



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES "ACATLAN"

"ANALISIS DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE  
LA SAL Y SU APLICACION EN LA CONSTRUCCION  
DE CAVIDADES SUBTERRANEAS"



**T E S I S**  
**PARA OBTENER EL TITULO:**  
**DE INGENIERO CIVIL**  
**P R E S E N T A :**  
**JAVIER ERNESTO BOUCHAIN PEREZ**

ASESOR: ING. JOSE PEDRO AGUSTIN VALERA  
NEGRETE



MEXICO D.F.

ABRIL 2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis 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.

Estas líneas pretende exponer lo valioso de todas las opiniones, comentarios y aportaciones de cada unas de las personas, que participaron en este trabajo, por mínima que haya sido su colaboración, por lo tanto quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas involucradas en él.

A mi asesor y a los sinodales, que durante mi vida académica fueron mis profesores y amigos muchas gracias por haber sido parte importante en mi desarrollo como persona e inspiración para ser mejor profesionalista.

ING. JOSE PEDRO AGUSTÍN VALERA NEGRETE  
(ASESOR)

ING. LEONARDO ALVAREZ LEÓN

DR. JOSÉ MARÍA CHÁVEZ AGUIRRE

ING. FRANCISCO AZURES ROSAS

ING. MANUEL GÓMEZ GUTIÉRREZ

Quiero dar agradecimientos especiales a una persona estupenda, sencilla y buen amigo el Ing. MANUEL ARTURO RODRÍGUEZ CORREA investigador del Instituto Mexicano del Petróleo que participo como asesor externo de esta TESIS proporcionando el tema de investigación, la bibliografía necesaria, así como el apoyo material y moral para la mejor conclusión del trabajo.

Y que por cuestiones institucionales no pude ser parte de los sidonales, por todo su apoyo muchas gracias.

Igualmente a toda la gente que conocí en el IMP, a mi primo Ernesto Soto Galera que me oriento en el ultimo capitulo y que por el llegue al Instituto; a Javier , a Brenda... , muchas gracias por su apoyo.

Al Ing. Mario López Aguirre, especialista en el tema, quien me proporciono información valiosa y accesoria para la presentación del examen profesional, mi mas grande gratitud por su sencillez y amabilidad.

A mis padres

Como un testimonio de cariño y eterno agradecimiento por mi existencia, valores y formación profesional.

Por que sin escatimar esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su vida para formarme y porque nunca podré pagar todos sus desvelos ni aun con las riquezas más grandes del mundo.

Por lo que soy y por todo el tiempo que les robé pensando en mi...

Les ofrezco este trabajo resultado del esfuerzo, apoyo y el sacrificio que ustedes han inspirado en mi persona

Con todo amor y cariño.

# ÍNDICE

<b>Justificación</b>	1
<b>Introducción</b>	2
<b>Generalidades</b>	3
<b>Capítulo I</b>	
<b>Origen y características de los domos salinos</b>	
I.1 Definición de domo salino	4
I.2 Formación de domos salinos	5
I.3 Ocurrencia de los domos	7
I.4 Uso potencial de los domos	11
I.4.1 Explotación	12
I.4.2 Almacenamiento	12
I.4.3 Confinamiento	13
<b>Capítulo II</b>	
<b>Características físico-químicas y mecánicas de la sal</b>	
II.1 Mineralogía	16
II.2 Tipos de sal	18
II.3 Plasticidad	19
II.3.1 Conceptos	19
II.3.2 Comportamiento de la sal	22
II.4 Fluencia	28
II.4.1 Modelo matemático	28
II.4.2 Fluencia de la sal	30
II.5 Calidad de la sal	33
<b>Capítulo III</b>	
<b>Ensayos de laboratorio</b>	
III.1 Especificaciones y equipo	36
III.2 Ensayos de compresión uniaxial	39
III.3 Ensayo brasileño o de compresión diametral	41
III.4 Ensayos de compresión triaxial	41
III.5 Cálculo de constantes elásticas	42
III.6 Diseño de la cavidad	46
III.6.1 Formas y dimensiones	46
III.6.2 Volumen útil	47
III.7 Definición de la envolvente geomecánica	50
III.7.1 Medios de la modelización	52
III.7.2 Parámetros de la modelización	53
III.7.3 Resultados	55

## **Capítulo IV**

### **Construcción de cavidades**

IV.1	Definición y selección de sitios	57
IV.2	Etapas de construcción	59
	IV.2.1 Descripción del proceso de lixiviación	62
IV.3	Evaluación de la cavidad	67
IV.4	Almacenamiento y confinamiento	69
	IV.4.1 Almacenamiento	69
	IV.4.2 Confinamiento	70

## **Capítulo V**

### **Impacto Ecológico y análisis financiero**

V.1	Beneficios de este tipo de almacenamiento y confinamiento	75
V.2	Impacto ambiental	76
	V.2.1 Conceptos y legislación	76
	V.2.2 Posibles afectaciones ambientales	77
	V.2.3 Acciones para el control ecológico	79
V.3	Análisis financiero	83
	V.3.1 Análisis para la justificación del proyecto	85

## **Conclusiones**

### **Relación de figuras y tablas.**

### **Glosario**

### **Referencias**

### **Apéndice**

- A Gráficas de los ensayos realizados en laboratorio
- B Gráficas de los ensayos realizados en cavidades

## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad en el país se requiere de una nueva tecnología de almacenamiento en la industria del petróleo que permita acumular grandes volúmenes de hidrocarburos, que sea económica, eficiente, segura y que le permita tener una reserva estratégica de abastecimiento de hidrocarburos.

La producción de gas natural en México ha tenido un ritmo de incremento del 7.3% anual, siendo el 74.43% recuperado de Comalcalco, Cd. Pemex y Cactus de las regiones sur y Marina en Tabasco, mientras el resto de la cuenca de Burgos, plataforma marina ubicada en el golfo de México, Campo Reynosa y Golfo de Sabinas; existe un gasoducto de 1,247 km de longitud que corre desde Cactus, Chiapas a los Ramones, Nuevo León (Ing. López Aguirre).

Esta necesidad es cubierta por las técnicas de almacenamiento subterráneo puesta en práctica en las últimas décadas por países desarrollados. Una de las opciones para el almacenamiento subterráneo es aprovechar las estructuras salinas (domos salinos), los cuales poseen ciertas propiedades geotécnicas y de impermeabilidad que los hacen aptos para la construcción de cavidades de almacenamiento de hidrocarburos en sus formas gaseosa, licuada y líquida.

Las ventajas que ofrece este sistema de almacenamiento son varias, de las cuales podemos mencionar, la capacidad de guardar grandes volúmenes que varían entre 300,000 m<sup>3</sup> a 500,000 m<sup>3</sup>, beneficios durante los días de temporal, seguridad, respeto al medio ambiente y permite abaratar los costos de almacenamiento.

En el mundo actualmente existen más de 1000 cavidades disueltas en sal; en nuestro país se han construido doce cavidades en el domo salino de Tuzandépetl, Veracruz con capacidad total de almacenamiento de diez millones de barriles de hidrocarburos, obra realizada entre los años 1984 a 1992.

Este tipo de tecnología puede ser utilizada para confinar residuos peligrosos solidificados (RP), con seguridad y sin riesgos ambientales garantizando la hermeticidad de la cavidad, evitando la emigración de los desechos contenidos, técnica utilizada en diversas partes del mundo como Alemania y Estados Unidos.

En México existe una gran producción de residuos industriales, aproximadamente 8,000,000 toneladas anuales. Según cifras de la SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) de los desechos que se generan en nuestro país solo un 26% se manejan adecuadamente, el resto es manejado de maneras inadecuadas o en formas ilícitas. Las cavidades lixiviadas en sal son una buena opción para solucionar esta problemática.



## INTRODUCCIÓN

### Objetivo General

Analizar las propiedades de la sal y su aplicación en la construcción de cavidades subterráneas (en domos salinos) para el almacenamiento de hidrocarburos o confinamiento de desechos (residuos peligrosos solidificados).

El siguiente estudio tiene el objetivo de ampliar la información acerca de los domos salinos; en el aspecto de su comportamiento mecánico existen algunos trabajos ya realizados logrando buenos resultados. Esta obra toma como base las investigaciones previas esperando ampliar los conocimientos del tema.

Los domos salinos son estructuras geológicas que son empleadas en la construcción de cavidades disueltas en sal para almacenar hidrocarburos líquidos, licuados y gaseosos, o para el confinamiento de residuos peligrosos (solidificados) químico-tóxicos producto de las variadas industrias.

Este sistema de almacenamiento subterráneo o confinamiento, es la respuesta a la necesidad de la creciente industria del petróleo, para cubrir sus requerimientos de reserva de productos de manera económica, segura y protegiendo el medio ambiente.

En el capítulo I se plantean las bases y conceptos principales de lo que es un domo salino, su origen, características, el proceso de evolución y la formación geológica así como los lugares donde se encuentran este tipo de estructuras salinas.

En la sección siguiente se exponen las propiedades físico-químicas de la roca sal, para definir los tipos de halita existentes ya que sus propiedades son determinantes en su comportamiento mecánico, se explica el proceder elasto-visco-plástico de nuestro material y el modelo matemático que ejemplifica su fluencia, para finalmente llegar a la calidad de la sal.

Se continúa con los ensayos de laboratorio de muestras extraídas de las exploraciones realizadas en Tuzandépetl, Veracruz; con esta relación de información y con los resultados recabados se diseña la cavidad y su posible geometría determinando la envolvente de la oquedad y su estabilidad.

Una vez realizados los estudios de estabilidad se prosigue con las etapas de construcción de la cavidad realizando un programa de lixiviación, determinado con la calidad de sal, se evalúa la oquedad, se programan registros sonares y se realizan pruebas de hermeticidad, para continuar con el llenado del producto a almacenar o confinar.

Por último se mencionan los beneficios económicos, de seguridad y ambientales de este tipo de almacenamiento o confinamiento, y se exponen los costos realizados en la construcción de un proyecto de ingeniería de esta magnitud.

## GENERALIDADES

En el presente se ha desarrollado una tecnología de almacenamiento de hidrocarburos o confinamiento de residuos peligrosos aprovechando las formaciones geológicas en sal, los países desarrollados como Alemania, Estados Unidos y Francia son los más avanzados en la investigación del comportamiento de los domos salinos e iniciadores en el uso de éstos obteniendo excelentes resultados.

La sal tiene ciertas características geomecánicas (comportamiento elasto-visco-plástico) que la hacen utilizable en la construcción de cavidades disueltas en domos salinos, se han realizado diversos análisis de este comportamiento obteniendo conclusiones aceptables, aun así es necesario profundizar un poco más en estas investigaciones. Este estudio pretende ampliar los conocimientos en esta área basándose en los trabajos ya realizados.

La idea de almacenar hidrocarburos en cavidades fue concebida en Alemania durante la primera Guerra Mundial en 1916, cuando una compañía alemana obtuvo una patente que permitía el uso de cavernas lixiviadas en sal para el almacenamiento subterráneo de gas natural y destilados para confinar de manera segura sus combustibles (Frias Hinojosa, 1997)

En 1918 la industria de sal holandesa inició su producción por medio de lixiviación de domos salinos, como consecuencia se generaron grandes cavidades subterráneas por las actividades de explotación de la sal.

En Estados Unidos, en el año de 1955, se desarrollaron cavidades en domos salinos de almacenamiento de etileno e hidrocarburos líquidos.

En Francia se realizó el almacenamiento de hidrocarburos líquidos en Manosque, desarrollado por la empresa especializada en el ramo Géostock Geosel Alpes de Haute en el año 1967.

En el presente estos países han desarrollado un centenar de cavidades de acuerdo a sus necesidades y recursos naturales, para cubrir sus estrategias económicas en el mercado del petróleo.

En México Petróleos Mexicanos (PEMEX), en conjunto con el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y Géostock, empresa de amplia experiencia en la rama de almacenamientos subterráneos, realizaron estudios para la construcción de cavidades en la cuenca salina del Istmo de Tehuantepec localizada al sureste del país, más específicamente en el domo de Tuzandépetl, el sitio más conocido y estudiado geológicamente como resultado de la explotación petrolera en la zona.

Petróleos Mexicanos (PEMEX) cuenta actualmente con almacenamiento subterráneo de hidrocarburos con una infraestructura constituida por un número importante de cavidades, las cuales están en operación desde 1989 y se está estudiando la posibilidad de la construcción de cavernas para el confinamiento de residuos peligrosos.

