (44)$$

$$a = a_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{2}{n}\right)^n (q-p-Co(1-n)) 2K (1+f(t))}}$$

además

$$\sigma_z = \frac{\sigma_r + \sigma_t}{2}$$

$$U_r = \frac{a^2 - a_0^2}{2r_0} = - \frac{a_0^2}{r_0} \frac{\left(\frac{2}{n}\right)^n (q-p-Co(1-n))^n K (1+f(t))}{1 + \left(\frac{2}{n}\right)^n (q-p-Co(1-n)) 2K (1+f(t))} \quad (44)$$

La estructura de las expresiones (44) muestra que son válidas sea cual sea la función $f(t)$ y que las magnitudes $a, \sigma_r, \sigma_t, \sigma_z$ y U_r dependen únicamente de la variable a . Si la reducción de radio de la cavidad es pequeña, la relajación de esfuerzos es también reducida.

3.3 CAVIDAD ESFERICA

Se utilizan las mismas hipótesis básicas del caso de cavidad cilíndrica, salvo en lo referente al estado de deformaciones que no se puede considerar plano. (figura 3.3).

La ecuación de equilibrio es, en este caso

$$r \frac{\partial \dot{\sigma}_r}{\partial r} + 2 (\dot{\sigma}_r - \dot{\sigma}_t) = 0 \quad (45)$$

y sustituye a la ecuación (29) del caso anterior.

La ecuación de compatibilidad de deformaciones

$$r \frac{\partial \dot{\epsilon}_t}{\partial r} + \dot{\epsilon}_t - \dot{\epsilon}_r = 0 \quad (46)$$

permanece idéntica a la correspondiente del caso anterior.

Introduciendo en (46) la consideración

$$\dot{\epsilon}_v = 0 = \dot{\epsilon}_t + \dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\psi \quad (47)$$

y tomando en cuenta que por simetría

$$\dot{\epsilon}_t = \dot{\epsilon}_\psi \quad y \quad \dot{\sigma}_t = \dot{\sigma}_\psi$$

se obtiene

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{A(t)}{r^3}$$

A partir de la ecuación (47) y siguiendo el mismo razonamiento del numeral anterior, se obtiene:

$$\sigma_r = p + [q - p - Co(1 - \frac{4n}{3})] [1 - (\frac{a}{r})^{3/n}]$$

$$\sigma_t = p + [q - p - Co(1 - \frac{4n}{3})] [1 - (\frac{a}{r})^{3/n} (1 - \frac{3}{2n})]$$

$$\sigma_\psi = \sigma_t$$

$$c = a \left(\frac{q - p - Co(1 - \frac{4n}{3}) n/3}{\frac{4n}{3} Co} \right)$$

$$a = a_0 \sqrt[3]{\frac{1}{1 + (\frac{3}{2n})^n \frac{3K}{2} (q - p - Co(1 - \frac{4n}{3}))^n (1 + f(t))}}$$

$$U_r = \frac{a^2 - a_0^2}{3n^3}$$

(48)

Como en el caso de la cavidad cilíndrica se nota que las expresiones (48) son válidas para cualquiera $f(t)$ y que las magnitudes c , σ_r , σ_t , σ_ψ y U_r dependen únicamente de la variable a .

4. RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Un conjunto de cavernas construídas en un domo salino y destinadas como almacenamiento de hidrocarburos, cumplirá con su finalidad siempre y cuando:

1. El radio de influencia de cada caverna sea inferior a la mitad de la distancia entre ejes longitudinales de las cavernas.
2. La reducción del volumen de cada caverna, por efecto de la fluencia de la sal, sea reducida a largo plazo.
3. No se presenten inestabilidades en las paredes de las cavernas.

Las tres condiciones enumeradas pueden ser analizadas con base en el modelo matemático elaborado y en los parámetros del comportamiento mecánico de la sal de Tuzandepetl. Para proceder a tal análisis se considera la simplificación geométrica planteada en el capítulo anterior: una cavidad cilíndrica, con eje de simetría vertical, rematada por dos caquetes esféricos en sus extremos superior e inferior y localizada entre 730 y 980 m de profundidad. El peso volumétrico de los mantos rocosos suprayacentes se considera igual a 2,2 ton/m³ y el de la salmuera de 1.2 ton/m³. El radio de la caverna se considera igual a 21.5 m.

4.1 ZONA DE INFLUENCIA DE LA CAVERNA

La variación, en función de la cohesión última C_0 de la sal, del cociente c/a se presenta en la figura 4.1, siendo c el radio de la zona de influencia de material plastificado alrededor de la caverna y a el radio de esta última. Tales curvas se obtuvieron con las expresiones (44) y (48).

Se observa que para C_0 tendiente a cero, el radio "c" tiende a infinito. Si se considera un valor de C_0 superior a 10 kg/cm², la relación c/a resulta menor de 6 para el caso de la parte central y menor de 3 para ambas bóvedas. En tales condiciones resulta conveniente alojar los ejes de las cavernas a una distancia de por lo menos 260 m. Este dato coincide con el que resulta del uso de la fórmula empírica propuesta por Dreyer (1984):

$$c / a = 6.06$$

4.2 REDUCCION DEL DIAMETRO DE LA CAVERNA

Variando los parámetros de comportamiento viscoso de la sal en los intervalos señalados en el inciso 2.2.4, se obtienen las curvas presentadas en las figuras 4.2 a 4.6, que representan la variación con el tiempo del cociente a / a_0 , con "a", radio de la caverna para un tiempo t y "a₀" radio inicial de la cavidad.

En las figuras 4.2 a 4.4 se nota que al aumentar la cohesión última C_0 , los valores de a / a_0 disminuyen para un tiempo dado. Este sentido de variación podría parecer contradictorio si no se toma en cuenta que al aumentar C_0 aumentan los esfuerzos desviadores en las paredes de la cavidad (fig 4.9 a 4.11) y por lo tanto se incrementan las deformaciones hacia la cavidad.

A los 20 años de operación y sin tomar en cuenta los efectos de disolución paulatina de la sal ocasionados por los ciclos de llenado y vaciado de la salmuera resulta que el valor más probable de a / a_0 será de 0.98. Este valor corresponde a un desplazamiento de las paredes de la caverna hacia el eje de la misma y en su parte central, de 40 cm.

Puede apreciarse sin embargo que en casos extremos la relación a/a_0 disminuye hasta 0.92. En tal caso la reducción del radio de la cavidad sería de 170 cm.

4.3 VARIACION DEL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO

Con el transcurso del tiempo, el volumen disponible para almacenar petróleo se reduce por efecto de la fluencia de la sal.

A causa de este fenómeno la reducción alcanzará, de acuerdo con los datos presentados en las figuras 4.7 y 4.8 un máximo de 15% y un valor probable de 4%.

4.4 VARIACION DE LOS ESFUERZOS CON EL TIEMPO

Los esfuerzos normales perpendicular y tangencial a la pared de la caverna varían en función del cociente r/a , siendo r la distancia al punto considerado y a el radio de la caverna en el instante t , como se muestra en las figuras 4.9 a 4.11. Implícitamente al ser constante la magnitud r y variable con el tiempo la magnitud a , de estas figuras se intuye que los esfuerzos varían con el tiempo. Tal variación se presenta explícitamente en la figura 4.12 para la parte central de la caverna.

4.5 ESTABILIDAD DE LAS PAREDES DE LA CAVERNA

La aplicación, sobre un material viscoso, de un esfuerzo desviador constante y suficientemente grande para que genere un proceso de fluencia estacionario, a velocidad de deformación constante, ocasiona inevitablemente la falla.

En las pruebas de fluencia en extensión triaxial efectuadas con la sal de Tuzandepetl no se definió un eventual flujo estacionario. La máxima duración de estas pruebas de fluencia fue de 32 días, que se mostró insuficiente para alcanzar ese eventual flujo estacionario. Sin embargo puede afirmarse que en caso de presentarse posteriormente a los 32 días, la velocidad de deformación sería evidentemente inferior a la que se presentó al final de la prueba. Por tanto, designando por $\dot{\epsilon}_m$ la velocidad de deformación de un eventual flujo estacionario puede escribirse

$$\dot{\epsilon}_m \leq \alpha K B (\sigma_1 - \sigma_3)^n t^{a-1}$$

Para $(\sigma_1 - \sigma_3)$ igual a 75 kg/cm², situación que prevalece en las cercanías de las paredes, resulta

$$\dot{\epsilon}_m \leq 3.5 \times 10^{-5} \text{ en } \%/\text{dfa}$$

La aplicación de la relación empírica expuesta por Morlier (1966) que relaciona la magnitud de $\dot{\epsilon}_m$ con la duración de vida del material T

$$\dot{\epsilon}_m T = 27$$

con ϵ_m en % /día y T en días, permite calcular la duración de vida del material en la cercanía de las paredes de la cavidad y T resulta superior a 500 años.

Para fines prácticos las paredes de la cavidad son, por tanto, estables.

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Con base en las pruebas de laboratorio efectuadas en la sal de Tuzandepetl y mediante el modelo analítico elaborado para valorar los estados de esfuerzos y deformaciones en el contorno de una caverna, puede concluirse que:

- La disminución del radio de una caverna cilíndrica de 43 m. de diámetro y localizada entre las profundidades 730 y 980 m., estará comprendida entre 0.4 y 1.7 m a los 20 años; esto ocasionará una reducción del volumen disponible de almacenamiento de entre 4 y 15 % que podrá ser compensado por el incremento generado por disolución al introducir cíclicamente salmuera no saturada en la caverna.

- La distancia conveniente entre ejes de cavernas, para evitar interferencias es de 260 m.

- No se presentarán problemas de inestabilidad de las paredes, a largo plazo.

Ya con los objetivos cumplidos, habiendo establecido la factibilidad técnica, desde el punto de vista de Mecánica de Rocas, del desarrollo del proyecto de almacenamiento de hidrocarburos en el domo salino de Tuzandepetl, vale la pena hacer algunos comentarios a manera de conclusión sobre diversos aspectos.

Con respecto al estudio de las propiedades reológicas de la sal de Tuzandepetl:

- Las pruebas de fluencia en extensión triaxial y las de relajación revelan el comportamiento dúctil de la sal para una temperatura de 50°C y un rango de esfuerzos de medio a alto.

- Para esfuerzos desviadores pequeños las pruebas revelan un

comportamiento lineal de tal manera que se pudieron establecer parámetros elásticos lineales a partir de las primeras etapas de los ensayos. Adicionalmente, las pruebas de fluencia en compresión simple se pudieron interpretar por medio de leyes reológicas debido al bajo nivel de esfuerzos con que se trabajaron (Rodríguez Cuevas 1986). Las anteriores razones justifican el hecho de haber adoptado condiciones de frontera elásticas, de acuerdo con la deducción de Lamé, dentro del modelo matemático.

- Para 50 ° C y esfuerzos desviadores mayores de 38 kg/cm² la respuesta en deformación de la sal es no lineal con respecto al esfuerzo desviador aplicado, tanto para la deformación instantánea como para la diferida.

- La respuesta en deformación de la sal en función de los cambios de temperatura no se pretendió conocer y todas las pruebas se hicieron bajo la misma temperatura constante, por ser similar a la que presenta la sal a 300 m de profundidad.

Es importante recalcar el hecho de haber utilizado un modelo analítico para el estudio del estado de esfuerzos y de deformaciones en el contorno de la cavidad, en lugar de haber desarrollado un modelo numérico. Como ya se expuso, la utilización del método analítico resultaba mas ventajosa que la del método numérico. Una herramienta tan-poderosa como el elemento finito no resultaba conveniente debido al grado de incertidumbre que se tenía en cuanto al valor de los parámetros a utilizar, los niveles de deformación y la definición de las fronteras del problema.

El verdadero ajuste de los parámetros se debe revelar durante las etapas de construcción y operación de las cavernas. En estas etapas se debe contar con un equipo de ingenieros con la suficiente experiencia en la construcción de almacenamientos y en el control y la correlación con el diseño.

El estudio de las propiedades reológicas de la sal y por ende el diseño de almacenamientos en domos salinos presenta todavía incertidumbres que constituyen motivos de futuras investigaciones. Algunos de estos aspectos son:

- Tratar de reproducir e interpretar matemáticamente procesos de carga y descarga de la sal, que son aplicables a casos como el de reemplazo de salmuera por hidrocarburo y viceversa.

- Determinar con mayor claridad los límites de aplicabilidad de la teoría elástica lineal. Buscar esa dependencia desde el punto de vista fenomenológico y llegar a cuantificarla en cada caso.

- Para la sal de Tuzandepetl, hacer pruebas adicionales buscando determinar claramente la etapa de fluencia con velocidad de deformación constante; desafortunadamente se tiene la incertidumbre de su existencia y además el inconveniente de requerir tiempos prolongados de prueba (meses), que hacen difícil alcanzar un estricto control para mantener la carga y la temperatura constantes. Otro aspecto que amerita mayor estudio es la determinación de la cohesión última C_0 ; para ello se podrían implementar pruebas de relajación a largo plazo, con una duración mayor a la que se tuvo en las pruebas realizadas.

Debido a la importancia económica que tiene el potencial salino de México debe seguirse ahondando en el conocimiento de la sal desde diversos campos: geológico, geofísico, físico, químico y de ingeniería. Para explotar óptimamente ese potencial es necesario conocer, además de la localización y el tamaño de las estructuras salinas, su composición, el estado de esfuerzos junto con su historia, los mecanismos de deformación a nivel atómico y su comportamiento mecánico.

6. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- ALBRECHT H, LANGER N, 1974. The rheological behavior of rock salt and related stability problems of storage caverns, Proc. Third Congress ISRM, Denver, Vol II, Part B.
- BENAVIDES G.L, 1984 .Domas salinas del sureste de Mexico. Origen, exploracion e importancia economica, Almacenamientos Subterraneos, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos.
- SELLO N, 1984. Economia de los almacenamientos subterraneos para petroleo y productos derivados, Almacenamientos Subterraneos, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos.
- BLAND D, 1960. The theory of linear viscoelasticity, Pergamon Press, Belfast.
- CANACHO R.C, 1984 .Desarrollo de cavernas en formaciones salinas para el almacenamiento de hidrocarburos, Almacenamientos Subterraneos, Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos.
- CARTER N, HANSEN F, SENSEN F, 1962, Stress magnitudes in natural rock salt, Journal of Geophysical Research, Vol 67, No 211, Pag 9289-9300.
- DREYER W, 1984, Crude oil storage in a system of salt caverns, Proc. First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- FLUGGE W, 1987, Viscoelasticity, Blaisdell Publishing Co, Mass.
- FOSSUM A, 1977, Visco-plastic behavior during the excavation phase of a salt cavity, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 1, 45-55.
- FRIEDMAN N, ZULF W, GANZI A, GAZONAI G, 1984, Structural petrology of experimentally deformed synthetic rock salt, Proc. First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Clausthal, German.
- GEOSTON, 1985, Descripcion de nucleos del pozo Tuzandepati 300.

HANSEN F, 1977, Evaluation of an inelastic law for salt creep, Proc. 13th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Colorado School of Mines, Vol 1, 4B5-1 - 4B5-5.

HANSEN F, CARTER N, 1980, Creep of rock salt at elevated temperatures, 21st U.S Symposium on Rock Mechanics, Univ. of Mo, Rolla.

HANSEN F, MELLERGARD N, 1980, Creep of 50mm diameter specimens of dome salt from Avery Island, Louisiana, Technical Report, ONWI-104

HANSEN F, MELLERGARD N, SENSEN F, 1984, Elasticity and strength of ten natural rock salts, Proc. First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.

HARDY R, LANGER M, (Editors), 1984, The mechanical behavior of salt, Proc. First Conference, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.

HAYDEN L, ROFFATI J, WULFF J, 1968, Propiedades mecanicas, Introduccion a la ciencia de materiales, Vol. II, Limusa-Wiley, Mexico.

HOFER K, THOMA K, 1968, Triaxial test on salt rocks, Journal Rock Mechanics and Mining Science, Vol 5, 195-203.

HORSEMAN S, PASSARIS Z, 1984, Creep test for storage cavity closure prediction, Proc. First Conference on the Mechanical Behavior of salt, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.

IME, 1985, Almacenamiento de crudo en cavidades minadas en domos salinos, analisis de registros geofisicos del pozo Tuzandepati 300, Informe del departamento de Petrofisica.

II, UNAM, 1976, RABAGO A, Camara triaxial de alta presion, Informe elaborado para CFE.

IE, 1985, Caracterizacion de roca sal-gema, para el diseno de almacenamientos en domos salinos, Proyecto 2010.

JACKSON M, TALENT D, 1980, External stresses, strain rates and dynamics of salt structures, Geological Society of America Bulletin, V87, 305-323.

JAEGER J, COOK N, 1979, Fundamentals of rock mechanics, Ed Chapman and Hall, 3a edicion, New York.

- KRENK S, 1973. Internally pressurized spherical and cylindrical cavities in rock salt, Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech., Vol 15, 219-224.
- LANGER M, 1962. Geotechnical investigation methods for rock salt, Bull. of the Int. Association of Engineering Geology, No 25, 155-164, Paris.
- LANGER M, 1964. The rheological behavior of rock salt, Proc. First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- LE COMTE F, 1965. Creep in rock salt, Journal of Geology, 173, No 3, 439-484.
- LINDNER E, BRADY S, 1964. Memory aspects of salt creep, Proc. First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.
- LOPEZ R, 1964. Analisis del comportamiento mecanico de cavernas en roca y sal. Almacenamientos contemporaneos. Sociedad Mexicana de Mecanica de Rocas.
- MOFFATT W, PEARNSALL S, WULFF C, 1968. Estructura, Introduccion a la ciencia de los materiales, Vol 1, Limusa-Wiley, Mexico.
- MORLIER F, 1966. Le fluage des roches, Annales de l'Institut Technique de Batiment et des Travaux Publics, No 217.
- MUEHLBERGER W, CLABAUGH P, 1968. Internal structure and petrographic of gulf coast salt domes, Am. Assoc. Petroleum Geologist Bull., Vol 8, 90-98.
- NAIR N, DEERE D, 1970. Creep behavior of salt in triaxial extension test, Proc. Third Symposium on Salt, 21, 108-215.
- ODE H, 1965. Review of mechanical properties of salt relating to salt-dome genesis, Geological Society of America, Special Paper 55, 543-595, 683-701.
- FREESE S, FOLEY J, 1964. Finite element analysis of salt caverns employed in the strategic petroleum reserve with comparison to field data, In Situ, 8(3), 233-260.
- REYNOLDS, OLYNA, 1961. Creep measurements in salt mines, Proc. 4th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Pennsylvania State University, 11-17.

RODRIGUEZ CUEVAS N, 1969a, Viscoelastic constants for a model representing the mechanical behavior of materials, Proc. of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference, Part 1, Ed Wiley-Interscience, 533-543, London.

RODRIGUEZ CUEVAS N, 1969b, Use of creep data to obtain properties of materials, Matériaux et Constructions, V2, No 12, 431-436.

RODRIGUEZ CUEVAS N, 1970, Efecto de las presiones de confinamiento sobre el comportamiento mecánico de los materiales, 2a Conferencia Interamericana sobre Tecnología de Materiales, 461-467, México.

RODRIGUEZ CUEVAS N, 1986, Interpretación de pruebas de fluencia en compresión simple en sal, Instituto de Ingeniería UNAM, en proceso de publicación.

