



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA**

**ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS
EN CAVIDADES SALINAS.**

TRABAJO ESCRITO

**Que para obtener el Título de
INGENIERO PETROLERO
P r e s e n t a**

Martín Terrazas Romero

México, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

I N D I C E

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
EL PROBLEMA DEL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS	3
CAPITULO II	
DISEÑO Y CONSTRUCCION EN CAVIDADES SALINAS	9
CAPITULO III	
ANALISIS COMPARATIVO	70
CAPITULO IV	
POSIBLES LOCALIZACIONES POTENCIALES EN LA REPUBLICA MEXICANA	77
CONCLUSION	80
BIBLIOGRAFIA	81

INTRODUCCION

El almacenaje bajo tierra fue originalmente concebido en Alemania durante la primera guerra mundial como medida de seguridad y ganó aceptación en Norteamérica por los años de 1950. En Canadá, la primera caverna de sal que fue usada para el almacenaje de hidrocarburos fue desarrollada en 1958. Después el uso de este tipo de almacenaje ha crecido extremadamente rápido debido a sus grandes ventajas y economía. Ventajas como seguridad y conservación del medio ambiente ha incrementado aún más el uso de este tipo de almacenaje.

El almacenaje de hidrocarburos bajo tierra ha sido considerado de diferente manera al paso de los años. Siempre motivados por el instintivo de la variación de los costos se han investigado todas las alternativas de almacenaje. Pero la baja inversión y los bajos costos de operación, seguridad, ecología y otros factores favorecen donde exista la posibilidad del almacenamiento bajo tierra, siendo la mayor alternativa - en la mayoría de los casos la disolución de sal para la generación de cavernas (donde las condiciones son propicias). Como un ejemplo, el costo por almacenar un barril de hidrocarburo en cavidades salinas cae en el rango de un dólar a comparación de cincuenta dólares por barril en el caso de almacenarlo en tanques de acero a presión.

Con respecto a los análisis de estabilidad presentados - en este trabajo. Hay que recalcar que se han desarrollado diferentes criterios de estabilidad, dependiendo del investigador que analice el fenómeno, éstos son: la presencia en el modelo de la primera fractura, cambios notables en la velocidad de deformación, el momento cuando el modelo desarrollado alcanza su límite máximo, o finalmente su completa destrucción. En este trabajo son presentados modelos empíricos desarrolla-

dos en laboratorio así como los principios de la estabilidad estructural aplicando la teoría de la plasticidad.

Después del análisis estructural de la caverna (en función del volumen a almacenar), la forma de ésta queda establecida así como sus dimensiones, pasando a la etapa de construcción ésta puede ser por explosiones nucleares o por disolución, siendo la segunda posibilidad la más viable. El desarrollo de la caverna por disolución queda supeditada a diferentes alternativas. Tipo de circulación de disolución, directa o inversa así como el diseño de las tuberías de disolución, diseño de dos o tres tuberías. El control de la disolución es llevado a cabo mediante un registro sonar, así como un simulador de disolución que nos establecen la configuración de la caverna a diferentes tiempos.

Su operación y mantenimiento queda en función del tipo de fluido a ser almacenado, distinguiéndose dos métodos, seco y mojado, ambos aplicables a líquidos o gases.

El desarrollo de este tipo de almacenaje puede alcanzar cierto auge en el sureste del país donde se encuentra la mayor producción de hidrocarburos y el mayor desarrollo petrolquímico, debido a que cumple con las condiciones geológicas y económicas.

CAPITULO I

EL PROBLEMA DEL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS

La historia del petróleo como materia prima puede ser dividida en dos etapas que reflejan formas distintas de relación entre los países productores, por un lado, países consumidores y las compañías transnacionales; por el otro, la primera etapa se inicia desde el comienzo de la importancia del petróleo en la economía internacional hasta los últimos años de la década de los setentas. Esta época se distinguió por la débil posición de los productores frente a los consumidores, tal situación se refleja en la tendencia decreciente del crudo en los años cincuentas.

Durante los años setentas, los precios del petróleo expresaron una tendencia a una estabilidad relativa, pero después de la guerra del Medio Oriente y el cierre del Canal de Suez, el consumo mundial del petróleo se incrementó fuertemente y comenzó la segunda etapa del proceso.

La guerra del Medio Oriente en octubre de 1973 ocasionó una serie de cambios drásticos en el mercado mundial del petróleo, cuando subieron los precios en los últimos meses de ese año hasta en un 40% en comparación al nivel de precios al mes de septiembre de 1973. Este fenómeno, acompañado de la reducción por parte de los países Arabes, con la siguiente prohibición total de las exportaciones hacia los Estados Unidos y a Holanda.

El 4 de noviembre los Ministros Arabes decidieron continuar el boicot, pero cubrieron el porcentaje de las reducciones en la producción hasta en un 25% además de la reducción mensual del 5%. Por supuesto, estas medidas causaron pánico -

en los países occidentales ya que su aparato industrial quedó amenazado con paralizarse por la falta de energéticos, reflejándose en fuertes controles de consumo.

Aunque el boicot petrolero se levantó en marzo de 1974 para Estados Unidos y en junio del mismo año para Holanda, el mundo industrial recibió el golpe verdadero con el alza del precio del crudo. El mundo industrial se enfrentó con su realidad amarga: el ya no poder vivir sin esta materia prima y su dependencia de los países productores.

Los países consumidores, en su afán de cambiar la política (que hasta la fecha estaba dictada por los países productores y tomar las riendas de la política futura) en una política de consumidores, necesitó almacenar grandes cantidades de hidrocarburos.

Esto significa un reto para la ingeniería; diferentes alternativas fueron analizadas, todas encaminadas al objetivo de almacenar grandes cantidades de hidrocarburos en el mínimo costo.

ALTERNATIVAS ANALIZABLES PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS

Hay una gran variedad de alternativas para el almacenamiento de hidrocarburos. Comúnmente son almacenados en tanques en la superficie cuando existe la posibilidad. En la superficie se incluyen:

- Tanques abiertos a presión atmosférica.
- Tanques de alta presión.
- Tanques de refrigeración.
- Boyas almacenadoras flotantes en el mar.

Bajo de la superficie se incluyen:

- Cavernas de sal.
- Cavernas en minas.
- Minas abandonadas.
- Yacimientos de gas y aceite agotados.

El almacenamiento en la superficie es conveniente o puede ser recomendable sólo como alternativa de almacenaje para volúmenes pequeños (volúmenes por debajo de 60,000 barriles) o para algunos casos de grandes volúmenes donde las condiciones geológicas no son adecuadas para el almacenaje bajo tierra. El costo de almacenar productos volátiles en tanques a presión de saturación (presurizados) es muy alta; estos costos pueden algunas veces ser recucidos considerablemente por el uso de tanques de refrigeración o localizar la zona de almacenaje en lugares elevados de la tierra. Sin embargo, este tipo de almacenaje por refriteración se limita a bajos volúmenes y bajos gastos de extracción, usualmente tiene altos gastos de operación.

De los métodos de almacenaje bajo tierra:

- a) Yacimientos de Gas y Aceite agotados.
- b) Cavernas en minas convencionales.
- c) Minas agotadas.
- d) Cavernas de sal.

Todas han sido usadas con éxito para el almacenaje de hidrocarburos. Los yacimientos agotados (gas y aceite) desde 1915 fueron usados para el almacenamiento de gas, ya en 1973 el 97% del total de gas almacenado en Canadá fue almacenado en yacimientos de gas. Generalmente el gasto de extracción que se requiere en este tipo de almacenaje podría ser mucho mayor que el que nos puede otorgar el yacimiento, por lo tanto, más pozos tendrían que ser perforados y probablemente los pozos y sistemas de recolección anteriores tendrían que ser reparados

o renovados para poder resistir las presiones de operación. - Pero la gran desventaja es que hay la seguridad de producir menos de lo que se ha almacenado, principalmente cuando se trata de almacenaje de líquidos, debido a la saturación residual.

Las cavernas de minas excavadas en roca, tales como granito, limonita, yeso y lutita, han sido utilizadas con éxito para el almacenaje de hidrocarburos. Cuando se usan minas abandonadas con el propósito de almacenar gas, después de un sello apropiado en la entrada de la mina, estas cavidades, con un volumen aproximado de $3 \times 10^6 \text{ M}^3$, pueden ser llenados con gas.

Por ejemplo: bajo una presión de 50 KG/CM^2 pueden ser almacenados en este volumen 10^8 M^3 de gas bajo condiciones normales. Sin embargo, de acuerdo con la experiencia, este tipo de almacenaje presenta varios problemas, la necesidad de sellar - la existencia de grietas, estratos porosos y cualquier otro tipo de fugas, como respiraderos. Cabe puntualizar que estas minas no fueron diseñadas para el almacenamiento de gas o líquidos, por lo tanto, en la mayoría de los casos es preferible hacer nuevas excavaciones para el propósito de almacenamiento. - Generalmente es conveniente convertir estas minas en lugares - adaptables para líquidos y no tanto para hidrocarburos gaseosos. Dada la apropiada localización y tamaño pueden ser competitivas en costo con las cavernas de sal.

Las cavernas hechas por disolución de minas de sal son para líquidos lo más eficiente y popular entre las alternativas de almacenaje antes mencionado. Estas cavernas pueden ser - - construídas en domos salinos, estratos de sal y pueden ser diseñados para reunir los requerimientos particulares respecto - al gasto y volumen.

Este tipo de almacenaje ha sido usado para almacenar una gran cantidad de variedades de hidrocarburos, desde líquidos - de baja presión de vapor hasta gas natural. Entre estos pro--

ductos se incluye; crudo, productos refinados, etano, etileno, propano, butano y anhídrido de amonía. Este tipo de almacenaje está siendo usado en las naciones industrializadas donde -- existen depósitos de sal. Estas cavernas cumplen con las necesidades de almacenaje comercial, seguridad de abastecimiento, centros de distribución y facilidad de transporte.

Con las recientes alzas del acero y el incremento en las exigencias de conservación del medio ambiente, el almacenaje - bajo tierra se encamina a ser más común e importante. Su incremento ha sido vertiginoso, especialmente para hidrocarburos ligeros como fue demostrado en 1977 por "Gas Processors Association" (Table No. 1). Los reportes observan un incremento - del 16.1% en el uso del almacenaje bajo tierra en los Estados Unidos en el periodo 1975 a 1977 y un 50% de incremento en el periodo de 1973 a 1977. En Canadá, el uso de este tipo de almacenaje se ha incrementado de 19.4% y un notable de 80.6% sobre los mismos periodos. El total de capacidad de almacenaje bajo tierra de fluídos en Canadá a mediados de 1977 fue aproximadamente de 29.2 millones de barriles, cerca de 16.2 millones en 1973 y 6.6 millones en 1971, casi el 100% de este almacenaje fue en cavidades salinas. Estas estadísticas no incluyen aproximadamente 6.0 B.C.F. de gas natural almacenado en cavernas de sal en Saskatchewan, además no incluye cavernas en desarrollo.

Cabe hacer la aclaración que la crisis petrolera de 1973 actuó como un catalizador en las operaciones de almacenaje y - no como una creación del mismo, ya que el almacenaje siempre - ha sido requerido cuando existe una diferencia entre los volúmenes de producción y de consumo a un mismo periodo de tiempo.

TABLA No. 1.1
 CAPACIDAD DE ALMACENAJE DE HIDROCARBUROS
 EN AMERICA DEL NORTE (1977)
 (MILES DE BARRILES)

	1977	1975	1973
EU Almacenamiento			
Kansas	58,864	51,272	42,385
Louisiana	77,584	70,729	57,512
Texas	169,029	135,516	100,223
Otras	48,543	47,371	34,631
T O T A L	354,035	304,882	234,732
Canada			
Este	9,545	7,999	6,914
Oeste	19,632	16,444	9,216
T O T A L	29,177	24,443	16,160

CAPITULO II

DISEÑO Y CONSTRUCCION EN CAVIDADES SALINAS

II.1. CARACTERISTICAS GEOLOGICAS DE UNA POSIBLE LOCALIZACION

Las formaciones de sal pueden ser consideradas como las más óptimas para localizar el almacenaje en cavernas y cumplen con los requerimientos de impermeabilidad, estabilidad y economía. Sin embargo, estas cavernas no pueden ser hechas en cualquier localización arbitraria dentro de los depósitos de sal. En ciertos estratos de sal se forman fisuras que difícilmente pueden ser evitadas, sobre esto podemos mencionar los depósitos de sal "Carnallite Potasium". Como consecuencia de su muy alta solubilidad, la carnalita (Carnallite) puede tener una considerable influencia en los procesos de disolución y pueden abrirse infinidad de canales entre la caverna y la roca circundante. Por estas razones es necesario llevar a cabo esmeradas investigaciones en los aspectos geológicos.

Con el propósito de hacer una posible evaluación, la perforación tiene que ser llevada a cabo con cuidado para obtener correspondiente y apropiada información sobre las rocas perforadas. Consecuentemente, un número suficiente de núcleos pueden ser tomados del interior de la roca salada para obtener un volumen adecuado de información sobre las condiciones de los estratos. Las mediciones obtenidas aportan cierta información sobre la física y química de los estratos a la vez que permite hacer conclusiones concernientes a su geología. Esta información es particularmente importante en el caso de depósitos de sal, considerando que la sal de potasio (Cloruro de Potasio) puede presentarse y su explotación es imposible para la creación de cavernas para el almacenaje.

El espesor del estrato de sal frecuentemente limita el volumen al cual puede ser desarrollada cada caverna. Puede, por lo tanto, ser una consideración decisiva con respecto al número de cavernas necesarias. La pureza de la sal es importante desde el punto de vista de proveer adecuada capacidad para su depositación en el fondo de la caverna donde se depositan los materiales insolubles. (Se tiene conocimiento de una caverna realizada en Alemania con un 22% de insolubles). (4)

La profundidad es un importante factor de costo, esto afecta directamente al costo de perforación, incluyendo los diámetros de la tubería a usar y la tubería de producción a ser usada.

Un suficiente suministro de agua fresca y un eficiente depósito de agua salada proveniente del sistema son dos muy importantes requerimientos para el desarrollo de las cavernas de sal. Durante el desarrollo de una caverna un gasto de 10,000 barriles por día por caverna puede ser requerido durante el tiempo de mayor actividad. La cantidad total de agua usada en una operación de disolución es de 7 a 8 barriles por barril de caverna. Esto da como resultado una gran cantidad de agua casi saturada de sal (salmuera). En muchos casos no hay uso comercial para esta sal, tales plantas de (caustic-chlorina), o planta de producción de sal y esta cantidad de salmuera producida representa un problema. Por lo tanto, un buen depósito de sal es necesario para captar la salmuera a gastos altos.

Si el almacenaje se encuentra cerca de la costa, el agua de mar puede ser usada en lugar del agua fresca, debido a que el agua de mar se encuentra sólo un 10% saturado de sal. La salmuera producida puede ser bombeada al interior del océano. Este sistema usando el océano como fuente de origen y depósito podría ser muy ventajoso y económico.

PRUEBAS DE LABORATORIO E INSITU

Por razones de seguridad, la caverna no puede exceder ciertas dimensiones límites. Es especialmente importante mantener una cierta distancia límite entre el techo y el piso de la caverna así como el espaciamiento entre las cavernas, necesitando un cuidadoso control de la construcción de la cavidad.

- Descripción del modelo mecánico para la determinación del espesor mínimo de sal sobre la base del techo de la caverna de almacenaje.

- El siguiente paso es determinar la máxima carga a la cual se presenta el fenómeno de opacidad de los cristales de la roca de sal alrededor de la cima del techo de la caverna bajo presión atmosférica interna. El modelo es presentado en la Figura No. 1 el cual contiene un cilindro de simetría axial y representativo de las condiciones de presión alrededor del techo de la caverna y del espesor de sal. Para la investigación de la carga máxima G_g a la cual ocurre la opacidad en la cima del techo de la caverna, series de tres modelos fueron producidos con diferentes relaciones,

$$x = \frac{s}{d} \text{ ----- (1)}$$

cada serie con nueve modelos.

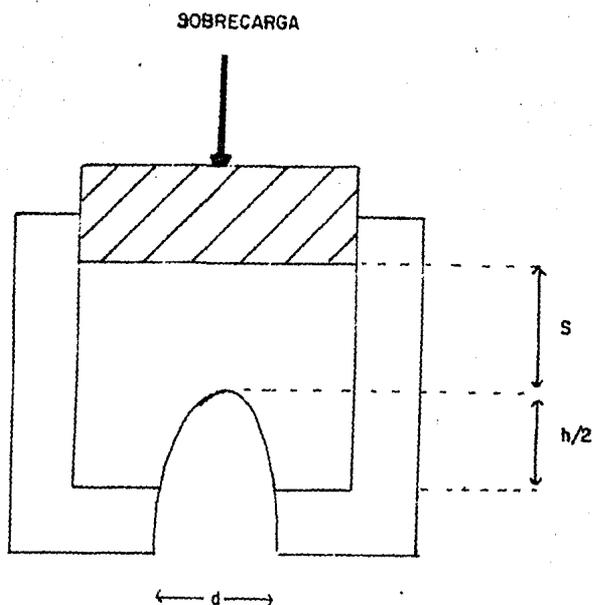


FIGURA 1

Los primeros trabajos fueron realizados con presión interna igual a la atmosférica. Cuando se incrementó la carga hasta alcanzar la carga máxima "Gg" se nubla la parte superior -- del techo y ocurrió una pequeña decoloración en los cristales de la roca que previamente estaban claros. En los cristales -- de esta área de carga máxima, los cuales se encontraban en posición favorable respecto a la dirección de la carga, muestran muy finas microfaturas, las cuales distorsionan el paso de la luz, provocándose el fenómeno de opacidad. Este fenómeno puede ser considerado como una fase anterior a la descomposición de la roca pero esto no es tan serio, considerando que las -- fuerzas de adhesión de los granos circundantes permanecen inalterables. Bajo una carga constante se presenta la deformación del grano sin que se presenten fisuras, generalmente no se forman microfaturas.

De otra manera, si se continúa incrementando la carga, -- las facturas intercristalinas de la formación llegan a ser más

pronunciadas. A mayor carga los cristales adquieren una apariencia blanco-lechoso y con esto un cambio estructural. Esta fase introduce el proceso de destrucción en la parte exterior del grano (en su película envolvente), con un adicional incremento de carga, el sistema penetra en el interior del cuerpo. El sistema de fracturas abarca todo el grano y produce superficies de disolución paralelas a la superficie libre, así introduciendo el proceso de campaneo. Es necesario proyectar en el almacenaje en cavernas tal fenómeno de campaneo y las dimensiones de ésta, de tal forma que la carga máxima "Gg" no se presente en ningún punto de las paredes de la caverna. La máxima carga como una función de la relación adimensional x , es representado en la siguiente Tabla 1.

TABLA 1

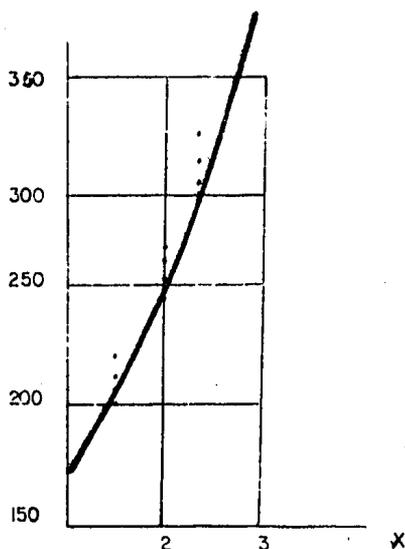
Carga máxima como una función de la relación adimensional de los modelos de prueba con un techo de tipo arco.

Serie de Modelo	Relación Adimensional "x"	Medición individual Valores de máxima carga "Gg" Kg/cm ²			
1	1.5	203	208	213	221
2	2.0	244	253	264	269
3	2.5	305	310	323	334

Como una base del proyecto, la altura del modelo fue elegida como:

$$h = 2d \text{ ----- (2)}$$

Puede ser visto de la tabla 1 que con un incremento en la relación adimensional "x", la carga máxima "Gg" necesaria para causar opacamiento en la base de la cavidad, se incrementa - - constantemente. En base a las mediciones realizadas en cada - serie, se realizó la gráfica de carga máxima. Grg. 1 "Gg" - - siempre se consideraron los valores más bajos de las cuatro se - ries con el propósito de mantener un adecuado margen de seguri - dad en la estimación.