## CAPÍTULO I

### ORIGEN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS DOMOS SALINOS.

**OBJETIVO ESPECIFICO.** Descripción del origen de los domos salinos.

#### I.1 Definición de domo salino.

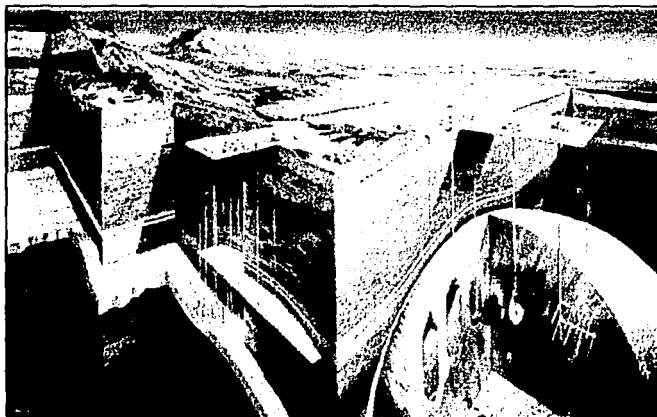


Imagen de La KIII, 1999.

Figura 1.1 Domo salino en un corte geológico

La sal es una roca monomineral donde su componente principal es la halita, que es un mineral compuesto de iones de cloro y sodio. Este mineral se presenta en el subsuelo en forma de capas extensas y gruesas o en forma de domos que llegan a tener grandes dimensiones (Benavides, 1983).

Debido a sus propiedades mecánicas particulares, si se somete la sal a una presión y a una temperatura suficiente (los valores de estos conceptos anteriores son difíciles de generalizar ya que dependen de la estructura salina y de los estratos suprayacentes) tiende a adoptar un comportamiento viscoso y a fluir hacia arriba formando los cuerpos en forma de hongo, de ahí su nombre de domo por la forma que adoptan las configuraciones geológicas. En la Figura 1.1 se muestra un domo salino en un corte geológico con tres cavidades lixiviadas y las instalaciones de superficie. A este fenómeno se le conoce como diapirismo, que es un anticlinal cuyas capas más internas han envuelto estratos de sal. Hoy en día este término se reserva generalmente a los pliegues con núcleo de carácter salífero (Foucault, 1986).

Los domos salinos son una masa esencialmente compuesta de sal gema, anhidrita y yeso. Forman cuerpos verticales con apariencia de hongo que pueden cubrir grandes extensiones y que penetran enormes espesores de rocas sedimentarias, algunos han aflorado a la

superficie. Ascenden por diferencias de densidades, pues las rocas salinas son más ligeras que las que atraviesan (caso de sal- somera, Veracruz).

## I.2 Formación de domos salinos.

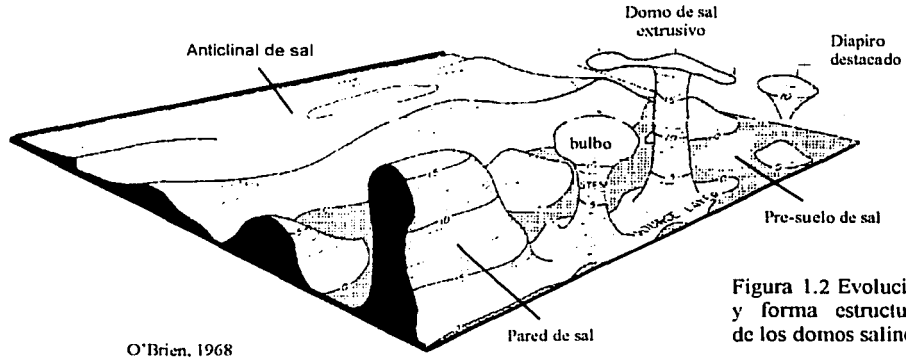


Figura 1.2 Evolución y forma estructural de los domos salinos

La sal tiene su origen en ambientes marinos y lagunas de poco fondo, donde por efecto de la evaporación y condiciones geológicas especiales, se provoca la sobresaturación de la salmuera marina, siguiendo a esto la precipitación de sales contenidas en el agua marina, como consecuencia, llegan a formarse depósitos potentes y grandes extensiones salinas que cubren miles de kilómetros cuadrados. Las sales que se depositan lo hacen en orden invertido a su grado de solubilidad, precipitándose primero los carbonatos (calizas), después los sulfatos (yesos y anhidrita), y por último los cloruros (sodio, potasio y magnesio) (Benavides, 1983).

Estos extensos depósitos de sal evaporítica son cubiertos por capas de sedimentos, roca y arenas formando grandes estratos arriba de los mismos con espesores de 4 a 5 kilómetros, provocando importantes presiones sobre la halita. Se crea un proceso geológico que hace que la sal fluya por inyección, debido a la diferencia de densidad y por sus características plásticas, esto es, que la halita se deforma intensamente por este fenómeno cuando la presión litostática de los depósitos sobreyacentes en la sal provoca que ésta fluya hacia arriba formando cuerpos en forma de domos. Si además existen fracturas y/o fallas, esto favorece la formación de estas estructuras (Benavides, 1983)

En la Figura 1.2 se muestra la evolución estructural de los diapiros. Se observa un anticlinal de sal donde se comienzan a formar pequeñas elevaciones aisladas, al pasar el tiempo, las presiones hacen fluir la sal, haciendo que la halita suba fisurando los estratos adyacentes y formando los diapiros de diferentes formas, como la pared de sal, el domo en forma de bulbo, etc. (Jackson, 1986).

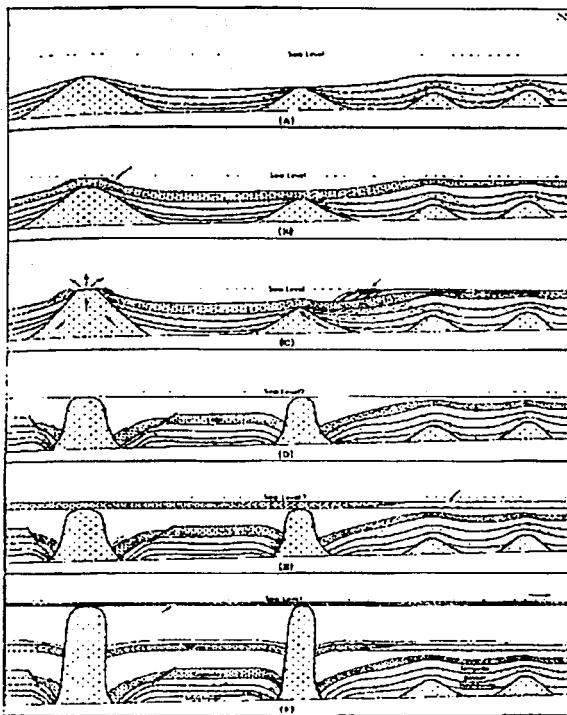
Las estructuras de sal pueden clasificarse en dos tipos:

- a).- Sin rotura de estratos
- b).- Con rotura de estratos

El primer tipo incluye el anticlinal de sal, una estructura lacolítica en la cual la sal estratificada aumenta de espesor por plasticidad, pero no rompe los estratos suprayacentes.

El segundo tipo son los diapiros que rompen los sedimentos que los cubren, éstos originalmente son horizontales antes de la intrusión. Como resultado de la inyección forzada de la masa de sal, los estratos inicialmente horizontales han sido arrastrados hacia arriba, unas pocas decenas hasta centenares de metros alrededor de los flancos de la intrusión antes de romper el equilibrio e iniciar su ascenso.

En la parte superficial del domo se encuentran rocas constituidas esencialmente por efectos de la intrusión en la sal y litología que se encuentra en contacto, resultado que se denomina cap rock, este es un cuerpo en forma de costra, situado en la parte superior de la estructura salina y que puede fluir a veces hasta algunas decenas de metros a lo largo de los flancos del domo (Foucault, 1986).



Esquema de una sección que ilustra la evolución de los diapiros de sal. Representa una sección horizontal de aproximadamente 60 millas (100 km).

- A) Las sal se formo por efecto de precipitación debido a la evaporación del agua marina.
- B) En la formación de la inyección de la sal hacia la superficie es debido al diferencial de densidades con respecto a los estratos superiores.
- C) La disminución del nivel del mar al final de la depositación abre brecha entre las capas de los sedimentos superiores, la relativa caída del nivel del mar al final de la depositación, produce corrosión local y abre brecha en las almohadas sobre los sedimentos superiores.
- D) La rápida depositación de sedimentos obliga a que se inicie el diapirismo.
- E) A causa de un levantamiento relativo del nivel de mar al final de los tiempos de esfuerzos de las arenas superiores, las calizas se depositaron como consecuencia de una zona poco profunda.
- F) En el Cretácico la formación de clásticos calcáreos tiene como consecuencia el depósito de las calizas encima de los domos.

Ref. M.P.A. Jackson, 1989

Figura 1.3 Evolución de los diapiros

En México el domo de Tuzandépetl, que es una de las masas evaporíticas de la cuenca salina de Tehuantepec ha sido fechada en el intervalo entre el Triasico Inferior y el Superior, la capa madre se encuentra a varios centenares de metros. Bajo la sobre carga de sedimentos suprayacentes la sal se colocó a través de formaciones secundarias y terciarias, hasta llegar localmente cerca de la superficie (Rodríguez, 1999).

La forma de la cima de las evaporitas se conoce gracias a los convectores-gravimétricos, al método sismológico de reflexión y a diversas perforaciones petroleras, salinas y azufreras realizadas en el sitio.

### 1.3 Ocurrencia de los domos.

En casi todo el mundo existe sal. En el ámbito mundial algunos países tienen innumerables depósitos de sal que se utilizan para almacenamiento de hidrocarburos o confinamiento de residuos peligrosos (solidificados) ver el mapa Figura 1.4. Entre ellos encontramos a Alemania, Estados Unidos y Francia, que son las naciones que más han desarrollado esta tecnología.

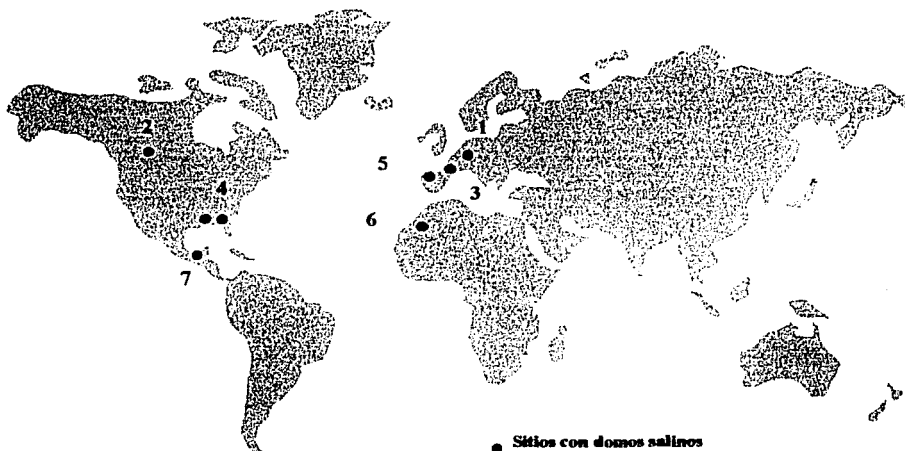


Figura 1.4

En las tablas de la 1 a la 7, el concepto de año indica el periodo de tiempo en que fueron construidas las cavernas, en Alemania en algunas oquedades se sigue trabajando en su realización por eso la tabla indica continua. La vida útil de las cavidades de almacenamiento es aproximadamente de 30 años (Rodríguez, 1999). A continuación se mencionan algunos casos mundiales de este tipo de almacenamiento o confinamiento en las siguientes tablas:

**TABLA 1: ALEMANIA**

COMPANÍA	PROYECTO	AÑO	No.CAVERNAS
HGW	Kraak	1995-continua	2
VEW	Stadfurt	1995-continua	2
PrussenElektra	Neuenhuntror	1993-1997	1
Gas-Union	Reckrod	1992-continua	2
Stadtwerke Kiel	Rönne	1992-1998	2
IVG	Etzel	1989-1998	9
Stadtwerke Bremen	Lesum	1987-1995	2
Thyssengas	Xanten	1981-1987	7
GHG	Empelde	1979-1988	3
EWE	Nüttermoor	1975-continua	16
EWE	Huntorf	1972-1979	4
EWE	Huntorf	1998-continua	4
Ruhrgas	Krummhörn	1971-1974	3

**TABLA 2: CANADA**

COMPANÍA	PROYECTO	AÑO	No.CAVERNAS
Western Resources	Hutchinson	1994-1999	70
Nortwestern UT	Alberta	1992-1999	5
Transgas	Saak	1968-1979	12