ROSS J, AVELALLEMENT H, CARTER N, 1980, Stress dependence of recrystallized-grain and subgrain size in olivine, Tectonophysics 70, 39-61.

SALENCON J, 1966, Expansion quasi-statique d'une cavite a symetrie spherique ou cylindrique dans un milieu elasto-plastique, Annales des Pons et Chaussees, III.

SALENCON J, 1969, Contraction quasi-statique d'une cavite a symetrie spherique ou cylindrique dan un milieu elasto-plastique, Annales des Pons et Chaussees, IV.

SERATA S, 1978, Geomechanical basis for design of underground salt cavities, ASME Energy Technology Conference and Exhibition, Houston, Texas, 43pp.

SERATA S, GLOYNA E, 1960, Design principles for underground salt cavities, Journal of the Sanitary Engineering Division, ASCE, V86, N.8A3.

SERATA S, GLOYNA E, 1960, Principles of structural stability of underground salt cavities, Journal of Geophysical Research. V65, No 9, 2979-2987.

STAGG H, ZIENKIEWICZ O, 1968, Rock mechanics in engineering practice, John Wiley and Sons, London.

THOMS R, CHAR CH, BERGERON N, 1973, Finite element analysis of

rock salt pillar models, Proc. 14th Symposium on Rock Mechanics, ASCE, New York, 393-409.

VOUILLE G, TIJANI S, GRENIER F, 1984, Experimental determination of the Tersane rock salt, Proc. First Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Trans Tech Pub. ,Clausthal, Germany.

WALSH J, 1965, The effect of cracks on the compressibility of rock, Journal of Geophysical Research, V70, No 2.

WAWERSIK W, PREECE D, 1984, Creep testing of salt procedures, Proc. First Conference of the Mechanical Behavior of Salt, Tras Tech Publications, Clausthal, Germany.