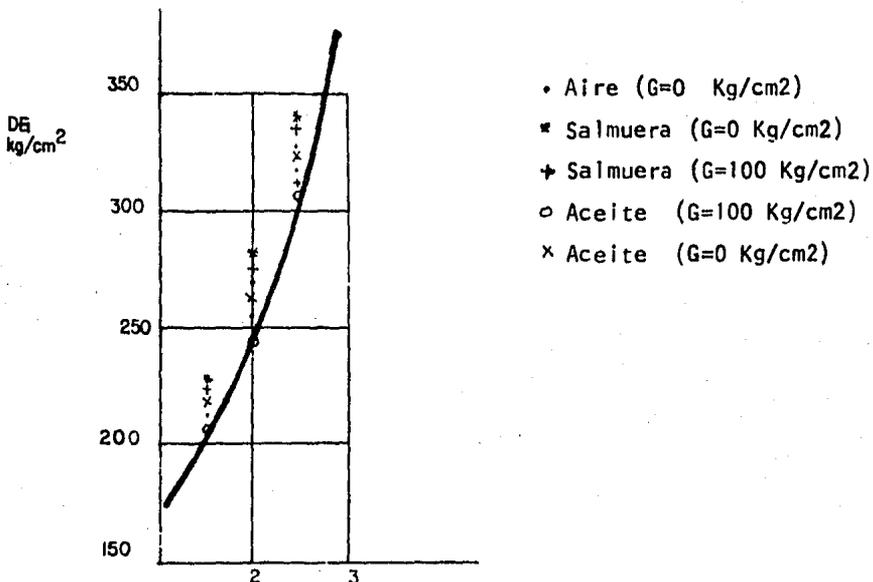
GRAFICA 1

En la Gráfica 1 se muestra la determinación adimensional con llenado de propano y presión interna igual a la atmósfera.

Los modelos investigados fueron también probados llenando los con líquidos hasta una presión interna P_f de 100 Kg/cm^2 . En la Gráfica No. 2 la relación adimensional "x" es graficada en la abscisa y la diferencia de presión $G = G_t - G_f$ en la ordenada donde G_t es la carga aplicada y G_f es la presión interna efectiva alrededor del techo de la caverna. Como puede

ser visto de la Gráfica No. 2, la formación de microfaturas con llenado de salmuera, ocurren sólo bajo una alta diferencia de presiones, con un adecuado margen de seguridad puede ser obtenida la curva de máxima carga usando los puntos correspondientes al llenado con aire como se muestra en dicha gráfica; en otras palabras, cuando productos derivados del petróleo son usados, los resultados son generalmente más bajos y bajo una presión interna G_f de 100 Kg/cm^2 , éste podría ser graficado como el límite inferior para condiciones atmosféricas. Podría no ser comprobado hasta ahora que se presentara el efecto de rajamiento. Parece cierto, sin embargo, el llenado de salmuera inhibe la formación de fracturas, especialmente por el orden de 10% de magnitud de su diferencia de presión particular.

GRAFICA 2



La Gráfica No. 2 muestran los valores máximos de formación de microfaturas como una función de la presión interna y el tipo de llenado.

Las investigaciones de estabilidad realizadas por modelos en roca salada, los cuales, a este respecto, fueron los primeros trabajos realizados, podrían no ser aceptados sin una evaluación crítica. Con respecto al criterio establecido para -- evaluar la estabilidad de la caverna, hay que preguntarse si -- el comienzo del cambio estructural en la superficie alrededor del mayor esfuerzo en una porción de las paredes de la caverna actualmente caracteriza la máxima carga durante la cual se puede garantizar la vida del proyecto durante 10 años.

Estas pruebas deben ser introducidas con el propósito de definir el margen de seguridad obtenible con este criterio de fractura. Lo poco que conocemos sobre este aspecto puede ser visto por la posición tomada por K. Wardell y P. Eynon (1968) quienes, en su trabajo, detallan con un concepto estructural -- la influencia del techo y entrada de minas, expresando con claridad que hasta ahora no hay una definición aceptada de un concepto estructural. Los científicos tienen producidos un gran número de criterios tales como la presencia del fenómeno de la primera fractura, cambios notables en la velocidad de deformación, el momento cuando el modelo llega a su límite máximo, y finalmente su completa destrucción.

Si el techo de la caverna se encuentra a una profundidad de 1300 M. en una roca salada, el cual tendría un peso específico de 0.234 kg/cm^2 , incluyendo los diferentes estratos, en -- el caso de llenar la caverna con un líquido que tenga un peso específico de 0.058 kg/cm^2 (propano); esto tendría una diferencia de presión AG de 229 kg/cm^2 . Entre tanto en la gráfica y considerando el límite inferior, se obtiene 1.85 de relación -- adimensional "x". Considerando la caverna de 50 M. de diámetro del mínimo espesor necesario de estrato de sal "S" es de -- 93 M.

Cuando el combustible es introducido en forma gaseosa bajo presión atmosférica, la diferencia de presión de sobrecarga

toma el valor de 304 kg/cm^2 con una relación adimensional "x" de 2.53 de acuerdo con la Gráfica No. 1, correspondiéndole - - 127 M. de espesor mínimo "S".

Estabilidad como función de la presión interna

Bajo un inadecuado manejo de la presión de gas en las cavernas podría presentarse el fenómeno de creación de fractura. El fenómeno de ruptura y fractura, el cual ocurre en el curso de hundimiento de la caverna de sal, indica la necesidad de investigar con modelos con el propósito de estimar la presión mínima de gas requerida para operaciones de seguridad. En los - resultados de estas investigaciones condujeron a la conclusión de operar el almacenaje en cavernas bajo alta presión, aunque originalmente fueron intentadas para bajas relaciones de presión.

Con un porcentaje aproximado "h" de altura de la caverna de 50 M. y un diámetro aproximado de 45 M. teniendo la siguiente relación:

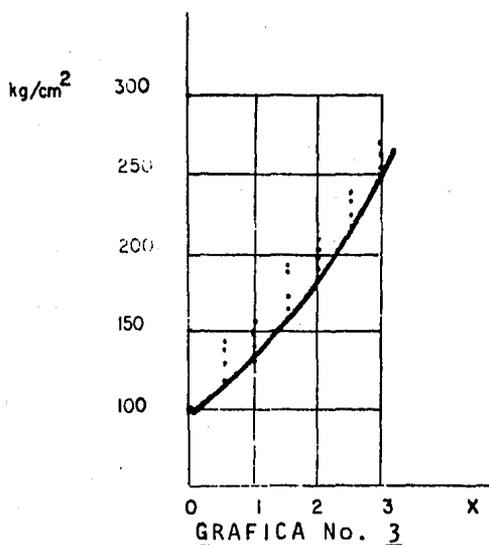
$$H = 1.1 d \text{ ----- (3)}$$

Fue considerada para todos los modelos. Esto corresponde a un perfil más o menos esférico.

Para investigación de la carga máxima Gg, a la cual se -- presenta la opacidad por primera vez en la base de la cavidad del modelo, seis series de modelos fueron preparados, cada una con cuatro especímenes. La carga máxima Gg como una función - de la relación adimensional "x", es presentado en la Tabla No. 2; la Gráfica No. 3 es basada en los datos presentados en la - Tabla No. 2.

TABLA No. 2

No. de la Serie	Relación Adimensional	Mediciones individuales de valores de carga máxima			
		Gg	Kg/Cm ²		
1	.5	116	124	129	134
2	1.0	134	137	142	154
3	1.5	153	160	166	170
4	2.0	178	182	191	195
5	2.5	217	220	225	229
6	3.0	258	267	270	276



GRAFICA No. 3

Determinación de la carga máxima

Supongamos el caso en que el fondo de la caverna se encuentre a 1,307 M. de profundidad, con un tope superior a los 1,183 M., en este caso el espesor del estrato disponible es de 124 M. Así, con respecto a un diámetro de caverna de 45 M., - la relación adimensional "x" es de 2.76. Este valor es indicado en la Figura No. 3. Los valores presentados en la Tabla No. 3 fueron obtenidos de la figura No. 3, combinando valores de relaciones adimensionales "x" con valores de máxima carga Gg.

TABLA No. 3

Carga Máxima (Gg) KG/CM ²	Relación Adimensional
112	0.4
137	1.1
162	1.7
187	2.2
212	2.5
237	2.8
262	3.0
287	3.2
312	3.3

De la ecuación:

$$\Delta G = G_t - G_f \text{ ----- (4)}$$

y de la condición límite de $\Delta G = G_g$ se obtiene la siguiente relación:

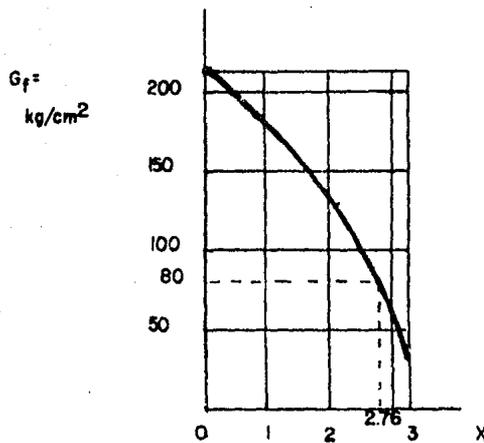
$$G_f = 312 - G_g \text{ ----- (5)}$$

Donde el valor de 312 kg/cm^2 corresponde a la presión geostática G_t medida en la parte inferior de la caverna y así la Tabla No. 3 puede ser reescrita; los resultados son presentados en la Tabla No. 4.

TABLA No. 4

La presión interna como una función de la relación adimensional "x"

Presión Interna G_f kg/cm^2	Relación Adimensional "x"
0	3.3
25	3.2
50	3.0
75	2.8
100	2.5
125	2.2
150	1.7
175	1.1
200	0.4



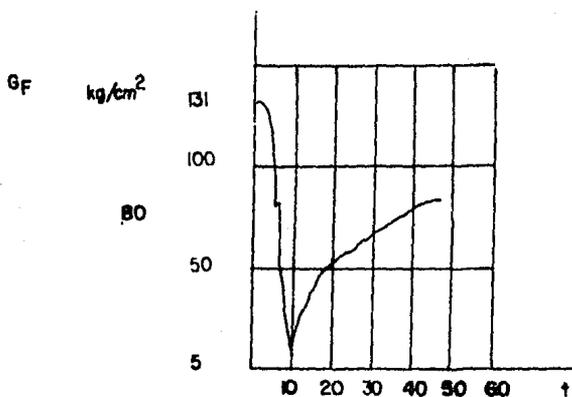
GRAFICA No. 4

La presión interna como una función de la relación adimensional "x"

Los valores de la Tabla No. 4 son mostrados en la Gráfica No. 4. Los puntos son unidos para formar la curva. Como mencionamos anteriormente, la relación adimensional "x" es de - - 2.76, por lo tanto, en orden de evitar cualquier fractura en el techo, una presión mínima G_f de 80 kg/cm^2 es requerida dentro de la caverna, este valor mínimo de presión interna no debe ser menor, ni durante la excavación ni durante la operación de la caverna de gas. Fueron realizadas pruebas con baja presión de 2 a 8 kg/cm^2 . En estas pruebas, durante la primera fase de la operación, la presión interna ejercida por el llenado de agua en el techo fue reducida de 150 kg/cm^2 a prácticamente cero. Durante esta inadmisibles presión sobre 3 M. de techo se derribó. Además ocurrían fracturas cuando la presión fue cada vez más baja.

La Gráfica No. 5 representa la dependencia de la presión interna en el área del techo de la caverna durante las primeras bajadas de presión.

Nosotros podemos notar que los disturbios ocurren en la curva alrededor de 80 kg/cm^2 , donde el límite es rebasado ocurre la formación de fracturas.



GRAFICA No. 5

Curva de la presión interna del área del techo durante el descenso de presión.

- Modelo mecánico para la obtención de la distancia mínima de seguridad que debe existir entre las caras de las cavernas

Como puede ser visto de lo investigado por W. Dreyer - (1969), para la estimación de la mínima anchura de la columna entre cavernas, fueron preparados modelos con forma semiesférica de acuerdo con la Figura No. 2. La carga fue aplicada en dirección vertical al plano del papel, bajo incrementos de carga, cuando la máxima carga es alcanzada G_g , los cristales de sal lufren el fenómeno de opacidad y decoloración a lo largo de la línea de unión de las paredes del cilindro. Si se aplica una mayor carga puede ser observado que se produce el fenó-

meno de campaneos*, agrietándose la pared y prosiguiendo la grieta con el tiempo en dirección al centro.

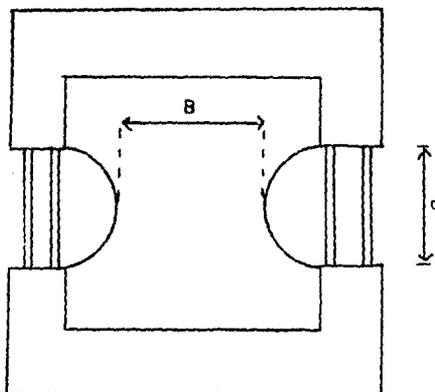


FIGURA No. 2

Modelo con cavidades semi-esféricas

Cuatro series de modelos fueron preparados, cada serie con cuatro especímenes. La carga máxima G_g como una función de la relación adimensional.

$$y = \frac{B}{d} \text{ ----- (6)}$$

es presentado en la Tabla No. 5.

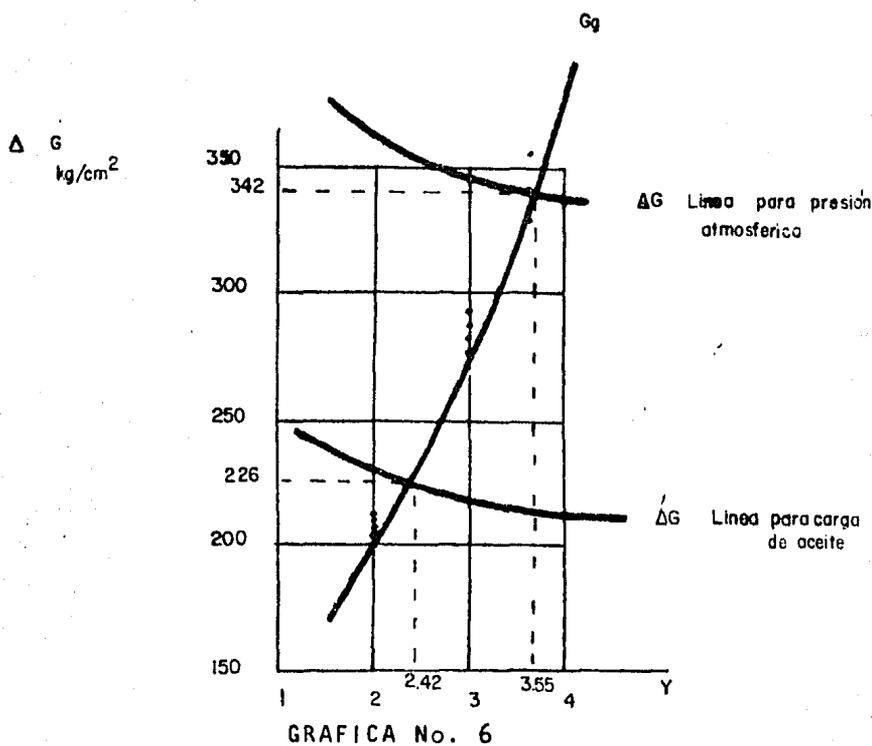
* Peeling.

TABLA No. 5

Carga máxima como una función de la relación adimensional "y"

Serie del Modelo	Relación Adimensional "y"	Mediciones Individuales de carga máxima			
		Gg	kg/cm ²		
1	2.0	197	200	203	206
2	2.5	233	238	243	246
3	3.0	280	286	291	298
4	3.5	330	337	340	357

Puede ser visto de esta Tabla que la carga máxima Gg se incrementa con incrementos en la relación adimensional y. En este caso también, se incrementa el esparcimiento entre los puntos de prueba conforme se incrementa la relación adimensional "y". Los resultados de la Tabla No. 5 son graficados en la Gráfica No. 6. Para la construcción de la curva de carga máxima Gg se consideraron los valores de las pruebas más bajas.



Construcción de la curva de carga máxima para la determinación de la distancia mínima entre cavernas.

La curva G_g , la cual se muestra en la Gráfica No. 6, como el límite más bajo, tiene la siguiente ecuación:

$$G_g = 55.07 \left[1 + 0.619 \left[\frac{1}{1 + 2 \frac{B}{d}} - 0.081 \right]^{-0.668} \right] \text{----- (7)}$$

Esta fórmula muestra el incremento de la carga máxima G_g , con incremento en la relación adimensional "y", donde es considerada la relación $y = \frac{B}{d}$.

Aparte de la curva de carga máxima, las curvas características de esfuerzos de la caverna son también mostradas en la Gráfica No. 6 para 1,400 M. de profundidad en los casos de pre

si3n interna igual a la atmosf3rica y llenado de aceite. En ambos casos un arreglo hexagonal de las cavernas es considerado; tal arreglo se caracteriza por la 3ptima utilizaci3n del espacio en comparaci3n con otros sistemas de cavernas.

La presi3n de sobrecarga ΔG , en el caso de cavernas en arreglo hexagonal, una caverna depende de la relaci3n adimensional "y". De acuerdo con W. Dreyer (1971):

$$\Delta G = \frac{(\gamma - \gamma_f) h}{1 - 0.907 \left[\frac{1}{1 + \frac{B}{d}} \right]^2} \quad \text{-----} \quad (8)$$

Donde (γ) representa el peso espec3fico de la roca salada circundante y (γ_f) es el peso espec3fico del fluido que llena la caverna. Por medio de la relaci3n $y=B/d$, la abreviaci3n "y" puede ser introducida. Con un peso espec3fico de la roca salada circundante de $\gamma = 0.234 \text{ kg/cm}^2 \text{ M}$, y un peso espec3fico de aceite de $\gamma_f = 0.085 \text{ kg/cm}^2 \text{ M}$ de la relaci3n anterior se transforma en:

$$\Delta G = \frac{208.6}{1 - 0.907 \left[\frac{1}{1 + \frac{B}{d}} \right]^2} \quad \text{-----} \quad (9)$$

introduciendo una profundidad $h = 1,400 \text{ M.}$, la l3nea G (curva de la parte inferior en la Gr3fica No. 6) est3 basada en la relaci3n (9). Bajo presi3n atmosf3rica interna la ecuaci3n (8) se transforma en:

$$\Delta G = \frac{3276.6}{1 - 0.907 \left[\frac{1}{1 + \frac{B}{d}} \right]^2} \quad \text{-----} \quad (10)$$

esta curva es graficada en la parte superior de la Gráfica No. 6.

En el caso de llenado de aceite, el valor obtenido de la relación adimensional "y" en la Gráfica No. 6 es 2.47. Considerando una caverna con 50 M. de diámetro, le corresponden 124 M. de distancia B, si está contemplado para fechas posteriores extracciones del contenido, luego el valor de la relación adimensional "y" es de 3.55, el cual es tomado de la Gráfica No. 5 y para esta situación la distancia B es determinada como 178 M.

En orden de obtener la distancia "A" entre los ejes de -- las dos cavernas, el círculo de impacto (a) y el diámetro (d) son sumados a la distancia "B".

$$A = B + d + a$$

Considerando un círculo de impacto de 25 M. a esta profundidad, una distancia "A" de eje a eje de 253 M. podría ser fijada para este sistema de cavernas.

- Características de convergencia del almacenaje en cavernas

Con respecto a las operaciones de seguridad del almacenamiento de gas en cavernas, son factores importantes la deformación de la roca salada circundante sin fractura y el conocimiento de sus características de convergencia. Dicho de otra manera, el movimiento de convergencia ocurriría durante el almacenaje y movimiento de los productos de petróleo líquido, y la extensión de éste puede ser conocida. En este caso, el volumen de convergencia "k" depende esencialmente de siete parámetros, el diámetro máximo de la caverna (d), la altura de la caverna (H), la presión geostática (Gt) de la roca que rodea la caverna, la presión interna de la caverna (Gf), el porcentaje de temperatura (V), el tiempo de vida (t) y las constantes

de la roca (a , l , m y n). Los modelos investigados, así como mediciones in-situ produjeron la siguiente fórmula de convergencia:

$$k = a \left[1 - \frac{d}{2H} \right] (Gt - Gf)^L (\mathcal{V} + 273)^m t^n \quad \text{-----} \quad (11)$$

Para el gas almacenado en las montañas de Hasel las constantes de la roca fueron determinados como:

$$a = 1.668 \times 10^{-8} \%$$

$$l = 1.2$$

$$m = 1.7$$

$$n = 0.94$$

Cuando estos valores son introducidos a la ecuación (11), la siguiente ecuación es obtenida:

$$k = 1.688 \times 10^{-8} \left[1 - \frac{d}{2H} \right] (Gt - Gf)^{1.2} (\mathcal{V} + 273)^{1.7} t^{0.94} \quad \text{-----} \quad (12)$$

Donde las dimensiones de la caverna (d) y (H) son expresadas en metros, (Gt) y (Gf) en Kg/cm^2 , (\mathcal{V}) en $^{\circ}\text{C}$ y el tiempo de vida (t) expresado en meses, luego el volumen de convergencia (k) será obtenido en porcentaje %. Debe ser notado, sin embargo, que la ecuación (11) así como al ecuación (12), la altura de la caverna siempre es más alta, o por lo menos, igual al diámetro de la caverna.