**TABLA 3: FRANCIA**

COMPANÍA	PROYECTO	AÑO	No.CAVERNAS
SNC	Geosel-Manosque	1965-1969	28
SOFREGAZ US	Tersanne		14
SOFREGAZ US	Etrez		14

**TABLA 4: ESTADOS UNIDOS**

COMPANÍA	PROYECTO	AÑO	No.CAVERNAS
Bay Gas	McIntosh, AL	1992-1994	1
Chevron	Petal, MS	1992-1993	1
Ponchartrain Gas	Napoleonville, LA	1992-1993	3
Centana	Winnie, TX	1980-1997	2
Sabine Gas	Winnie, TX	1990-1997	1
Enron	Napoleon, LA	1990-1994	2
Hattiesburg Storage	Petal, MS	1990-1991	3
Lone Star Gas	Bethel, TX	1990-1991	2
Bridgeline	Sorrento, LA	1989-1991	1
AMOCO	Stratton Ridge, TX	1988-1991	2
HNG	North Dayton, TX	1986-1989	2
TUFCO	Bethel, TX	1974-1995	3
TRANSCO	Eminence, MS	1969-1970	6
Valero	Boling, TX	1961-1982	5
SE Michigan Gas	Marysville, MI	1961-1977	6

TABLA 5: PORTUGAL

COMPañA	PROYECTO	AÑO	No.CAVERNAS
TRANGAS	Carrico-Portugal		1

TABLA 6: AFRICA

COMPañA	PROYECTO	AÑO	No.CAVERNAS
SOMAS	Mohammedia-Marruecos	1981-1988	1

En México se cuenta con innumerables depósitos de sal localizados principalmente en el sureste del país, en la cuenca salina del Istmo de Tehuantepec (aproximadamente 70) otros en el norte, más específicamente en Monterrey, localizados a 20 km de la ciudad y otro en Reynosa a 55 km al este. En general estos sitios se describen en la siguiente tabla 7 (Frias Hinojosa, 1997).

TABLA 7: Domos salinos en México.

Domo	Estado	Domo	Estado
Abanicos	Veracruz	Magallanes	Tabasco
Acalapa	Veracruz	Manati	Veracruz
Achotal	Veracruz	Mazate	Veracruz
Almagres	Veracruz	Medellín	Chiapas
Amezquite	Veracruz	Medias aguas	Veracruz
Buenavista	Veracruz	Metate	Veracruz
Cabritos	Veracruz	Moloacan	Veracruz
Cascajal	Veracruz	Moralar	Veracruz
Chichon	Veracruz	Nopalapa	Veracruz
Chichonal	Veracruz	Nuevo Teapa	Veracruz
Chinameca	Veracruz	Ogarrío	Tabasco
Cinco presidentes	Tabasco	Paltebot	Tabasco
Coatzacoalcos	Veracruz	Pajaritos	Veracruz
Colorado	Veracruz	Pedregal	Veracruz
Cosoleacaque	Veracruz	Pochitoque	Veracruz
El burro	Veracruz	Potreriños	Veracruz
El dorado	Tabasco	Punta gorda	Veracruz
El encanto		Rabón grande	Veracruz
El juile	Veracruz	Remolino del grande	Veracruz
El plan	Veracruz	Romero rubio	Veracruz
El roble	Tabasco	San Cristobal	Veracruz
El rosario	Tabasco	San José del Carmen	Veracruz
El venado		San Pedro	Veracruz



Encantada	Veracruz	Santa Ana	Tabasco
Filisola	Veracruz	Santa Rosa	Veracruz
Hidalgotitlan	Veracruz	Soledad	Veracruz
Ixhuatlan	Veracruz	Tabasqueño	Veracruz
Jaltipan	Veracruz	Tancamichapan	Veracruz
Jalupa	Tabasco	Teterete	Veracruz
La central	Tabasco	Texistepec	Veracruz
Laguna nueva	Veracruz	Tortuguero	Veracruz
La venta	Tabasco	Tuzandepetl	Veracruz
Las limas	Veracruz	Yucatecal	Veracruz
Los muertos	Veracruz	Zanapa	Tabasco
Los soldados	Veracruz		

Fuente: ALVAREZ, 1999,31.

Es importante mencionar que la cuenca salina del Istmo de Tehuantepec cubre una zona aproximada de 290 km de largo por 70 km de ancho. Ocupa toda la llanura costera que se extiende desde el sur de Veracruz, a través del norte de Tabasco y continúa hacia el este a la Península de Yucatán.

En la Figura 1.5 se muestra la localización de la zona de Tuzandépetl, Veracruz, lugar donde actualmente se cuenta con 12 cavidades de almacenamiento y se evalúa la creación futura de mas cavernas.

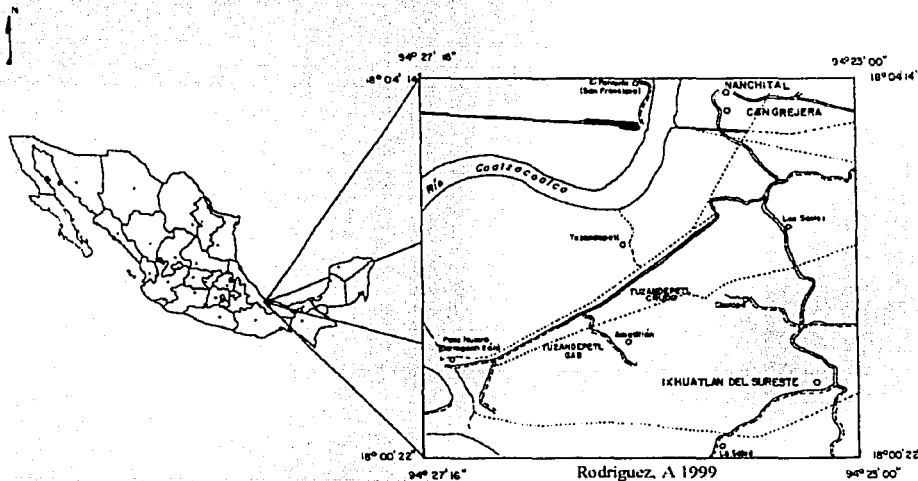


Figura 1.5 Mapa indicando la localización de Tuzandépetl

#### 1.4 Uso potencial de los domos.

Es importante mencionar los beneficios y aprovechamiento de las formaciones salinas, ya que son el resultado de la aplicación y desarrollo de muchas investigaciones realizadas por países industrializados.

Estos cuerpos de sal presentan singulares características que los hacen útiles de diferentes maneras. La explotación de sal como mineral, para almacenar productos, o para confinar desechos.

En la Figura 1.6 se muestra un ejemplo del volumen que se puede almacenar o confinar en una cavidad realizada por lixiviación donde se indica la profundidad y el diámetro de una cavidad en comparación con la torre Eiffel.

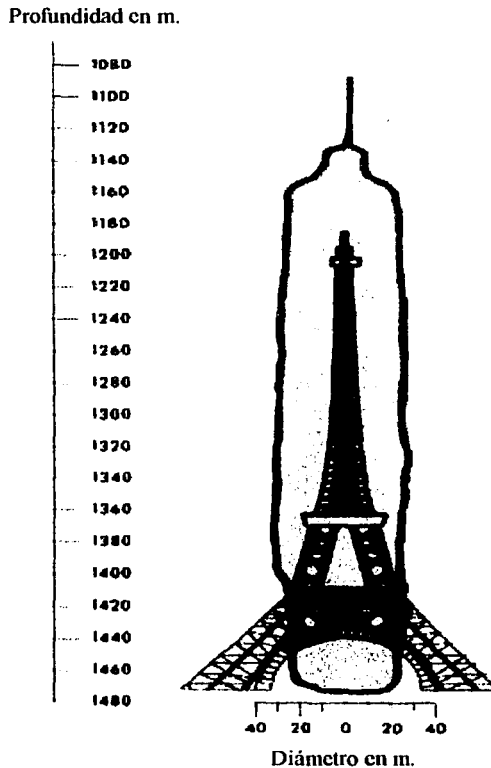


Imagen de la KBB, 1999

Figura 1.6 Torre Eiffel en comparación de una cavidad

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### I.4.1 Explotación.

Los domos salinos son utilizados para explotar la halita como mineral. La extracción de sal o sales especiales por lixiviación resulta un sistema adecuado para el medio ambiente, y una técnica más económica que la minería convencional.

La obtención de la salmuera puede llevarse a cabo a través de uno o más orificios, y por hidrofractura o lixiviación selectiva. Por lo tanto, a la tecnología de cavernas de sal puede dársele también buen uso como tecnología para la extracción de sal (KBB, 1999).

En el esquema (Figura 1.7) se ejemplifica el uso de la explotación de la roca de sal, se extraen los diferentes componentes minerales, estos son utilizados en la industria del refresco y se emplea como materia prima de fabricación en variadas industrias.

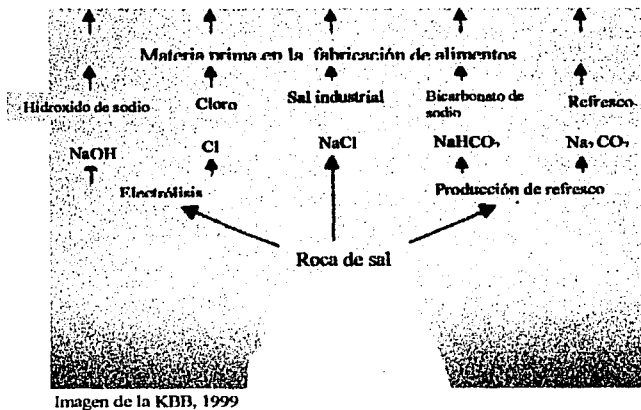


Imagen de la KBB, 1999

Figura 1.7 Roca de sal y sus derivados

### I.4.2 Almacenamiento.

La sal, por ser un material de fácil extracción disolviéndolo en agua (lixiviación); permite realizar grandes oquedades subterráneas.

El agua inyectada a través de un sondeo perforado a profundidad de hasta 2000 metros, disuelve progresivamente la sal de una manera controlada. La salmuera producida es evacuada por el mismo sondeo (Géostock, 1991).

Las dimensiones de las cavernas llegan a centenares de metros de altura y varias decenas de metros de diámetro, con volúmenes que generalmente oscilan entre 300,000 – 500,000 metros cúbicos o más.

La estabilidad de las cavidades se asegura gracias a una geometría adecuada y a un control permanente de las presiones, temperaturas y de los caudales durante la operación.

Los productos que pueden ser almacenados en estos huecos son: hidrocarburos líquidos, gases licuados y aire comprimido.

En la Figura 1.8 se muestra un corte tridimensional donde se observan tres cavidades, en la parte superior las instalaciones y el ambiente geológico del sitio.

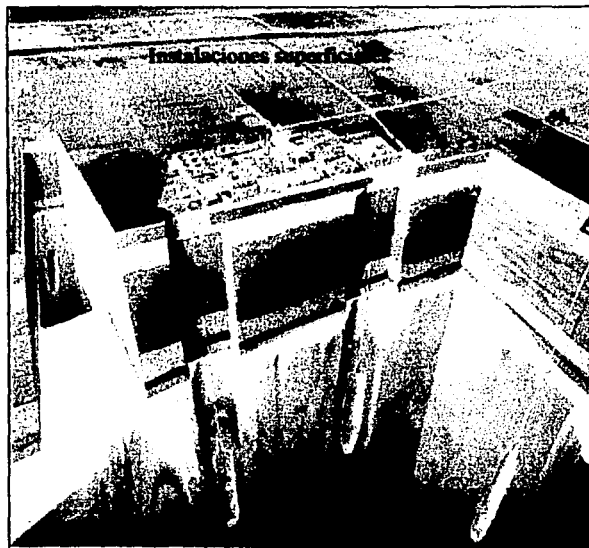


Imagen de la KBB, 1999.

Figura 1.8 cavidades lixiviadas en un corte geológico

### I.4.3 Confinamiento

En el presente la infraestructura disponible para el manejo o la eliminación de residuos peligrosos a nivel mundial es reducida, en cambio la generación de residuos es en millones de toneladas al año en todo el mundo, las oquedades en sal son una buena opción para la disposición final.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las cavernas de confinamiento para el depósito final de residuos peligrosos (solidificados) se construyen por lixiviación en formaciones salinas adecuadas para ello, a profundidades que varían entre los 700 y los 2000 metros. Los diámetros de éstas oscilan entre 40 y 45 metros, mientras que las alturas se encuentran entre 150 y 300 metros. Algunos de los residuos que se pueden confinar son: residuos radioactivos y residuos químico-toxicos (KBB, 1999).