7. FIGURAS

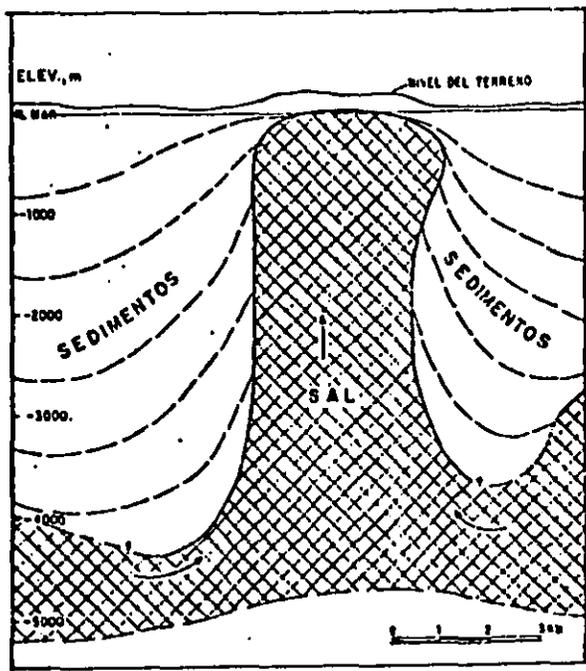


FIG 1.1 Domo salino típico

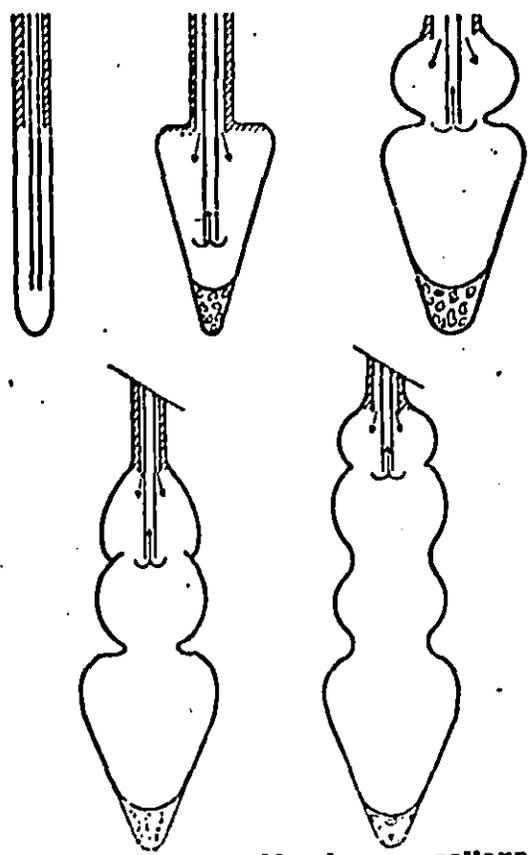


FIG 1.2 Etapas de desarrollo de una caverna por disolución

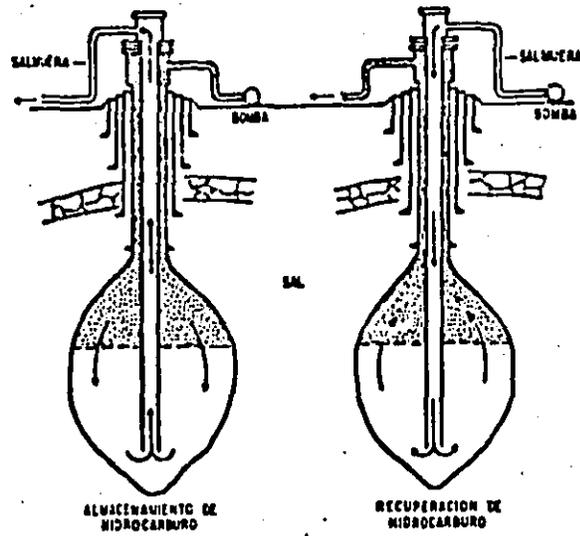


FIG 1.3 Operación de la cavidad como almacenamiento

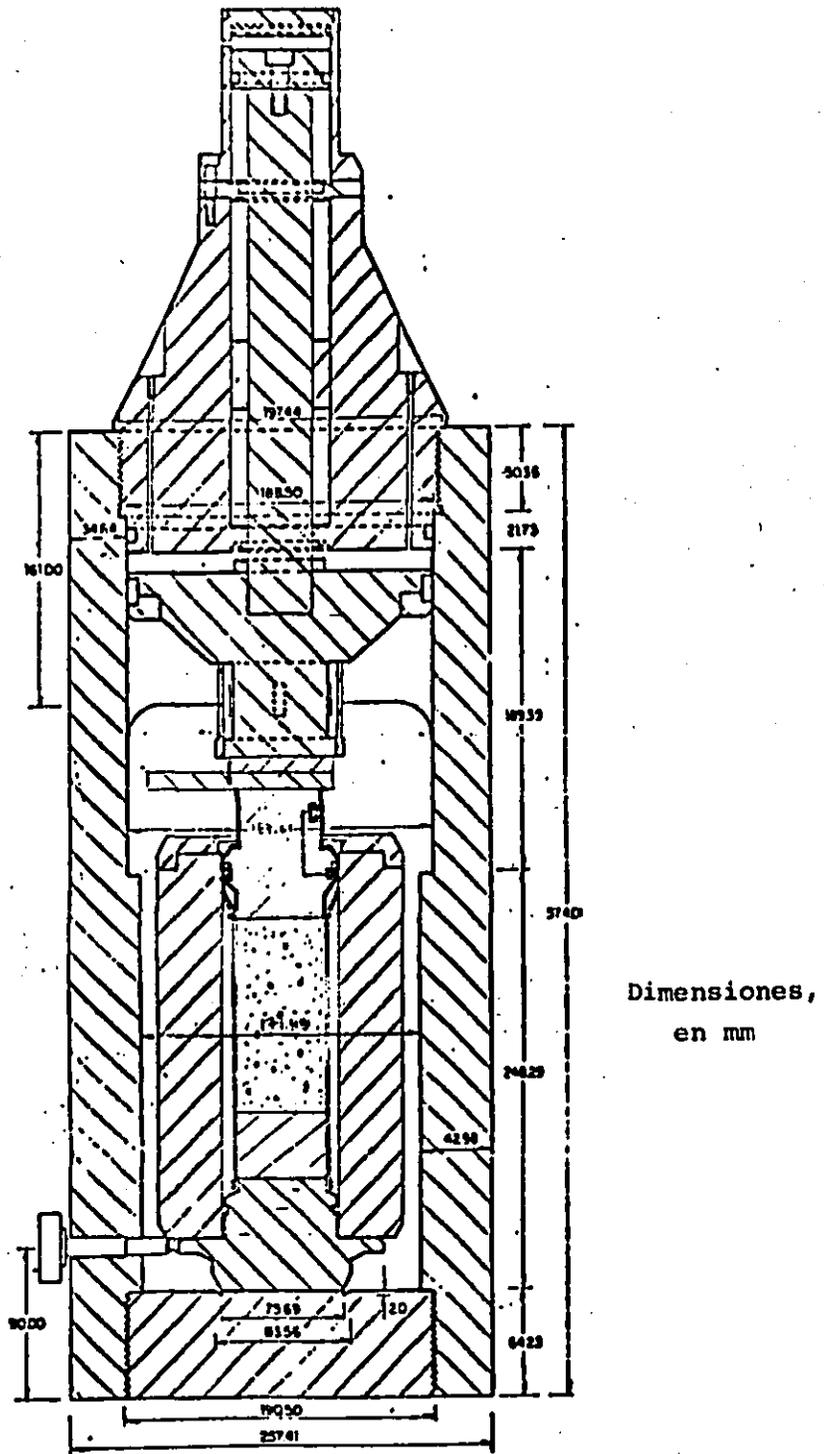


Fig 2.1 Cámara triaxial de alta presión

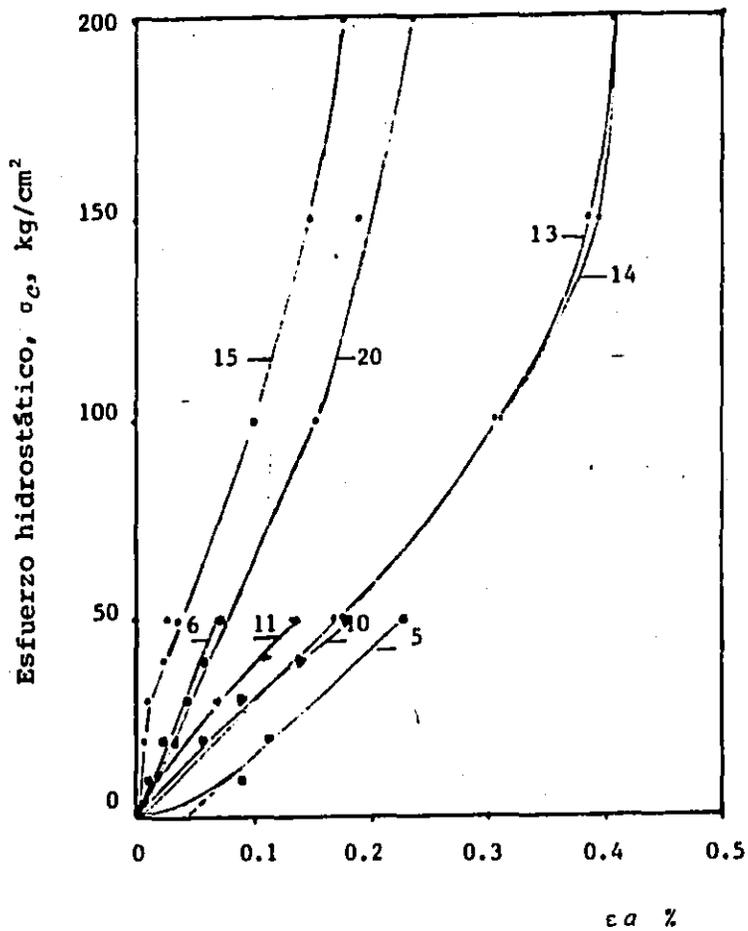


FIG 2.3 Curvas esfuerzo-deformación axial en compresión hidrostática

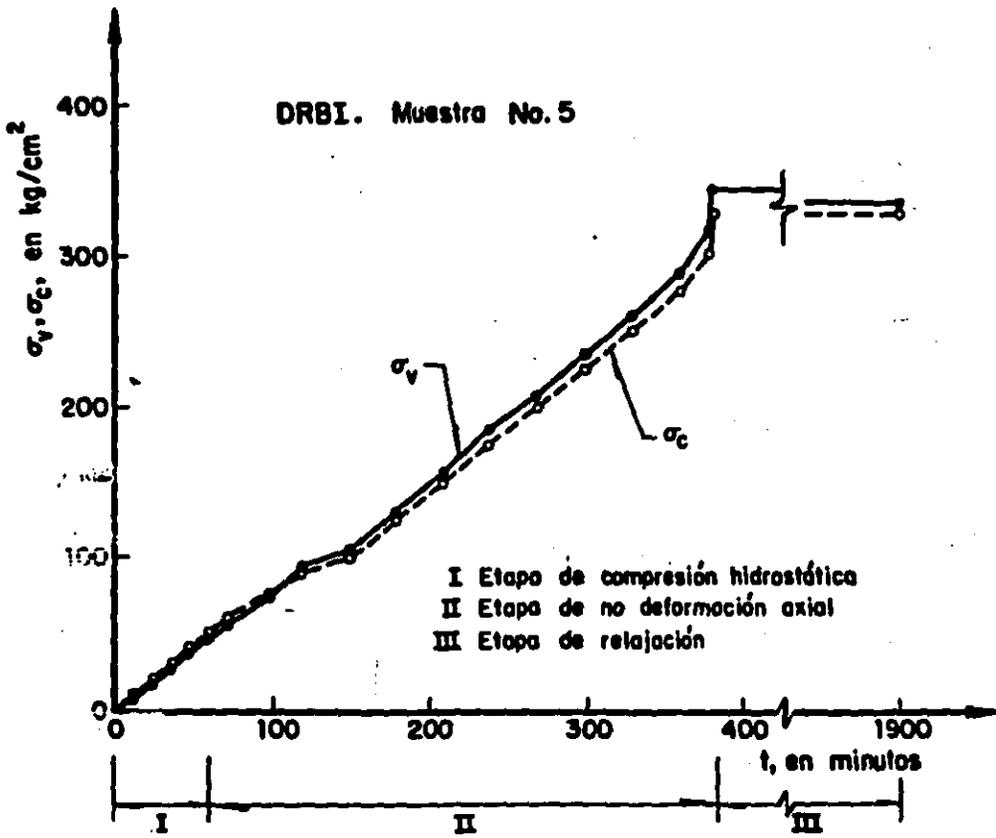


Fig 2.4 Esfuerzos confinante y axial vs tiempo

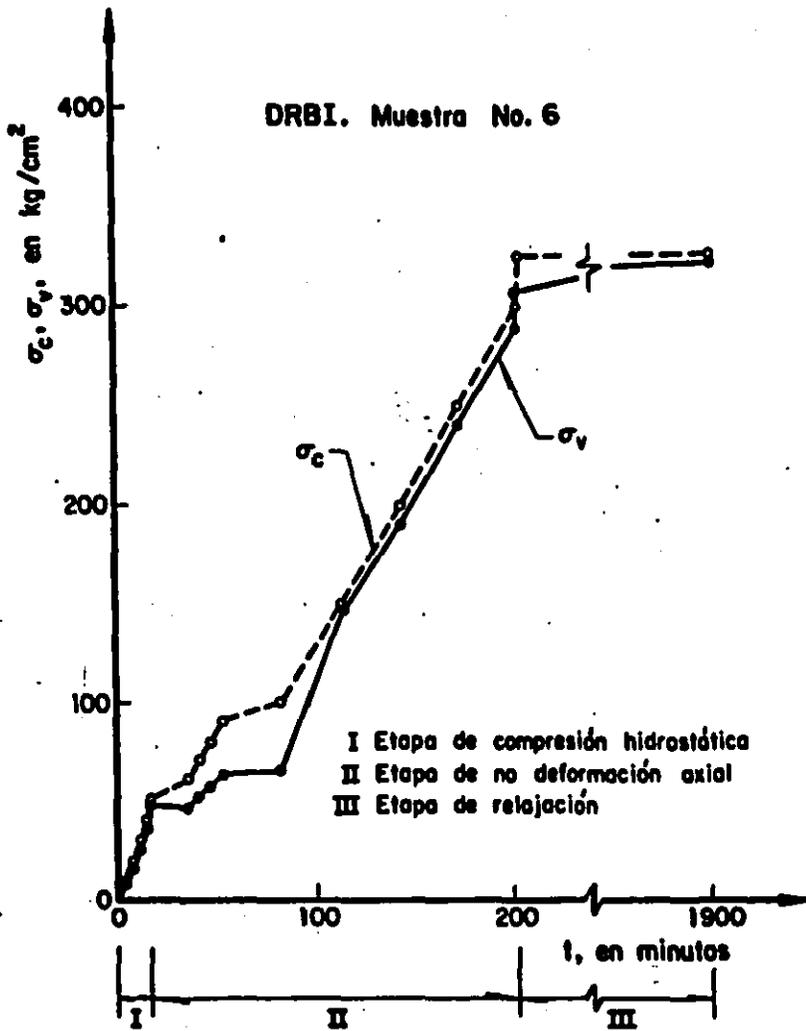


Fig 2.5 Esfuerzos confinante y axial vs tiempo

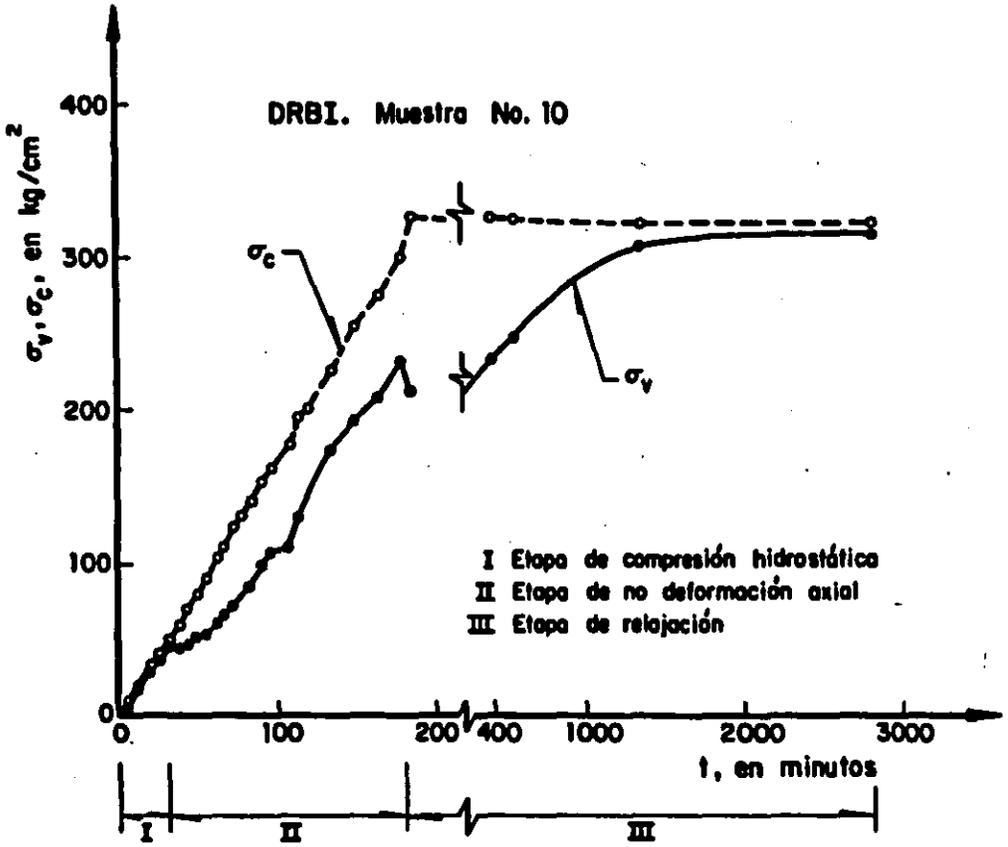


Fig. 2.6 Esfuerzos confinante y axial vs tiempo

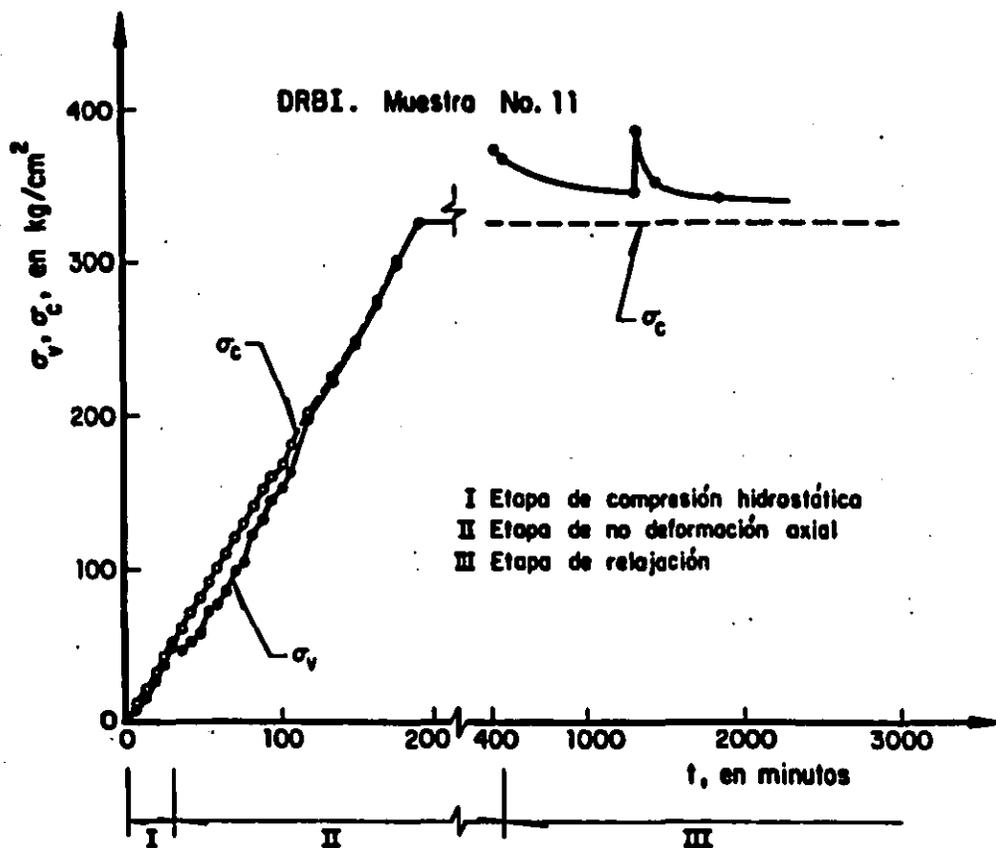


Fig2.7 Esfuerzo confinante y axial vs tiempo

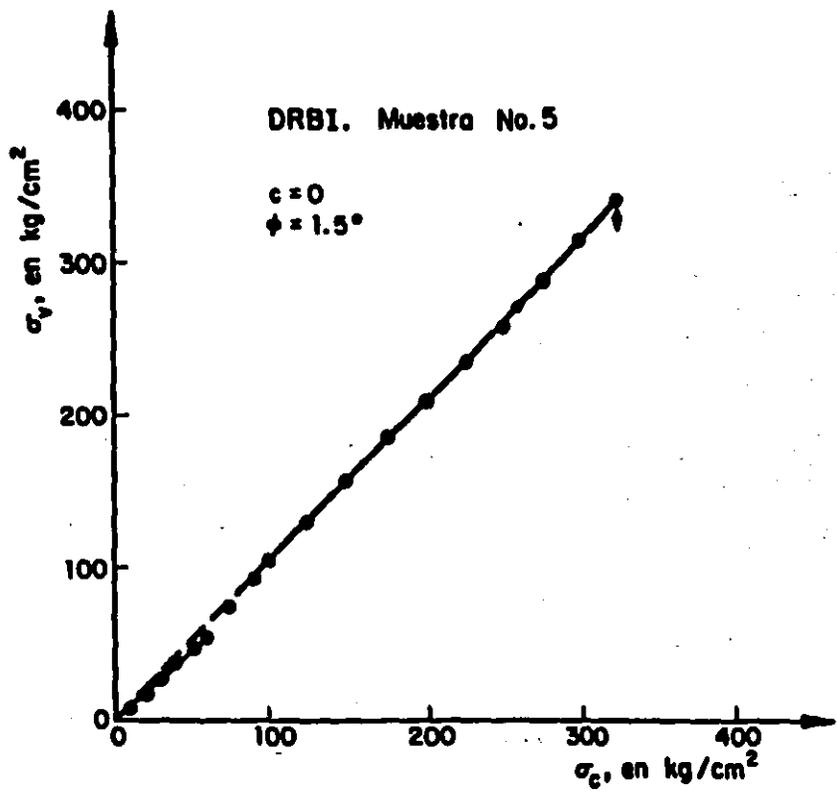


Fig 2.8 Esfuerzo axial vs esfuerzo confinante

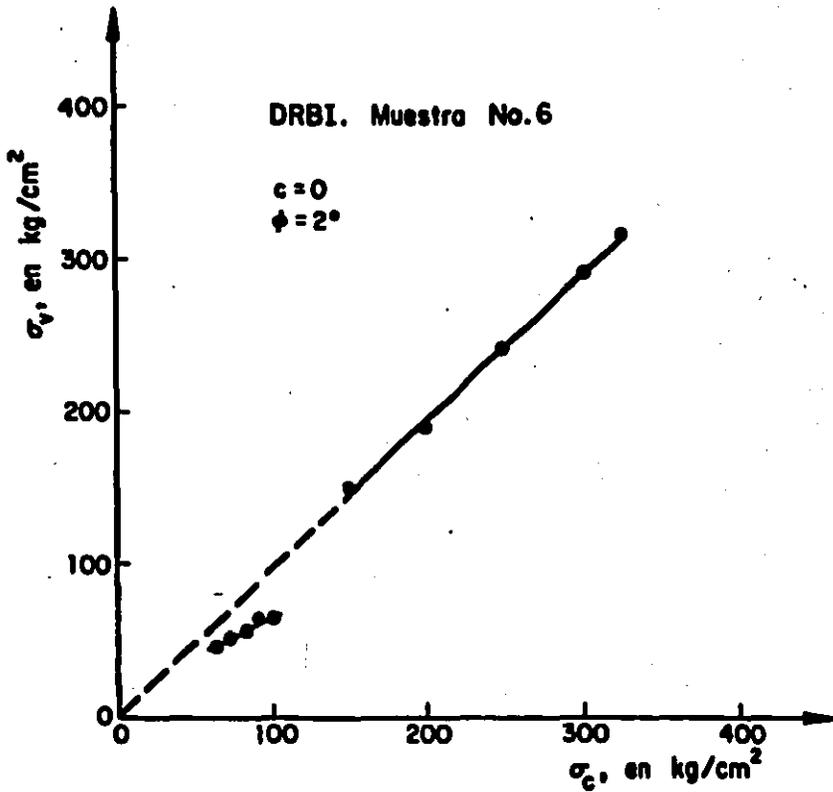