Considerando un caso particular en el cual la altura de la caverna (H) es de 50 M. y el diámetro (d) de la caverna es igual a 45 M., la ecuación (12) se transforma en:

$$K = 9.284 \times 10^{-8} (Gt - Gf)^{1.2} (\mathcal{V} + 273)^{1.7} t^{0.94} \quad \text{-----} \quad (13)$$

Considerando la presión geostática (Gt) de 312 Kg/cm² y el porcentaje de temperatura de la caverna de 68.5°C, el resultado sería:

$$k = 1,881 \times 10^{-4} (312 - Gf)^{1.2} t^{0.94} \quad \text{-----} \quad (14)$$

Cuando la cavidad es cerrada completamente, el sedimento del material insoluble tiene que ser considerado, esto fue establecido como un 42%. Consecuentemente, en el caso del cierre completo de la caverna 58% de volumen de convergencia (k) sería tomado e introducido en la ecuación (14). Así, la relación de cierre (t), como una función de la presión interna - (Gf), puede ser dada por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{3.083 \times 10^5}{(312 - Gf)^{1.276}} \quad \text{-----} \quad (15)$$

La presión del líquido o gas (Gf), está expresada en Kg/cm², luego (t) está en meses. En la Tabla No. 6, la relación de cierre está determinada como una función de la presión interna en incrementos de 50 kg/cm². Los valores de la Tabla No. 6 son graficados en la Gráfica No. 7.

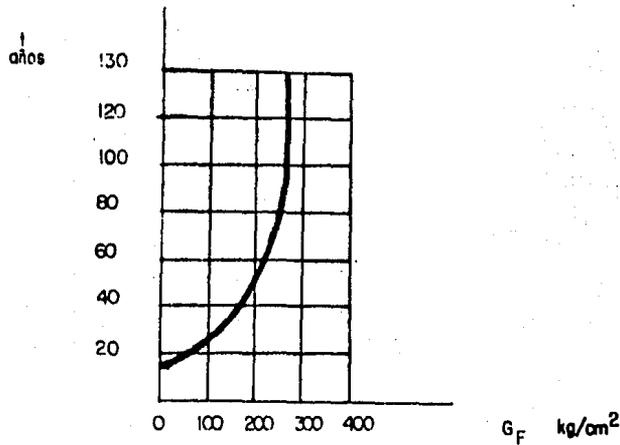
TABLA No. 6

Relación de cierre como una función de la presión interna

Presión interna Gf kg/cm ²	Relación de cierre t años
0	17
50	21
100	28

TABLA No. 6
(Continuación)

Presión interna Gf kg/cm ²		Relación de cierre t años
150		39
200		58
250		133
300		1078



GRÁFICA No. 7

Relación de cierre como una función de la presión interna.

La relación de cierre (t) se incrementa en forma acintótica; conforme se incrementa la presión interna (G_f). Esto pa

rece justificar la revisión de la idea original de operar el almacenaje a baja presión e incrementar la presión de operación de 2 a 100 kg/cm². Conforme a la relación de cierre se incrementa de 17 a 28 años.

- Modelo experimental en cilindro hueco

En ausencia de presión de líquido:

$$G_f = 0 \quad \text{-----} \quad (16)$$

y con una forma semejante a un pozo muy largo:

$$\frac{d}{H} = 0 \quad \text{-----} \quad (17)$$

La fórmula general de convergencia (11) llega a ser simplificada:

$$k = a \cdot G_t^L (\nu + 273)^m t^n \quad \text{-----} \quad (18)$$

En pruebas en cilindros, en rocas saladas viejas investigadas por W. Dreyer (1965) bajo varias presiones G_t y temperatura (ν), produjeron las siguientes constantes de la roca:

$$a = 6.12 \times 10^{-7} \%$$

$$L = 1.2$$

$$m = 1.7$$

$$n = 0.70$$

Introduciendo estos valores en la ecuación (18) se tiene:

$$k = 6.12 \times 10^{-7} \cdot G_t^{1.2} (\nu + 273)^{1.7} t^{0.70} \quad \text{-----} \quad (19)$$

Para los valores de prueba de $Gt = 117 \text{ kg/cm}$ y $\nu = 20^\circ\text{C}$, la siguiente relación es obtenida para el volumen de convergencia (k):

$$k = 2.9 t^{0.70} \quad \text{-----} \quad (20)$$

Para una mayor aproximación de la forma en que se lleva a cabo el cierre de la caverna, la siguiente sección detalla con modelos de investigación en los cuales las características de convergencia fueron probados con una altura de la cavidad cilíndrica constante con variaciones de presión y temperatura. De acuerdo con la ecuación (11), la siguiente ecuación es aplicada para cavernas sin presión interna:

$$k = a \left[1 - \frac{d}{2H} \right] Gt^L (\nu + 273)^m t^n \quad \text{-----} \quad (21)$$

En los modelos investigados por K.E. Brown y F.W. Jessen (1959), la altura de la caverna fue de 10.2 cm. y el diámetro fue exactamente la mitad 5.1 cm. Con estas dimensiones la ecuación (21) se transforma en la siguiente ecuación:

$$k = 0.75 a Gt^L (\nu + 273)^m t^n \quad \text{-----} \quad (22)$$

La Tabla No. 7 muestra una sección de las mediciones publicadas en los primeros rangos de presión de 70 a 350 kg/cm^2 , y una temperatura de 32°C y 149°C respectivamente. Los valores de convergencia presentados en esta Tabla están relacionados a periodos de un día, y podría ser mencionado que las observaciones de convergencia duraron pocos días. Cuando comparamos los valores de convergencia experimentales con los calculados, excelente similitud puede ser observada para valores de temperatura altos de 149°C , la diferencia de convergencia es alta. Sin embargo, esto no es tan serio, ya que la temperatu-

ra que se presenta en una caverna normal está por debajo de --
149°C. Un rango de temperatura de 60°C es válido para la si--
guiente relación:

$$k = 3.16 \times 10^{-6} Gt (\nu + 273)^{1.7} t^{0.22} \text{ ----- (23)}$$

y ésta es la ecuación válida para el cálculo de los valores de
la Tabla No. 7.

Las siguientes constantes del material fueron obtenidas -
de las fórmulas de convergencia:

$$a = 4.21 \times 10^{-6} \%$$

$$m = 1.7$$

$$n = 0.22$$

$$L = 1.0$$

TABLA No. 7

Valores de convergencia en modelo cilíndrico, bajo variaciones
de presión y temperatura y valores de acuerdo a la fórmula.

Presión de Prueba		Temperatura de prueba °C		
Gt kg/cm ²	Vel. de con- vergencia de la cavidad %/día	Vel. de con- vergencia calculado %/día	Vel. de con-- vergencia de la cavidad %/día	Vel. de con- vergencia calculado %/día
70	1.3	1.7	2.6	3.0
140	3.5	3.5	5.3	6.1
210	5.0	5.2	8.2	9.1
280	7.0	7.0	9.5	12.1
350	9.0	8.8	14.8	15.2

- Modelo experimental de forma esférica

En ausencia de presión interna y cavidad de forma esférica

$$\frac{d}{H} = 1 \quad \text{-----} \quad (24)$$

la fórmula inicial (11) es transformada en:

$$K = 0.5 \cdot a \cdot G^L (\mathcal{U} + 273)^m t^n \quad \text{-----} \quad (25)$$

Cuando la fórmula (25), determinada para cavidades esféricas, es comprada con la fórmula (18), la cual describe las características de convergencia de un cilindro muy largo, es rápidamente encontrado que la convergencia de la cavidad esférica es solamente la mitad de la otra.

Consecuentemente, las cavernas de forma esférica son más estables que las de forma alargada.

M.B. Nowotry y F.W. Jessen (1963) llevaron a cabo investigaciones sobre modelos de cavidad esférica en roca salada de 4.7 cm. de diámetro. La temperatura fue de 54°C y la presión de prueba, después de 5 días, se mantuvo constante a 280 kg/cm². La convergencia puede ser aproximada por medio de la siguiente fórmula:

$$k = 4.66 t^{0.55} \quad \text{-----} \quad (26)$$

Si consideramos las pruebas del modelo cilíndrico (Tabla No. 7), las constantes del material fueron encontradas como -- L=1.0 y m=1.7, luego, la fórmula 26 puede ser expandida como:

$$k = 0.88 \times 10^{-6} \cdot Gt (\mathcal{U} + 273)^{1.7} t^{0.55} \quad \text{-----} \quad (27)$$

Por medio de la relación general (25) la constante (a) del material usado en esta prueba es calculado como $1.76 \times 10^{-6}\%$.

- Pruebas in-situ en un pozo profundo

A causa de la incertidumbre de los estratos de sal en el pozo, donde las condiciones minerales y estructurales varían con la profundidad, la velocidad de convergencia en un horizonte individual es diferente que las de los demás estratos, de tal manera que ni la evaluación cuantitativa ni la aplicación de la fórmula puede ser aplicable. De otra manera K. Barron y N.A. Toews (1963), habiendo encontrado un depósito de sal homogéneo en Esterhazy, Saskatchewan, en su pozo especialmente seleccionado para mediciones experimentales. Estos autores tienen determinado el tiempo de convergencia a 939 M. de profundidad. El diámetro de su pozo experimental fue de 5.5 M. Una herramienta de medición registró en el pozo experimental 0.87% de convergencia en sección transversal del pozo es idéntico -- con el volumen de convergencia (k). La siguiente fórmula de convergencia pudo ser obtenida de las mediciones en el pozo*.

$$k = 1.13 t^{0.54} \quad \text{-----} \quad (28)$$

Las constantes del material partiendo de cavidades en forma de pozo y obtenidos por medios mecánicos son $L=1.2$ y $m=1.7$, la fórmula de convergencia (28) puede ser aproximadamente expandida a:

$$k = 9.81 \times 10^{-8} Gt^{1.2} (\nu + 273)^{1.7} t^{0.54} \quad \text{-----} \quad (29)$$

* Shaft.

- Evaluación crítica de los modelos mecánicos para la determinación de la convergencia de la cavidad

De acuerdo con la fórmula (19) determinada por modelos y desarrollada específicamente para cavidad en forma de pozo* -- (muy alargado), usando los datos numéricos de la sección anterior, un volumen de convergencia de 7.05% es calculado a 939 M. de profundidad y una temperatura de 43°C. Este valor es tan alto que el valor actual de convergencia en Saskatchewan es de 1.13 o sea el valor calculado es 6.2 veces mayor que el real.

Como una regla, los valores experimentales de convergencia aportan valores excesivos, esto es debido al tamaño del -- grano que está disponible en las pruebas, en comparación con -- el diámetro de la cavidad, el cual es de solamente unos centímetros. Así, un modelo experimental de solamente 4 cm. de diámetro de cavidad podría aportar valores confiables de convergencia para 5.5 M. de diámetro en pozo alargado, cuando los aspectos petrográficos del modelo son también presentados en precisión. De otra manera, tal precisión en el modelo podría requerir un material de una relación de tamaño del grano de 550 a 4, esto es, 137 veces menos; tal grano fino es excepcionalmente raro encontrar, por lo tanto, es necesario desarrollar factores en base a las estructuras investigadas, el cual podría permitir aportar resultados partiendo de las condiciones in-situ, en base a las pruebas obtenidas en modelos.

- Pruebas de almacenaje

En esta sección intentaremos encontrar la fórmula de convergencia in-situ. El almacenaje bajo tierra escogido con facilidad para este propósito fue en 725 M. de profundidad, te--

* Shaft.

niendo un máximo de 20 M. de diámetro y una altura de 100 M.

Después de la extracción del espacio para el almacenaje, el cual tiene una capacidad de $15,000 \text{ M}^3$, la cantidad de salmuera extraída de la caverna fue medida y por lo tanto la extensión del volumen para el almacenaje fue determinado. De acuerdo con V. Rohr (1969), la siguiente relación fue obtenida:

$$k = 0.0555 t^{0.94} \quad \text{-----} \quad (30)$$

Conociendo el peso específico promedio de las rocas estratos por arriba de la roca se puede conocer su presión geostática (Gt), para un peso específico de 0.234 kg/cm^2 . $M \text{ Gt} = 170 \text{ kg/cm}^2$. La temperatura fue tomada a la profundidad estimada, el valor encontrado fue de 37°C . En las pruebas de almacenaje el peso específico de la salmuera fue de 0.115 dg/cm^2 . M, así, a una profundidad de 725 M. se encuentra una presión de fluido $Gf = 83 \text{ kg/cm}^2$. Tomando como base $L=1$ v $M=1.7$; como primera aproximación la fórmula general de convergencia queda expresada como:

$$K = 1.668 \times 10^{-8} \frac{(1-d)}{2H} (Gt-Gf)^{1.2} (\nu + 273)^{1.7} t^{0.94} \quad \text{-----} \quad (31)$$

La relación de convergencia (V) es obtenida diferenciando la ecuación (30):

$$V = 0.0522 t^{-0.06} \quad \text{-----} \quad (31)$$

Si introducimos el tiempo (t), expresado en meses, luego la relación de convergencia (V) sería obtenida en %/mes. Considerando que el 1% del volumen total $15,000 \text{ M}^3$ corresponde a 150 M^3 , la ecuación (31) podría ser reescrita para M^3/mes en la siguiente forma:

$$V = 7.83 t^{-0.06} \quad \text{-----} \quad (32)$$

finalmente, para $M^3/\text{día}$ la ecuación (32) sería:

$$V = 0.26 t^{-0.06} \quad \text{-----} \quad (33)$$

Después de un mes, el gasto de extracción es $0.26 M^3/\text{día}$, ésta decrece con el tiempo y por ejemplo después de 7 meses, - sería solamente de $0.23 M^3/\text{día}$. Ambos valores fueron medidos en un almacenaje sencillo y podría ser establecido que la relación de convergencia (gasto) fue realmente muy bajo.

En la misma forma, después de cerrar el pozo de exploración, las características de convergencia fácilmente podrían - ser conocidas por medio de la medición en los incrementos de - presión.

- Estimación de las relaciones de convergencia para un proyec- to de caverna

El depósito de sal, en la cual la caverna es construida, el tope de este estrato se encuentra a 1,150 M. de profundidad. El tirante de roca consiste de 600 M. de estrato terciario más 550 M. de yeso, seguido por 200 M. de base yeso. Tomando un - margen de seguridad de 150 M. del tope de la sal, el cual no - estará expuesto a ningún proceso de lavado, el tope de la ca-
verna se localizaría a 1,300 M. de profundidad. Considerando que los resultados de la perforación de exploración indican la posibilidad de 200 M. de altura de la caverna (H), el nivel -- promedio de profundidad de la caverna podría ser localizado a 1,400 M. Con tal profundidad se pueden realizar los cálculos correspondientes a la estimación de las características de con

vergencia de la caverna, considerando que la porción más baja de la cavidad en forma de pera, predominan las condiciones de convergencia correspondientes a forma esférica, mientras la -- porción cilíndrica de la cavidad, donde la tendencia de convergencia es mayor, es localizada a más baja profundidad. Con un peso específico promedio de $0.234 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{M}$, se tiene 328 kg/cm^2 de presión geostática. El peso específico del crudo es de $0.085 \text{ kg/cm}^2 \cdot \text{M}$, teniendo una presión de fluido de $G_f = 119 \text{ kg/cm}^2$.

A 1,400 M. de profundidad la temperatura de la caverna podría ser de 57°C . Considerando que el volumen (V) de la caverna podría ser de $200,000 \text{ M}^3$, el diámetro de la caverna puede ser obtenido de la siguiente relación:

$$V = \frac{\pi}{18} (2H + d) \cdot d^2 \quad \text{-----} \quad (34)$$

La cual es aproximadamente válido para la fórmula de pera. Introduciendo 200 M. de altura (H) en la ecuación (34) así como el volumen de la caverna (V) de $200,000 \text{ M}^3$, luego de ciertos cálculos el valor de 50 M. es obtenido para el diámetro de la caverna.

Asumiendo que las características de convergencia son similares a cualquiera de los almacenajes ya investigados con anterioridad, la siguiente relación puede ser obtenida de la -- ecuación (31):

$$k = 0.1723 \cdot t \quad \text{-----} \quad (35)$$

Cuando el tiempo (t), expresado en meses, es introducido dentro de esta fórmula, el volumen de convergencia (k) sería -- obtenido en %. Considerando que el 1% del volumen total es de $2,000 \text{ M}^3$ la ecuación (31) puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$k = 344.6 t^{0.94} \text{ ----- (36)}$$

Sujeta la cavidad a convergencia, es estimado que después de un mes 345 M^3 de aceite crudo fluiría a través del pozo - - abierto. Diferenciando la ecuación (36) con respecto al tiempo, la relación de convergencia expresada en M^3/mes sería:

$$k = 323.9 t^{-0.06} \text{ ----- (37)}$$

Expresada en $\text{M}^3/\text{día}$, la ecuación (37) sería:

$$v = 10.8 t^{-0.06} \text{ ----- (38)}$$

Después de un mes, la relación de extracción de la caverna sería de $11 \text{ M}^3/\text{día}$.

- La influencia de la forma de la caverna en la cantidad de extracción

La cantidad de extracción (M), relativo al tiempo (t) de un mes.

Recordando que las mismas suposiciones son usadas como en las secciones anteriores, la cantidad de extracción puede ser calculada de acuerdo con la ecuación (31):

$$M = 1.688 \times 10^{-8} \left(\frac{1-d}{2H} \right) (Gt-Gf)^{1.2} (\nu + 273)^{1.7} \text{ ----- (39)}$$

Si introducimos la relación de profundidad:

$$Gt = 0.234 \cdot h \text{ ----- (40)}$$

dentro de la ecuación (34), así como la presión del líquido

$$Gf = 0.085 \cdot h \quad \text{-----} \quad (41)$$

las cuales son función de la profundidad (h), el resultado sería:

$$M = 3.444 \times 10^{-6} \left(1 - \frac{d}{2H}\right) h^{1.2} (\nu + 273)^{1.7} \quad \text{-----} \quad (42)$$

el incremento de la temperatura (ν) con la profundidad es adecuadamente expresado por la siguiente relación:

$$\nu = \alpha + B \cdot h \quad \text{-----} \quad (43)$$

donde (α) es la temperatura en la superficie y (B) es el gradiente geotérmico. Cuando se considera una temperatura superficial (α) de 15°C y un gradiente geotérmico (B) de 0.03°C/M, la ecuación (43) quedará expresada como:

$$\nu = + 15 + 0.03 \cdot h \quad \text{-----} \quad (44)$$

introduciendo la ecuación (44) dentro de la ecuación (42) se obtiene:

$$M = 3.44 \times 10^{-6} \left(1 - \frac{d}{2H}\right) h^{1.2} (288 + 0.03 h)^{1.7} \quad \text{-----} \quad (45)$$

Para diferentes valores de (d) y (H), la profundidad de la caverna, en base a la ecuación (34), sería obtenido como:

$$h = 1,300 + \frac{52.325}{\sqrt[3]{\left(\frac{2+d}{H}\right) \left(\frac{d}{H}\right)^2}} \quad \text{-----} \quad (46)$$

Finalmente, la introducción de la ecuación (46) en la ecuación (45) da:

$$M = 3.444 \times 10^{-6} \left(1 - \frac{d}{H}\right) \left[\frac{1300 + 52.325}{\sqrt[3]{(2+d)\frac{(d)^2}{H}}} \right]^{1.2} \left[\frac{357+1.570}{\sqrt[3]{(2+d)\frac{(d)^2}{H}}} \right]^{1.7} \quad (47)$$

Usando la siguiente relación:

$$q = \frac{d}{H} \quad (48)$$

se tiene:

$$M = 3.444 \times 10^{-6} \left(1 - \frac{q}{2}\right) \left[\frac{1300+52.325}{\sqrt[3]{(2+q)q^2}} \right]^{1.2} \left[\frac{357+1.570}{\sqrt[3]{(2+q)q^2}} \right]^{1.7} \quad (49)$$

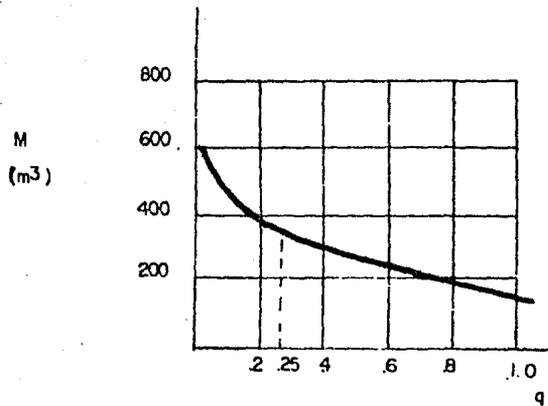
Los valores numéricos presentados en la Tabla No. 8 fueron calculados de acuerdo con la relación (49).