En la Figura 1.9 se ilustra la secuencia de construcción: primero se introduce la tubería, inyectando agua por este medio, para formar la cavidad, y una vez realizada la oquedad se continúa llenando la cavidad con residuos, una vez llena se retira la tubería para confinar los desechos.



Imagen de KBB, 1999.

Figura 1.9 Procedimiento de lixiviación y llenado de cavidades

Las ventajas del confinamiento de desechos en cavernas salinas son principalmente que la permeabilidad de la roca salina es muy baja, esto hace que la hermeticidad sea alta, los espesores de sal que contienen a la cavidad actúan como barrera geológica aislando totalmente los desechos, y el contacto con el depósito sólo es posible por una perforación. Cuando la cavidad se ha llenado, en un plazo de tiempo, la masa rocosa, por plasticidad, confinará definitivamente a los desechos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El receptáculo de residuos peligrosos en cavernas subterráneas de sal es una forma económica y correcta para conservar el medio ambiente, y una manera indispensable a tener en cuenta dentro de la tecnología convencional de eliminación de residuos.

Ejemplos de países que confinan sus residuos peligrosos en cavidades lixiviadas en domos salinos:

- Alemania es el país donde más estudios se realizan para confinar desechos, la empresa NGS con la ayuda de la empresa Kaver Bau-und Betribs (KBB) especialista en estas labores, en los años 1987, 1991 y 1993.
- En Estados Unidos la compañía ONWI junto con la asesoría de la empresa KBB diseñó un proyecto para confinar residuos nucleares en el año 1985.

En la siguiente tabla 8 se muestra el número de proyectos de confinamiento de residuos peligrosos planeados por la empresa KBB en Alemania.

TABLA 8 Tipos de confinamientos para residuos.

<b>Tipo de confinamiento</b>	<b>No de proyectos</b>
Residuos nucleares en sal	9
Residuos nucleares en roca	10
Residuos químico-tóxico en sal	11
Residuos químico-tóxicos en roca	3
Tecnología general de confinamientos	12

Ref. kbb, 1999.

## CAPÍTULO II

### CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE LA SAL

**OBJETIVO ESPECIFICO.** Realizar el estudio mineralógico y de las propiedades mecánicas de la sal y efectuar la evaluación de su comportamiento en condiciones de fluencia.

#### II.1 Mineralogía.

La halita (NaCl) o sal gema se presenta en cubos perfectos con tres exfoliaciones ortogonales perfectas, en tolvas, más frecuentemente en masas grandes, de color blanco o rojizo por impurezas.

La sal es una roca compuesta fundamentalmente por halita, que es un mineral cuya composición es de iones de cloro y sodio. La sal químicamente pura tiene las siguientes proporciones: Na (39.4%) y Cl (60.6%) (Benavides, 1983)

La sal gema contiene inevitablemente impurezas, basta con observar una muestra para notar diversas inclusiones y colores diferentes, aun en pequeñas cantidades. La sal gema no es halita pura (NaCl) sino que contiene otros compuestos químicos (silvita KCl, carnalita  $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$ ). En la Figura 2.1 se observan probetas de sal en diferentes tonalidades que muestran claramente sus impurezas (Farfán, 1994).



Word salt symposium, 20000

Figura 2.1 Probetas de sal

- 1.- Sal gris clara cristalina traslúcida, resistencia mecánica media con presencia de solubles menor de 5%
- 2.- Sal gris oscura y negra, afectada por la presencia de solubles menor de 5%.
- 3.- Sal blanca cristalina resistencia mecánica alta, combinación con sal en la parte inferior con contenido de anhidrita.
- 4.- Sal con anhidrita de coloración café o negra afectada por presencia de potasio, resistencia mecánica baja.
- 5.- Sal de coloración roja, cristalización mixta, mal compactada, resistencia mecánica débil, muy soluble.

La importancia de determinar o conocer la composición química de la sal es para relacionar el comportamiento mecánico de la roca con sus características litológicas. Para la construcción de las cavidades es preferible trabajar en sal lo más homogénea posible y pura, pero los domos salinos en su entorno geológico contienen horizontes de impurezas y estos repercuten en el comportamiento mecánico y en las etapas de lixiviación de la roca.

El grado de pureza de la sal debe determinarse principalmente en:

- los minerales más solubles que la halita (NaCl).
- los minerales menos solubles que la halita.

Los minerales más solubles son principalmente algunas sales de potasio, excepcionalmente de magnesio, o la combinación de ambas.

Los minerales menos solubles son los materiales insolubles de dolomía, anhidrita y minerales arcillosos. Los minerales arcillosos pueden estar diseminados en forma más o menos coloidal. Si están en enclaves, de mayor o menor dimensión, los minerales arcillosos pueden disminuir considerablemente la resistencia mecánica de las paredes de la cavidad.

Solubilidad a 20° centígrados (peso en la solución saturada)

- Silvita      KCl                      25.6%
- Carnalita    KCl MgCl<sub>2</sub> 6H<sub>2</sub> O    27.3%
- Halita        NaCl                     26.4%

Los costos en la construcción de cavidades y de operación se incrementan debido a que la sal con solubles en capas produce mayores problemas de inestabilidad y más movimientos de la tubería que la sal pura ya que la sal con insolubles difusos induce una disminución del volumen útil. En la tabla 9 se muestra la composición química de la sal (Rodríguez, 1988).

TABLA 9

EVAPORITAS DE LOS POZOS DE TUZANDEPETL			
MINERAL	COMPOSICION QUIMICA	SISTEMA DE CRISTALIZACION	DENSIDAD (gr / cm <sup>3</sup> )
Halita	NaCl	Isométrico	2.1
Silvita	KCl	Isométrico	1.99
Carnalita	KCl MgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	Ortorómbico	1.6
Taquidrita	CaCl <sub>2</sub> 2MgCl <sub>2</sub> 12H <sub>2</sub> O	Hexagonal	1.6
Bischofita	MgCl <sub>2</sub> -6H <sub>2</sub> O	Monoclínico	1.6
Anhidrita	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ortorómbico	3

Tabla. Composición química y mineralógica de la masa salina perforada por el pozo Tuz- 300 ( Oviedo, 1985).



Los Geólogos del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) consideran que la problemática de los minerales solubles, según su forma de ocurrencia es la siguiente:

Solubles diseminados, cambian el factor de solubilidad en la sal a una mayor velocidad de disolución.

Solubles en espesores pequeños (horizontes de hasta 5 m en el domo) provocan irregularidades en las paredes de la cavidad.

Solubles en espesores grandes (horizontes de hasta 10 m en el domo) provocan irregularidades de las paredes y disolución horizontal formando cavidades pequeñas laterales en las paredes de la cavidad.

Un alto contenido de solubles cambia las características de plasticidad y fluidez de la masa salina.

Presencia de solubles en grandes bancos.- provocan cavidades grandes laterales que pueden afectar la forma y posiblemente la estabilidad de la caverna (Rodríguez, 1988).

## II.2 Tipos de sal.

La clasificación presentada fue realizada por los laboratorios en mecánica de rocas y los geólogos del Instituto Mexicano del Petróleo en la tabla 10 que se muestra a continuación:

Existen varios componentes fundamentales en esta clasificación: la halita, la anhidrita, carnalita y potasio. La combinación de estos componentes y el porcentaje de abundancia en el medio es lo que determina su comportamiento mecánico y la solubilidad al momento de hacer la lixiviación.

TABLA 10 Tipos de sal

Clases	Color o Transparencia	Cristales	Resistencia Mecánica	Grado de solubilidad	Porcentaje de Solubles (%)
1	Transparente	Compactos	Alta	Medio	<5
2	Blanca	Compactos	Alta	Medio	<5
3	Gris, traslucida	Compactos	Media	Medio	5 a 10
4	Gris oscura y negra	Compactos	Media	Medio	5 a 10
5	Café a negra	Compactos	Débil	Alto	10 a 15
6	Anaranjada y roja	Mixtos	Muy débil	Alto	15 a 30
	Rodríguez, A. 2000				

Otra clasificación existente es la realizada por Géostock que divide a la sal en tres clases: clásica, rápida y compleja.

Clásica: es la sal más limpia, carente de impurezas mineralógicas (sales potásicas y no potásicas). Esto le confiere homogeneidad, propicia para la lixiviación (Géostock, 1991)

Rápida: por su contenido de sales solubles (sales de potasio) es la respuesta más veloz a la lixiviación.

Compleja: en este proceso es variable: de disolución rápida o lenta, según su contenido de minerales solubles (potasio) o insolubles (carbonatos, etc.) y arcilla.

Las sales encontradas en Tuzandépetl se pueden clasificar de la siguiente manera, como se muestra en la tabla 11 donde se indica el porcentaje de fluencia.

TABLA 11. Clasificación de la sal

Descripción	Clase	Resistencia a la tracción	Porcentaje de Fluencia $\epsilon_0$ (%)
Sal gris clara con granos finos	Clásica	2.3 a 1.5	6
Sal gris con granos finos a medianos con impurezas (anhidrita)	Rápida	1.6	5
Sal impura con granos finos a medianos	Compleja	1.2 a 1.5	4

Nota: Los valores de  $\epsilon_0$  corresponden a la deformación axial que experimenta una muestra bajo una carga de 100 bares durante 1000 días, realizada por el profesor Vouille.

## II.3 Plasticidad.

### II.3.1 Conceptos.

Los materiales dúctiles, que comprenden el acero estructural y muchas aleaciones de otros materiales y rocas, se caracterizan por su capacidad para fluir a temperaturas normales. Cuando se somete la probeta a carga creciente, su longitud aumenta primero linealmente con la carga y en una tasa muy lenta. Sin embargo, después de que se alcanza un valor crítico del esfuerzo, la probeta sufre grandes deformaciones con un pequeño aumento de la carga aplicada.

La mayor parte de los elementos estructurales se diseñan para sufrir pequeñas deformaciones, que involucran sólo la parte lineal del diagrama esfuerzo-deformación unitaria (Beer, 1996).

Si las deformaciones causadas en una probeta, por la aplicación de cierta carga, desaparecen al quitar la carga, se dice que el material se comporta elásticamente. El máximo valor del esfuerzo para el cual se obtiene un comportamiento elástico es el límite elástico del material. Pero si la deformación ( $\epsilon$ ) no vuelve a cero después de retirar la carga, entonces se ha producido una deformación permanente o plástica del material.

La fuerza por unidad de área, o intensidad de las fuerzas distribuidas sobre una sección dada, se conoce como el esfuerzo en dicha sección y se designa por la letra griega " $\sigma$ " (sigma) se denota de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Las unidades métricas en SI con "P" en newtons (N) y "A" en metros cuadrados ( $m^2$ ), el esfuerzo  $\sigma$  se expresa en ( $N/m^2$ ) esta unidad es un pascal (Pa), sin embargo, el pascal resulta ser una cantidad pequeña y en la práctica se utilizan sus múltiplos:

$$1 \text{ KPa} = 10^3 \text{ Pa} = 10^3 \frac{N}{m^2}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 10^9 \frac{N}{m^2}$$

$$1 \text{ MPa} = 10 \text{ bares}$$

La deformación " $\varepsilon$ " es el alargamiento o desplazamiento total " $\delta$ " sobre la longitud total " $l$ " de la probeta o barra, se denota de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l}$$

Puesto que el alargamiento y la longitud están expresados en las mismas unidades, la deformación " $\varepsilon$ " es una cantidad sin dimensiones. Así el valor numérico obtenido en el sistema SI de unidades métricas se considera:

$$\varepsilon = \frac{\mu m}{m} \quad \text{micrómetros}$$

En efecto, si observa la gráfica (Figura 2.2) notamos que si descargamos una probeta cargada a partir del punto A, la curva no regresa a O sino a C, dando lugar a la deformación permanente. Si se recarga la probeta a partir de C, la deformación sigue una recta sensiblemente paralela a OL, y el dominio de elasticidad se incrementa.

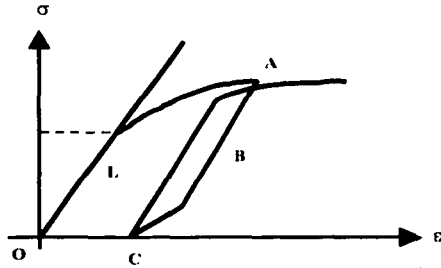


Figura 2.2 Gráfica de fluencia

Este comportamiento se caracteriza por la existencia de un límite de esfuerzo " $\sigma$ " (límite elástico) debajo del cual no existen deformaciones permanentes (Beer, 1996).