Fig 2.9 Esfuerzo axial vs esfuerzo confinante

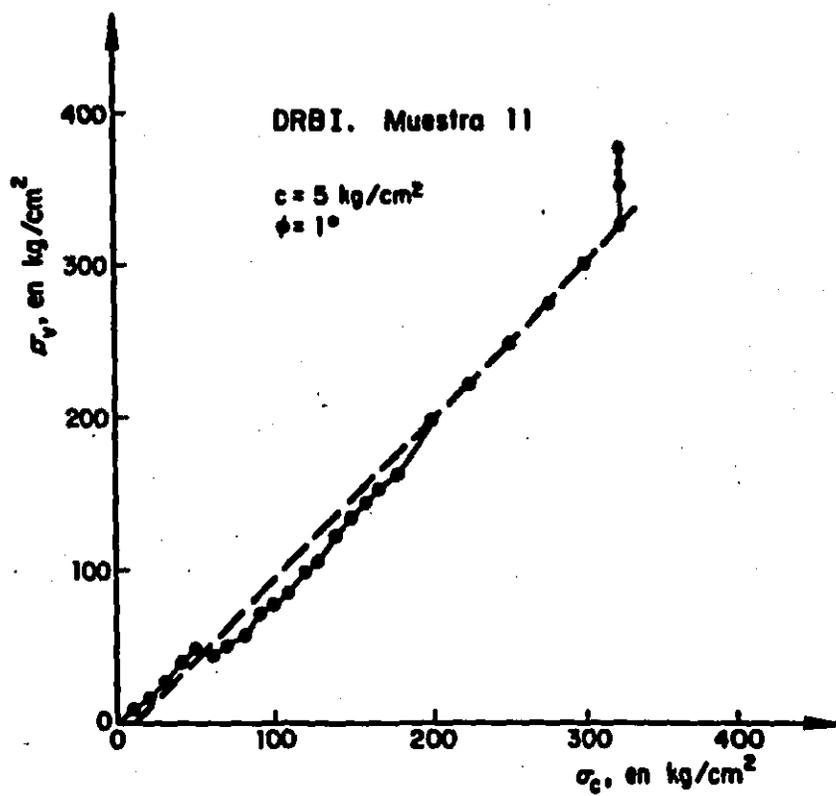


Fig2.10 Esfuerzo axial vs esfuerzo confinante

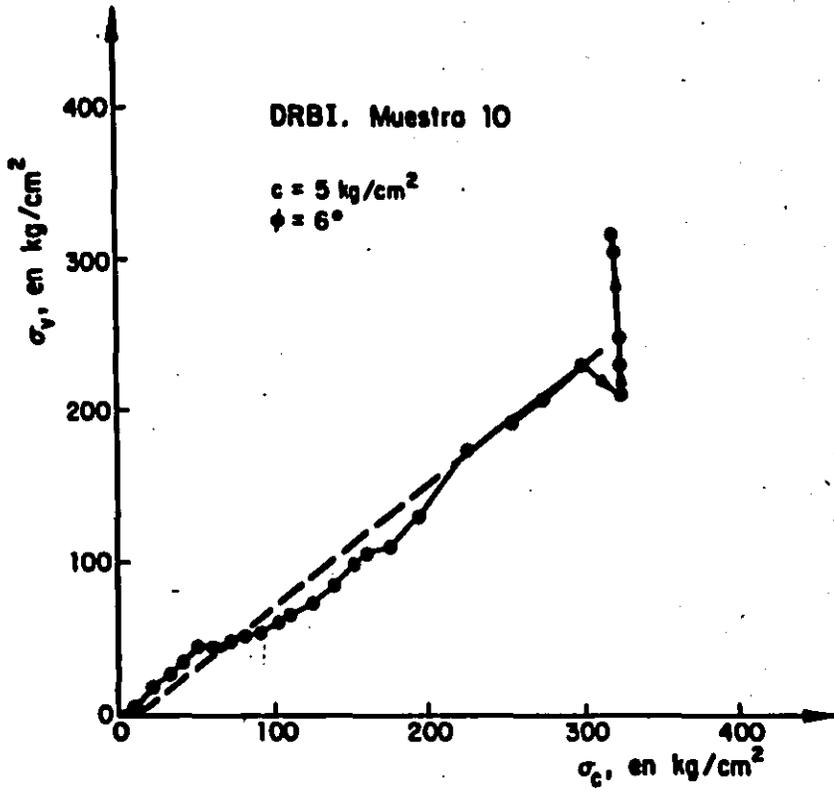


Fig2.11 Esfuerzo axial vs esfuerzo confinante

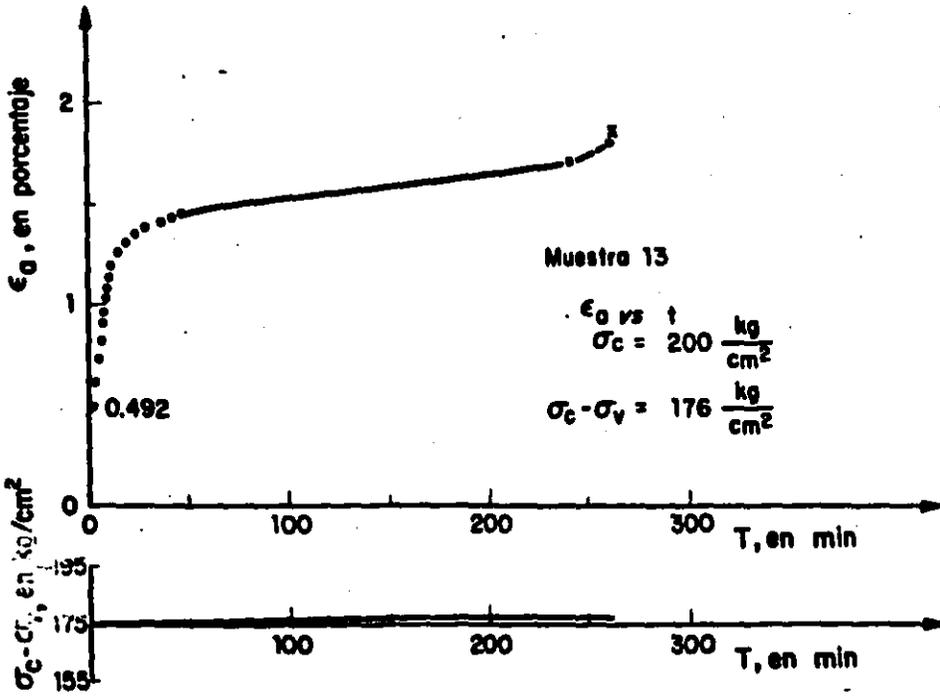


Fig. 12 Fluencia en prueba triaxial de extensión

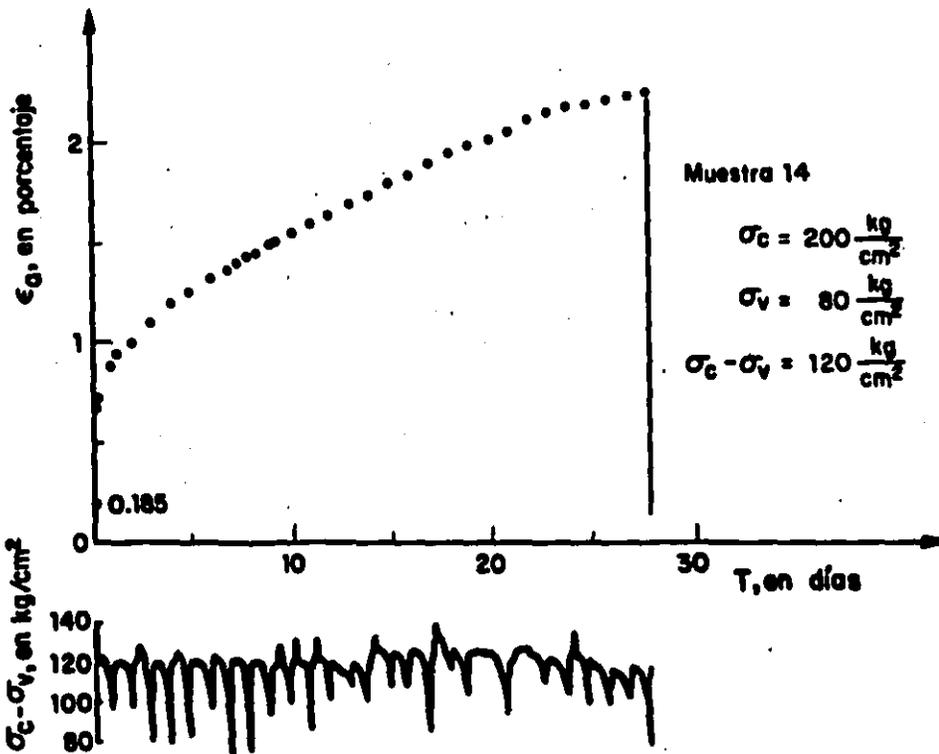


Fig. 13 Fluencia en prueba triaxial de extensión

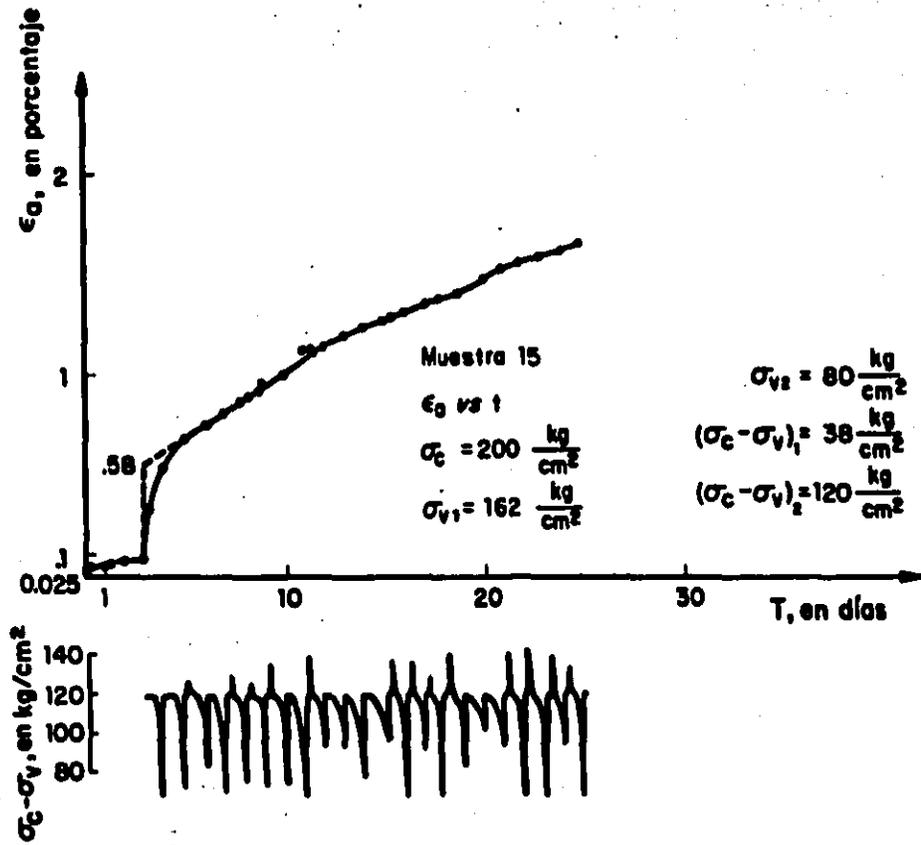


Fig.2.14 Fluencia en prueba triaxial de extensión

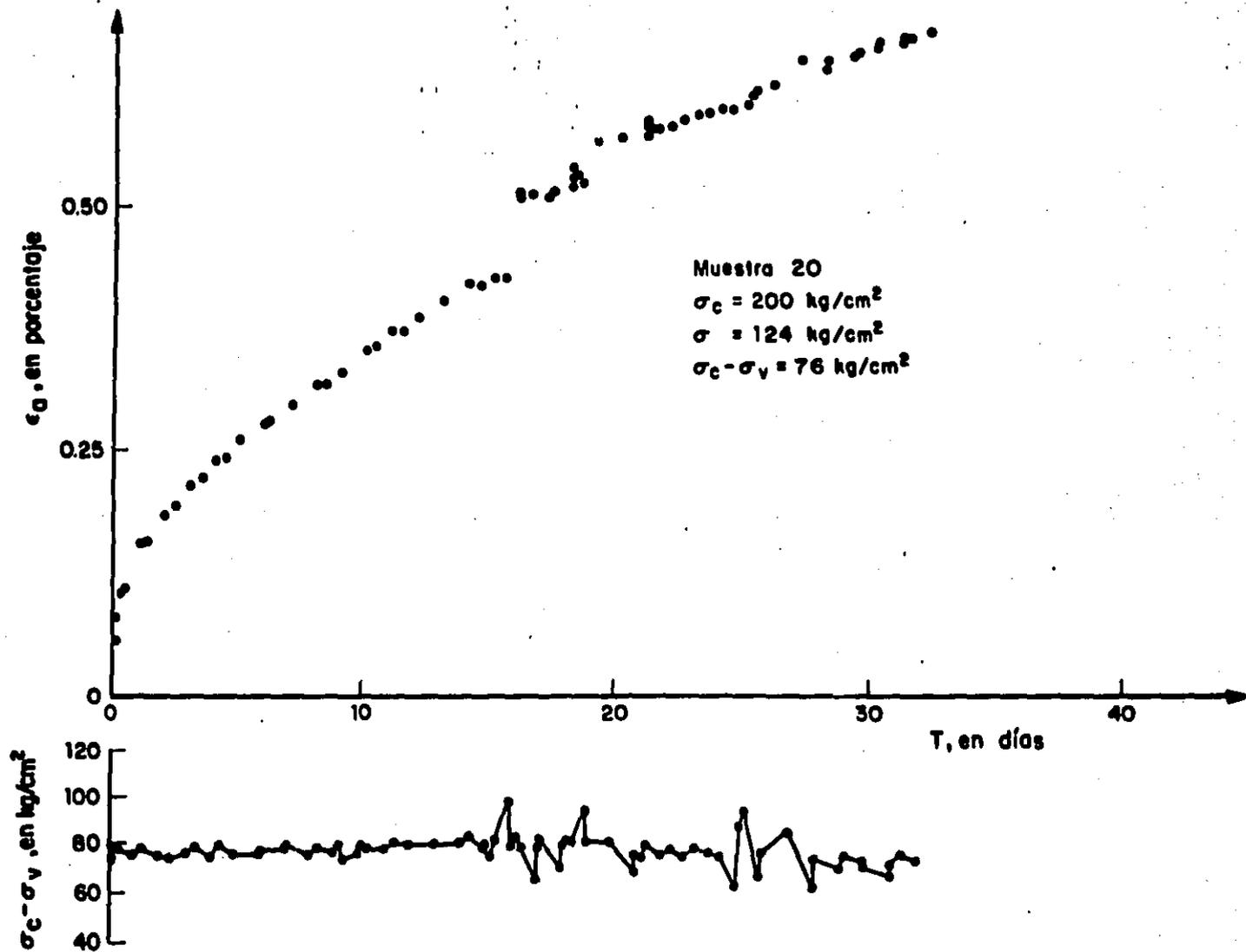


Fig 2.15 Fluencia en prueba triaxial de extensión

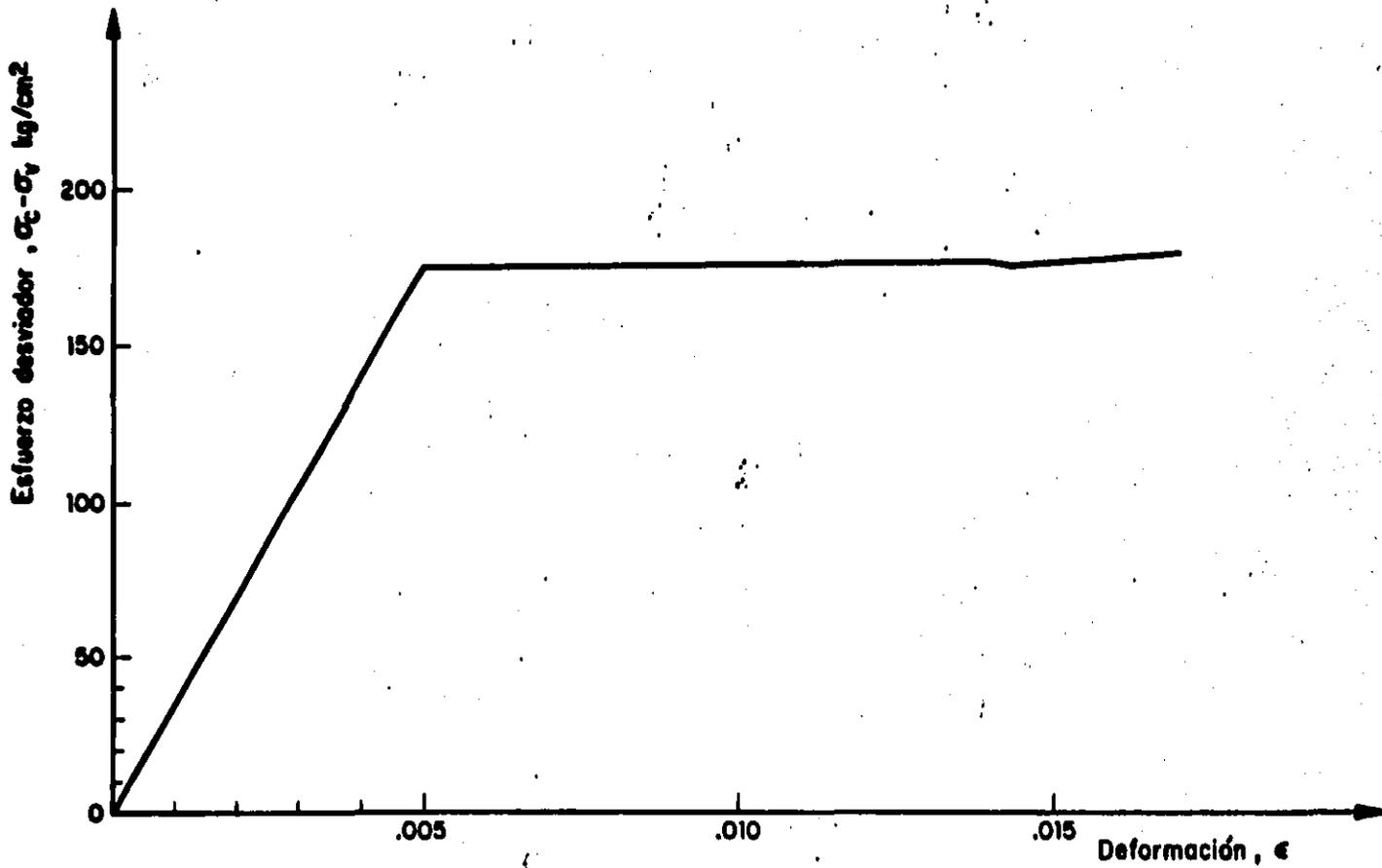


Fig 2.16 σ vs ϵ , Fluencia en extensión triaxial, muestra 13

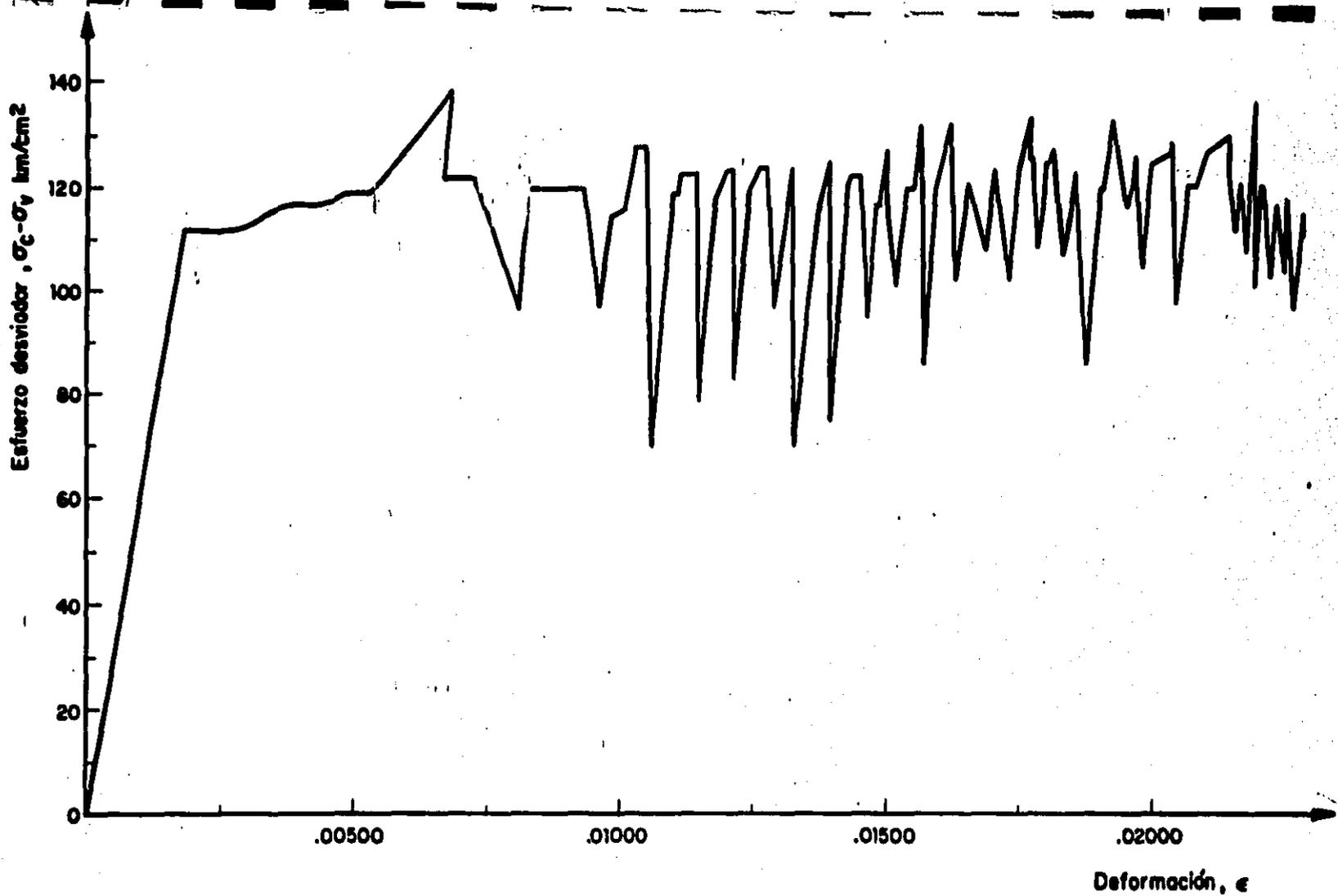


Fig2.17 σ vs ϵ Fluencia en extensión triaxial muestra 14

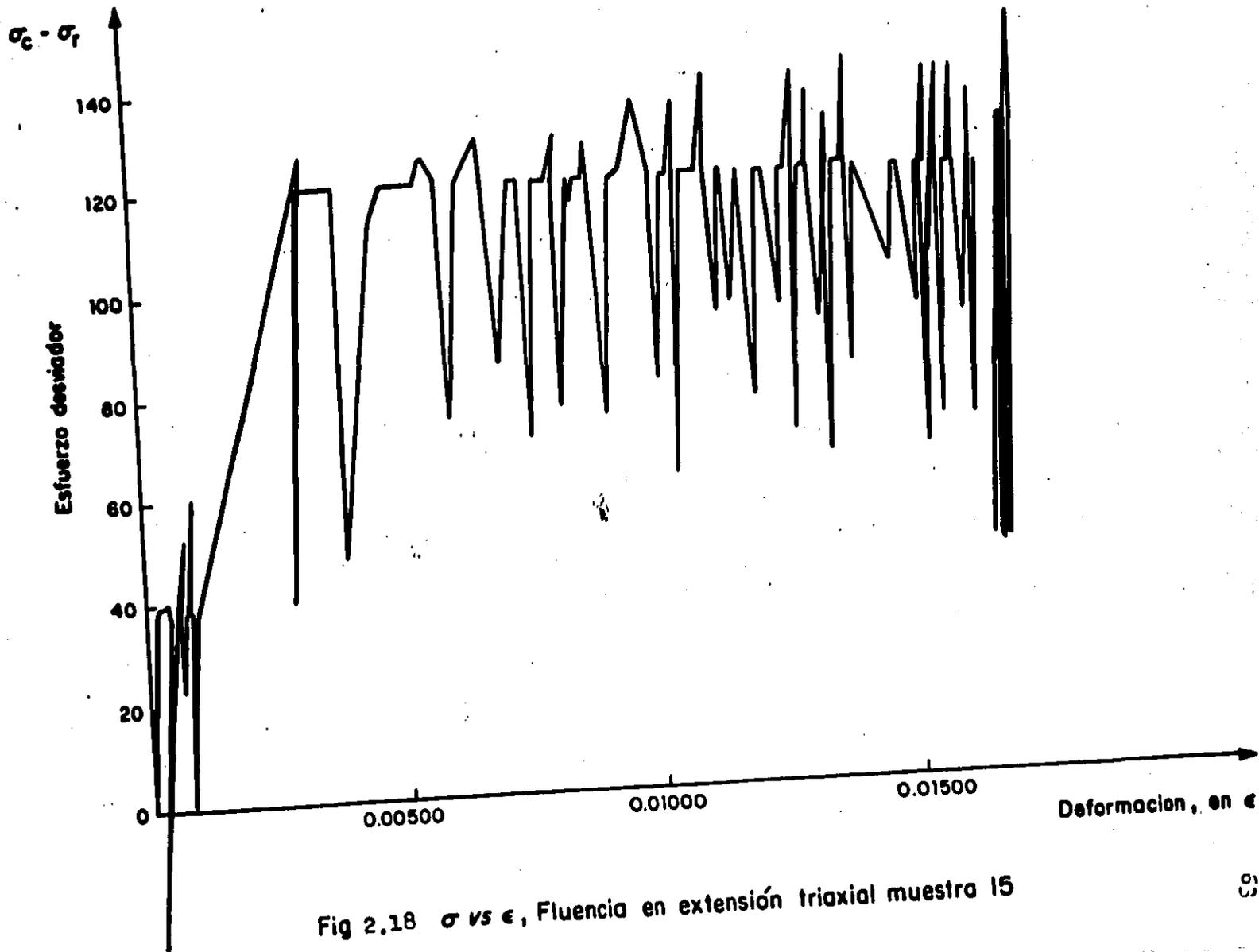


Fig 2.18 σ vs ϵ , Fluencia en extensión triaxial muestra 15

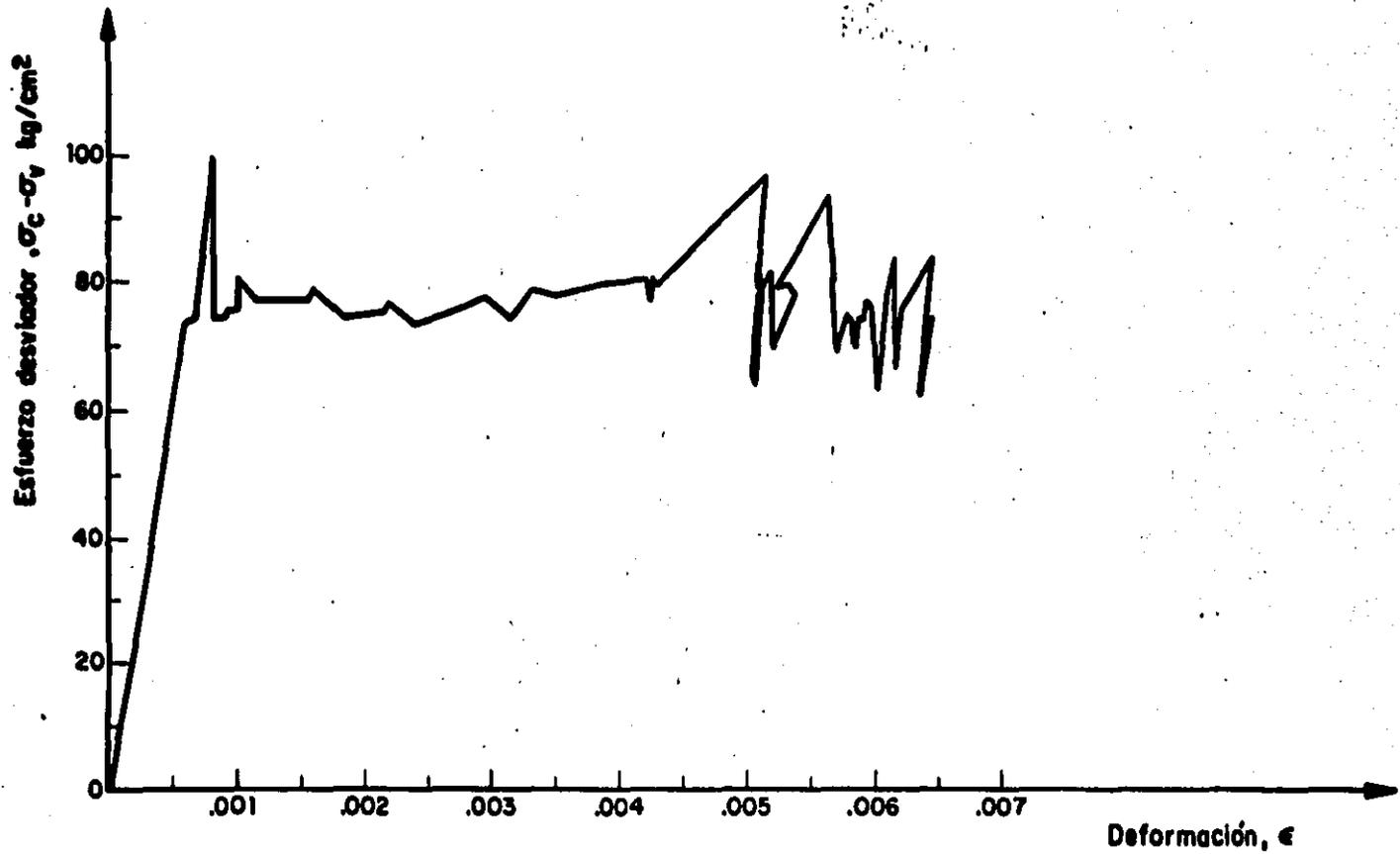