TABLA No. 8

Gasto de extracción esperado después de un mes como una función de la relación adimensional de la caverna.

Relación adimensional (q)	Porcentaje de profundidad h (m)	Gasto de extracción M ³ /mes
0.05	1603	465
0.10	1490	407
0.15	1444	379
0.20	1418	360
0.25	1400	345
0.30	1388	330
0.40	1372	305
0.50	1361	283
0.60	1353	262
0.70	1348	242
0.80	1343	222
0.90	1339	203
1.00	1336	184

En la Gráfica No. 8, la dependencia del gasto de extracción (M) es representado para el proyecto de almacenaje de - - 200,000 M³, el cual puede ser esperado en el periodo de tiempo de un mes.



GRAFICA No. 8

Gasto de extracción esperado, en el periodo de tiempo igual a un mes, como una función de la relación adimensional de la caverna.

Con una relación adimensional (q) de 1, la caverna es transformada en forma esférica y después de un mes poca relación de extracción puede esperarse; éste es un índice favorable. Como consecuencia en la planeación de las dimensiones de la caverna es deseable esforzarse como sea posible para obtener una forma esférica.

- Pruebas preliminares de campo

La idea va principalmente enfocada al hacerse las preguntas: ¿De dónde obtener el agua dulce? y ¿Qué hacer con la salmuera?

Suministro de agua dulce

Si cercano al sitio del almacenamiento seleccionado se encuentran ríos, lagos, etc., el agua dulce para la disolución será tomada de dichos lugares. En caso contrario, se tendrán que localizar acuíferos y perforar un número de pozos que permitan disponer del gasto requerido para cada pozo de disolución. De preferencia, los acuíferos se localizarán en los estratos superiores o en los flancos del domo, para evitar traer agua desde sitios lejanos.

Deshecho de salmuera

Con el fin de evitar problemas de contaminación en la zona seleccionada para la generación de cavidades, se debe hacer una selección cuidadosa del sitio al cual se enviará la salmuera producida, esto puede ser:

- Entregar la salmuera a un complejo industrial para su utilización o comercialización.

- En el caso de existir formaciones arenosas de espesor considerable y alta permeabilidad en las cercanías, estratos superiores o en los flancos de la estructura, perforar pozos para inyectar la salmuera a dichas formaciones.

- Si el sitio seleccionado se encuentra cerca de la costa, pueden tenderse tuberías de asbesto o fibra de vidrio para arrojar la salmuera directamente al mar.

- Análisis de estabilidad y Mecánica de rocas

Como ha sido observado, generalmente las cavidades bajo tierra no se colapsan por la simple presión geostática. Esta habilidad de las cavidades en general para resistir la formación de fracturas no puede ser satisfactoriamente explicado por el concepto común de elasticidad, aplicado a las formaciones bajo tierra. Un entendimiento del comportamiento estructural de las cavidades de sal bajo tierra es ahora necesario debido a un incremento en el uso de estas cavidades. En suma, usando las cavidades bajo tierra como tanques de almacenaje para productos derivados del petróleo y otros materiales, hay también la posibilidad de que ciertas cavidades puedan ser usadas para el almacenamiento de sustancias radioactivas, posiblemente para cientos de años. En estudios de estructuras bajo tierra, los conceptos comunes de los esfuerzos de materiales y datos experimentales en formaciones bajo tierra obtenida por métodos ordinarios de prueba no son aplicables por las siguientes razones.

1.- Las formaciones bajo tierra están siempre sujetas a compresión tridimensional (triaxial); por lo tanto el esfuerzo de una formación bajo tierra podría ser definida en términos de tres dimensiones.

2.- Bajo compresión triaxial, el comportamiento estructural de un material difiere del observado en pruebas ordinarias en las dos dimensiones.

3.- La plasticidad y viscosidad natural de un material -- particularmente pronunciado en compresión triaxial; por lo tanto, el esfuerzo de un material podría ser expresado en términos de tiempo.

4.- La fricción interna en un material en compresión triaxial, en contraste a la compresión ordinaria, altera en forma significativa su comportamiento estructural.

El propósito de este inciso es establecer principios teóricos que gobiernan los esfuerzos y estabilidad de las cavidades bajo tierra. Plasticidad y viscosidad de la formación son consideradas en adición a la elasticidad.

- Limitaciones a la teoría de la elasticidad

La creación de una cavidad en un medio elástico acarrea una redistribución del esfuerzo inicial y la concentración del mayor esfuerzo de corte alrededor de la cavidad. La magnitud de la concentración del esfuerzo puede ser determinado precisamente por método teórico o experimental para cavidades solas o múltiples bajo cualquier condición de presión externa.

Esto no sería problema estructural si las formaciones bajo tierra se comportaran en forma elástica o casi elástica; en la realidad.

Sin embargo, toda formación geológica exhibe ambas propiedades (plasticidad y viscosidad), dependiendo de la presión y propiedades triaxiales de la formación. Así, la teoría de la elasticidad solamente puede ser aplicada a cavidades localizadas en formaciones a ciertas profundidades límite. Cálculos basados en la teoría de la elasticidad muestran que el esfuerzo máximo de corte alrededor de las cavidades cilíndricas y esféricas siempre opera en forma circundante. Cuando este esfuerzo máximo de corte excede al esfuerzo máximo de corte de la formación, el material circundante podría afallarse, de acuerdo a la teoría.

En muchas formaciones estas fracturas no ocurren, porque el material circundante a la cavidad podría ceder, además de que el esfuerzo de corte alcanza en máximo esfuerzo.

Esto podría resultar en una relación de esfuerzos en la

periferia y una transferencia de la concentración de esfuerzos a las formaciones adyacentes, como es ilustrado en las figuras 13 y 14. Esta característica de cedencia de la roca de sal es particularmente producida cuando el material se encuentra en compresión triaxial. Con el propósito de evaluar esta deformación, las propiedades triaxiales del material podrían ser conocidas.

- Comportamiento triaxial del material frágil

La roca de sal exhibe fracturas bajo compresión. Sin embargo, bajo compresión triaxial, el (slightest yielding) del material frágil a lo largo del plano de máximo esfuerzo causa una fuerza de fricción en el mismo plano. Esta resistencia de fricción puede ser el mecanismo por el cual el material alrededor de la formación, así como la roca salada, se comporta plásticamente bajo compresión triaxial. Ya que la fuerza de fricción es directamente proporcional a la fuerza normal actuando perpendicularmente al plano de máximo esfuerzo, el comportamiento plástico del material depende primeramente de la magnitud y geometría de la compresión triaxial. El grado de la compresión triaxial puede ser indicado por el esfuerzo principal (T_m) el cual es un porcentaje de los tres esfuerzos principales, (T_1), (T_2), (T_3). por lo tanto:

$$T_m = \frac{1}{3} (T_1 + T_2 + T_3) \quad \text{-----} \quad (50)$$

Para la roca salada, un valor que exceda a 5,000 psi es suficiente para producir la fuerza de fricción necesaria para evitar las fracturas.

Bajo presión triaxial la fuerza de la roca es dependiente de la máxima fuerza de corte triaxial que opera en el material. Esta máxima fuerza de corte es llamada fuerza de corte octahedral, τ_o , la cual puede ser expresada como:

$$\tau_o = \frac{1}{3} \left[(\tau_1 - \tau_2)^2 + (\tau_2 - \tau_3)^2 + (\tau_3 - \tau_1)^2 \right] \quad \text{----- (51)}$$

La fuerza de corte octohedral es gráficamente presentada en la figura 9.

Para cualquier material, la fuerza de corte octohedral -- puede ser determinada por pruebas triaxiales de laboratorio, - si la suficiente presión triaxial es producida. La relación - general entre la fuerza de corte octohedral (τ_o) y la deforma- ción (Vieldino Shear Estrain) son mostrados en la Figura 10.

Como puede ser observado en la Figura 10, cuando la roca salada empieza a ceder, (τ_o) sobrepasa el límite elástico - - (k_e) del material. Además, al incrementarse el valor de (τ_o) sobre (k_e) se acelera la deformación, como se ilustra en la fi- gura . Como consecuencia de esto, el esfuerzo de corte octo- hedral (τ_o) no puede exceder a cierto valor definido con lími- te plástico (k_p) del material. Más allá de este límite, el ma- terial se deforma infinitamente. En base a estos hechos, la - deformación de la roca salada puede ser tratada como una defor- mación plástica.

En las formaciones bajo tierra puede que no tengan defini- dos los valores de (k_p) como la presión triaxial requerida pa- ra exceder su límite plástico no son alcanzadas en el laborato- rio. Sin embargo, se obtienen incrementos de plasticidad con incrementos de la compresión triaxial.

Flujo lento.- En respuesta a las deformaciones instantá- neas que sufre la roca salada, esta roca se encuentra sujeta a

flujo pseudoviscoso. El flujo pseudoviscoso es definido, como la deformación lenta (gradual) cuando una presión constante es aplicada por debajo del límite elástico (k_e). Esta deformación viscosa en la sal puede ser acumulada en cantidades considerables para un largo periodo de carga constante. En un principio, la fuerza de cedencia octahedral (k_y) decrece con forma, se incrementa el periodo de observación debido a este efecto. Generalmente es la fuerza de cedencia (k_y) tiene las características de una función logarítmica dependiente del tiempo. En el diseño de una cavidad bajo tierra, el valor (k_y) podría ser determinado como una función del tiempo, con el propósito de que para un periodo de tiempo dado la zona de cedencia pueda ser calculada.

- Presión de la tierra existiendo inicialmente

La presión de existencia inicial puede ser determinada -- por el uso de la relación de Poisson de la formación para profundidades someras donde la formación se puede considerar elástica, a condición de que la presión tectónica no exista. Más allá de esta profundidad la presión de la tierra llega a ser independiente de la relación de Poisson pero depende de la profundidad de la cavidad y de la fuerza de cedencia octahedral (k_y). Para la mayoría de las formaciones de presión lateral de la tierra es más que un tercio de la presión geostática (9), si la relación de Poisson es supuesta como 0.25 (tiene las mismas propiedades elásticas en todas direcciones). Sin embargo, la relación de presiones lateral y geostática se aproxima a la unidad conforme se incrementa la profundidad. La presión tectónica podría presentar a la presión lateral como o mayor o menor que la presión vertical. Sin embargo, el posible rango de presión lateral recae dentro de ciertos límites. Este rango -

es además restringido en rocas saladas a sus pequeños valores de (k_p) .

- Desarrollo de la zona de cedencia alrededor cavidad esférica

Como se mostró anteriormente, una zona de cedencia puede desarrollarse alrededor de la cavidad bajo tierra sin hacer caso del esfuerzo y lo frágil de la formación. Para formas de cavidades simples, tales como esferas o cilindros, el desarrollo de esta zona puede ser matemáticamente determinado y las condiciones estructurales pueden ser matemáticamente formuladas. Aunque las cavidades no son ideales, la teoría derivada de una condición ideal revela los principios fundamentales. Los principios obtenidos de una condición ideal pueden ser adaptados para la evaluación de las condiciones no ideales.

El principio del desarrollo de la zona de cedencia ocurre cuando el esfuerzo de corte octohedral (T_o) excede el esfuerzo de corte octohedral elástico (k_e) . La redistribución de esfuerzos en esta zona de cedencia puede ser obtenida por introducción del esfuerzo de corte octohedral de cedencia (k_y) dentro de la ecuación diferencial que simula el equilibrio de esfuerzos en la zona (Figura No. 11), por lo tanto:

$$\frac{dT_r}{dr} + \frac{(2)}{r}(T_r - T_t) = 0 \quad \text{----- (52)}$$

El esfuerzo de corte octahedral alrededor de la cavidad es obtenido por sustitución de $T_1 = T_r$ y $T_2 = T_3 = T_t$ dentro de la ecuación (51)

$$T_o = \pm (\sqrt{2/3})(T_r - T_t) \quad \text{----- (53)}$$

Así, la ecuación (52) puede ser reescrita como:

$$\frac{dTr}{dr} = \frac{-2}{r} (Tr - Tt) = \pm 3\sqrt{2} \frac{|T_{\text{omax}}|}{r} = \pm 3\sqrt{2} \frac{Ky}{r}$$

al mismo tiempo, los límites de los esfuerzos alrededor de la cavidad son restringidos a:

$$Tt < 0, \quad Tr < 0, \quad Tt - Tr < 0 \quad \text{y} \quad \frac{dTr}{dr} < 0$$

Por lo tanto, la ecuación fundamental de cedencia está expresada como:

$$\frac{dTr}{dr} = -3\sqrt{2} \frac{Ky}{r} \quad \text{-----} \quad (54)$$

Y

$$Tr - Tt = \frac{3}{\sqrt{2}} Ky \quad \text{-----} \quad (55)$$

Por integración:

$$\begin{aligned} Tr &= C - 3\sqrt{2} Ky \ln r \\ Tt &= C - 3\sqrt{2} Ky (\ln r + 0.5) \end{aligned} \quad \text{-----} \quad (56)$$

Donde (C) es la constante de integración.

Esta zona circundante de cedencia es una zona de estado elástico extendiéndose a una infinita distancia en la formación. La ecuación general de distribución de esfuerzos en esta zona elástica es obtenida de la teoría de la elasticidad.

$$S_r = A - \frac{B}{r^3} \quad \text{-----} \quad (57)$$

$$S_t = A + \frac{B}{2r} \quad \text{-----} \quad (57)$$

Los coeficientes de integración A, B y C en las ecuaciones (56) y (57), pueden ser determinados simultáneamente con las condiciones de frontera, éstas son:

A la pared de la cavidad $r = a \therefore T_r = -P_i$

A una distancia infinita de la cavidad $r = \infty \therefore S_r = -P_o$.

Al borde entre la zona de cedencia y zona elástica

$$r = \rho \therefore S_r = T_r$$

Las constantes de integración pueden ser así evaluadas, y la siguiente distribución de esfuerzos alrededor de la cavidad es obtenida.

En la zona de cedencia ($a \leq r \leq \rho$)

$$T_r = -P_i - 3\sqrt{2} K_y \ln r/a$$

$$T_t = -P_i - 3\sqrt{2} K_y (\ln r/a + 0.5) \quad \text{-----} \quad (58)$$

Donde (P_i), (P_o) son las presiones interna y externa de la cavidad.

En la zona elástica

$$S_r = -P_o + \frac{\rho^3}{r^3} (P_o - P_i - 3\sqrt{2} K_y \ln \rho/a)$$

$$S_t = -P_o - \frac{\rho^3}{r^3} (P_o - P_i - 3\sqrt{2} K_y \ln \rho/a) \quad \text{-----} \quad (59)$$

El radio de la zona de cedencia, (ρ), puede ser obtenido como una función de las condiciones de carga de la cavidad; ya que ($T_r=S_r$) y ($T_r=S_t$) a ($r=\rho$) la ecuación (55) puede ser reescrita como:

$$S_t - S_r = -\frac{3}{\sqrt{2}} K_y$$

Por sustitución de (59) dentro de esta relación, el radio de la zona de cedencia es obtenido como:

$$= a \exp \left[\frac{P_o - P_i}{3} - \frac{1}{2 K_y} \right] \quad \text{-----} \quad (60)$$

En la figura No. 12, el radio de cedencia es dado bajo varias condiciones de esfuerzos de la cavidad. La distribución de esfuerzos a ambas partes, en la zona de cedencia y en la zona elástica, puede ser conocida por sustitución del radio (ρ) en las ecuaciones (58) y (59). Como ejemplo, la distribución de esfuerzos alrededor de la cavidad es graficado y presentado en la Figura No. 13 para una formación, la cual tiene $K_y = 700$ psi y $P_o = 1$ psi por cada pie de profundidad.

- Desarrollo de la zona de cedencia alrededor de una cavidad cilíndrica

El desarrollo de la zona de cedencia y de la distribución de esfuerzos alrededor de una cavidad cilíndrica fue analizada por un método similar al que fue usado para cavidades esféricas, la ecuación diferencial de equilibrio en la pared cilíndrica es: (Figura No. 14)

$$\frac{dTr}{dr} + (Tr - Tt)/r = 0 \quad \text{-----} \quad (61)$$

La fuerza de corte octohedral de la cavidad cilíndrica, de la ecuación (51).

$$T_o = \pm \frac{1}{3} \sqrt{(Tr-Tt)^2 + (Tt-Tz)^2 + (Tz-Tr)^2}$$

Ya que no es probable el desplazamiento en dirección axial en la zona de cedencia, la tensión axial de cedencia puede ser igual a cero (0). La tensión axial de cedencia (E_z) puede ser expresado como:

$$E_z = F(T_o) \left[T_z - \frac{1}{2} (Tt + Tr) \right]$$

Donde $F(T_o)$ es una función característica de (T_o) y no es cero (0). Por lo tanto, $E_z=0$ conduce a:

$$T_z = (Tt + Tr)/2$$

Por sustitución de (T_z) dentro de la ecuación es fuerza de corte octohedral, el esfuerzo en la zona octohedral es obtenido:

$$T_o = \pm \frac{1}{\sqrt{6}} (Tr - Tt) \quad \text{-----} \quad (62)$$

Así, la ecuación (61) puede ser reescrita para la condición de esfuerzos en la zona de cedencia.

$$\begin{aligned} \frac{dTr}{dr} &= - \left[\frac{1}{r} \right] (Tr - Tt) \\ &= \pm \sqrt{6} r / T_{\text{omax}} / = \pm (\sqrt{6}/r) Ky \end{aligned}$$

Al mismo tiempo, los esfuerzos alrededor de la cavidad están regidos por:

$$Tt < 0, \quad Tr < 0, \quad Tt < Tr \quad \text{y} \quad \frac{dTr}{dr} < 0$$

Por lo tanto, las ecuaciones fundamentales de esfuerzos - de la zona de cedencia alrededor de una cavidad cilíndrica están expresados como:

$$\begin{aligned} dTr/dr &= - \sqrt{6} Ky/r \\ Tr - Tt &= \sqrt{6} Ky \quad \text{-----} \quad (63) \\ Tz &= \frac{1}{2} (Tr + Tt) \end{aligned}$$

Estas ecuaciones pueden ser resueltas simultáneamente. - Así, las ecuaciones de distribución de esfuerzos en ambas partes, la zona de cedencia y la zona elástica alrededor de la cavidad, son las siguientes:

En la zona de cedencia $a \leq r \leq \rho$

$$\begin{aligned} Tr &= -\pi \sqrt{6} Ky \ln r/a \\ Tt &= -\pi \sqrt{6} Ky (\ln r/a + 1) \quad \text{-----} \quad (64) \\ Tz &= -\pi \sqrt{6} Ky (\ln r/a + 0.5) \end{aligned}$$

En la zona elástica $\rho \leq r \leq \infty$

$$\begin{aligned}
 S_r &= -P_o + \left(\rho^2 / r^2 \right) (P_o - P_i - \sqrt{6} K_y \ln \rho / a) \\
 S_t &= -P_o - \left(\rho^2 / r^2 \right) (P_o - P_i - \sqrt{6} K_y \ln \rho / a) \quad \text{-----} \quad (65) \\
 S_z &= -P_o
 \end{aligned}$$

El radio a la frontera de la zona de cedencia es derivado como una función de la condición de esfuerzos de la cavidad. - Ya que $T_r = S_r$ y $T_t = S_t$ a $r = \rho$ la ecuación (63) llega a ser:

$$S_r - S_t = \sqrt{6} K_y$$

Sustituyendo (S_r) y (S_t) en la ecuación (65), encontramos por fin la revelación entre la frontera de cedencia y las condiciones de carga (presión).

$$\rho = a \exp \left[\frac{P_o - P_i - 1}{6 K_y} \right] \quad \text{-----} \quad (66)$$

En la Figura No. 12 es graficado el radio de la zona de cedencia bajo varias condiciones de carga (presión) de la cavidad, este radio es dado como una función de la presión interna, externa y la fuerza de corte octohedral.