Los valores aproximados de esfuerzo ( $\sigma$ ) y de la deformación ( $\epsilon$ ) para una probeta de roca de sal varían en un rango de 200 a 350 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) y las deformaciones oscilan entre 20 a 39 ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) micrómetro, estos resultados son para una probeta de sal gris clara con granos finos.

Un material con comportamiento plástico explica su conducta en la siguiente gráfica (figura 2.3) idealizando que es un material elastoplástico para el cual el diagrama esfuerzo-deformación consta de dos segmentos rectos.

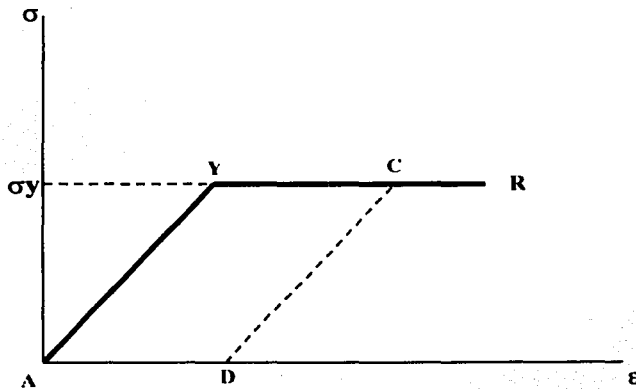


Figura 2.3 Gráfica de elasticidad

Puede notarse que en el diagrama esfuerzo-deformación que se presenta, el esfuerzo " $\sigma$ " es menor que el esfuerzo de fluencia " $\sigma_y$ ", el material se comporta elásticamente y obedece la ley de Hooke. Cuando " $\sigma$ " alcanza el valor " $\sigma_y$ ", el material empieza a fluir y se deforma plásticamente bajo carga constante. Si se retira la carga, la descarga tiene lugar a lo largo de una recta CD paralela a la porción inicial AY de la línea de carga. El segmento AD del eje horizontal representa la deformación plástica o permanente resultante de la carga y descarga de la probeta.

### **II.3.2 Comportamiento mecánico de la sal.**

La sal es un material con comportamiento elasto-viscoplástico cuando es sometida a esfuerzos mecánicos, de una manera muy general al realizar la lixiviación (disolución de la sal) en un domo salino para crear una cavidad se modifica el entorno geomecánico transformando el estado de tensiones en el macizo de la estructura salina, esto genera presiones en el entorno de la cavidad provocando que la sal fluya y la oquedad pierda volumen.

Para una cavidad tipo ya sea para almacenamiento o confinamiento, las presiones (una presión geostática de alrededor de 230 bares) a las que está sujeta dependen de la profundidad y de la geometría en que la oquedad es lixiviada, con estos datos y conociendo las características de la sal se puede realizar un cálculo de tensiones alrededor de la caverna por medio de algún programa general tridimensional o por medio del elemento finito.

Las presiones máximas de explotación son generalmente del orden de 0.18 (bares) por la profundidad (en metros) de la zapata de la tubería de revestimiento, esto indica que si la cavidad es realizada a 1000 m de profundidad la presión sería de 180 bares.

Se ha explicado que la sal está sujeta a presiones, pero nuestro interés es exponer cómo la roca de sal reacciona a las exigencias mecánicas a la que es sometida. El comportamiento mecánico de la halita es afectado por las características físico-químicas del material, como se ha expuesto en los párrafos anteriores de este capítulo, la halita encontrada en la naturaleza no es pura y contiene impurezas, pero las cavidades serán creadas en las secciones de sal lo más pura posible.

La litología de la roca de sal gema hace referencia a su mineralogía, textura y fábrica, junto con un nombre o término descriptivo de algún sistema de clasificación, en la mecánica de rocas y su aplicación en la ingeniería podemos clasificar a las rocas basados en dos propiedades importantes de estas: la resistencia a la compresión simple y el módulo de elasticidad.

Esta clasificación fue realizada por Coates y Parsons, y después modificada por Miller siendo ésta la que se describe a continuación en la tabla 12:

TABLA 12 Clasificación de la roca basada en la resistencia ( $\sigma$ )

Clase	Descripción	Resistencia a compresión simple (kg / cm <sup>2</sup> )
A	Resistencia muy alta	> 2,250
B	Resistencia alta	1,120 - 2,250
C	Resistencia media	560 - 1,120
D	Resistencia baja	280 - 560
E	Resistencia muy baja	< 280

Fuente Stagg-Zinkiewicz, 1970.

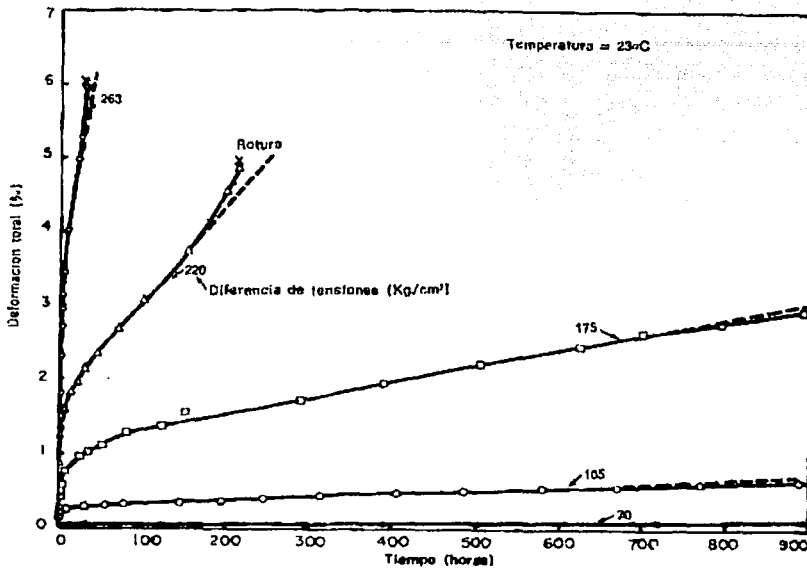
La resistencia a la compresión simple para la sal gema varia de 200 a 350 (kg/cm<sup>2</sup>) aproximadamente, por lo tanto la halita entra en las categorías D y E de la clasificación correspondientes a la resistencia baja y muy baja, que comprenden rocas porosas o de baja densidad como la sal gema.

Con objeto de estimar la magnitud y la velocidad de cierre de las cavidades previstas en estructuras salinas es necesario determinar las propiedades de fluencia del material. Suponiendo un estado hidrostático de tensiones en la roca salina a profundidad, la distribución de tensiones en torno a una cavidad esférica es tal que la tensión radial es la tensión principal menor, tanto la tensión principal intermedia como la máxima son iguales a la tensión orientada tangencialmente a la cavidad.

Los movimientos radiales en función del tiempo dependen, por lo tanto, de las características de fluencia de la sal gema en tracción triaxial (Stagg, 1968).

En la Figura 2.4 se dan los resultados de cinco ensayos de fluencia realizados por tracción triaxial, en cada curva se ha indicado el desviador ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) con el que se ha realizado cada ensayo, pueden verse las distintas partes de la curva clásica de fluencia: la parte elástica instantánea, la parte curva que representa la fluencia transitoria, la parte recta que indica la fluencia permanente, y la fluencia acelerada hasta la rotura (sólo para desviadores de 264 y 220 kg/cm<sup>2</sup>); las muestras sometidas a desviadores de 264 y 220 (kg/cm<sup>2</sup>) se rompieron 29 y 214 horas después de aplicar la carga.

Las muestras sometidas a desviadores más pequeños mostraron una velocidad de fluencia por encima de la fase de deformación permanente.

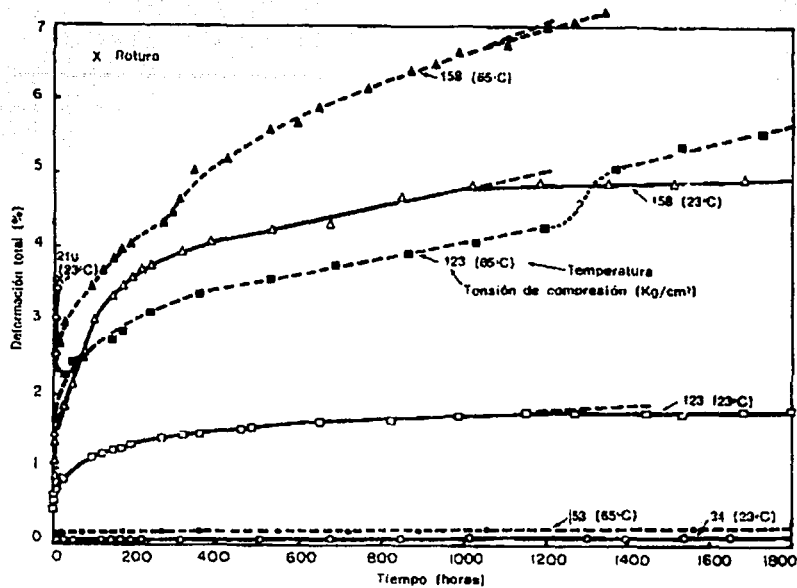


Curvas de fluencia en tracción triaxial de la sal gema

Figura 2.4 Gráfica de fluencia en tracción triaxial de la sal

En la Figura 2.5 se muestran las curvas de fluencia de ocho ensayos de compresión simple. Los símbolos en blanco representan ensayos realizados a 23 °C y los negros a 65 °C. Si se comparan las dos muestras cargadas a 123 (kg/cm<sup>2</sup>) se observa que para la temperatura más alta, la deformación total es aproximadamente doble a la del ensayo a 23 °C y la velocidad de fluencia permanente es también mayor.

En la Figura 2.6 se comparan las velocidades de fluencia permanente en ensayos de tracción simple y triaxial. Hasta una diferencia de tensiones 162 (kg/cm<sup>2</sup>) existe poca diferencia en las velocidades de fluencia y por debajo de 70 (kg/cm<sup>2</sup>) la velocidad de fluencia es despreciable en ambos ensayos.



Curvas de fluencia en compresión simple de la sal gema

Figura 2.5 Gráfica de fluencia en compresión simple

Como se observa en las gráficas anteriores la halita tiene un proceder elasto-plástico con fluencia. Este comportamiento elasto-plástico de la sal es afectado por fenómenos térmicos (aumentos de temperatura) los cuales repercuten de una manera importante en su conducta mecánica, haciendo que ésta tenga un proceder viscoso (Farfán, 1994).

La sal se caracteriza por tener un comportamiento elasto-visco plástico y una manera para representar su proceder es mediante modelos reológicos como los que a continuación se enuncian.

Gracias a la analogía entre las leyes de comportamiento de los materiales (elásticos, plásticos, viscosos) y al comportamiento conocido de ciertos objetos (resorte, amortiguador, patin) ha sido posible representar el proceder de los materiales:



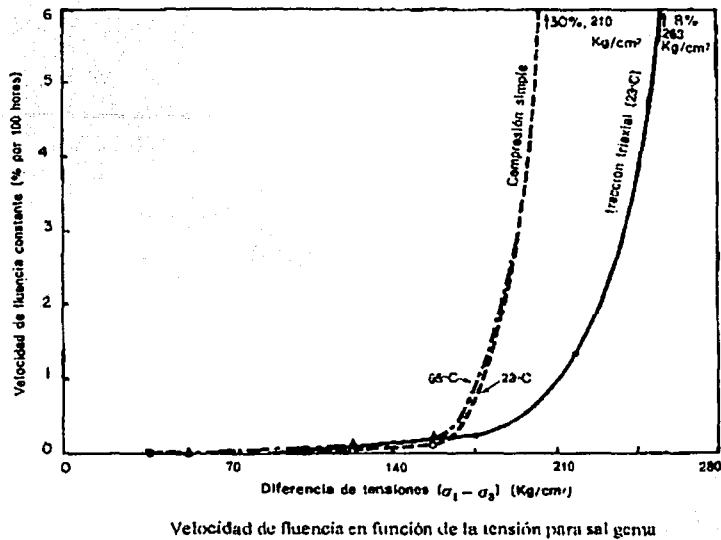




Figura 2.6 Gráfica de velocidad de fluencia

Se utilizan entonces:


1.- El resorte para representar la ley de Hooke es:

  $\sigma = E \epsilon$ ; donde E es el módulo de elasticidad o de Young

2.- El amortiguador para representar la ley de Newton es:

  $\sigma = \eta \dot{\epsilon}$ , donde  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad

3.- El patín de Saint-Venant para representar la plasticidad:

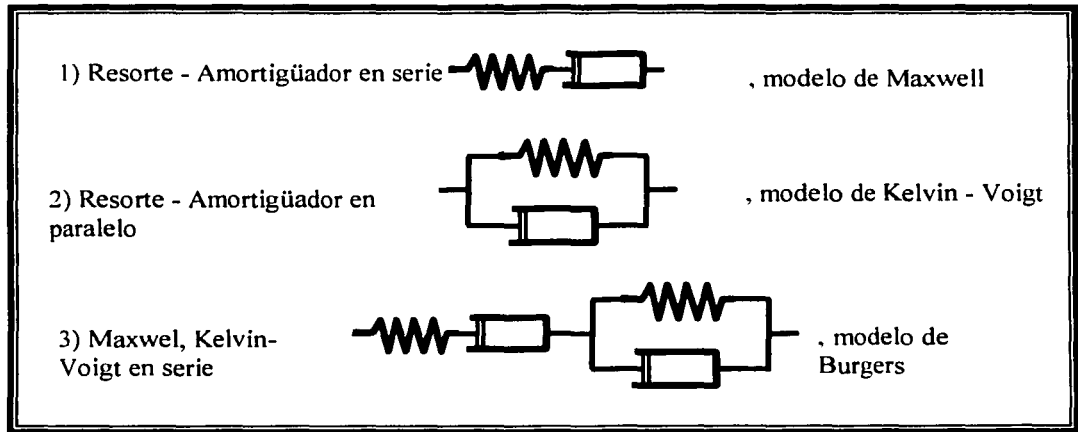
  $- S \leq \sigma \leq S, \epsilon$  tiende a 0  
 $|\sigma| \geq S, \epsilon$  indeterminado

donde:

S = Esfuerzo límite que marca el inicio del comportamiento plástico del material.