Fig2.19 σ vs ϵ , Fluencia en extensión triaxial, muestra 20

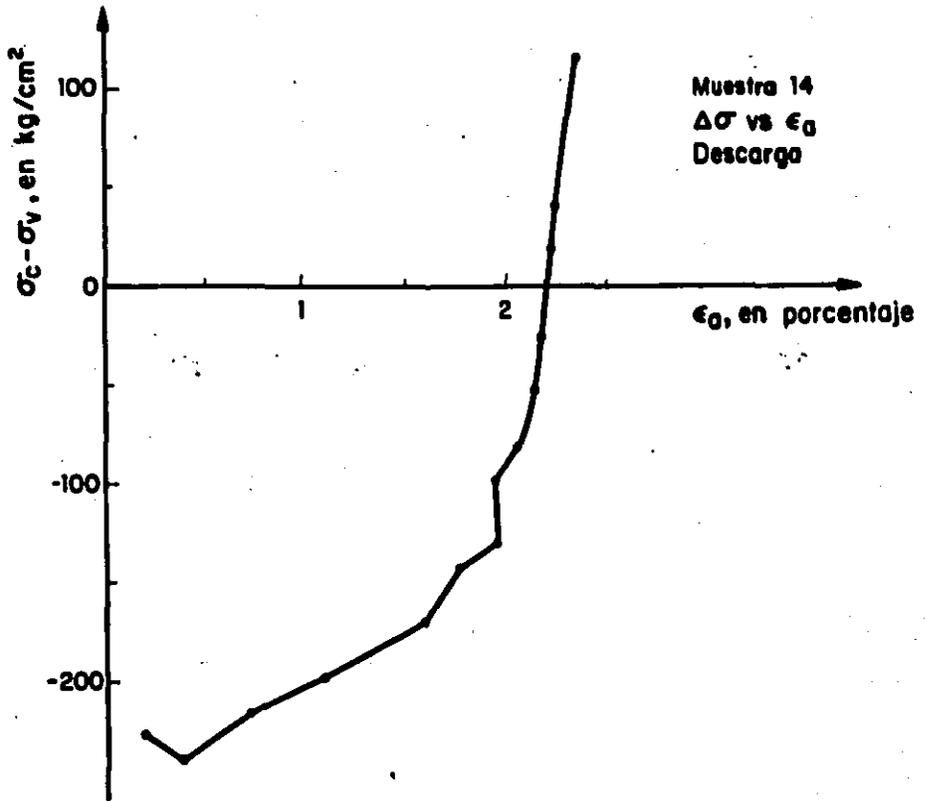


Fig 2.20 Curva esfuerzo deformación en descarga de la muestra 14

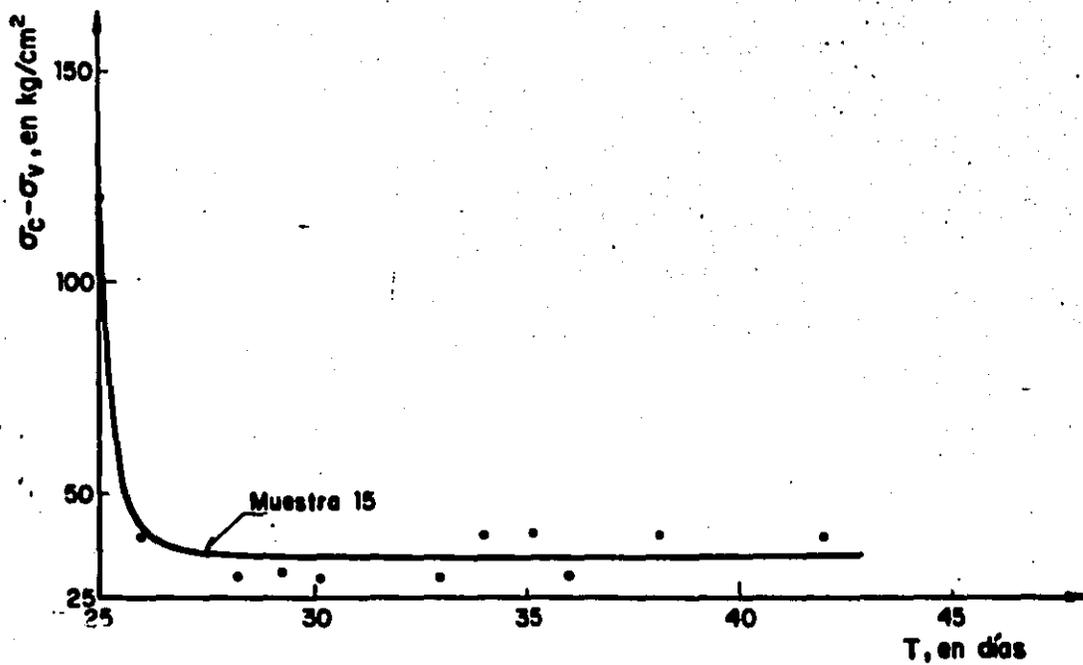


Fig 2.21 Relajación de esfuerzos

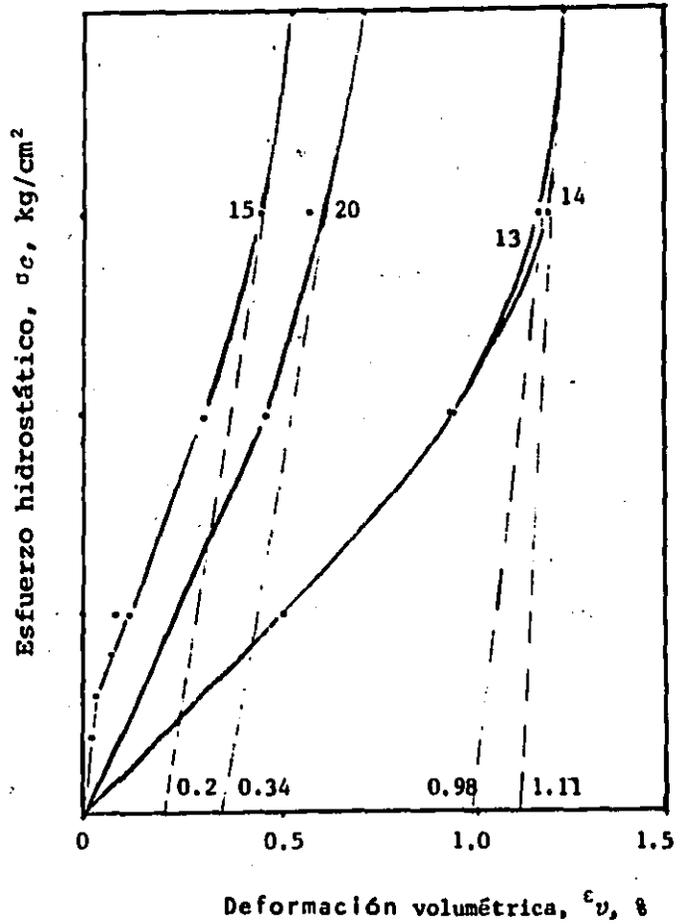


FIG 2.22 Curvas esfuerzo-deformación volumétrica, en compresión hidrostática

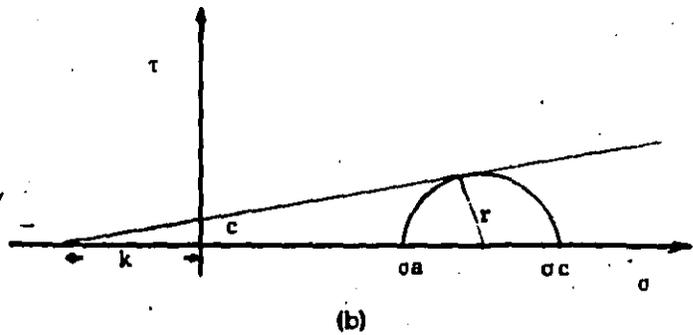
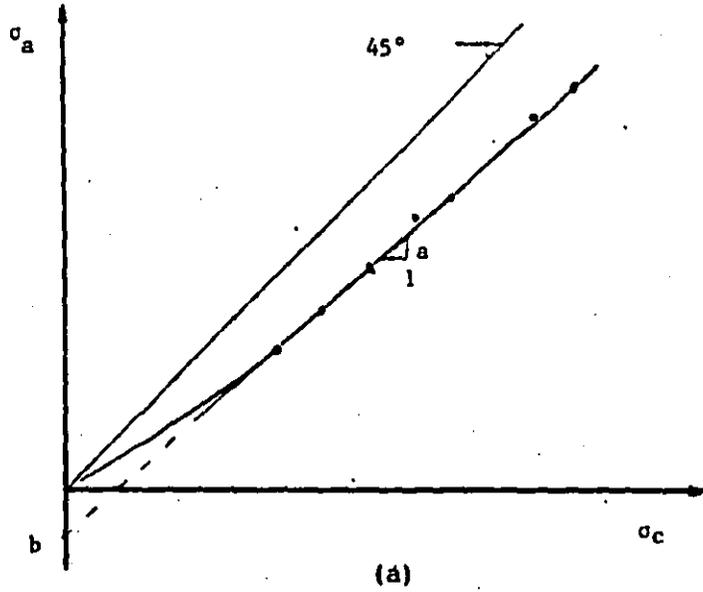


FIG 2.23 Interpretación de la prueba DRBI (sin escala)

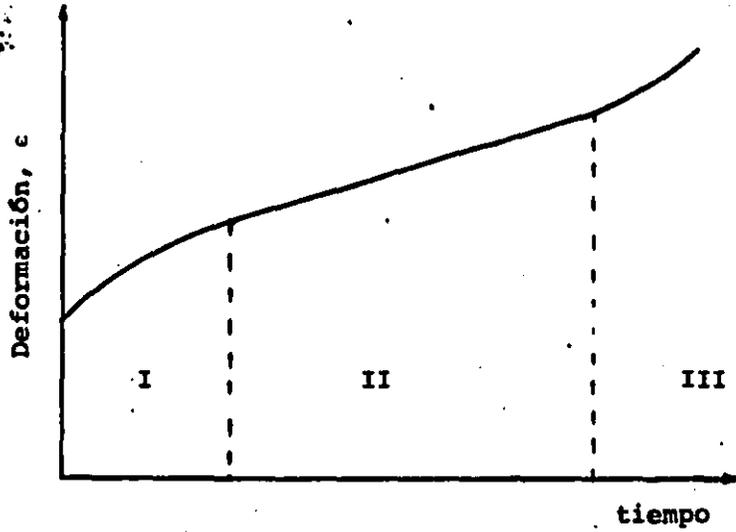


FIG 2.24 Curva de fluencia típica

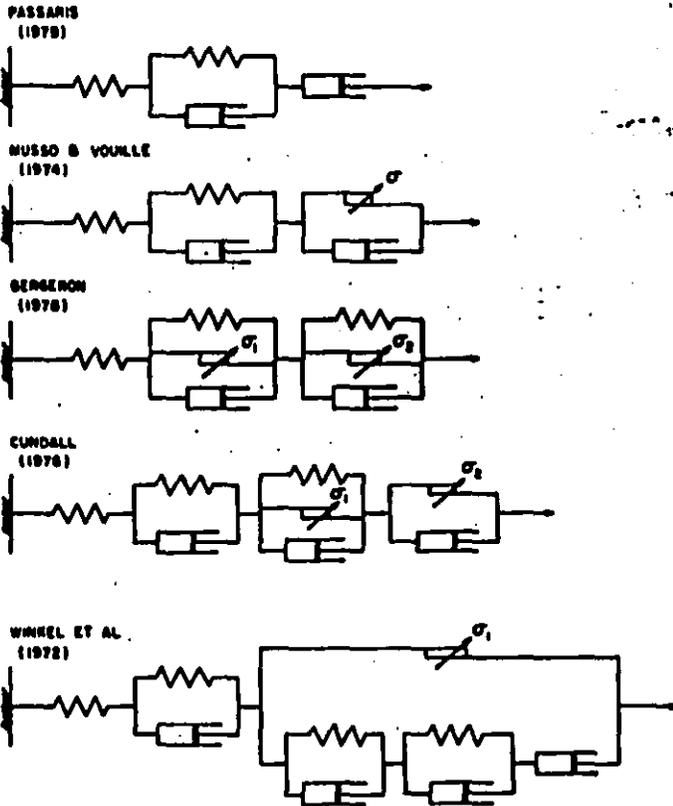


FIG 2.25 Ejemplos de modelos reológicos en sal [Lindner et al., 1984]

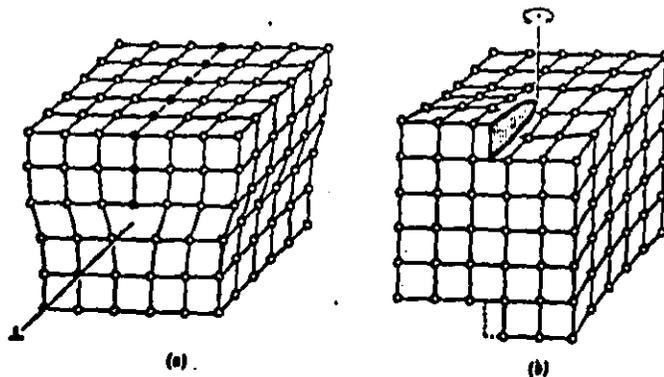


FIG 2.26 Tipos de dislocaciones: (a) de borde
(b) de tornillo [Hayden et al, 1968]

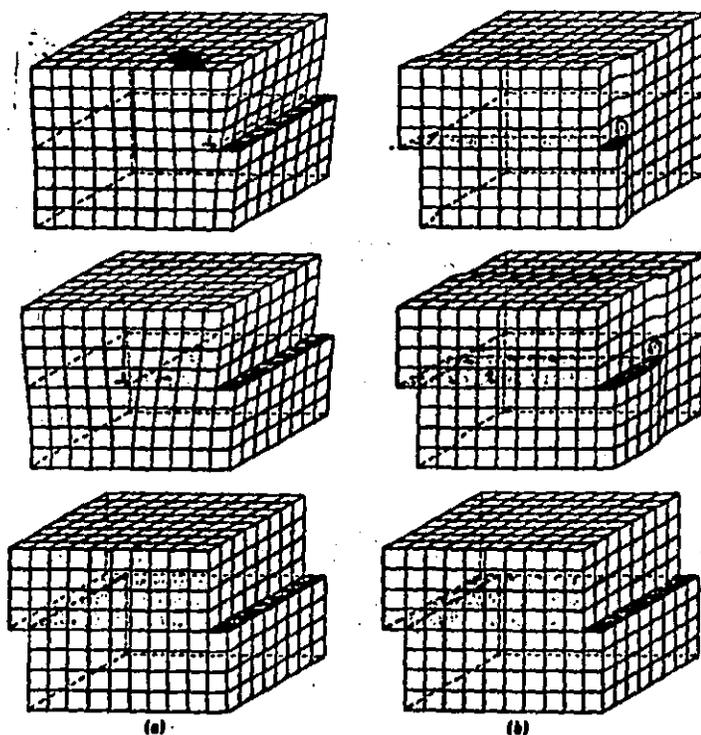


FIG 2.27 Deslizamiento resultante del movimiento
de una dislocación. (a) de borde pura
(b) de tornillo pura. [Moffatt et al
1968]