La distribución de esfuerzos alrededor de la cavidad, en la zona de cedencia y la zona elástica es calculado por sustitución del radio (ρ) dentro de la ecuación (65) y (64). La distribución de esfuerzos alrededor de la cavidad es ilustrada en la Figura No. 14, teniendo como suposiciones $K_y = 700$ psi y $P_o = 1$ psi por pie de profundidad.

- Aplicaciones de la Teoría

La teoría desarrollada supuesta para condiciones ideales

pueden ser adecuadamente aplicada a condiciones actuales de -- campo. La aplicación, por supuesto, requiere una cuidadosa -- adaptación de la teoría a las condiciones de campo. Primero, hay tres factores importantes, los cuales requieren ser considerados: forma de la cavidad, condiciones iniciales de esfuerzo y el esfuerzo de corte octohedral (K_y) de la formación.

Aunque las cavidades formadas en un medio elástico, la -- forma no es del todo significativa para la estabilidad estructu-- ral de una cavidad bajo tierra. En cualquier cavidad irregu-- lar la cedencia se presenta primero en las esquinas del cuerpo, donde se encuentran concentrados los mayores esfuerzos elásti-- cos. Con un incremento en la presión externa de la zona de ce-- dencia se incrementa alrededor de las esquinas, donde la dis-- tribución en esta zona es quizá diferente de la cavidad ideal. Sin embargo, la distribución alrededor de cavidades irregula-- res llega a ser similar a una ideal.

Cuando la presión externa no es sólo hidrostática, el des-- arrollo de la zona de cedencia no es uniforme alrededor de la abertura. La distribución de la zona de cedencia es afectada por la relación de presiones verticales y lateral. La zona de cedencia opera primero en las paredes de la cavidad, las cua-- les están sujetas a la mínima presión principal. Sin embargo, con un incremento en la presión, la zona de cedencia se des-- arrolla alrededor de toda la cavidad. Con el agrandamiento de la zona de cedencia, la distribución llega a ser similar a una cavidad con presión uniforme. Porque en esta zona de cedencia, la presión no-hidrostática tiene poco efecto sobre la estabili-- dad estructural de la cavidad. La última forma de la zona de cedencia asemeja a un elipse o elipsoide al cual la relación -- de ejes mayor y menor es igual a la relación de esfuerzos prin-- cipales mayor y menor. Una área de debilidad de la cavidad ba-- jo condiciones no ideales se desarrolla entre el límite de la

caverna y la zona inicial de cedencia. Como esta área es rodeada por la zona de cedencia, esta zona llega a aislarse de la presión externa. Este proceso causa fracturas en el techo, paredes y piso.

La propiedad estructural más importante de la roca de sal es su esfuerzo de corte octohedral (K_y). Análisis reportados de pruebas triaxiales en rocas de sal, por algunos investigadores, indican un rango de variación de K_y de 1,000 psi a 4,000 psi mediciones realizadas a la misma temperatura. Parece que más estudios sobre el comportamiento de la roca de sal bajo esfuerzos triaxiales son necesarios. Además, el valor de (K_y) podría ser determinado como una función del tiempo porque la roca salada no es idealmente plástica está por lo tanto sujeta a considerable flujo pseudoviscoso.

La reducción del espacio de la cavidad es anticipado, cuando se desarrolla la zona de cedencia alrededor de la cavidad por la expansión del volumen máximo contenido en la zona de cedencia. Esta reducción puede ser calculada conociendo la masa de la zona de cedencia y su coeficiente de expansión. Este coeficiente puede ser obtenido por pruebas de laboratorio como una función de (K_y) y de los esfuerzos iniciales.

- Significado de los principios desarrollados aplicados a otras formaciones

La aplicación de los principios desarrollados para cavidades en formaciones de sal a cavidades en otro tipo de formaciones es restringido porque la roca salada llega a ser casi plástica para valores relativamente bajos de T_m y K_p . Además, las formaciones rara vez se comportan en forma plástica bajo pruebas de presión de laboratorio triaxiales. Las condiciones descritas por las curvas T_{m1} y T_{m2} en la Figura No. 10, podrían -

ser verdaderas para algunas rocas bajo presiones de laboratorio sobre 10^6 psi. Naturalmente, en estos casos, la teoría de elasticidad es más razonablemente aplicable que los principios aquí desarrollados.

De la teoría aquí expuesta podemos derivar las siguientes conclusiones:

- Las cavidades creadas en formaciones de sal bajo tierra pueden contraerse pero no colapsarse bajo presión directa de la tierra sin considerar la profundidad porque se desarrolla una zona de cedencia alrededor de la cavidad.

- Alrededor de las cavidades de sal, se desarrolla una zona de cedencia debido a un incremento en la plasticidad causado por un incremento en la presión triaxial.

- Una cavidad de sal bajo tierra establece su equilibrio estructural por expansión de su zona de cedencia como oposición de la presión de la tierra.

- Para cavidades de forma simple, tales como una esfera o un cilindro, el frente del radio de la zona de cedencia (ρ), puede ser calculado como una función del esfuerzo de corte octohedral (K_y), las presiones externa e interna, y el radio inicial de la cavidad.

Para cavidad esférica:

$$\rho = a \exp \left[\frac{P_o - P_i}{3 \sqrt{2} K_y} - \frac{1}{3} \right]$$

Para cavidad cilíndrica:

$$\rho = a \exp \left[\frac{P_o - P_i}{\sqrt{6} K_y} - \frac{1}{2} \right]$$

- La más importante propiedad estructural de la roca de sal es su esfuerzo de corte octahedral (K_y), el cual es determinado en el laboratorio.

- El volumen de reducción de la cavidad puede ser predeterminado si es conocido el coeficiente expansión de la formación, este volumen es determinado como una función de la presión triaxial.

- Una cavidad de forma irregular bajo compresión no-hidroestática podría probablemente ser considerada como una cavidad ideal debido a la pronunciada zona de cedencia en compresión triaxial. El equilibrio estructural de una cavidad de forma irregular puede ser aproximadamente comparada con cavidades ideales en forma de cilindro y esfera.

- La condición de carga de una cavidad es mejor descrita por el término "factor de carga estructural "x" el cual se define como:

$$x = (P_o - P_i/K_y)$$

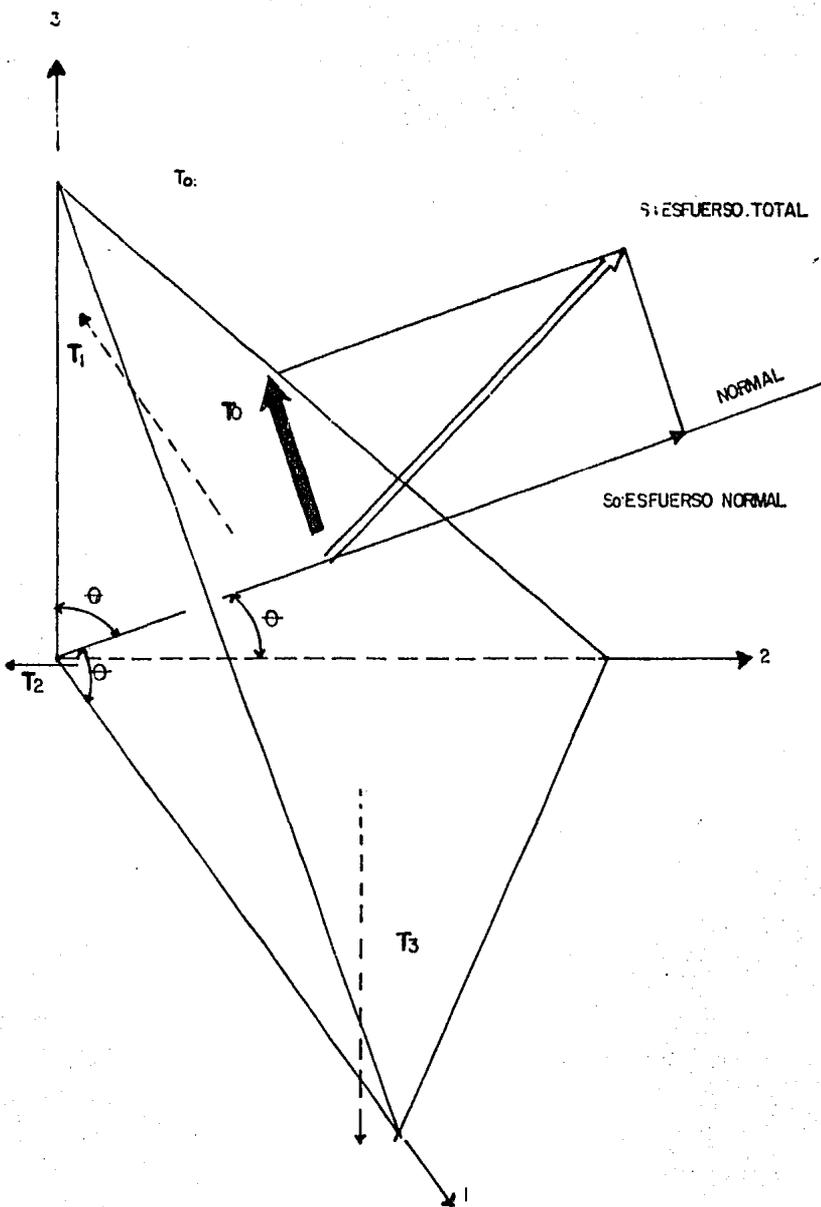
Donde: P_o = presión externa geostática

P_i = presión interna

K_y = esfuerzo de corte octohedral de la cavidad

- La teoría de la elasticidad puede ser aplicada para análisis de los esfuerzos de las cavidades sólo cuando el máximo esfuerzo de corte octohedral es menor que el esfuerzo elástico de corte octohedral, K_e . De otro modo, la teoría de la plasticidad puede ser introducida.

- Los principios desarrollados para cavidades salinas pueden ser aplicables a cavidades en otro tipo de formación siempre y cuando se tenga que la presión triaxial excede a la mínima presión triaxial requerida para comportamiento plástico de la formación.



La fuerza de corte octaédrica de la cavidad cilíndrica, de la ecuación (51)

Fig 9

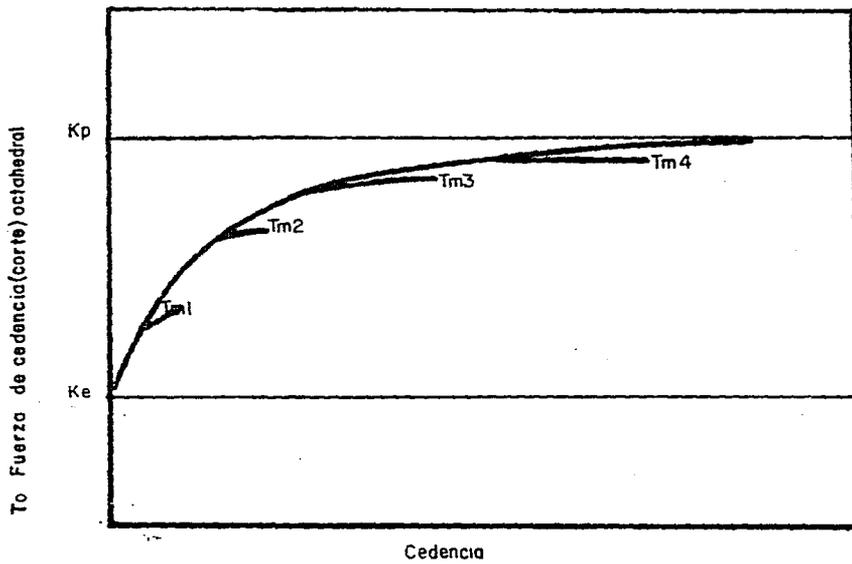
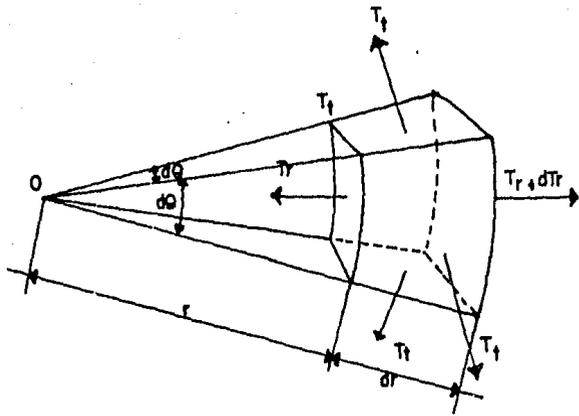


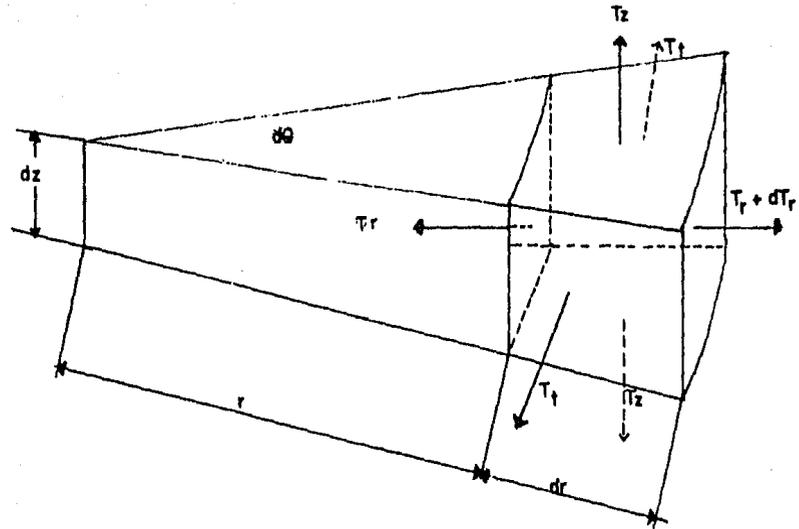
Fig 10



$$(T_r + \frac{dT_r}{dr} dr) (r + dr)^2 (d\theta)^2$$

$$-T_r r^2 (d\theta)^2 - 2T_r r dr (d\theta)^2 = 0$$

$$\frac{dT_r}{dr} + 2 \frac{T_r - T_\theta}{r} = 0 \dots (3)$$



$$(T_r + \frac{dT_r}{dr} dr) (r + dr) d\theta dz$$

$$-T_r r d\theta dz - T_\theta dr d\theta dz = 0$$

$$\frac{dT_r}{dr} + \frac{T_r - T_\theta}{r} = 0 \dots (12)$$

Fig. 11

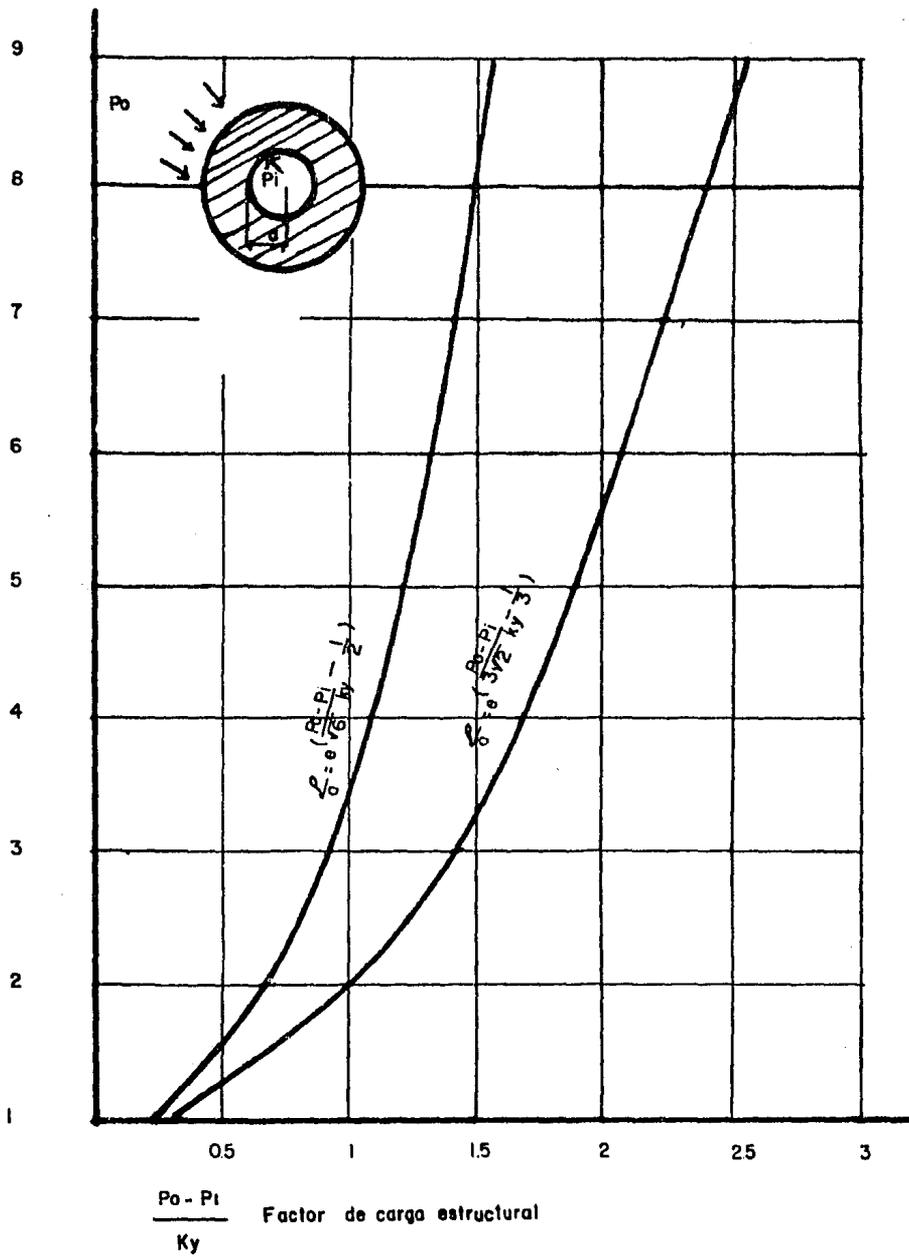


Fig.12

- Para las formaciones bajo tierra las cuales no presentan suficiente plasticidad, la estabilidad estructural de sus cavidades puede ser razonablemente estimado como una condición intermedia entre los dos extremos, idealmente elástico e idealmente plástico.

Técnicas de construcción por disolución

- Por disolución

Los principios del desarrollo de las cavernas por disolución involucra perforación de un pozo en el interior de la formación de sal, inyección de agua fresca en el interior del pozo, disolución de la sal y recuperación de la salmuera resultante.

La secuencia normal para empezar un proyecto de almacenaje en caverna, después de que ha sido elegido el sitio adecuado, es perforar el primer pozo, para confirmar la sección de sal y pruebas potenciales de depósito y localización de posibles acuíferos, si en la superficie o en el terreno, el agua no está disponible. Si la sección de sal es adecuada y las pruebas de pureza son positivas y una fuente de agua está disponible, el pozo es terminado como el primer pozo de caverna, y subsecuentemente otros pozos de caverna son perforados. Varios pozos de caverna pueden ser operados simultáneamente si hay suficiente agua y capacidad de disposición. Por lo que respecta a los pozos perforados, la localización de tuberías, así como los fluidos de perforación usados son diseñados de la manera más económica. El tamaño de la tubería (diámetro) es función de las consideraciones del equipo, requerimientos de -

gasto, presiones y velocidades de restricción y criterio de -- operación.

El programa del pozo comprende un mínimo de dos tuberías cementados en el interior de la sal dependiendo del criterio - de disolución tomado.

Varios métodos de ingeniería de disolución han sido utili- zados, para crear cavernas de diferente forma y tamaño.

Lo subsiguiente es una descripción general de dos métodos más comúnmente usados en la disolución de cavernas. Sin embar- go, puede ser sobrentendido que estos métodos no son rígidos, - pueden ser modificados de acuerdo con los requerimientos en ca- da caso:

- El método de "Tres Herramientas" involucra tres tube- rías concéntricas, una es cementada en el interior de la sal, mientras que las otras dos están "flotando", esto es, están, - colgando en la superficie (Figura No. 15). El proceso de lava- do de la caverna comienza en el fondo de la formación de sal o en algún otro punto establecido, si el fondo es inestable o si está disponible una ilimitada fuente de sal. El primer paso - en el proceso es el desarrollo rápido del fondo (receptáculo) para la acumulación del material insoluble, el cual no sale de la caverna (Figura No. 15-A). Por ajustes periódicos del flui- do de control y mediante la posición de la tubería flotante, - la forma y diámetro de la caverna puede ser controlado.