Empleando estas tres representaciones es posible utilizar modelos reológicos ya existentes como se explica a continuación en la figuras 2.7 respectivamente de cada caso:

Esquemas de los modelos reológicos mencionados:



Fuente Nuñez Farfán, 1994.

Figura 2.7 Modelos reológicos

### 1. El modelo de Maxwell

Este modelo está compuesto por un amortiguador y un resorte conectados en serie el cual procede de la siguiente manera: al ser aplicado el esfuerzo, éste se concentrará con la misma intensidad en ambos elementos, puesto que son colineales, pero el proceso de deformación será diferente en cada elemento de acuerdo con sus características mecánicas (Farfán, 1994).

### 2. El modelo de Kelvin - Voigt

En este modelo los cuerpos se encuentran en paralelo, provocando que la carga se reparta en los dos cuerpos dependiendo de las características de cada elemento, a la "G" del resorte y de la " $\mu$ " del amortiguador.

### 3. El modelo de Burges

En este modelo se puede aplicar la superposición del comportamiento de los cuerpos que lo constituyen, dando como resultado que la suma de las deformaciones de los modelos es el comportamiento de éste.

## II.4 Fluencia.

### II.4.1 Modelo matemático.

Una representación por analogía no es utilizable para el comportamiento en tres dimensiones. Es por esto que el modelo reológico completo será un conjunto de leyes, que rigen el comportamiento del material estudiado.

Para representar el comportamiento de la sal se utiliza la ley de Lemaître que es la que más se asemeja al proceder del material (Farfán, 1994).

La formulación de esta ley es:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{vp}$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = A \varepsilon_{vp}^{\left(\frac{1}{m}\right)} \varepsilon_{vp}^{\left(\frac{1}{n}\right)}$$

siendo:

$\varepsilon_e$  = deformación elástica

$\varepsilon_{vp}$  = representa la parte visco- plástica de la deformación (  $\mu\text{m}/\text{m}$  )

$\sigma$  = representa el esfuerzo de tensión (bares)

$C$  = límite de plasticidad del material (bares)

$K$  = parámetro de rigidez visco-plástica (bares)

$\beta$  = parámetro exponente de la tensión

$\alpha$  = parámetro exponente del tiempo

$t$  = tiempo en días

donde,  $A$ ,  $m$  y  $n$  son los parámetros de ajuste. Recordemos que no existe un modelo analógico para esta ley.

La integración de la ecuación diferencial resulta:

$$\varepsilon_{vp}(t) = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^\beta t^\alpha$$

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $K$  = parámetros de Lemaître

con la condición:

$$\varepsilon_{vp}(0) = 0$$

### Adaptación de la ley de Lemaître a la Mecánica de suelos.

Para tomar en cuenta un eventual dominio de elasticidad, hacemos:

$$\varepsilon_{vp}(t) = \left(\frac{\sigma - 2C}{K}\right)^\beta t^\alpha$$

La expresión entre paréntesis rectangular debe anularse en el intervalo  $[-2C, 2C]$  por lo tanto  $2C$  representa el límite de plasticidad del material y en este intervalo no existe deformación plástica.

Para tomar en cuenta los ensayos triaxiales, esta ley puede adaptarse reemplazando  $\sigma$  por el desviador  $S$ .

$$S = \sigma_{axi} - \sigma_{lat}$$

Donde  $S$  es la diferencia entre el esfuerzo axial y lateral impuesto a la probeta.

La ley completa se vuelve entonces:

$$\varepsilon = \frac{S}{E} + \left(\frac{S - 2C}{K}\right)^\beta t^\alpha$$

La ley de Lemaître se simplifica de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{vp}(t) = \left(\frac{\sigma - 2C}{K}\right)^\beta t^\alpha$$

$\alpha$  es un parámetro que depende nada más del origen de la sal (edad, origen, cristalización). El coeficiente K se expresa en bares y se calcula en función de la unidad de tiempo; los valores de  $\alpha$  y de  $\beta$  se van ajustando durante los ensayos de laboratorio; es necesario conocer el historial del material para deducir su comportamiento futuro (Farfán, 1994).

Si se sujeta la sal a una sollicitación, su respuesta será la suma de una respuesta elástica,  $\epsilon_e$ , y de una diferida (fluencia de desplazamiento y relajación de esfuerzos  $\epsilon_{vp}$ )

La ley de Lemaitre da un enfoque global a los problemas de fluencia ya que pretende ligar diferentes parámetros medidos en un ensayo mecánico y representar los resultados por leyes exponenciales o logarítmicas.

#### II.4.2 Fluencia de la sal.

La fluencia de la sal es un fenómeno natural del macizo rocoso salino, que para su estudio se deben incluir todos aquellos factores que condicionan este fenómeno y se involucran en los conocimientos de:

- Calidad de sal.
- Estudios de mecánica de rocas en los núcleos (ensayos de laboratorio).
- Análisis y conclusión del comportamiento de las presiones de los pozos.
- Monitoreo topográfico superficial.
- Estudios químicos de los núcleos.

La ley de fluencia escogida para describir el comportamiento de la sal permite presentar la deformación visco-plástica según la fórmula o ley de Lemaitre:

$$\epsilon_{vp} = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^\beta t^\alpha e^{\left( \frac{-A}{T} \right)} \quad \text{Ley de Lemaitre}$$

Esta función hace intervenir el desviador de tensiones “ $\sigma$ ”, el tiempo “ $t$ ” y un factor que toma en cuenta la temperatura  $e^{(-A/T)}$  (Gcostock, 1991).

En donde:

$\epsilon_{vp}$	=	deformación visco-plástica
$\alpha, \beta, K$	=	coeficiente de Lemaitre
$t$	=	tiempo
$\sigma$	=	desviador de tensiones
$e^{\left( \frac{-A}{T} \right)}$	=	término corrector de las temperaturas
$A$	=	coeficiente d'Arrhenius
$T$	=	temperatura

La deformación visco-plástica, tal como se le define aquí, implica un límite de plasticidad nulo. Los investigadores G. Vouille, S. M. Tijani y B. Hugout han mostrado que la sal se comporta como un líquido de alta viscosidad. En consecuencia, el límite de plasticidad de la sal gema es muy débil y puede considerársele nulo. Este límite es igual a dos veces la cohesión, por lo que podemos considerar la cohesión de la sal nula ( $C=0$ ) (Farfán, 1994).

No se puede afirmar que una sal es más fluente que otra utilizando solamente la ley de Lemaître que comprende tres parámetros ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $k$ ). Por lo tanto, se ha escogido un cuarto parámetro que representa globalmente las capacidades de fluencia:  $\varepsilon_0$  que es el valor de la deformación visco-plástica expresada en porcentaje (de una muestra sometida durante un año (365 días) a un desviador de tensión de 10 MPa) (Géostock, 1991).

De acuerdo al modelo de Lemaître, la velocidad de deformación visco-plástica se puede relacionar a la tensión y a la deformación visco-plástica con las 3 ecuaciones siguientes:

$$1. \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{vp}$$

$$2. \quad \varepsilon_{vp} = 10^{-6} \xi \alpha$$

$$3. \quad \frac{d\xi}{dt} = \left( \frac{\sigma}{k} \right)^{\beta}$$

En las que:

$\varepsilon$  = deformación total

$\varepsilon_{vp}$  = deformación visco-plástica

$\sigma$  = desviador de tensiones

$E$  = módulo de Young

$K, \alpha, \beta$  = parámetros reológicos característicos del modelo de Lemaître

Para clasificar las diferentes sales en función de la fluencia, se ha calculado en porcentaje la deformación de fluencia  $\varepsilon_0$ , con las siguientes expresiones:

$$\xi = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\beta} t$$

$$\varepsilon_{vp} = 10^{-6} \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\beta} t^{\alpha}$$

Se obtiene la deformación de fluencia  $\epsilon_o$  en % :

$$\epsilon_{\text{tp}} = 10^{-6} \left( \frac{10}{K} \right)^{\beta} 365^{\alpha}$$

de donde

$$\epsilon_o = 10^{-4} \left( \frac{10}{K} \right)^{\beta} 365^{\alpha}$$

Sustituyendo valores obtenidos de las pruebas de laboratorio de los parámetros de Lemaitre (capítulo III) en la ecuación tenemos:

$$\epsilon_o = 0.0001 \left( \frac{10}{0.58} \right)^{3.10} 365^{0.36}$$

$$\epsilon_o = 5.69$$

$$\epsilon_o = 0.0001 \left( \frac{10}{0.72} \right)^{3.30} 365^{0.36}$$

$$\epsilon_o = 4.93$$

$$\epsilon_o = 0.0001 \left( \frac{10}{0.86} \right)^{3.48} 365^{0.35}$$

$$\epsilon_o = 4.02$$

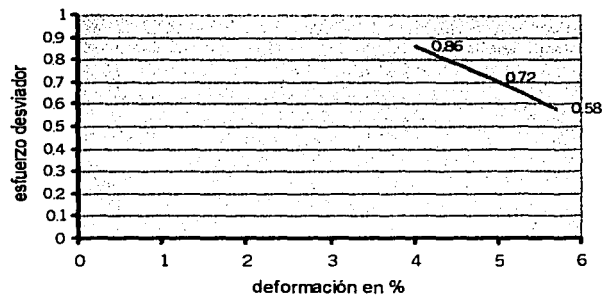
Los resultados se presentan en la tabla 13 y se ilustran en una gráfica.

TABLA 13 Resultados de porcentaje de fluencia.

$\alpha$	$\beta$	K (MPa)	$\epsilon_o$ (%)
0.36	3.10	0.58	5.70
0.36	3.30	0.72	4.93
0.35	3.48	0.86	4.02

Fuente Géostock.

### Porcentaje de fluencia



Como ejemplo de lo expuesto anteriormente, se ha simulado la evolución de cavidades esféricas con un diámetro de 40 metros, aisladas de 65,000 m<sup>3</sup> de capacidad o de cavidades cilíndricas de gran altura en relación a un diámetro de 20 metros (llenas de salmuera). Durante 20 años con una pérdida de volumen de alrededor de -3% en la cavidad esférica, y la caverna cilíndrica con una pérdida de -2.5%. En conclusión la fluencia será de 3% a 8% en 10 años según el tipo de explotación, las gráficas se localizan en el apéndice A.

### II.5 Calidad de la sal.

El termino de “calidad de la sal” para la lixiviación de cavidades, implica que la sal tenga características mineralógicas especiales que son las que determinan el grado de aceptación para la construcción de almacenamientos en el subsuelo.

Las características mineralógicas se involucran directamente con el proceso de lixiviación y la vida futura de las cavidades. Determinan si la masa salina y su comportamiento plástico, son homogéneos o heterogéneos (Géostock, 1991).