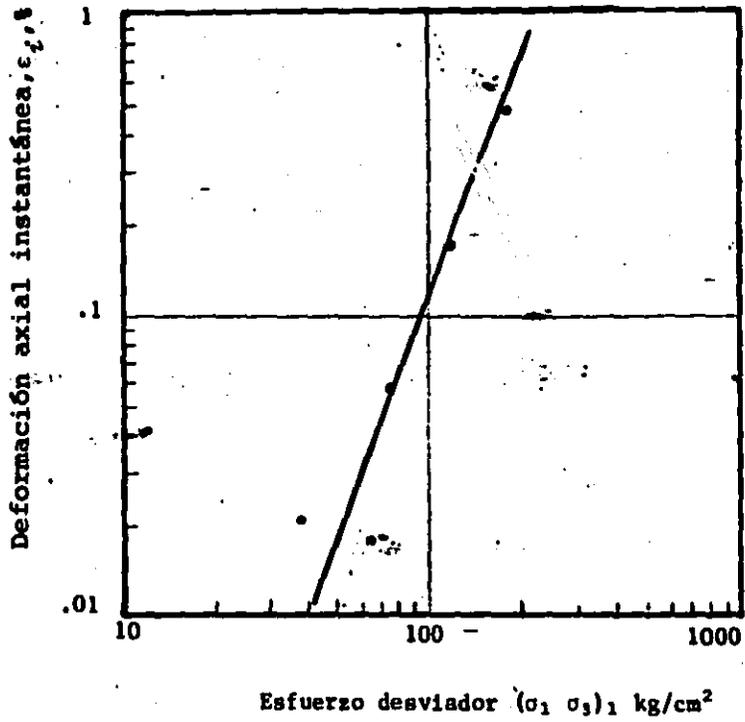


FIG 2.28 ϵ_i vs $\sigma_1 - \sigma_3$, pruebas de fluencia en extensión triaxial

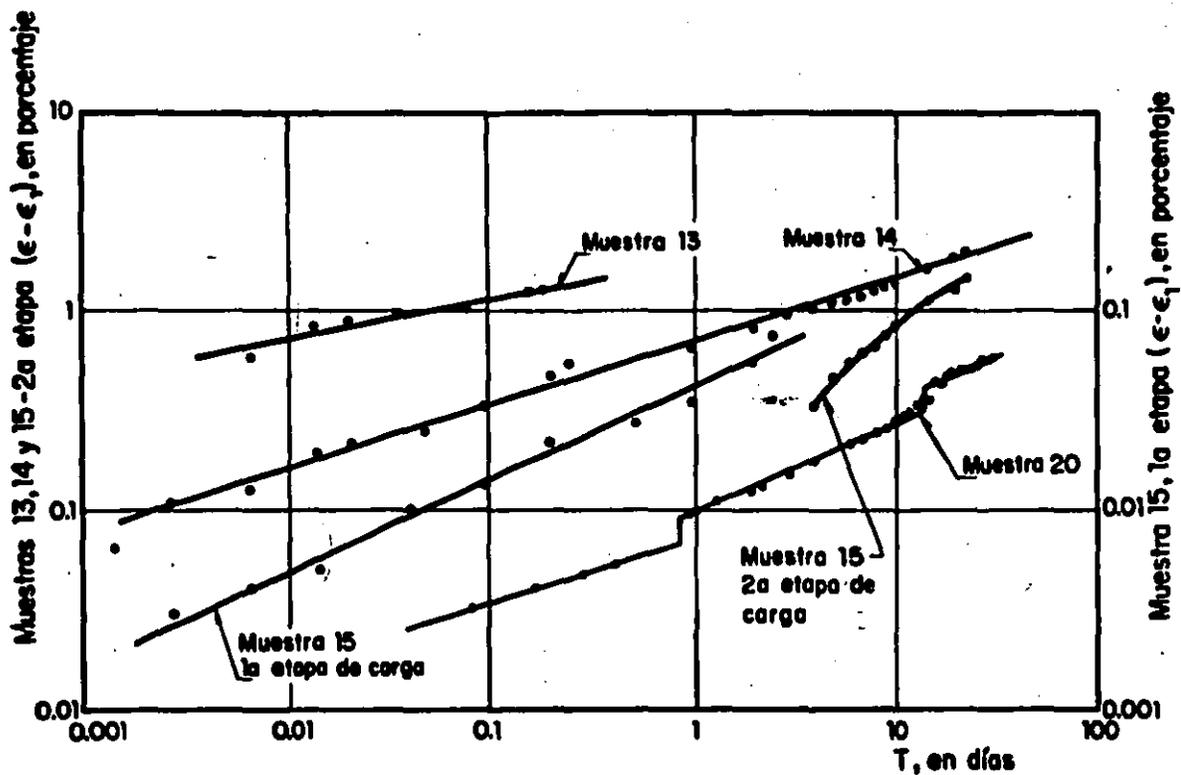


Fig 2.29 Deformación diferida vs tiempo

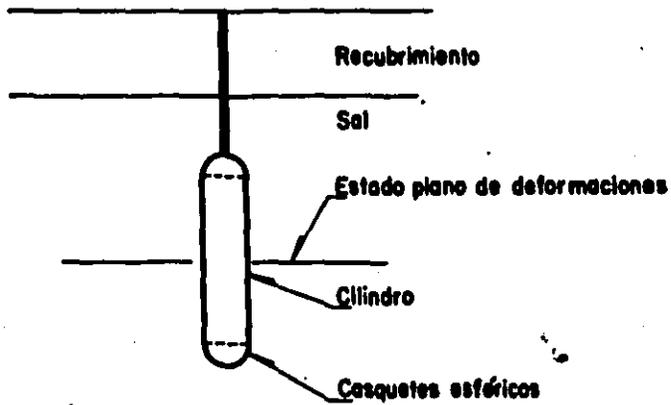


Fig 3.1 Geometría idealizada de la cavidad

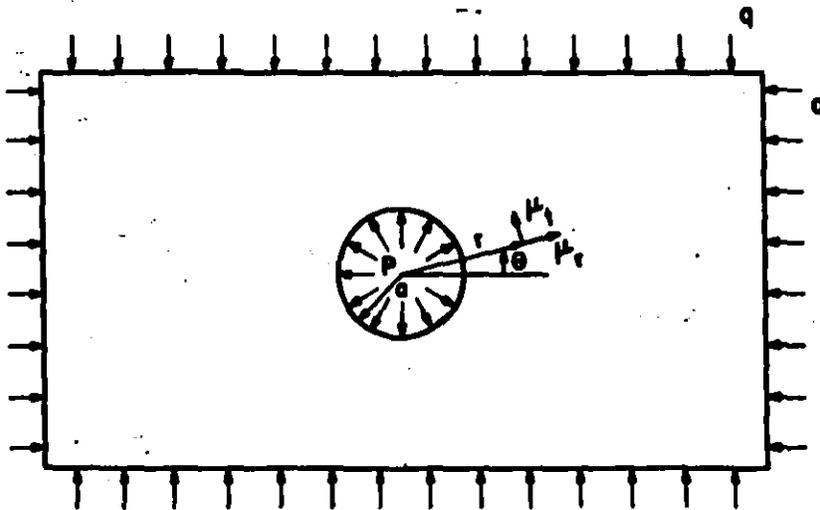


Fig 3.2 Caso de la cavidad cilíndrica para $t > 0$

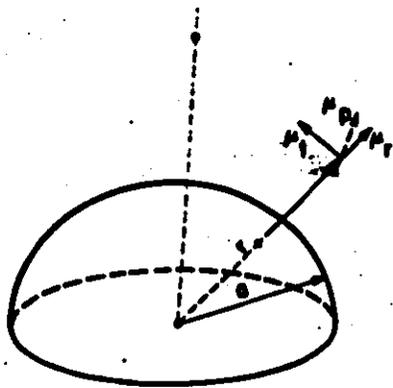


Fig 3.3 Casquete esférico

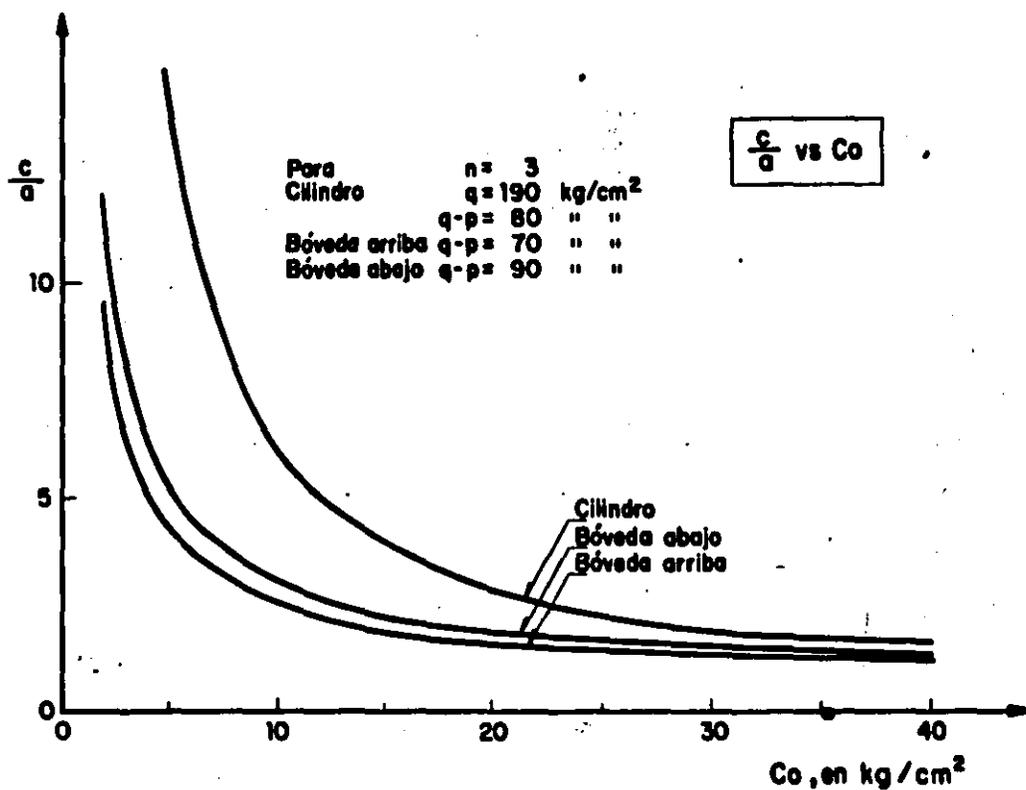
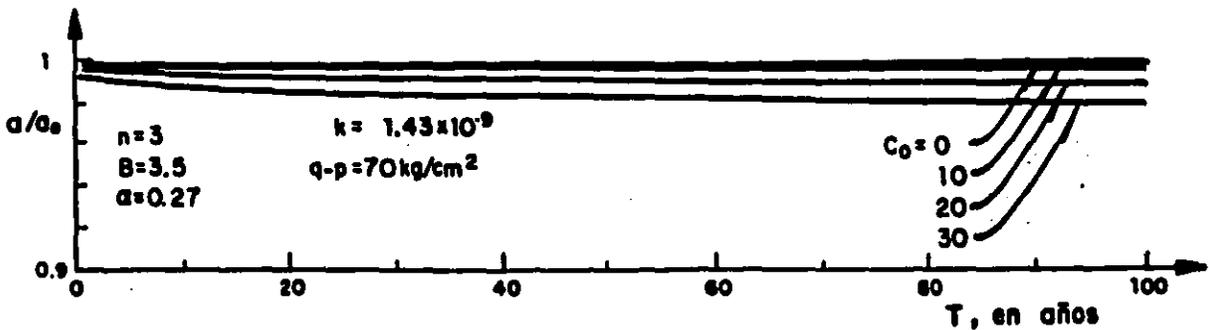
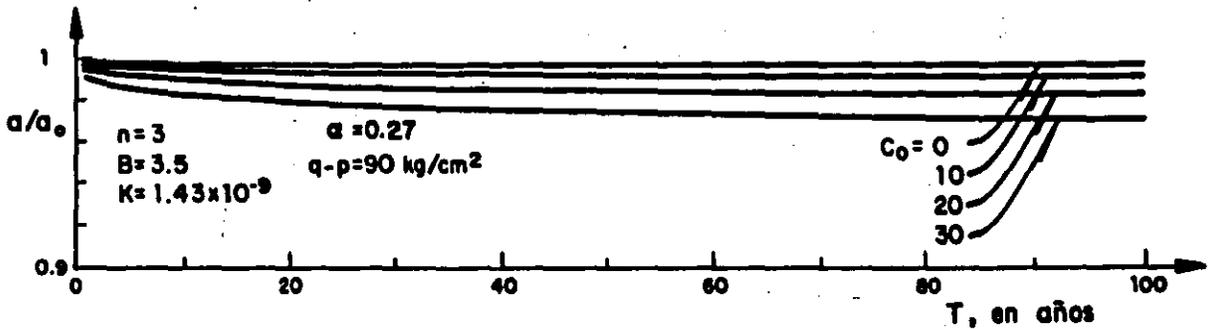
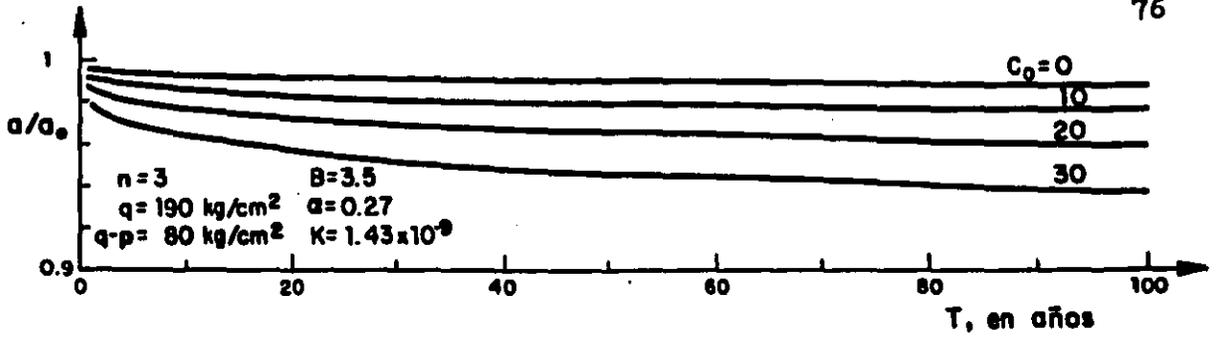


Fig 4.1 Radio de la zona de influencia vs cohesión última



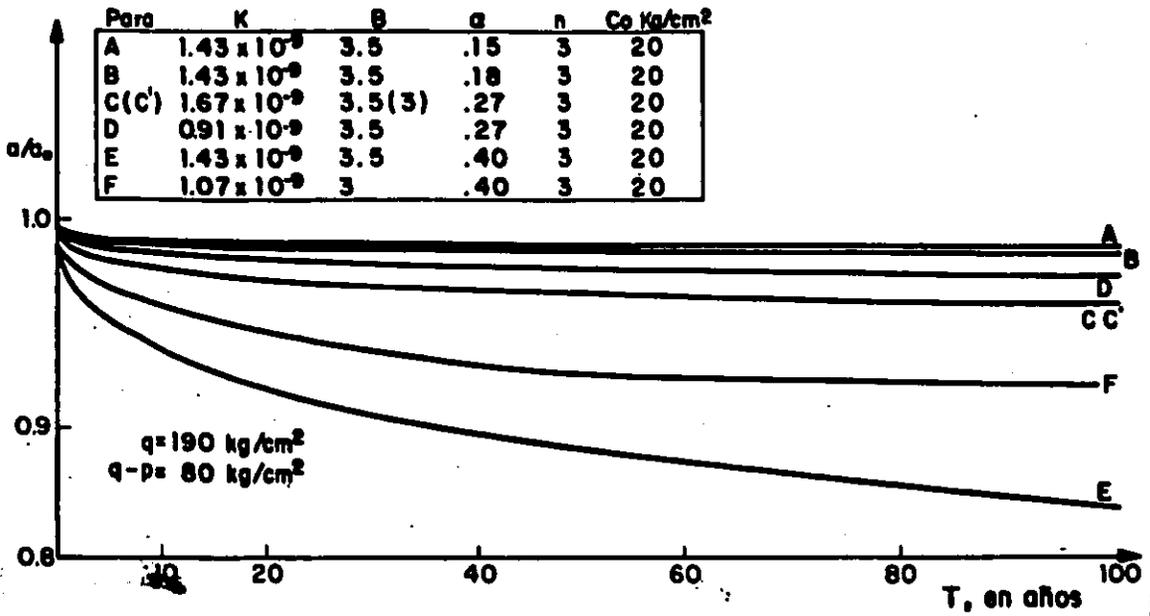


Fig 4.5 Variación de a/a_0 vs T , para diferentes valores de los parámetros mecánicos. Cohesión última igual a 20 kg/cm^2 .
 Parte central de la caverna

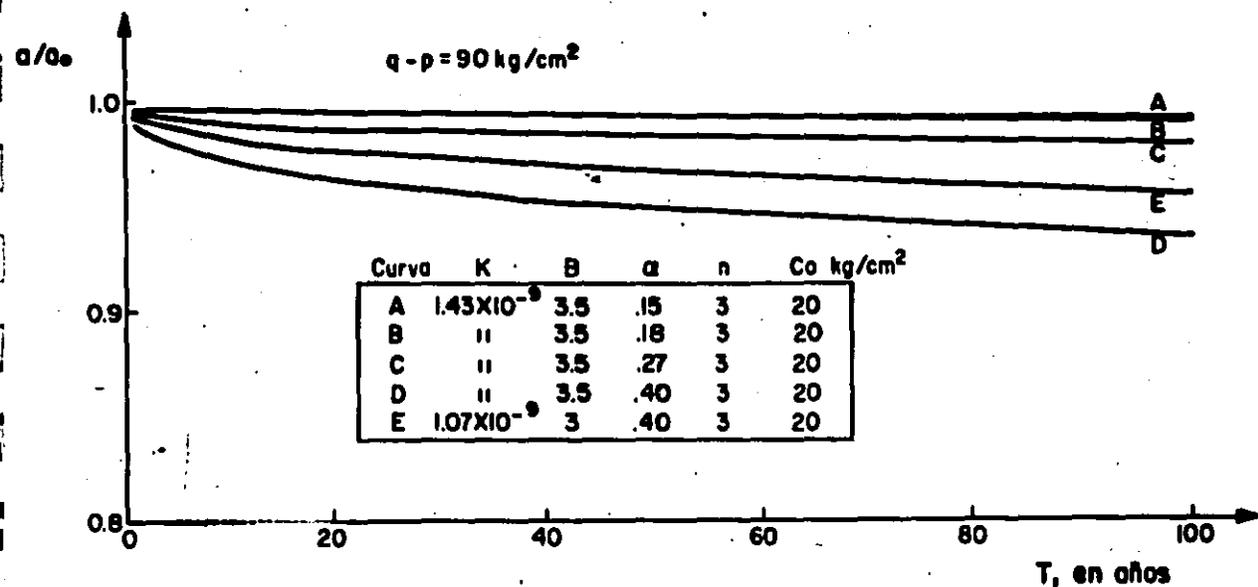


Fig 4.6 a/a_0 vs T, para diferentes valores de los parámetros mecánicos cohesión última igual a 20 kg/cm^2 ; bóveda inferior de la caverna