- El método de las "Dos Herramientas". En este método -- una herramienta (tubería) es cementada en el interior de la -- sal extendiéndose hasta la base mientras que la otra está flo- tando (Figura No. 16). Este método elimina una tubería. El - proceso de lavado y control es similar al sistema de tres tube- rías, excepto que el fluido de control es inyectado con el - - agua fresca en lugar de ser manipulado con la herramienta in- - termedia. En el caso del método de las "Tres Herramientas", -

el fluido de control es removido de la caverna a la herramienta intermedia es alzada para exponer más sal (Figura No. 17). Con el método de las "Dos Herramientas", la tubería es cementada y no puede ser movida. Para exponer una nueva sección de sal la tubería cementada tiene que ser perforada o cortada (Figura No. 16). El uso del método de las dos tuberías resulta de menor inversión inicial, porque una herramienta es eliminada y frecuentemente es de pequeño diámetro. El método de las tres tuberías es sin embargo ventajoso si el almacenaje requerido es de una máxima precisión. Este método podría simplificar operaciones durante lavados simultáneos y operaciones de almacenaje.

Además, se debe de considerar las técnicas de circulación que pueden ser utilizadas en los dos casos, estas son:

- Circulación Directa
- Circulación Inversa

Circulación Directa

Consiste en la inyección de agua dulce por el interior de la tubería de menor diámetro y producción de la salmuera por el espacio anular entre las dos tuberías como se muestra en la Figura No. 18.

Circulación Inversa

Se lleva a cabo mediante la inyección de agua dulce a través del espacio anular entre las tuberías flotantes y producir salmuera por el interior de menor diámetro (Figura No. 19).

Después de considerar los factores anteriores, se procede a elegir el método apropiado. Un importante factor en el sistema de disolución, es el de controlar el proceso de lavado, durante todo el tiempo, ya que de todo esto depende directamen

te el desarrollo de la caverna, forma y medida a la que fueron diseñadas. En áreas donde grandes espesores de sal están presentes, tales como domos salinos, el control del desarrollo de la caverna no es una parte muy crítica del proceso. Pero en áreas donde sólo hay espesores muy delgados de sal es de importante seguridad el control de las dimensiones de la caverna maximizando el volumen de sacrificar estabilidad.

El control de la caverna se realiza de la siguiente forma:

Para controlar el crecimiento vertical se requiere el uso de un material inerte, tal como un hidrocarburo sobre la posición a la cual la disolución está actuando, el método de control es basado en el simple hecho de diferencia de densidades. Porque el material inerte o fluido de control es menos denso que el agua o salmuera, por eso siempre estará en la cima. Limitando el crecimiento por la parte vertical mientras crece en forma horizontal (Ver Figuras 18 y 19).

Durante el desarrollo de las operaciones la configuración de la cavidad puede ser reproducido paso a paso utilizando un registro sonar-caliper (Figura No. 20) o un simulador numérico, el registro sonar es exacto pero representa el inconveniente en su uso ya que para su operación se requiere extraer el aparejo de tuberías colocadas, lo cual implica una operación costosa; estas mediciones son realizadas dependiendo del tamaño y forma de la caverna, como mínimo dos veces por caverna.

Entonces la simulación numérica proporciona una herramienta útil para la ingeniería del diseño y planeación de las operaciones, así como una alternativa parcial de medición para controlar la forma de la cavidad. Otra manera de determinar el volumen de la cavidad es en base a los volúmenes inyectados y a los volúmenes y concentración de la salmuera recuperada; la forma de la cavidad dependerá de la técnica de circulación

empleada y los movimientos de los puntos de inyección.

Producción

El desarrollo de la cavidad comprende básicamente tres -- etapas:

- El desarrollo del receptáculo de insolubles es la prime ra etapa a desarrollar. Esta zona sirve como depósito de los insolubles y escombros que contiene la masa salina. Estos materiales se depositan por diferencia de densidades al fondo, - durante el proceso de disolución.

La formación de este receptáculo se logra mediante la téc nica de circulación directa. El punto de inyección se localiza a la profundidad deseada de la cavidad, con el extremo infe rior de la tubería de mayor diámetro del aparejo, a una dist ancia del fondo igual a la altura del receptáculo de insolubles. Este depósito debe ser creado rápidamente y no puede ser consi derado como almacenaje de aceite. Generalmente de depósito re presenta 1/5 parte del volumen total de la cavidad. (Figura - No. 21).

Después que el receptáculo de insolubles es realizado, el proceso de lavado es parado y la caverna despresurizada, el -- primer registro sonar es tomado.

- Generación de la caverna o chimenea.- Concluida la etapa anterior, se levantan las tuberías colgadas a 40 y 10 M. -- del fondo respectivamente y se reinicia el bombeo de agua dulce bajo la técnica de circulación inversa en un 70% y circula ción directa en un 30%. La inversión de la técnica de circula ción es necesaria a fin de evitar el taponamiento de las tuberías por recristalización de la sal y establecer una mejor dis solución de los estratos, de tal modo que obtengamos la forma

deseada como se muestra en la Figura No. 22. La operación de mover las tuberías flotantes y disolver el intervalo expuesto en cíclica y se repite tantas veces como sea necesario hasta alcanzar el volumen programado el cual se comprueba parando el bombeo para la toma del registro sonar caliper.

- Desarrollo del techo.- Para impedir la disolución de la parte superior de la cavidad, es conveniente mantener una inyección periódica del fluido de control (kerosena, etc.) a través del espacio anular entre la última tubería cementada y la T.R. flotante de mayor diámetro.

La técnica a emplearse en esta etapa será de circulación inversa, para esto, las tuberías flotantes deben estar con una separación aproximada de 5M. entre sí, se requiere de 3 a 4 movimientos descendentes de las tuberías flotantes hasta formar un techo de forma cónica como se muestra en la Figura No. 23.

Por explosiones nucleares

En los años recientes, en Estados Unidos de América fue el primero en comenzar a crear cavernas por explosiones atómicas. Las cavernas producidas en diferentes tipos de rocas, presentaron los requerimientos de impermeabilidad así como volúmenes que exceden los $2 \times 10^5 \text{ M}^3$, comprobándose la no-existencia de fracturas. Sin embargo, en otras formaciones si se presenta el fenómeno de fracturas, presentándose éstas en todas partes, el sello de este tipo de cavidades representa un problema.

La energía liberada por la fisión nuclear y la reacción en cadena, opera en forma de calor expresado en kilotonos o megatonos de la equivalencia de tritocloruro (TNT). Por kilotón 10^{12} unidades térmicas son liberadas repentinamente. En vista

de la alta energía explosiva concentrada en poco espacio, ésta puede ser colocada con relativa facilidad dentro de un pozo, - la cual después de la ignición, en fracciones de segundo forma una caverna de grandes dimensiones. La explosión nuclear - es siempre controlada desde la superficie en un lugar remoto.

En el momento de la explosión la temperatura de la roca vaporizada alrededor del centro de la explosión es de más de - 10^6 °C y la presión de varios millones de kg/cm². El vapor se expande casi en forma esférica por lo cual la presión decrece también en forma esférica. La formación de espacio va acompañado por una poderosa onda de presión radial con velocidades - superiores a 10,000 M/ses. En las paredes de estas cavernas la roca puede derretirse con un espesor de varios centímetros. - Este material derretido se concentra en el piso de la caverna y rápidamente solidifica. Este tipo de roca es muy dura, insoluble en el agua y contiene sobre el 95% de los productos radioactivos. En la mayoría de las cavernas el techo podría -- romperse y las fracturas son llenadas con roca derretida en -- forma simultánea.

En ciertos tipos de roca las cuales no son adecuadas para este tipo de almacenaje, las fracturas creadas por la explosión pueden prolongarse dentro de la roca virgen. Por ejemplo: en la roca de granito, las fisuras que se forman en dirección horizontal podrían llegar a ser dos veces más grandes que la cavidad, tres veces en el área del techo, mientras que en el fondo sólo tendrían una longitud equivalente a la mitad del radio de la caverna.

Buenos resultados están ya disponibles así como los mecanismos de las explosiones fueron ya realizadas, variando la potencia de 7 a 12 kilotones de TNT, en formaciones de: granito, brocha, dolomita y roca salada. Los efectos de estas explosiones fueron investigados por medio de pozos exploratorios.

La aplicación de explosivos nucleares en minas, aparte de la creación de grandes cavernas, permite la explotación de minerales, los cuales no pueden ser explotados por otros medios debido a los altos costos. Las explosiones bajo tierra pueden llegar a hacer mucho más económicas, con 1 kilotón de carga, - produce un espacio efectivo de almacenaje de $1.7 \times 10^6 \text{ M}^3$, el costo es de 3.82 dólares/ M^3 . De otra manera, 100 kilotonnes de TNT producen $6.12 \times 10^6 \text{ M}^3$ de almacenaje con un costo de sólo .05 dólares/ M^3 .