El comportamiento plástico está relacionado con la estabilidad y diseño de las cavidades, por lo tanto, el grado de pureza determina el buen desarrollo de la oquedad.

La sal homogénea con menor número de insolubles e impurezas presenta menos problemas en el control de la lixiviación y en el comportamiento mecánico. Aunque por otra parte los estudios realizados por Géostock en las probetas extraídas en Tuzandépetl muestran una sal con repartición geográfica no homogénea y poco fluente.

La halita con potasio o magnésica tiene características mecánicas menores y es más difícil controlar la lixiviación que en una sal pura, se elige la halita que tenga el menor contenido de potasio (Rodríguez, 1988).



En Tuzandépetl son dos tipos de sal definidos en la estructura:

**Sal homogénea:**

La sal con estas características se presenta a partir de los 1000 metros de profundidad. En algunos pozos, después de los 1000 metros de profundidad, la sal es mas limpia y con solubles escasos (5%) e insolubles (menos del 10%) bien distribuidos en la matriz salina.

**Sal heterogénea:**

Este tipo de sal corresponde a la parte superior de la estructura de la masa salina, con un espesor de 1000 metros aproximadamente entre los 400 hasta los 1500 metros de profundidad.

En la Figura 2.8 se ejemplifica la calidad de la sal en una estructura salina, donde se muestra la profundidad de la halita con sus impurezas, la sal homogénea y la sal heterogénea.

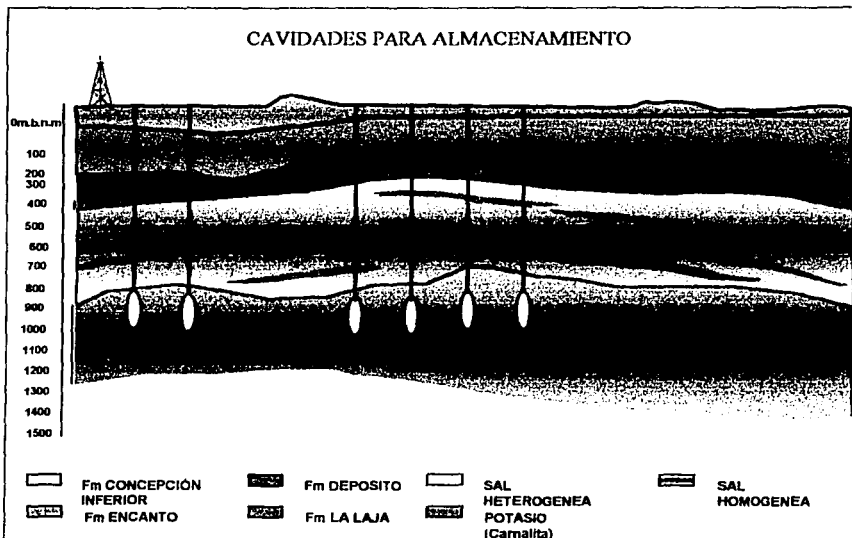


Imagen de Rodríguez, A. 2000.

Figura 2.8 Estructura salina

En la siguiente tabla 14 se relaciona la pureza de la sal con su resistencia a la compresión simple indicando la profundidad de donde fue extraída la muestra, los resultados del análisis mineralógico fueron obtenidos por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, para lo

TESTE CON  
FALLA DE ORIGEN

cual se utilizo un difractometro de rayos X , empleando radiación filtrada de cobre. Los ensayos de compresión simple son explicados en el capítulo siguiente.

TABLA 14 Calidad de la sal y su resistencia a la compresión simple.

Profundidad (m)	% de halita	% de anhidrita	Tipos de sal	Resistencia a Compresión simple(bar)
791.1	83	14	Sales potásicas	278
794	94	5	Sal grisácea	278
894.7	90	9	Sal blanca lechosa con poca anhidrita	341
897.45	91	4	Sal café claro	246
950.8	82	7	Sal blanca lechosa y grisacea.	314
1001.8	80	8	Sal grisacea con anhidrita	270
1005.5	88	6	Sal grisacea con anhidrita	235.8
1053.6	88	6	Sal gris con anhidrita	287
1103	93	2	Sal gris con anhidrita	234
1141.08	83	8	Sal blanca con anhidrita	311

Geostock, 1995.

De acuerdo con los intervalos y a la geometría de una cavidad si ésta se lixiviera basados en los resultados expuestos en la tabla anterior se tendrían los siguientes resultados preliminares para la construcción de la oquedad tabla 15:

TABLA 15 Cavidad y su posible resistencia a compresión simple

Secciones de la cavidad	Resistencia (Bar)
Cuello	278
Techo de la cavidad	199-341
Cuerpo de la cavidad	235-314
Fondo d la cavidad	287

Fuente IMP, 1992.

## **CAPÍTULO III**

### **ENSAYOS DE LABORATORIO.**

**OBJETIVO ESPECIFICO. Resultados de laboratorio de las propiedades mecánicas de la sal.**

#### **III.1 Especificaciones y equipo.**

En este capítulo se muestran los resultados del trabajo experimental realizado en el comportamiento mecánico de la sal, y se describen los equipos y las técnicas experimentales que se emplean para efectuar las mediciones en los diferentes ensayos.

La realización de las pruebas de laboratorio es con el fin de definir experimentalmente el comportamiento mecánico de las rocas de sal. Esto se logra realizando experimentos en probetas extraídas del sitio, en este caso las muestras son obtenidas de las exploraciones hechas en Tuzandépetl de los pozos exploratorios.

Se observa el comportamiento instantáneo de la probeta (ensayos de corta duración) o la evolución del comportamiento de la muestra en el tiempo (ensayos de larga duración).

Los diferentes experimentos realizados pueden ser:

1. Sondeos en los cuales se impone una deformación constante (ensayo de relajación) o lineal en el tiempo (prueba de endurecimiento); se observa la evolución del esfuerzo axial.
2. Examen donde se impone un esfuerzo (ensayo de compresión o de tracción constante) o no ( ensayo de fluencia); se observa la evolución de la deformación axial.

Los ensayos realizados a las probetas son:

Experimento Brasileño  
Compresión uniaxial  
Compresión triaxial

Para cada muestra analizada se midieron las características físicas como, longitud, diámetro, masa volúmica y la velocidad del sonido.

Las muestras se separan en tres tipos de sal:

- a) Sal gris clara con granos finos.
- b) Sal gris con granos finos a medianos con impurezas más oscuras (anhidrita).
- c) Sal impura con granos finos a medianos.

Previamente se analiza la composición química de la salmuera resultante de la disolución de cada muestra en agua de características químicas conocidas. Se determina para cada muestra: la densidad, y el contenido de insolubles, para relacionarlos con el comportamiento mecánico de cada probeta.

Características físicas de los tres tipos de sal en tabla 16:

TABLA 16 Características de las probetas.

Referencia de la muestra	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Masa (kg)	Tiempo de prolongación ( $\mu$ s)	Masa volúmica ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )	Velocidad del sonido (m / s)
A	64.4	34.0	239.7	-----	2 165	-----
A	64.4	129.4	916.6	46.7	2 175	2 270
A	64.6	132.4	920.1	58.3	2 120	2 270
A	64.6	33.7	235.3	-----	2 130	-----
B	64.5	130.0	930.9	34.8	2 190	3 735
B	64.7	132.2	947.5	36.2	2 180	3 650
B	64.6	34.3	251.2	-----	2 235	-----
C	64.5	129.8	928.2	37.6	2 190	3 450
C	64.3	132.1	939.7	34.9	2 190	3 785
C	64.6	35.3	246.2	-----	2 130	-----
C	64.7	35.7	251.3	-----	2 140	-----

Geóstock, 1985.

En la figura 3.1 se muestra el esquema simplificado del sistema experimental que se utilizó para efectuar los ensayos de compresión uniaxial, triaxial. Los principales componentes del sistema que intervienen en la ejecución del trabajo experimental, son el vaso de presión o cámara triaxial, la estructura de carga, el actuador hidráulico controlado automáticamente, el intensificador de la presión de confinamiento y el sistema computarizado de adquisición de datos.

En la cámara triaxial (Figura 3.2) se aloja la muestra, adecuadamente instrumentada para poder medir las deformaciones axial y transversal que resultan de la aplicación de los esfuerzos. En la misma ilustración se observan los detalles de la forma como se instrumentaron las muestras para los tres tipos de ensayos. Los elementos de la instrumentación que quedan ubicados dentro de la cámara triaxial son: un dispositivo para medir la deformación axial, que utiliza transformadores diferenciales linealmente variables como elementos sensores; un dispositivo tipo viga empotrado en un extremo y libre en el otro, instrumentado con extensómetros eléctricos para medir la deformación transversal, y una celda descarga para medir el esfuerzo mecánico que se aplica en los ensayos de compresión uniaxial y triaxial.

La preparación de las muestras, las características del equipo empleado para efectuar los ensayos, los procedimientos experimentales y el proceso de abreviación de datos conforme a lo que establecen las normas recomendadas aplicables ASTM D-4543, ASTM D-2938 y ASTM D-3148

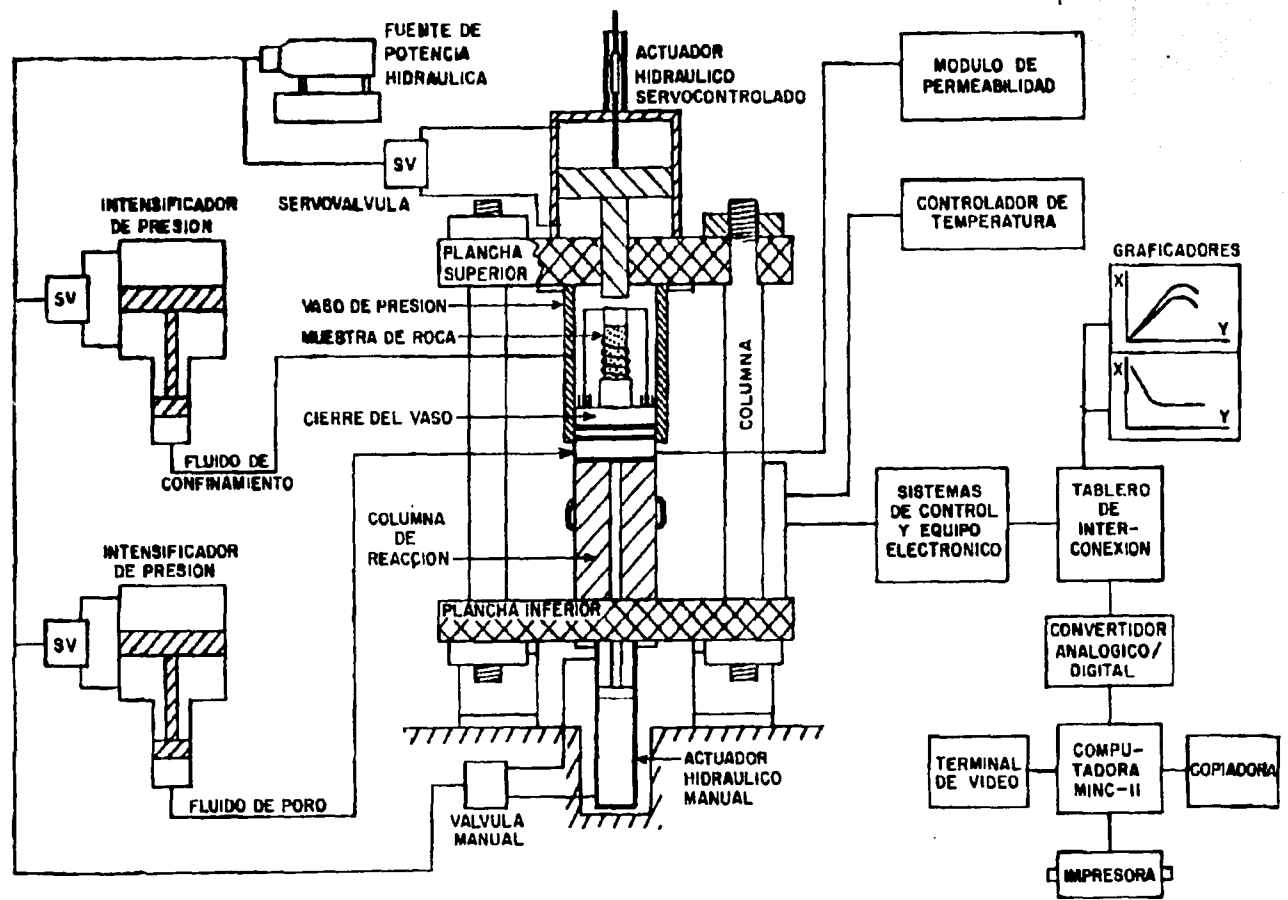


Figura 3.1 Diagrama del sistema empleado en laboratorio para realizar los ensayos en las probetas de sal.