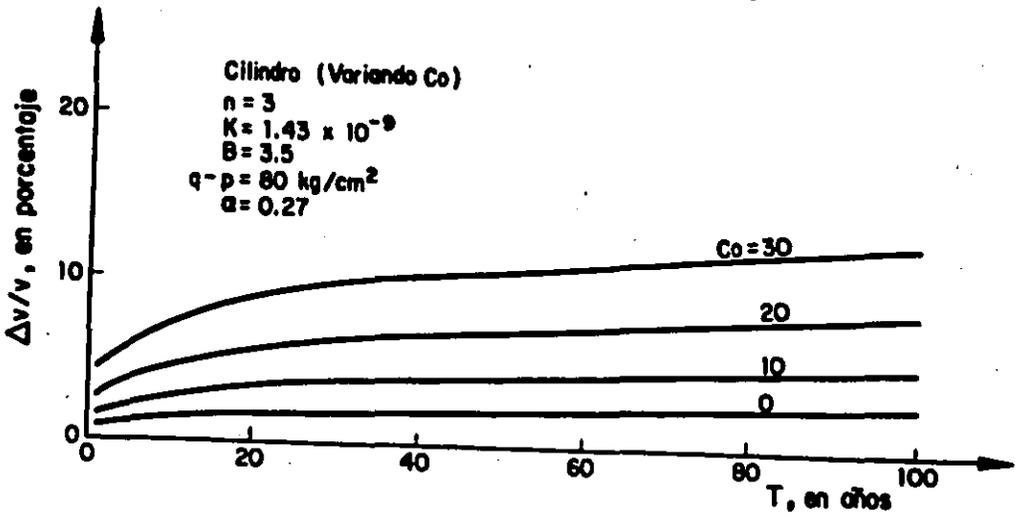


Fig 4.7 $\frac{\Delta v}{v}$ vs T parte central de la cavidad al variar C_0

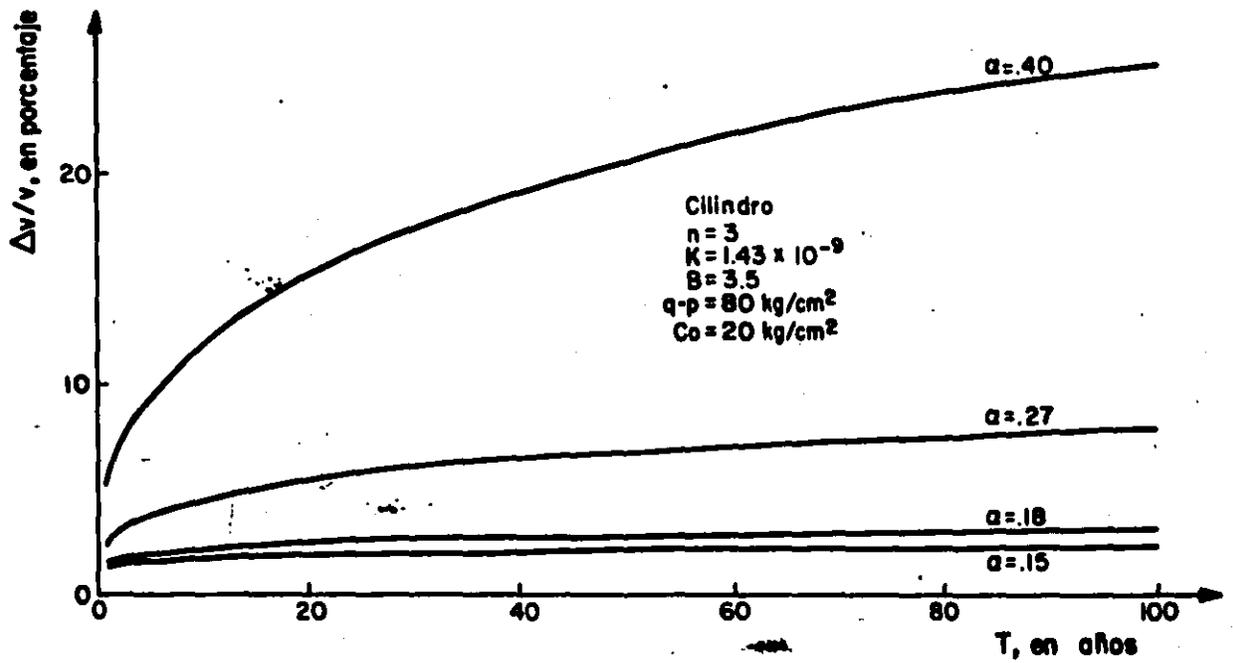


Fig 4.8 $\frac{\Delta v}{v}$ vs T, parte central de la cavidad al variar α

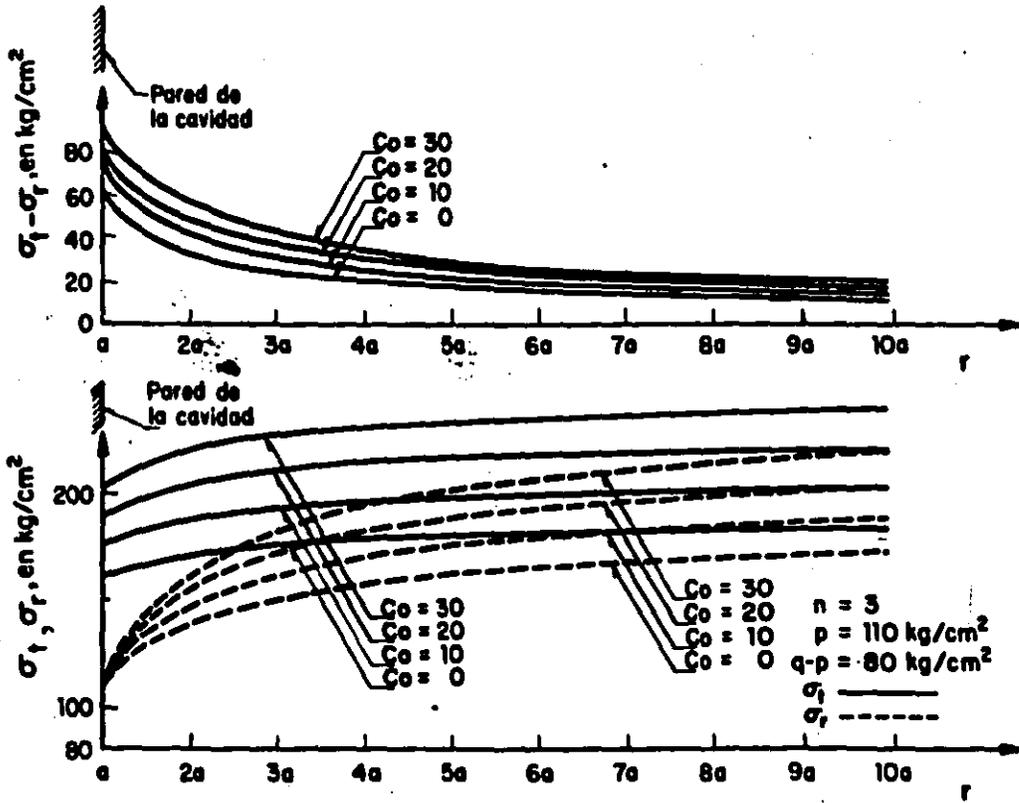


Fig 4.9 Distribución de esfuerzos en un plano horizontal que es normal al eje de simetría de la cavidad en su parte central

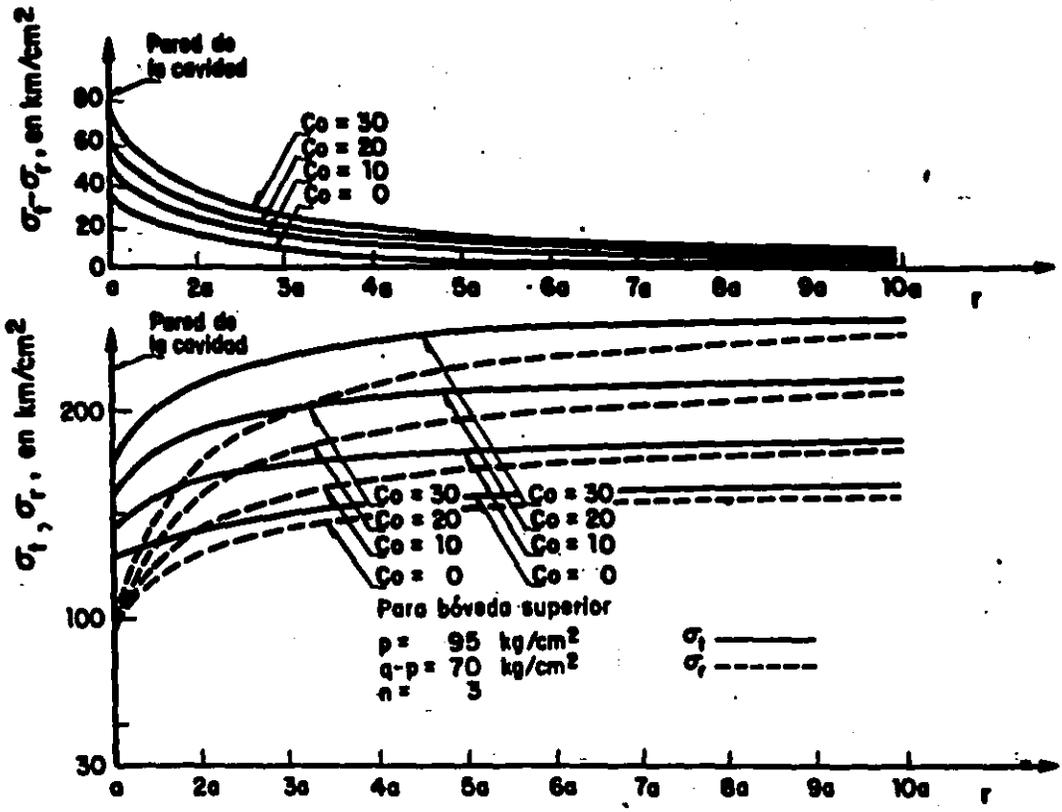


Fig 4.10 Distribución de esfuerzos alrededor de la bóveda superior

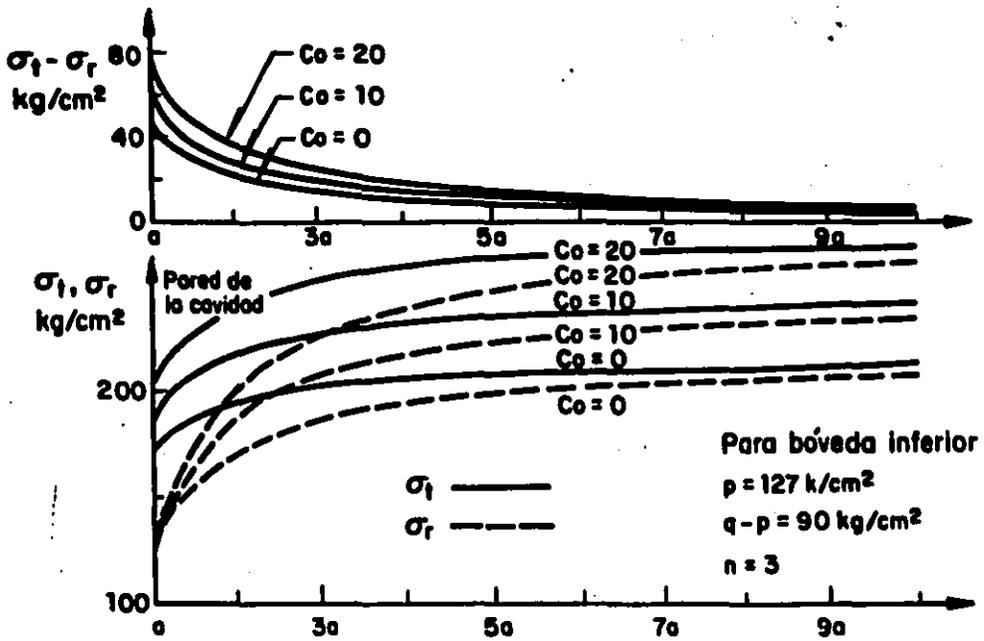


Fig 4.11 Distribución de esfuerzos alrededor de la bóveda inferior

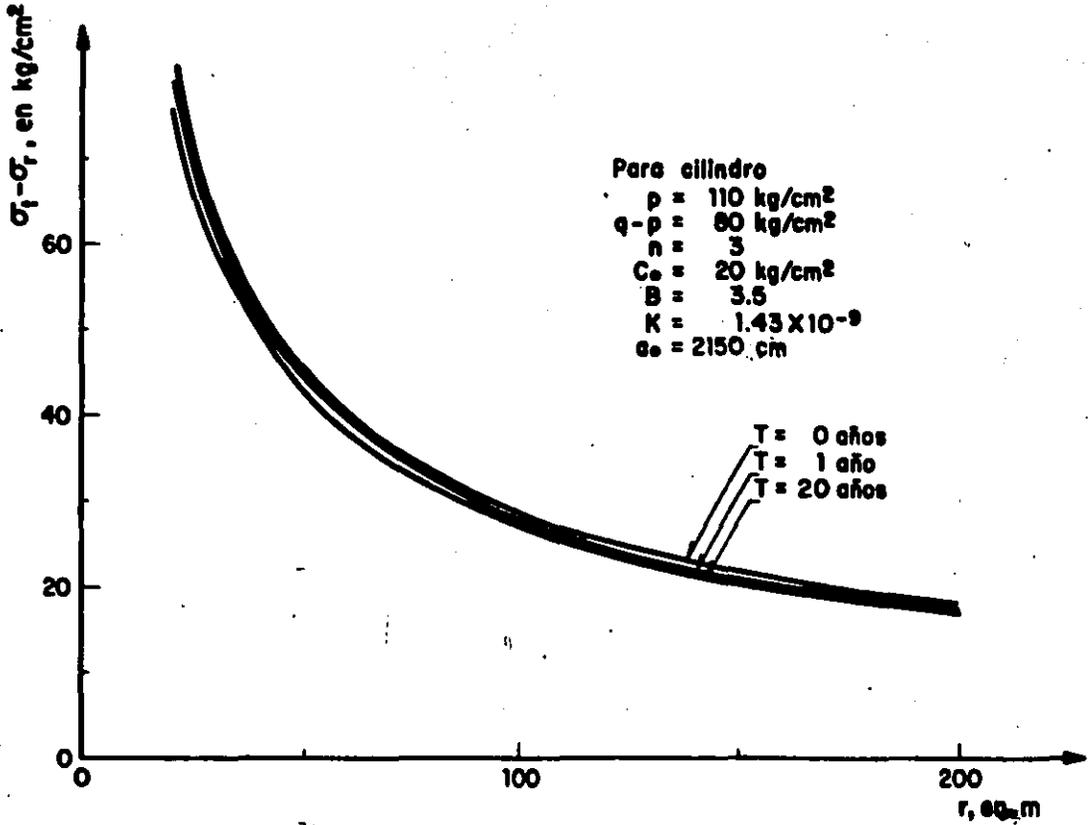


Fig 4.12 Relajación del esfuerzo desviador ($\sigma_1 - \sigma_r$) vs r , en función del tiempo $\alpha = 0.40$. Parte central de la cavidad

ANEXO 1: PROCEDIMIENTOS Y ANOTACIONES PARA EL MANEJO DE LA CAMARA TRIAXIAL DE ALTA PRESION.

- A1. Generalidades
- A2. Calibraciones
- A3. Cálculos
 - A3.1 Esfuerzo axial
 - A3.2 Reducción del área de la muestra
- A4. Manejo del gato que proporciona la presión vertical
- A5. Montar la muestra
- A6. Desmontar la muestra
- A7. Carga hidrostática
- A8. Carga con esfuerzo desviador
 - A8.1 Ensayo DRBI
 - A8.2 Ensayo de fluencia en extensión triaxial

A1. GENERALIDADES

La cámara triaxial de alta presión se construyó en el I.I. en 1976. En el presente anexo se hacen algunas anotaciones para complementar, en cuanto a procedimientos de manejo y cálculos, el informe original realizado por el ingeniero Rábago (I.I. 1976).

Con respecto al diseño original se utilizó una cabeza diferente para poder realizar las pruebas en extensión. Así mismo se independizó el sistema de carga axial del de la cámara utilizando en el primero el mecanismo Amsler. Adicionalmente el único manómetro que se utilizó durante las pruebas fue el que registra la presión de la cámara (M6, de la figura 2.2), pues la presión del aceite que baja el gato se registró mediante transductor de presión. En efecto, se instalaron dos transductores de presión (T90 y T400 de la figura 2.2), con el fin de mejorar el sistema de medida involucrando menos volumen de aceite y longitud de tubería en la operación. El primero (T90) tiene capacidad para medir presiones entre 0 y 90 kg/cm²; el segundo (T400) trabaja en el rango de 50 a 400 kg/cm².

La cámara triaxial permite ensayar especímenes de suelos de 3.6 cm de diámetro por 9.0 cm de altura; para roca, de 5.38 cm de diámetro y de 10 a 14 cm de altura.

A.2 CALIBRACIONES

En la figura A1-1 se presenta la calibración del transductor de baja presión (T90) con respecto al puente utilizado. No se calibró el transductor de mayor capacidad (T400) porque no se requería trabajar dentro de su rango de carga. Se encontró para el transductor T90 una constante de 17.18 Divisiones / kg/cm².

En la figura A1-2 se muestra la calibración del manómetro que registra la presión de cámara. En las figuras A1-3 Y A1-4 se presentan las curvas de presión de las bombas de baja y de alta presión, con respecto al manómetro de aire.

A3. CALCULOS

A3.1 CALCULO DEL ESFUERZO AXIAL

De acuerdo con la figura A1-5 se tiene:

DIAMETRO, cm	AREA, CM2	DIFERENCIA, cm2
$D_1 = 18.85$	297.07	
$D_2 = 3.804$	11.38	267.67
$D_3 = D_p$	37.72	
$D_4 = 6.43$	A	37.72 - A

Haciendo equilibrio de fuerzas

$$\sigma_a A + \sigma_c (37.72 - A) = \frac{L_p - L_0}{17.18} \times 267.69$$

siendo

σ_a : esfuerzo axial en kg/cm²

σ_c : esfuerzo de cámara o radial en kg/cm²

A : área de la muestra en cm²

L_p : lectura del puente

L_0 : lectura del puente para la muestra totalmente descargada

17.18 : constante de calibración del transductor 90

Si $L_p - L_0 = \Delta$ resulta

$$\sigma_a = \frac{15.58 \Delta - (37.72 - A) \sigma_c}{A}$$

A3.2 REDUCCION DEL AREA DE LA MUESTRA

Sea D_0 el diámetro de la cabeza de la celda y D el diámetro de la probeta en cualquier instante t ; suponiendo que en el ensayo realizado en extensión la forma cilíndrica de la muestra se mantiene, disminuyendo su diámetro (figura A1-6a)

el área inicial es: $A_0 = \pi D_0^2$

el área final es: $A = \pi D^2$

la deformación unitaria radial: $\epsilon_r = -\frac{D_0 - D}{D_0}$

suponiendo incompresibilidad volumétrica $\epsilon_r = -\epsilon_a/2$

de lo que resulta

$$D = Do + \epsilon_r Do$$

$$D = Do - 0.5 \epsilon_a Do$$

$$D = Do (1 - 0.5 \epsilon_a)$$

$$A = \pi Do^2 (1 - 0.5 \epsilon_a)^2$$

$$A = Ao (1 - 0.5 \epsilon_a)^2$$

Por otra parte, si se utiliza relleno (figura A1-6b):

$$A = \frac{\pi}{4} (Do - 0.5 \epsilon_a D_{po})^2$$

siendo

Do el diámetro de la cabeza de la celda
 D_{po} el diámetro inicial de la probeta

A4. MANEJO DEL GATO QUE PROPORCIONA LA PRESION AXIAL

Se recomienda subir y bajar, en lo posible, solo con el sistema de bombas para no perder aceite del sistema Amsler que tiene diferente viscosidad.

A4.1 SUBIR EL GATO

Válvulas abiertas: 2, B, 12, 13 y 14 (figura 2.2)

Utilizar bomba de baja presión.

En este caso las manecillas del micrómetro giran en sentido horario al subir el pistón.

A4.2 BAJAR EL GATO

Válvulas abiertas 1, 3, 21 y A (figura 2.2)

Utilizar bomba de baja presión.

A.5 MONTAR LA MUESTRA

- Se coloca la base de la cámara, la base de extensión (si es necesario debido a la altura de la muestra) y la muestra. Si se requiere se coloca relleno. Sobre ellos se pone la membrana

ajustada con arosellos No 226. Se coloca la cabeza y queda el conjunto de la figura A1-7.

- Se sube la camisa mediante el sistema de pesas; se aceita el interior de la camisa y el arosello de la cabeza.

Se baja la camisa para meter el conjunto. Se verifica que coincida con la marca ('O') de la base y la camisa.

Camisa y conjunto se suben para poner los tornillos que aseguran la base.

- Se instala la camisa en el marco, conectándola al sistema de aceite. Se centra mediante los tornillos y las placas especiales.

Se baja el gato de tal manera que llegue a tope, sobre la platina y la base del micrómetro que van sobre la cabeza (figuras 2.1 y 2.2).

- Se llena la cámara de aceite abriendo únicamente la válvula 6, utilizando la bomba de baja presión, dejando el tornillo de purga de la cabeza abierto.

Se verifica la verticalidad del micrómetro y su carrera de acuerdo con las deformaciones esperadas.

- Si se va a realizar un ensayo con temperatura controlada, se cierra el horno, se prende el control de la temperatura y se dejan las válvulas 5 y 6 abiertas durante el tiempo conveniente (por ejemplo hasta que se mantenga la deformación inducida por el cambio de temperatura).

A6. DESMONTAR LA MUESTRA

- Verificar que todas las válvulas estén cerradas, una vez se ha descargado completamente el sistema.

- Subir el gato

- Desconectar el sistema de aceite.

- Sacar la cámara del marco.

- Quitar el tornillo de purga de la cabeza.

- Con aire a presión, introducido a través del orificio de purga de la cabeza, sacar el aceite de la cámara (se desecha).

- Levantar la cámara con el sistema de pesas y quitar los tornillos de la base.

- Separar base y camisa, fijando la primera a la base auxiliar.

- Quitar cabeza, arosellos y finalmente el recubrimiento de la muestra.

- Tomar dimensiones y, si es el caso, velocidad de onda de la muestra.

A7. CARGA HIDROSTATICA

Se utilizó el sistema Amsler para dar la presión axial y el sistema de bombas para dar la presión de cámara o radial. Se abren únicamente la válvula C, para dar la presión de la cámara, y la válvula A, para transmitir la presión del Amsler.

El peso a colocar en el Amsler, para generar una presión hidrostática $\sigma_c = \sigma_a$ dada, se puede establecer de la expresión ya deducida:

$$\sigma_a = \frac{15.58 \Delta - (37.72 - A) \sigma_c}{A}$$

El área corresponde a un diámetro de 5.38cm y el peso a colocar (W) es igual a

$$W = \frac{\Delta}{2 \times 17.18}$$

de lo que resulta

$$W = 7.04 \times 10^{-2} \sigma_c$$

Se fijan los incrementos de carga a una determinada tasa. Para presiones menores de 70 kg/cm² es recomendable utilizar la bomba de baja presión que demora un rato para comenzar a funcionar.