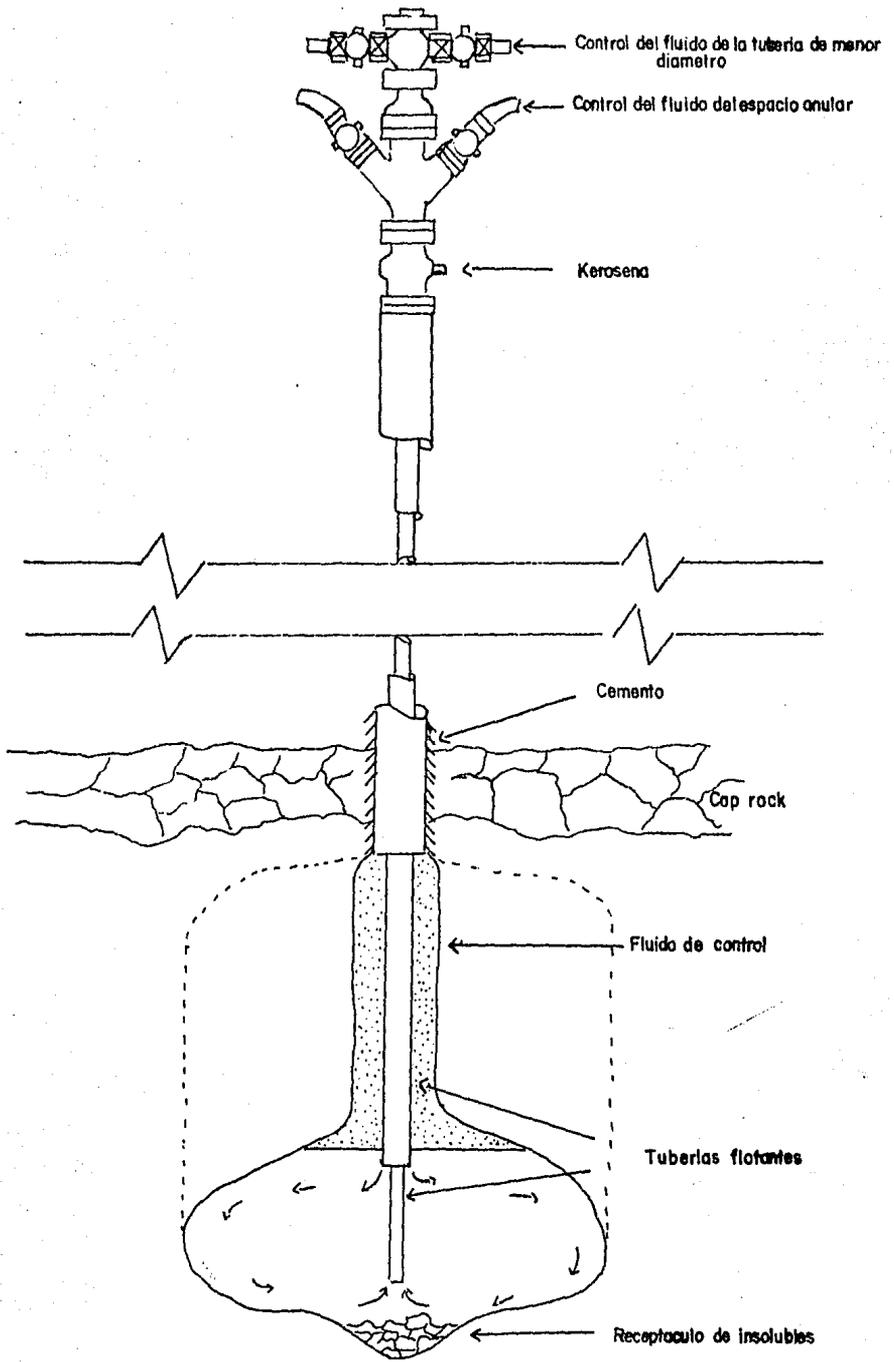


Fig. 15

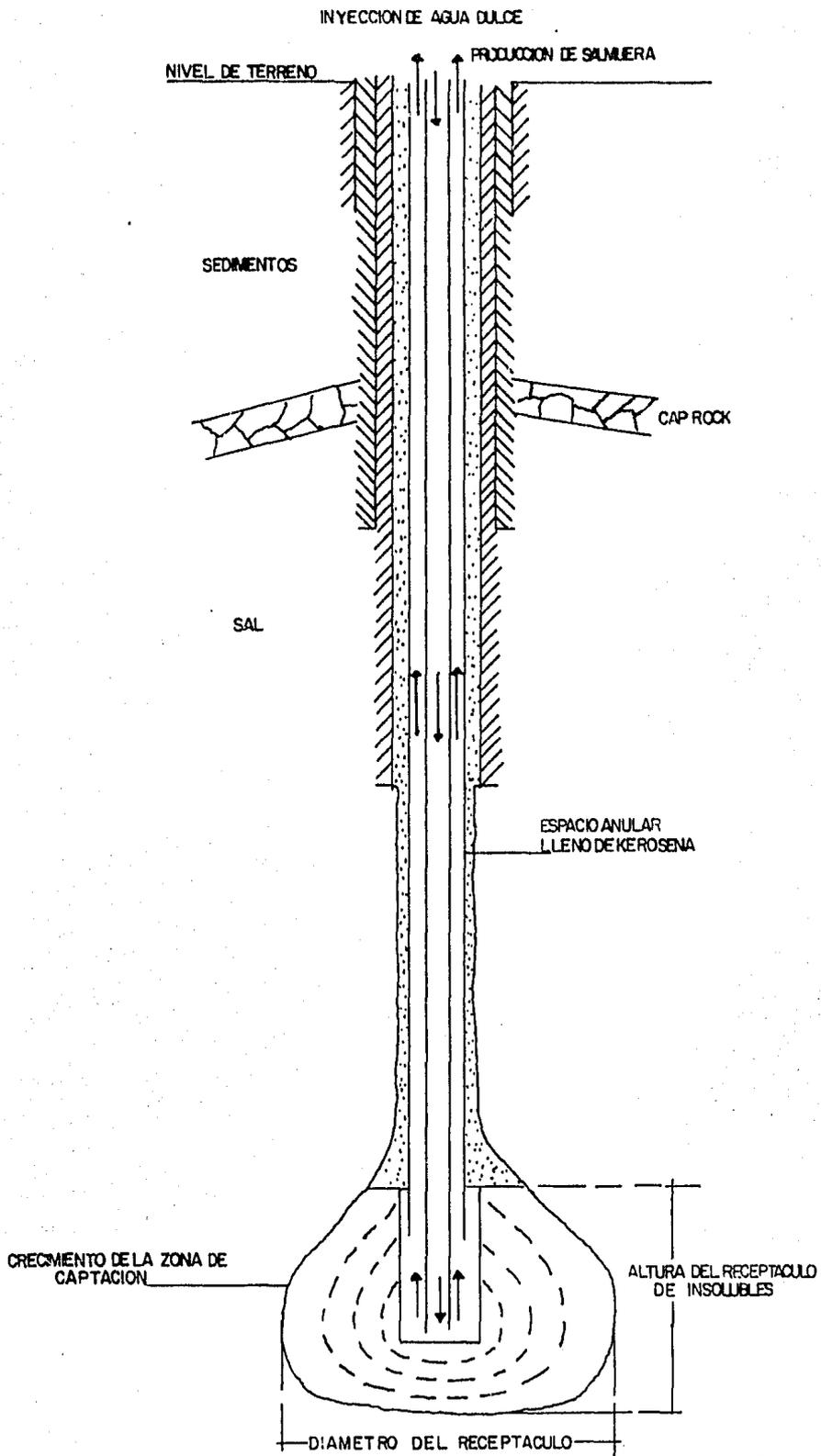


Fig 15 - A

GENERACION DE LA CAPTACION POR ZONA DE LA TECNICA DE CIRCULACION DIRECTA

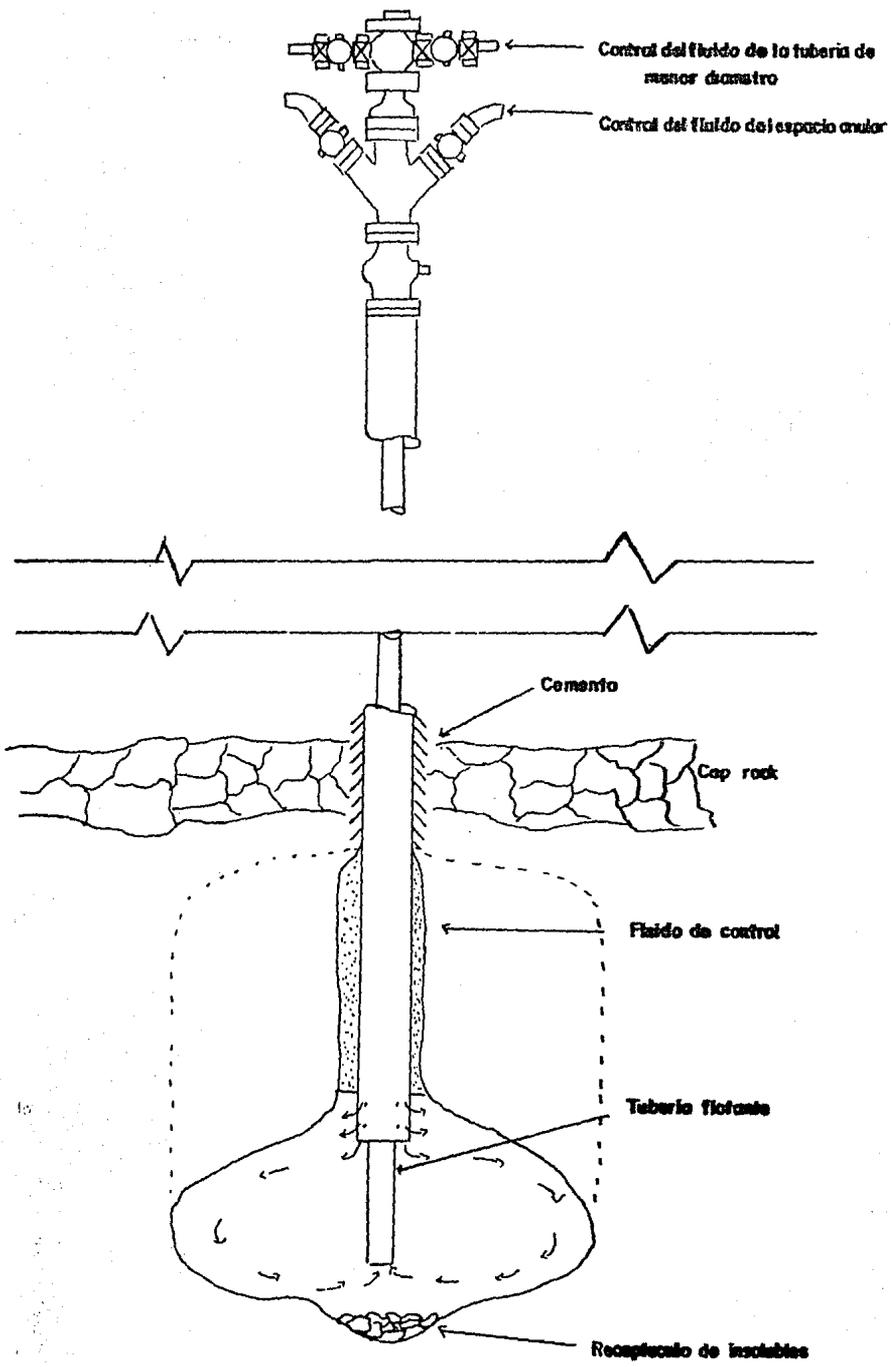


Fig. 16

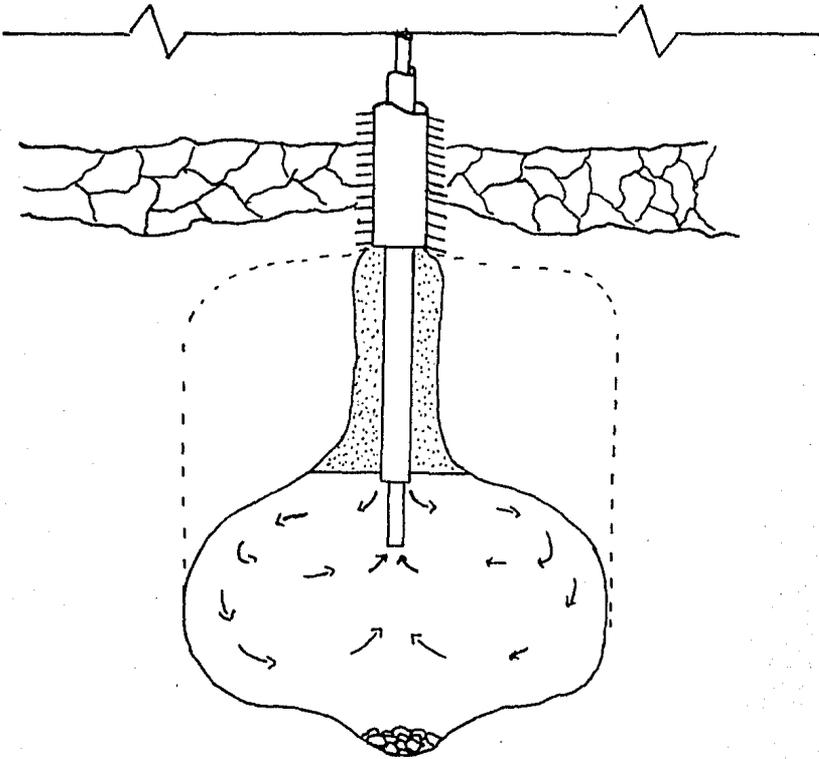
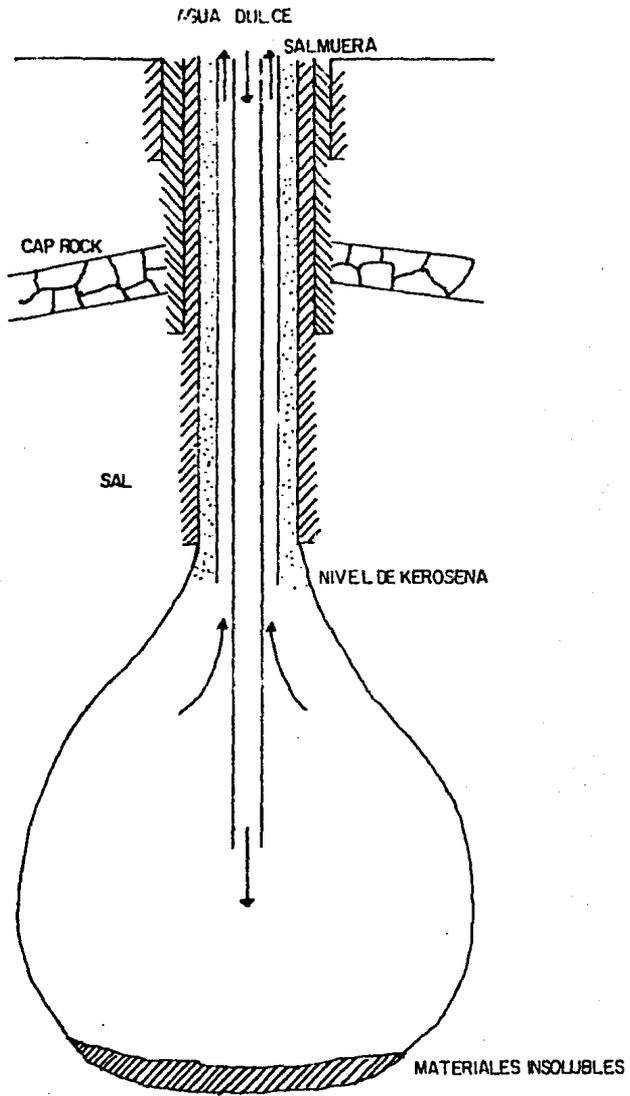


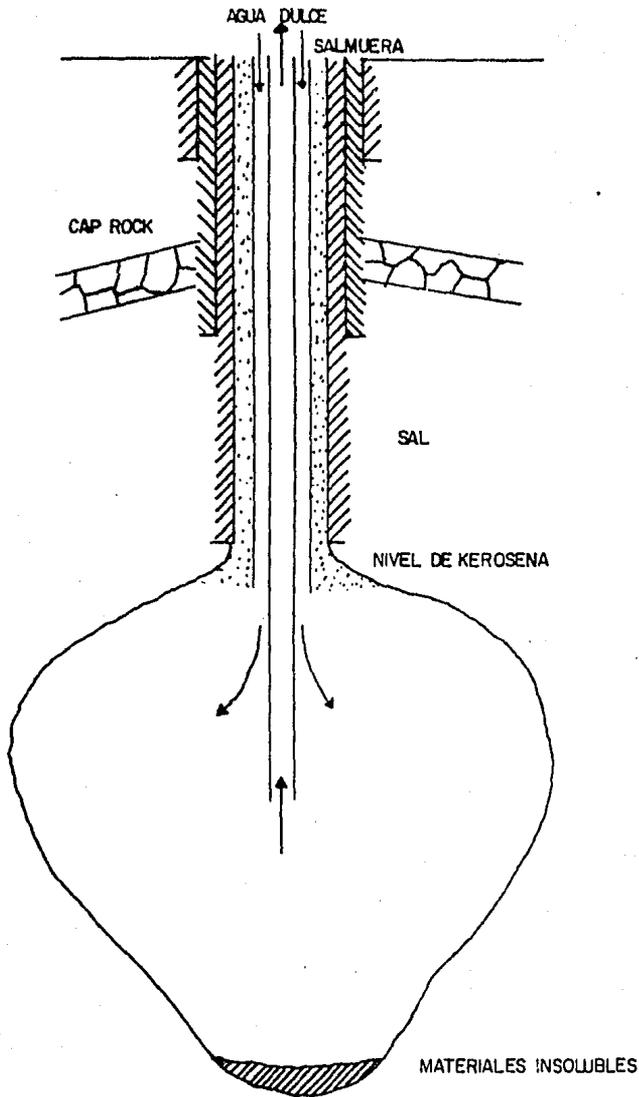
Fig. 17



FORMA GENERADA POR CIRCULACION DIRECTA

Fig B

CIRCULACION DIRECTA



FORMA GENERADA POR CIRCULACION INVERSA

Fig. 19

CIRCULACION INVERSA

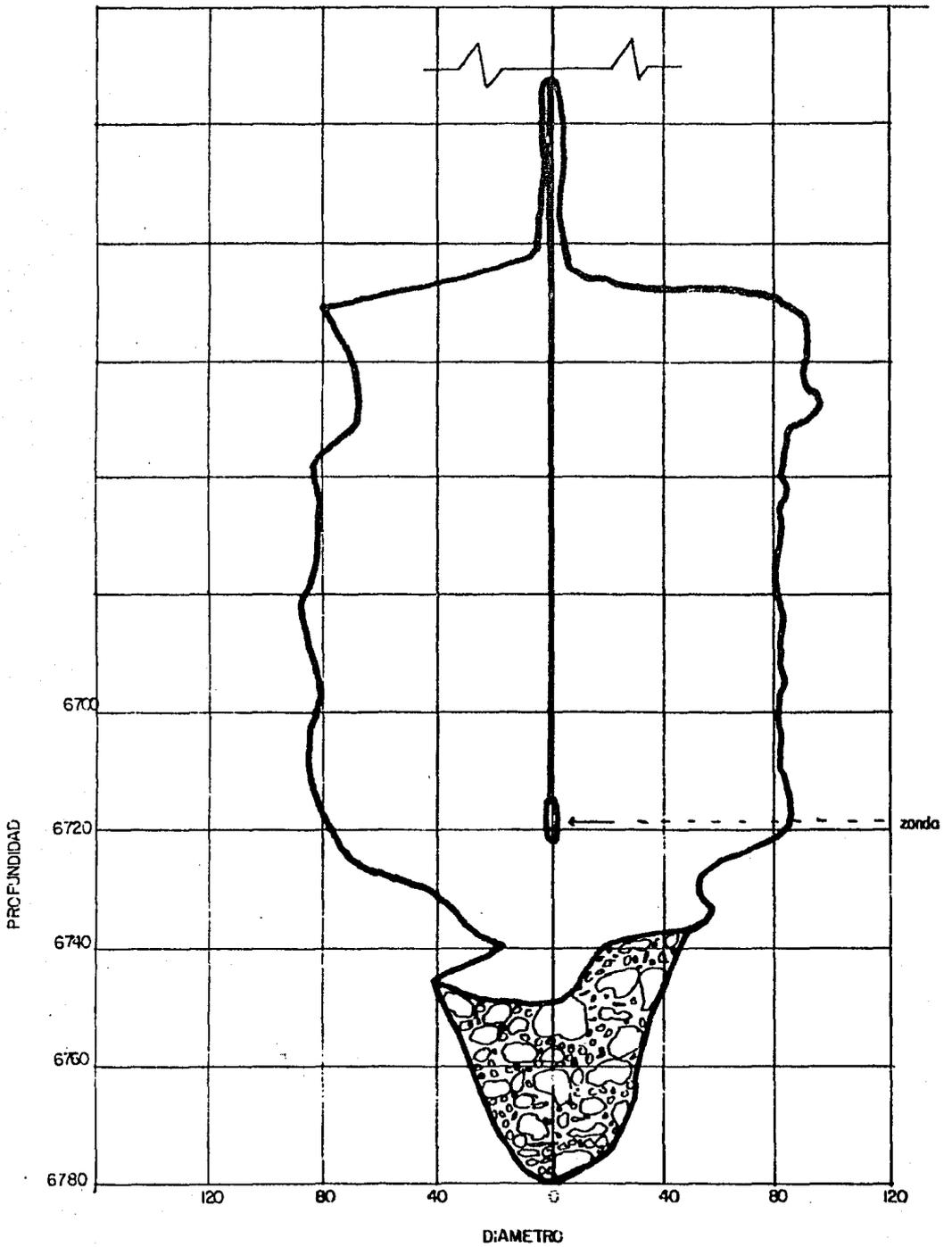


Fig. 20 SONAR-CALIPER

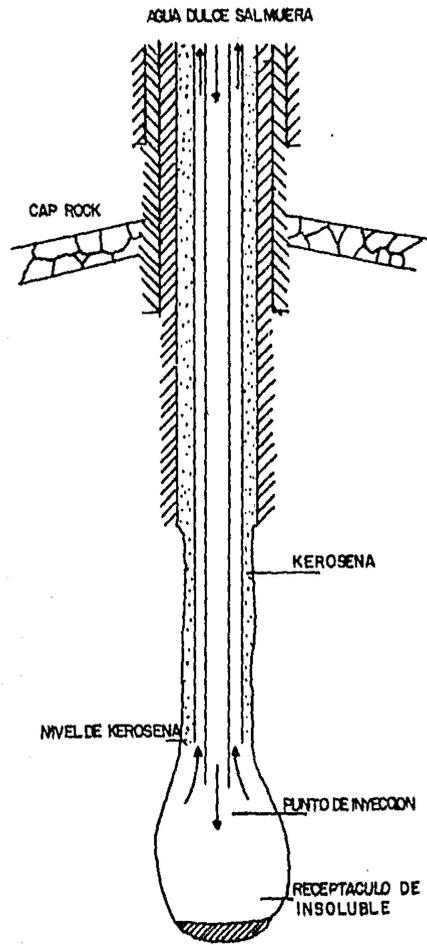


Fig. 21

SECUENCIA DEL DESARROLLO DE LA CAVIDAD POR LA TECNICA DE CIRCULACION DIRECTA DESPLAZANDO EL PUNTO DE INYECCION

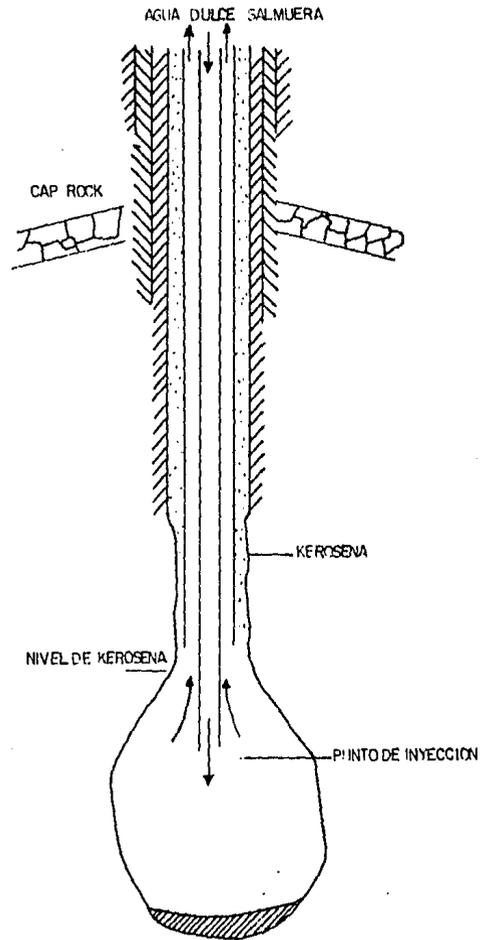


Fig. 22

SECUENCIA DEL DESARROLLO DE LA CAVIDAD POR LA TECNICA DE CIRCULACION DIRECTA DESPLAZANDO EL PUNTO DE INYECCION

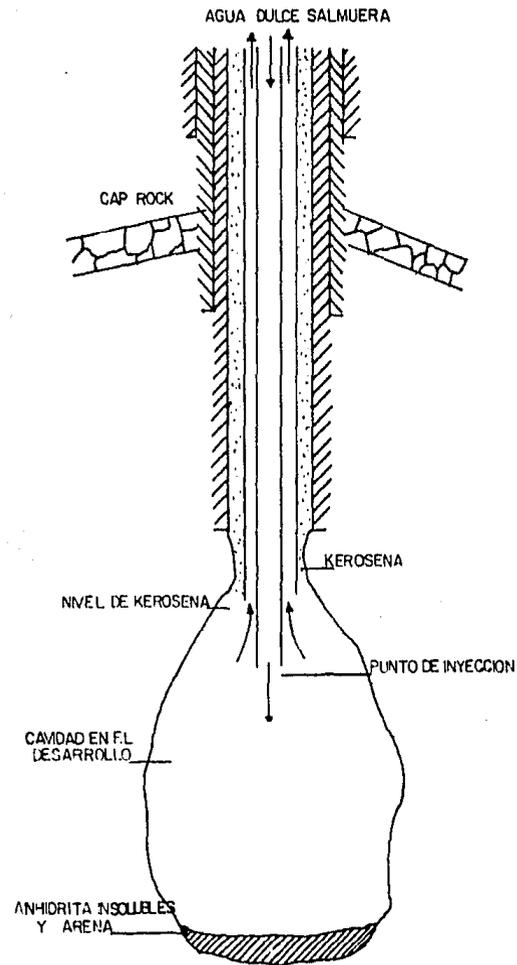


Fig 23

SECUENCIA DEL DESARROLLO DE LA CAVIDAD POR LA TÉCNICA DE CIRCULACION DIRECTA DESPLAZANDO EL PUNTO DE INYECCION

CAPITULO III

ANALISIS COMPARATIVO

Costos.- El costo de almacenaje en el subsuelo, podría -- ser mucho menor que el costo de las diferentes alternativas de almacenaje en la superficie, particularmente cuando se opera - con grandes volúmenes de hidrocarburos ligeros tales como, eta no, etileno, gas licuado potable y gas natural. Por ejemplo; el costo para construir cavernas en el oeste de Canadá puede - ser entre \$2.0 y \$3.0 dólares por barril comparado con tanques a presión, los cuales alcanzan un costo entre \$50.00 y \$60.00 dólares por barril, en tanques a presión atmosférica el costo es del orden de \$8.00 dólares por barril. Hay que hacer notar, sin embargo, que el capital total podría variar en forma sig- nificativa de acuerdo con las condiciones físicas del fluido a almacenar y de la localización (país y zona). Para comparar - lo propuesto, se presenta una gráfica comparativa de costo con tra almacenaje en cavernas, tanques presurizados, tanques a -- presión atmosférica y almacenaje refrigerado, esta gráfica -- fue realizada en el año de 1975, se encuentra expresada en dó- lares. Ver gráfica No. 24.

Los incrementos en el precio del acero ha mejorado la eco- nomía del almacenaje en cavernas. Para construir el almacena- je bajo tierra, se requiere de menos acero, por ejemplo: entre 0.25 y 0.33 pulgadas cuadradas de acero se requieren para alma- cenar cada barril en cavernas, contra 8.5 a 9.0 pulgadas cua- dradas de acero por barril en tanques a presión atmosférica.

El almacenaje por disolución de cavernas tiene gran flexi- bilidad con respecto a altos y bajos gastos de extracción e in- yección y el rango de productos que pueden ser almacenados. -

En refineras pueden ser almacenados grandes volúmenes de hidrocarburos, de la forma más económica (cavernas salinas) y -- así eliminar la posibilidad de un costoso paro de la planta, -- por falta de materia prima.

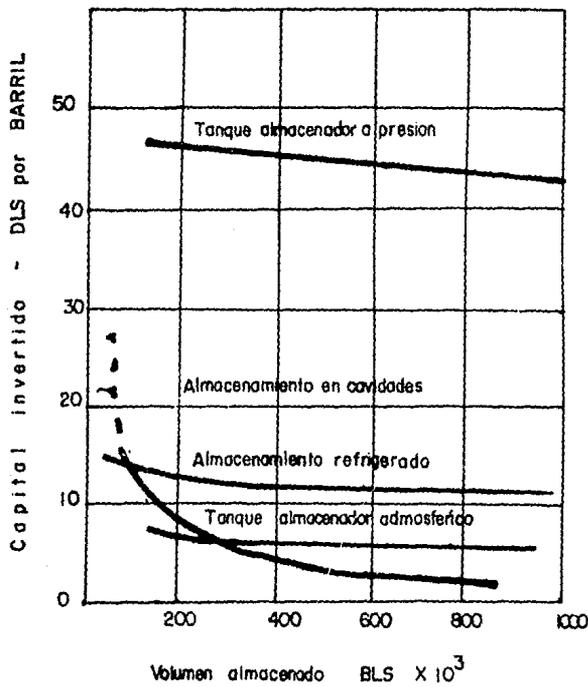


Fig. 24

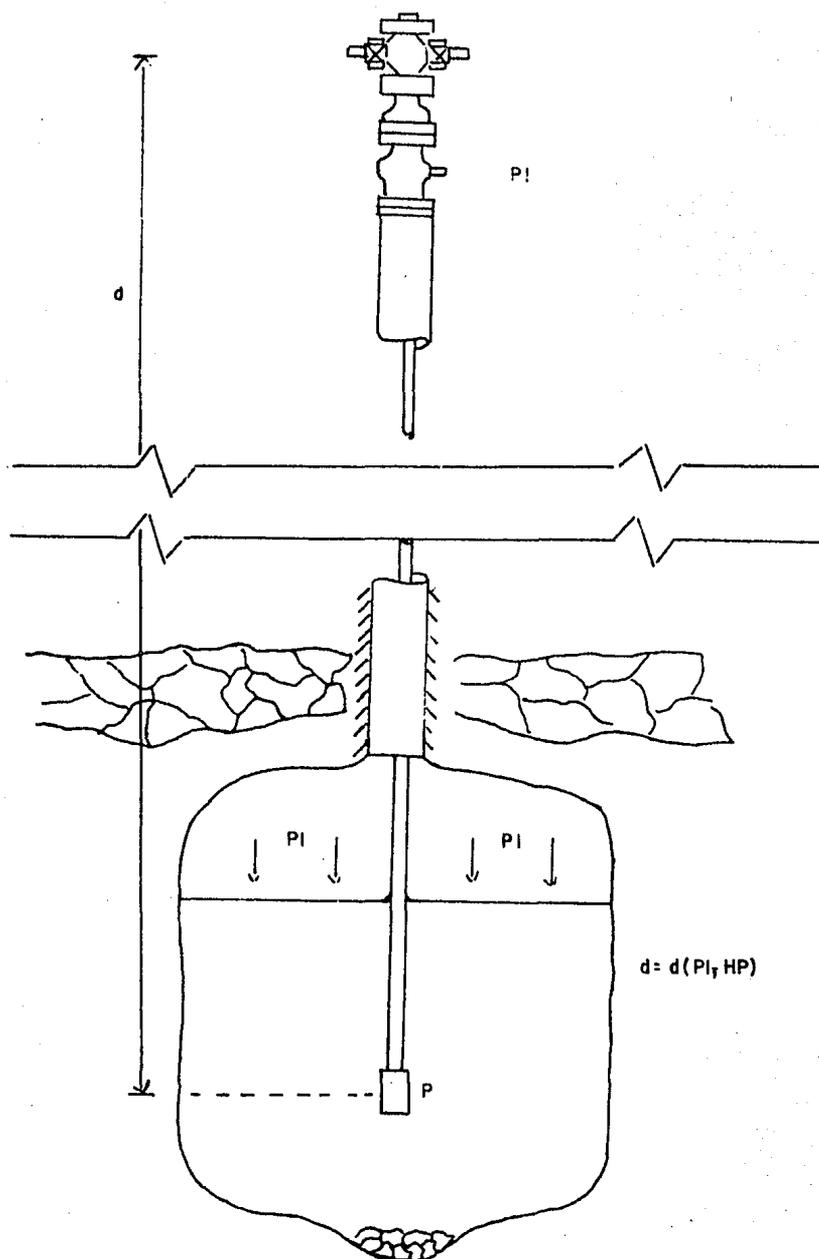
Seguridad y mantenimiento. - El aspecto de seguridad y mantenimiento de la caverna o sistemas de cavernas, dependen de los métodos usados en su operación.