A8. CARGA CON ESFUERZO DESVIADOR

A8.1 ENSAYO DRBI (Dispositivo de Relajación Biaxial Isotérmica)

Los pasos seguidos en esta prueba fueron:

- Montaje (Ver A5)
- Etapa I: hidrostática de 0 a 50 kg/cm² (Ver A7)
- Etapa II: sin deformación axial (50 a 300 kg/cm²)
- Etapa III: de relajación de esfuerzos.

Etapa II: sin deformación axial

- Se fija una velocidad de carga para la cual se elige el número de incrementos y la magnitud del esfuerzo por incremento.

- Únicamente con la válvula 6 abierta se da el primer incremento de presión de cámara. Se coloca en el Amsler la carga necesaria para regresar el micrómetro a su posición original del final de la etapa hidrostática. Se toman las lecturas indicadas en el formato (figura A1-8). Se realiza el siguiente incremento.

Etapa III: relajación de esfuerzos

- Al llegar σ_c a 300 kg/cm², se realizó el último incremento, sabiendo únicamente la presión radial a 325 kg/cm² de tal manera que se induce un esfuerzo desviador y una pequeña deformación a la muestra.

- Se deja el conjunto el tiempo (días) que se estime conveniente, manteniendo constante la deformación, haciendo lecturas periódicas.

A8.2 ENSAYO DE FLUENCIA EN EXTENSION TRIAXIAL

Los pasos seguidos en esta prueba fueron:

- Montaje (Ver A.5)
- Etapa I: hidrostática de 0 a 200 kg/cm² (Ver A.7)
- Etapa II: fluencia bajo confinamiento y en extensión.

Etapa II: Fluencia en extensión triaxial

- Una vez alcanzada la máxima presión hidrostática y transcurrido el tiempo necesario para su estabilización, se indujo el esfuerzo desviador cerrando la válvula A, reduciendo la carga en el Amsler al valor deseado y reabriendo la válvula A para transmitir la nueva presión. La carga del Amsler se calcula a partir de las expresiones ya vistas y resulta

$$W = 4.24 \times 10^{-2} \sigma_a + 2.8 \times 10^{-2} \sigma_c$$

Con el transcurso del tiempo se tiene en cuenta el efecto de reducción de área mediante la expresión

$$W = 1.868 \times 10^{-3} A (\sigma_a - \sigma_c) + 7.045 \times 10^{-2} \sigma_c$$

que resulta de las expresiones del numeral A3.

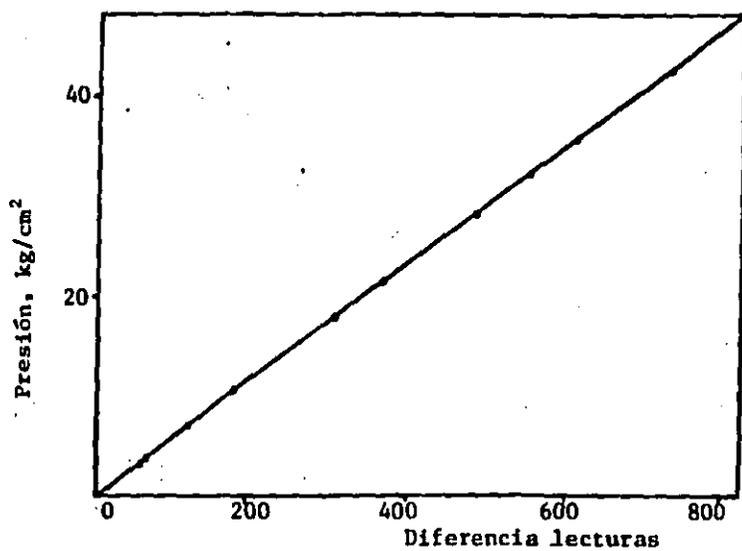


FIG A1.1 Calibración de la celda 90 con el puente

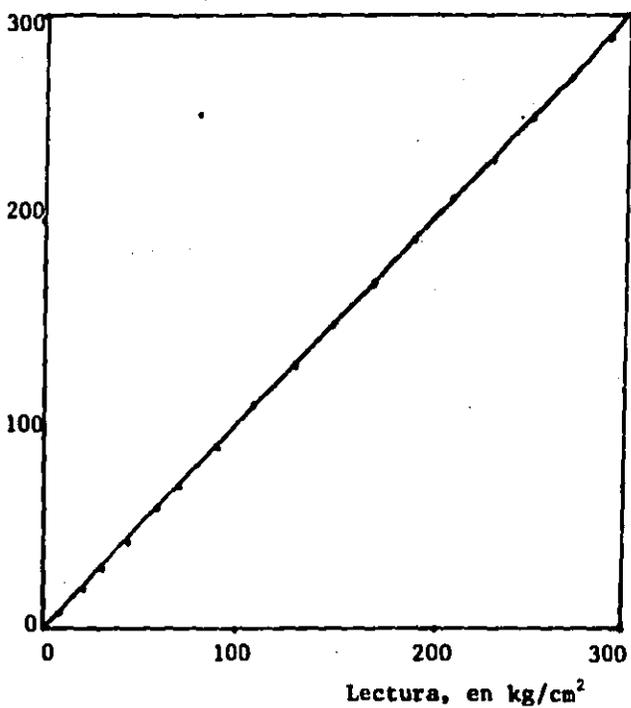


FIG A1.2 Calibración del manómetro M-6

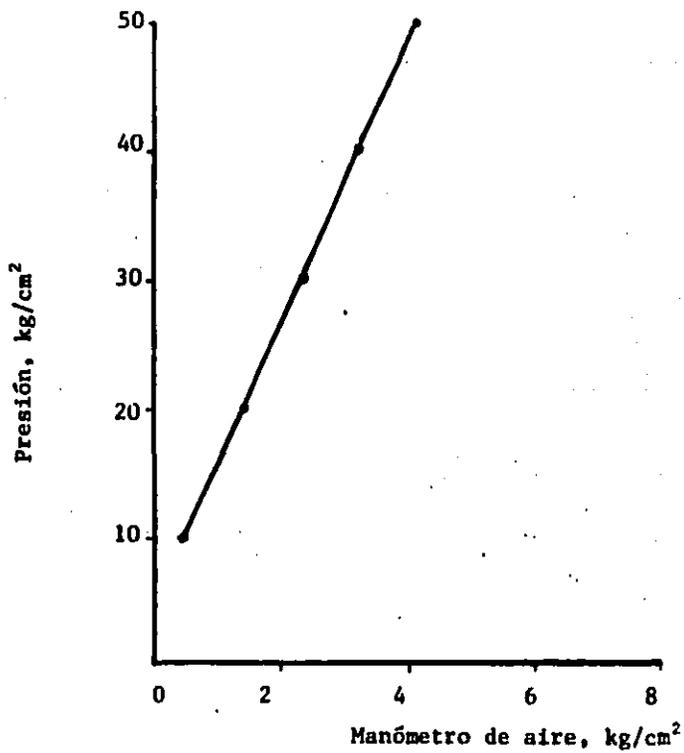


FIG A1.3 Bomba de baja presión

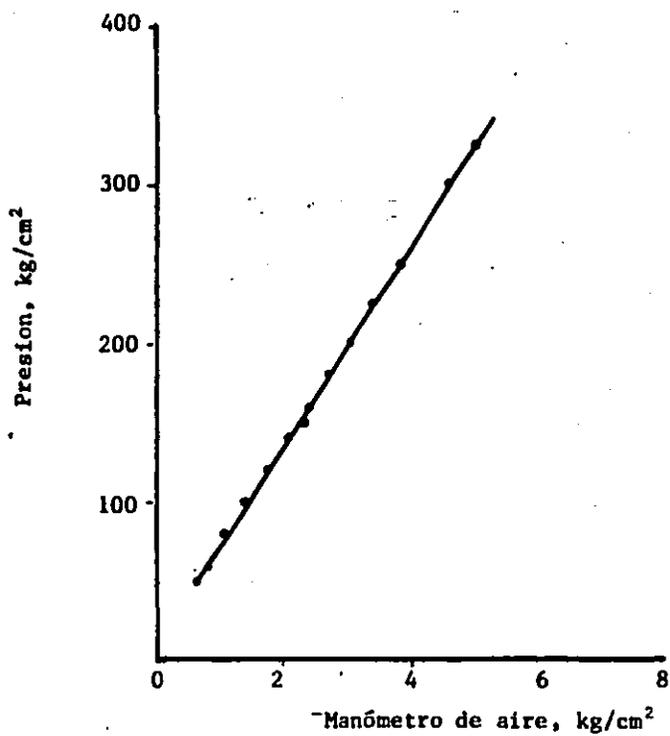


FIG A1.4 Bomba de alta presión

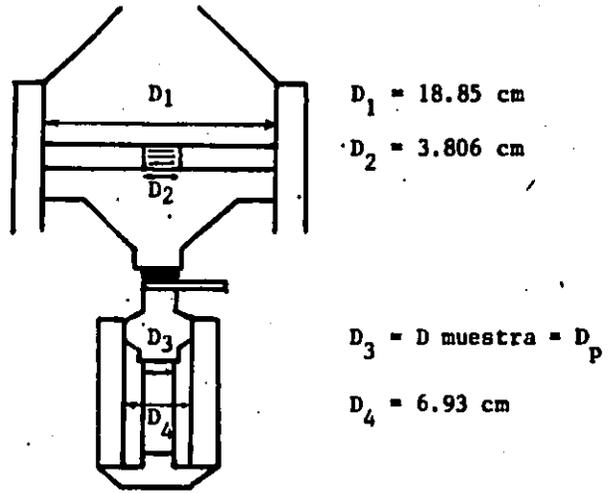


FIG A1.5 Diámetros involucrados en el cálculo de σ_y

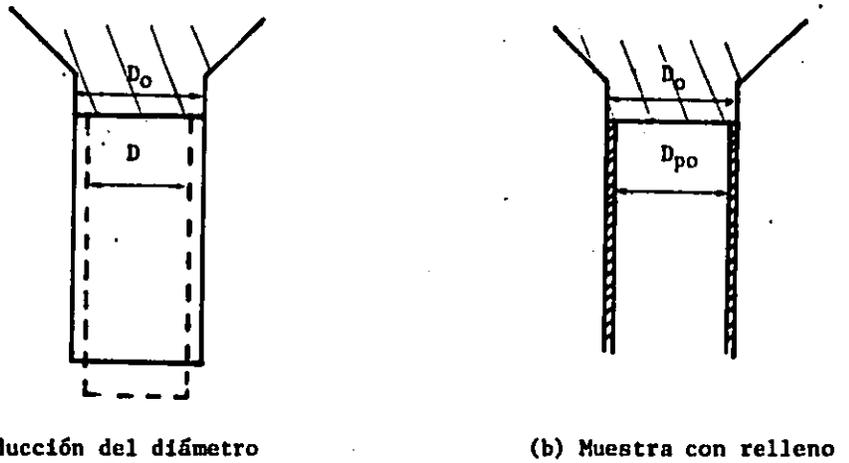


FIG A1.6 Diámetros involucrados en la reducción de área en pruebas de fluencia en extensión triaxial

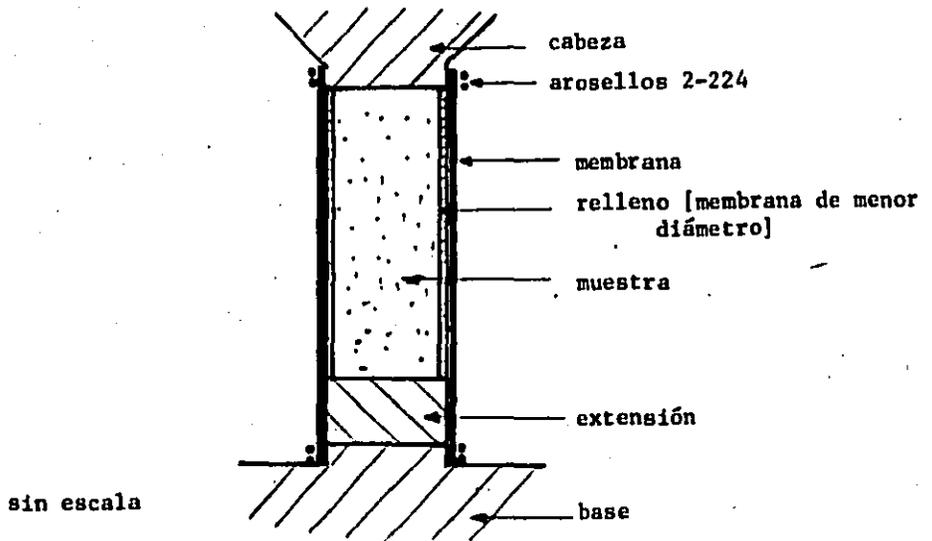


FIG A1.7 Esquema del montaje de la muestra

ENSAYO	HOJA N°
MUESTRA	FECHA

	Fecha	Hora	Tiempo (min)	Tiempo (días)	T °C	Micrómetro .0001"	ϵ_a	σ kg/cm ²	ANSLER W(kg)	Puente LP	σ kg/cm ²	σ kg/cm ²	Observaciones

FIG A1.8 Formato para ensayos

ANEXO 2 CORRELACION DE ESFUERZOS TECTONICOS Y TAMAÑO DE SUBGRANOS EN LOS CRISTALES DE SAL

En años recientes, desarrollos de estudios en petrografía estructural han llevado a valorar indirectamente el máximo esfuerzo desviador que ha actuado sobre la masa bajo estudio. En efecto, se ha establecido que los granos recrystalizados (neoblastos) y los subgranos en los cristales poligonizados alcanzan un estado de equilibrio en el que su tamaño promedio, \bar{d} resulta inversamente proporcional al esfuerzo desviador máximo actuante ($\sigma_1 - \sigma_3$) (Friedman et al. 1984).

Ross et al. (1980) mostraron que esta relación es para el olivino independiente de la deformación, de la velocidad de deformación y poco dependiente de la temperatura. Esta relación ha sido generalizada para otros minerales mediante la expresión

$$\bar{d} = A (\sigma_1 - \sigma_3)^{-n}$$

en la que \bar{d} se expresa en micrones, A y n son constantes y $(\sigma_1 - \sigma_3)$ se expresa en MPa.

Al conocer A y n , la medición experimental de \bar{d} permite pues inferir la magnitud del esfuerzo $(\sigma_1 - \sigma_3)$. Como se muestra en la figura A2-1, Carter et al. (1982) obtuvieron para muestras de sal provenientes de 7 sitios diferentes

$$\bar{d} = 190 (\sigma_1 - \sigma_3)^{-1}$$

con un coeficiente de correlación $r = 0.9775$.

La relación entre el tamaño de los subgranos y el esfuerzo desviador máximo aplicado parece ser, por tanto, independiente del origen de la sal, del contenido de impurezas y de su historia de deformaciones.

Con la colaboración del Instituto de Física de la UNAM, se procesaron varias muestras de sal de Tuzandepetl a fin de determinar en el laboratorio, la magnitud $\bar{\alpha}$.

Se utilizó un fotomicroscopio polarizador con iluminación vertical. Los cristales individuales se partieron según un ángulo de clivaje, se trataron con una solución de 200 ml de etanol y 0.5 gr de cloruro de cadmio, durante 6 a 7 minutos; luego se lavaron con acetona y se secaron con aire frío.

En las figuras A2-2 y A2-3 se presentan fotografías de la estructura cristalina observada. Las dislocaciones presentes en los cristales son poco numerosas y alcanzan a limitar subgranos de tamaño \bar{d} superior a 200 micras, por lo que, de acuerdo con la relación propuesta

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 10 \text{ kg/cm}^2$$

La sal localizada a 800 m de profundidad está sometida a un esfuerzo normal vertical σ_1 igual a 175 kg/cm², por lo que el correspondiente esfuerzo normal horizontal σ_3 es igual a 165 kg/cm², resultando

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = 0.94$$

En conclusión, se puede considerar que la masa de sal en la que se excavará la caverna está sometida a un estado de esfuerzos prácticamente hidrostático, con

$$q = \gamma h$$

siendo q el esfuerzo normal actuante en la dirección horizontal sobre un plano vertical en un punto localizado a la profundidad h . Se ha considerado un valor de 2.2 ton/m³ para el peso volumétrico del material suprayacente.

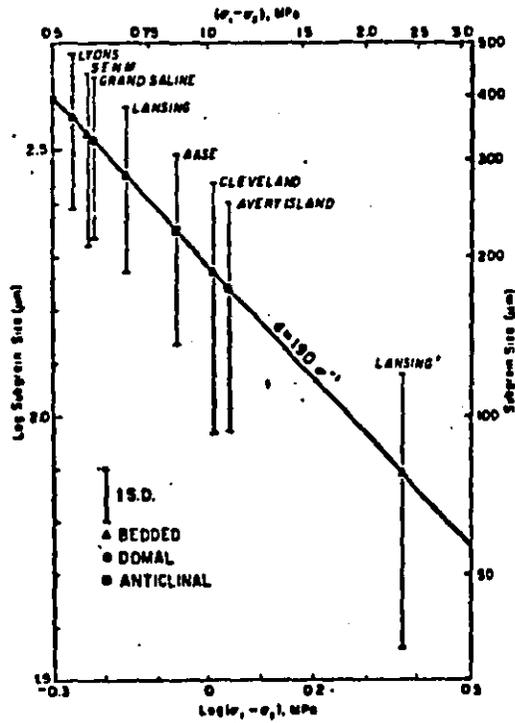
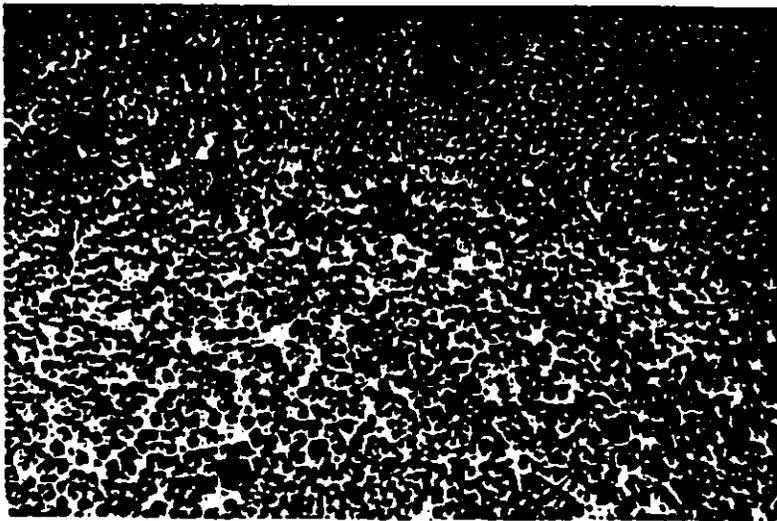


FIG A2.1 Tamaño medio de subranos vs. esfuerzo desviador para 7 sales provenientes de diferentes sitios. Las barras verticales indican desviación estándar (SD) con respecto al valor medio del diámetro del subgrano [Carter, et al., 1982]



10 μ m



10 μ m

FigA2.2 Fotografias cristal de sal a 750 m de profundidad



FigA2.3 Cristal de sal a 1300 m de profundidad