El producto a ser almacenado determina el modo de operación de almacenaje. Hay dos métodos básicos, el "convencional" o "mojado" (wet), en el cual el producto almacenado es desplazado de la caverna por otro fluido inmiscible con el producto y el método "seco" (dry) en el cual el fluido desplazante no es usado y el producto es extraído por otros métodos, tales como: extracción por bombas sumergibles o mediante la expansión del gas represionado. Cada uno de los métodos anteriores presentan variaciones que pueden ser usadas de acuerdo a las condiciones que prevalezcan.

Un ejemplo común del método "mojado", consiste en desplazar el producto con salmuera saturada o casi saturada. Esto tiene una gran ventaja en la estabilidad de la caverna, debido a que ocurre una mínima disolución de sal en las paredes de la caverna. Sin embargo, el volumen de salmuera requerido presenta un serio problema, ya que es casi igual al volumen de la caverna. Otra posibilidad radica en utilizar una fuente de agua fresca o poco saturada como fluido desplazante; esto eliminaría la necesidad de la salmuera (ya que regresaría a su fuente original). Sin embargo, debe ser considerado la disolución de una cantidad considerable de sal que ocurriría en cada desplazamiento (aproximadamente un 10% del volumen original) - de aquí que sea necesario considerar este hecho en el diseño original de la caverna, ya que de no hacerlo la vida de la caverna podría ser severamente recortada por inestabilidad, como resultado de un volumen de caverna excesivo. En algunos casos, la salmuera desplazante puede ser almacenada en otra caverna y desplazada con agua fresca o bombeada. En otros casos se puede depositar la salmuera en depósitos horizontales.

La operación del método seco encuentra su mayor aplicabilidad en el almacenaje de gas natural. Cuando la operación de disolución es terminada, la salmuera es desplazada de la caverna y nunca más retornará. Este almacenaje es efectuado por inyección de gas en el interior de la caverna hasta una determinada presión máxima. La recuperación es llevada a cabo permitiendo la expansión del gas hasta una determinada presión mínima. La operación puede pararse a cualquier presión entre los dos límites. Este método de operación puede ser aplicable a cualquier sustancia en fase vapor bajo condiciones de almacenaje. Por ejemplo gases con diferentes componentes químicos no pueden ser almacenados en forma líquida, considerando que algunos componentes pueden licuarse primero, otros después y algunos no alcanzarán a licuarse y durante la revaporización de acuerdo con las condiciones físicas de presión y temperatura, estos podrían separarse en condensados y gases que difieren en composición dependiendo de sus propiedades físico-químicas. -- Por ejemplo: el calor específico del gas podría variar.

Otra forma de almacenaje seco (dry), el cual puede -- ser aplicado al almacenaje de líquidos es mediante el uso de bombas para extraer el producto de la caverna. La salmuera original es evacuada de la caverna y posteriormente, durante la inyección, el producto es bombeado como si fuera al interior de un tanque. La presión de la caverna es mantenida a un nivel aceptable. La profundidad de colocación de la bomba de fondo depende de la potencia de ésta. Debido al tamaño de la tubería (diámetro), no pueden ser introducidas bombas de -- considerable potencia. Para solucionar este problema se aplica presión por el espacio anular, el fluido utilizado puede -- ser vapor, aire o el fluido almacenante. Ahora, la profundidad de colocación de la bomba será función de la potencia propia de la bomba y la presión suministrada por el espacio anular como se muestra en la siguiente figura:



El método seco (dry) de almacenaje tiene un gran número de ventajas económicas y de conservación del medio ambiente. - La mayor ventaja es que no se necesitan depósitos para el almacenaje de la salmuera.

Otra importante consideración es el gasto a la cual el -- producto diámetro de la tubería de revestimiento y probablemente el número de cavernas.

Este tipo de almacenaje, bajo cualquier método de operación, acarrea una considerable reducción de personal, mano de obra, así como disminuye la posibilidad de desastres naturales. Esta última consideración puede jugar un papel importante donde grandes volúmenes de almacenaje son requeridos en áreas densamente pobladas.

Durabilidad.- Los trabajos realizados por W. Dreyer, establecen la vida útil de la caverna como una función de la presión interna, en otras palabras, entre mayor sea la presión interna de operación (sin exceder la presión máxima) mayor será la vida del proyecto; para tal efecto la ecuación establecida es:

$$t = \frac{3.083 \times 10^5}{(312 - cf)^{1.276}}$$

En esta ecuación las siguientes consideraciones fueron tomadas; $H = 50$ m, $d = 45$ m, $Gt = 312$ kg/cm², $v = 68.5^\circ\text{C}$, y las constantes de la roca, $a = 1.118 \times 10^{-8}\%$, $l = 1.2$, $m = 1.7$, $n = 0.94$. Se consideró un volumen de convergencia $K = 58\%$ ya que se estableció un volumen de insolubles de 42%. Estas constantes de la roca así como los valores aquí establecidos, varían para cada proyecto y la ecuación anterior tiene que ser modificada.

Analizando el fenómeno desde otro punto de vista, al aumentar la presión interna disminuye la zona de cedencia (comportamiento plástico), en el caso $P_1 = P_0$, desaparece la cedencia (se comporta como un cuerpo elástico) y el tiempo de duración de la caverna tiende a infinito.

Ecología y medio ambiente.- Con respecto al medio ambiente podemos decir que este tipo de almacenaje es virtualmente invisible, la sola evidencia puede ser un edificio de control, una casa de bomba, un árbol de válvulas y posiblemente una área de almacenaje de salmuera. Como el incremento en la demanda del petróleo y productos petroquímicos más y más almacenaje podría ser requerido. Sin embargo la sociedad y el gobierno de cada país deben estar conscientes del impacto que causaría al medio ambiente, los gigantes tanques junto a las ciudades. -- Una buena solución a este problema es el uso de cavernas bajo tierra en lugares adecuados. En este tipo de almacenaje los problemas de contaminación ambiental quedan reducidos al mínimo. También como queda reducido el espacio de almacenaje, el terreno puede ser utilizado para otros fines. Por ejemplo: -- agricultura o sus derivados.

Otras aplicaciones.- Otra posible aplicación de las cavernas es el almacenamiento de aire para la generación de energía eléctrica. Prácticamente todas las plantas de generación de energía eléctrica, presentan variaciones en el consumo de ésta, pero estas plantas prefieren mantener una producción constante de energía, por eso durante las horas no pico el exceso de energía es aplicado a la inyección de aire en una caverna salina (represionándola) para que en las horas de mayor consumo el aire represionado al ser despresurizado produzca energía eléctrica (por el movimiento de una turbina). Otra aplicación ra dica en el almacenamiento de desechos radiactivos.

CAPITULO IV

POSIBLES LOCALIZACIONES POTENCIALES EN LA REPUBLICA MEXICANA

México es uno de los pocos países del mundo que cuenta -- con extensas paliocuenas salinas, ubicadas principalmente en el sureste del país, en la región conocida como Cuenca Salina del Istmo. Ocupa la parte sur y noroeste de los estados de Veracruz y Tabasco entre los paralelos 17°00' y 18°30' latitud - norte (ver figura 26).

Dentro de la Cuenca Salina aparecen una multitud de domos salidos de muy diversas características estando la mayor parte concentrados en una área de 15 000 km² de los cuales 500 km² - son considerados propicios para ser explotados económicamente para la obtención de azufre y sal. Sin embargo esto aún es - muy arbitrario ya que los límites reales no han sido delinea-- dos con precisión para los domos salidos descubiertos de la -- cuenca de Somojovel, Campeche, al sur de Yucatán y en el Golfo de México.

Con base en los estudios realizados en la Cuenca Salina, se ha determinado que actualmente se cuenta con más de 85 es-- tructuras dómicas factibles de utilizarse como depósitos sub-- terráneos, de las cuales las más óptimas son:

Nombre	Ubicación	Cima de sal	Eje prin.	Eje sec.
Tuzandépol	Veracruz	500 m	10 km	5 km
Moloacán	Veracruz	500 m	7 km	4 km
Tunel	Veracruz	500 m	6 km	5 km
Ixhuathán	Veracruz	500 m	1 km	0.5 km
Nuevo Teapa	Veracruz	500 m	2.5 km	1 km

Palmitola	Veracruz	400 m	4 km	1 km
Pajaritos	Veracruz	800 m	3.5 km	2 km
Rabon Grande	Veracruz	1000 m	4 km	3 km
La Venta	Tabasco	800 m	6 km	4 km
El Plan	Veracruz	1000 m	6 km	4 km

Hagamos algunas consideraciones con respecto al área en cuestión.

Ductos

Converge en esta área la red de ductos procedentes de ciudad Pémex, Cactus, Samaria y La Venta entre otros.

Instalaciones existentes

En esta zona se localizan tres de los complejos petroquímicos más importantes del país. Pajaritos, Cangrejera y Salina Cruz.

Estaciones de bombeo

Existen estaciones de bombeo en: Tehuantepec, Matías Romero, Sarabia, Carranza, Paredón, Cactus, Cárdenas, La Venta, Pajaritos, Arriaga, etc.

Abastecimiento de agua

La red hidrográfica en la porción del Istmo corresponde a la vertiente del Golfo de México, las principales corrientes fluviales las constituyen: el río Coatzacoalcos y sus afluentes Cuahapa, Uzpanapa; además de un sinnúmero de arroyos tribu

tarlos y el río Tonalá con sus afluentes, los ríos Zanapa, -- Tancoachapa y el río Blasillas, los que aseguran el abasteci-- miento de agua. Con respecto al abastecimiento de agua cabe - hacer ciertas consideraciones; la salmuera producida no debe - arrojarse al río, ya que causaría serios problemas de contami-- nación tanto en la vida marina como en las tierras de cultivo, ahora bien, sólo quedan tres posibilidades:

- Aportar la salmuera a una industria para su utilización (si ésta existe).
- Inyectarla en estratos permeables en el subsuelo.
- Conducirla hasta el mar.

Considerando las posibilidades anteriores, hay que reali-- zar una evaluación económica y optar por el más óptimo y menos contaminante.

En vista de lo anterior dicha área ofrece las posibili-- des para el desarrollo de almacenamiento en cavidades salinas.

Hasta la fecha sólo un intento de este tipo de almacenaje se ha llevado a cabo en México, éste fue en los pozos: Tuzan-- depetl 7,202,201-A. El proyecto trató de realizarse en caver-- nas que ya estaban hechas con anterioridad, por Industrias Quí-- micas del Istmo, S.A. y cuyo propósito era la extracción de -- sal. El proyecto fue abandonado porque las cavernas no cum-- plían con los requerimientos necesarios para su utilización. - O sea, la forma de la caverna era totalmente irregular, enfren-- tándose a serios problemas de estabilidad y un arreglo en su - configuración era difícil y arriesgado.

En la literatura sobre este tema se advierte que las ca-- vernas realizadas para otros propósitos que no sean los de al-- macenaje, sólo en muy contadas ocasiones pueden ser utiliza-- bles para almacenaje.

Ver gráficas Nos. 25 y 25-A.

CONCLUSION

Es difícil que una caverna, que ha sido desarrollada durante un tiempo considerable y que no tuvo como finalidad desarrollar cierta configuración geométrica pudiera presentar posibilidades para utilizarla como almacenaje. Ahora bien las posibilidades de desarrollar cavernas para almacenamiento en la zona son considerables. Hay que estar conscientes de que en este instante las necesidades de almacenamiento en la zona (refinerías, puertos de exportación) tienen que ser satisfechos. Entonces desarrollar un proyecto de almacenaje en cavernas, debe estar ligado con la expansión del almacenaje de la zona y es responsabilidad de las personas encargadas de esta expansión, considerar el almacenaje más óptimo (económico y de conservación del medio ambiente). Cabe aclarar que debido al tiempo que se tarda en realizar la caverna (dos años promedio, dependiendo del volumen), el desarrollo tiene que iniciarse con anterioridad.

Todo el diseño que comprende la realización de la caverna, puede ser desarrollada con tecnología 100% mexicana, ya que se cuenta con profesionistas capacitados, así como los modelos de disolución ya desarrollados.

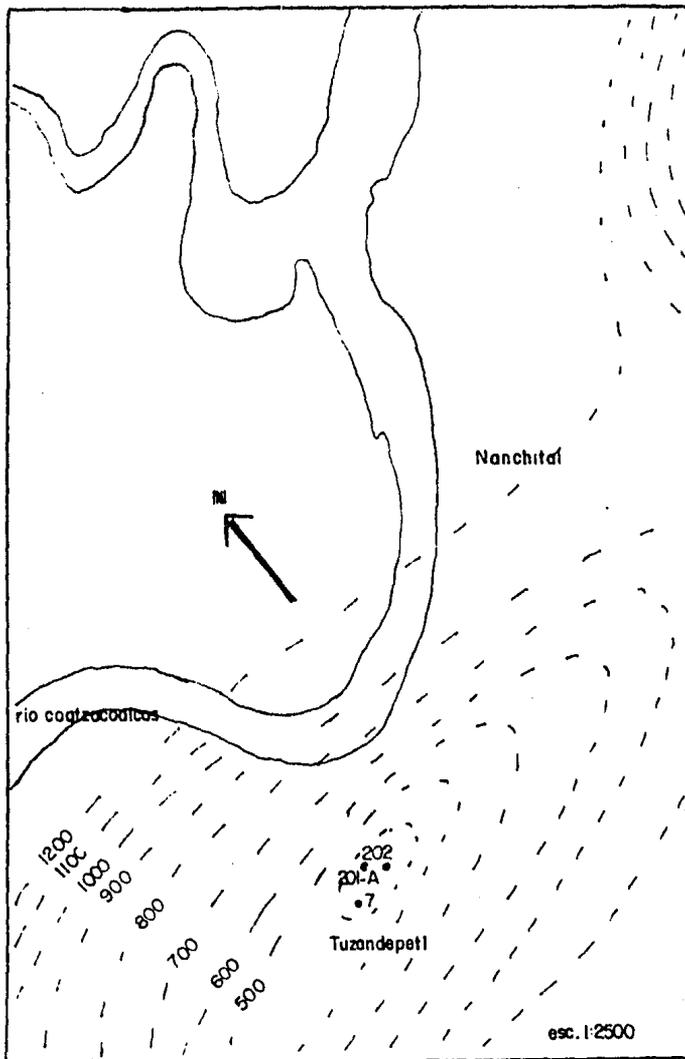


Fig.25 LOCALIZACION DE LOS POZOS TUZANDEPETL 7, 202, 201-A
Y CONFIGURACION DE LA CIMA DE LA SAL

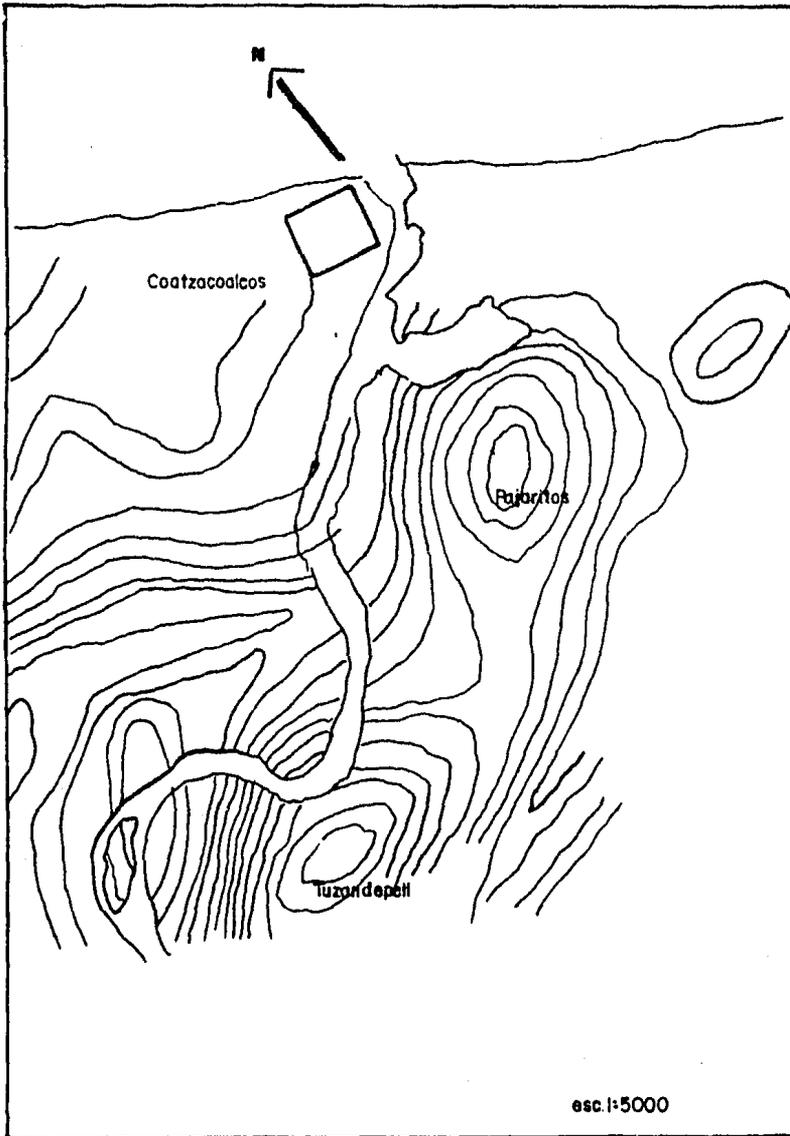


Fig 25-A

BIBLIOGRAFIA

1. Expansion of Solution Cavern Storage Technology (SPE), - 1981.
2. Principles of Structural Stability of Underground Salt -- Cavities (1960). Journal of Geophysics Research. Serrata, Sh. y Gloyna, E.
3. Salt Cavities for the Storage of Natural Gas at Hornsea - in Great Britain (1976) 13 th. World Gas Conference, London. Lambert, G. et.al.
4. Mechanical Behavior of Gas Storage Cavern in Evaporitic Rocks. Hans Ulrick Rohr.
5. Solution-Mined Salt Cavern Storage of Fluid Hydrocarbons (1978) Pustechnyk, L,t. CIM Bulletin.
6. Outlook for Underground Storage, Katz D.
7. The Science of Rock Mechanics W. Freyer.
8. Mecánica de Materiales. S.P. Timoshenko, James M. Gere.
9. Mechanics of Hydraulic Fracturing. M. King Hubbert David G. Willis.
10. Generación de Cavernas por Disolución en Estructuras Salinas para Almacenar Hidrocarburos.- Tesis de Licenciatura, I.P.N. Jorge Antonio Contreras P. y Salvador Hurtado Muñoz.

11. Consideraciones y Alternativas de Almacenamiento de GLP - en Domo Salinos. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., Urgell S. Adrian.
12. Michel T. Halbouty. Salt Dome, Gulf Region, United States and México.
13. E. López Ramos. Geología de México.