### III.2 Ensayos de compresión uniaxial.

El ensayo de compresión uniaxial consiste esencialmente en medir la deformación axial experimentada por las muestras en respuesta a la carga mecánica axial sin presión de confinamiento. Las muestras se cubrieron únicamente con tubo de teflón, para evitar que se esparcieran partículas de sal dentro de la cámara triaxial.

Las muestras se instrumentaron conforme al arreglo mostrado en la ilustración anterior (Figura 3.2). En los ensayos de compresión uniaxial el vaso de presión no se llenó con fluido de confinamiento, quedando así las probetas expuestas a la presión del medio ambiente

El esfuerzo mecánico se aplicó bajo dos diferentes esquemas: controlando la rapidez de la deformación axial, y controlando la rapidez de aplicación del esfuerzo.

Utilizando el esquema de deformación controlada es posible determinar el comportamiento post falla del material. En cambio, con el esquema de control de la rapidez de aplicación de esfuerzo sólo es posible conducir el ensayo hasta el punto de máxima resistencia del material.

En la siguiente tabla se presentan los resultados de los ensayos de compresión uniaxial con control de rapidez de deformación

TABLA 17 Resultados de compresión uniaxial.

Muestra	Profundidad (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Masa (gr)	Densidad (gr / cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo máximo (bar)	Deformación unitaria axial (%)
A.1	791.26	180.69	402.59	2.228	270	1.77
A.2	891.92	190.56	406.67	2.134	185	2.04
A.4	898.30	189.148	408.94	2.0162	236	2.08
A.6	1002.66	183.66	402.77	2.0193	263	3.40
A.10	965.85	188.95	406.62	2.152	300	3.72

Geo Energía, 1985.

Los resultados de los ensayos de compresión uniaxial con control de la rapidez de aplicación de esfuerzo se muestran en la siguiente tabla.

TABLA 18 Resultados de compresión uniaxial.

Muestra	Profundidad (m)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Masa (gr)	Densidad (gr / cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo máximo (bar)	Deformación unitaria axial (%)
A.5	963.91	185.21	413.02	2.230	305	2.47
A.7	1053.37	182.81	402.56	2.202	285	2.22
A.8	1103.08	181.11	388.66	2.146	223	3.32
A.9	1141.45	184.70	398.95	2.160	302	4.55

Geo Energía, 1985.

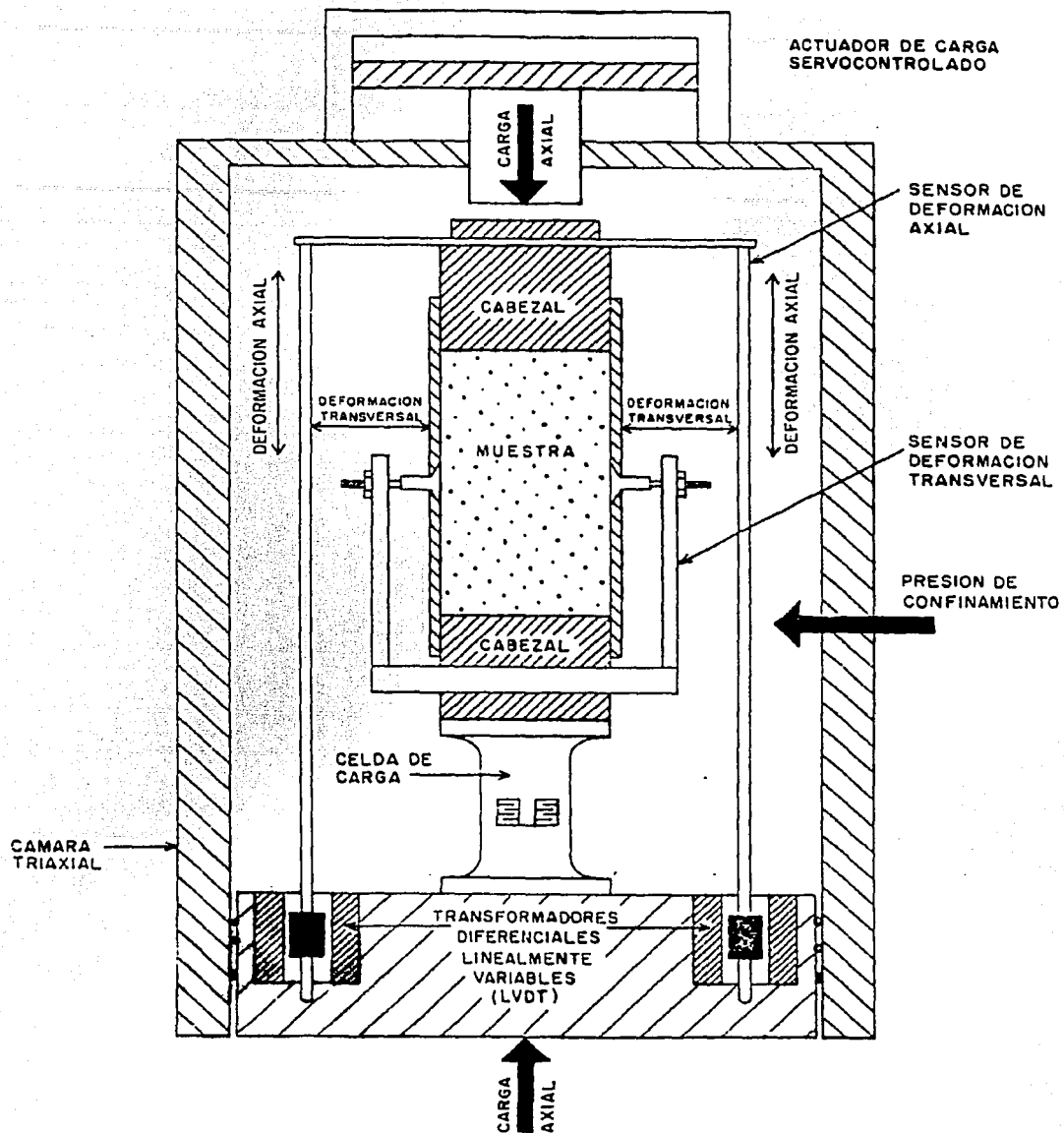


Figura 3.2 Esquema detallado del vaso de presión.

### III.3 Ensayo brasileño o de compresión diametral.

Este ensayo permite determinar la resistencia de una muestra a la tracción. Se han realizado con muestras cilíndricas de unos 65 mm de diámetro y 35mm de altura.

Los resultados se presentan en el siguiente tabla:

TABLA 19 Resultados del ensayo brasileño.

Referencia de la muestra	Resistencia a la tracción (MPa)
Sal gris con granos finos	2.4
	1.4
Sal gris con granos finos a medianos con impurezas más oscuras (anhidrita)	1.5
Sal impura con granos finos a medianos	1.3
	1.4

Geóstock, 1985.

### III.4 Ensayo de compresión triaxial.

Los ensayos de compresión triaxial consisten en aplicar una carga mecánica axial superpuesta a una presión de confinamiento previamente aplicada. Esto se logra llenando de aceite el vaso de presión de la cámara triaxial mostrada anteriormente. (figura 3.2)

Durante el ensayo se somete la muestra a una presión lateral constante de 10 MPa ejercida por el aceite a una presión axial aplicada por una prensa hidráulica.

Se aísla la muestra del fluido que libera la presión lateral con un forro de silasteno.

El ensayo se realiza con una velocidad de deformación axial constante de 0.01% por minuto.

Para determinar las características elásticas se somete la muestra a ciclos de carga-descarga porque durante las fases de descarga-recarga la parte viscoplástica de la deformación permanece casi constante, por lo tanto sólo se anotan las variaciones de la deformación elástica (Goc Energía, 1993).

Se ha adoptado el siguiente esquema de evolución de la carga axial:

- a) carga hasta 15 MPa
- b) descarga hasta 10 MPa
- c) carga hasta 20 MPa
- d) descarga hasta 10 MPa
- e) carga hasta 25 MPa
- f) descarga hasta 10 MPa
- g) carga hasta obtener una deformación permanente de 25%.



Durante el ensayo se midieron las deformaciones locales en las direcciones axial y lateral mediante extensómetros eléctricos cuya base de medida es de 10 mm.

Para seguir la evolución de la muestra durante todo el ensayo, se mide la deformación global axial con captore de inducción que miden el acercamiento de las placas de la prensa y la deformación lateral global se determina midiendo el volumen del aceite expulsado de la célula durante todo el ensayo.

TABLA 20 Resultados de compresión triaxial.

Referencia de la muestra	Presión de confinamiento (MPa)	Número de ciclo	Módulo de Young (MPa)	Coefficiente de Poisson
Sal gris clara con granos finos	10	1	----	----
		2	----	----
		3	----	----
Sal gris con granos finos a medianos con impurezas	10	1	27 130	0.41
		2	27 135	0.39
		3	25 890	0.35
		Promedio	26 718	0.38
Sal impura con granos medianos	10	1	24 450	0.37
		2	22 540	0.34
		3	24 530	0.34
		Promedio	23 840	0.35

Nota( ---- )indica que no se tienen valores.

Geostock. 1985.

### III.5 Cálculo de constantes elásticas

Las constantes elásticas se determinan a partir de "Vp" (velocidad de las ondas P), de "Vs" (velocidad de las ondas S) y de la densidad total, utilizando las conocidas fórmulas de la teoría de la elasticidad que relaciona las constantes elásticas con la densidad total y la velocidad de los bucles "P" y "S" para el caso de un material elástico lineal, homogéneo e isotrópico, es decir que sus propiedades son las mismas en cualquier dirección (consultar por ej. la obra de Obert y Duvall, 1967).

Las rizo P son las ondas compresionales que se transmiten cuando las partículas del medio se desplazan en la dirección de propagación. produciendo compresiones y dilataciones en el medio. mejor conocida como onda primera o primaria. La onda "S" es de corte o cizalla, es mas lenta que la onda "P" y es la segunda en llegar por eso se le llama secundaria.

Para medir la velocidad de las ondas elásticas "P" (rizos primarios) y "S" (bucles secundarios) se empleó una técnica que se basa en la medición del tiempo que tarda un impulso de ondas longitudinales o transversales en viajar a través de un espesor conocido del material sometido a estudio.

Esta técnica es la que se emplea más profusamente en trabajos de laboratorio, y ha sido estandarizada en cuanto a equipo y procedimiento por la ASTM bajo la designación D-2845-90.

En la siguiente ilustración (Figura 3.3) se muestra el diagrama esquemático del sistema experimental empleado. Los principales componentes del sistema son:

- a) un generador de impulsos en el que también está integrado un generador de señales de disparo para iniciar el barrido del osciloscopio.
- b) un osciloscopio de doble haz marca Tektronic modelo 2211.
- c) dos transductores piezoeléctricos diseñados para generar tanto ondas longitudinales como transversales.
- d) una computadora personal.
- e) una impresora láser.

La muestra sometida a estudio se coloca entre los transductores piezoeléctricos y se aplica una carga axial moderada para asegurar el buen acoplamiento acústico entre las caras de la muestra y las caras de los transductores. Uno de los transductores actúa como emisor, mientras que el otro actúa como receptor. El generador suministra impulsos eléctricos de corta duración al transductor emisor. Los impulsos eléctricos son convertidos en impulsos de energía mecánica, que se aplica en una de las caras de la muestra ya sea para generar ondas longitudinales u ondas transversales. Después de viajar a través de la muestra los impulsos de energía mecánica son detectados por el transductor receptor y reconvertidos a impulsos de energía eléctrica, los cuales son enviados de regreso a los dispositivos donde se generaron los impulsos primarios.

Mediante el empleo conjunto del osciloscopio y de las marcas de referencia generadas por la unidad PUNDIT se obtiene directamente en forma de una lectura digital el tiempo de tránsito de los impulsos de energía de las ondas "P" o de las ondas "S" a través de la muestra. La velocidad de las ondas se determina finalmente dividiendo el tiempo de tránsito de la onda considerada entre la distancia que ésta recorrió, representada por la longitud de la muestra.

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos para las constantes elásticas y para los parámetros de Lemaitre utilizados en las modelizaciones así como de los tres sitios franceses conocidos Etrez y Tersanne, dos sitios de explotación de gas natural y Manosque, lugares supervisados por Géostock desde hace 20 años y utilizados para el almacenamiento de hidrocarburos líquidos.

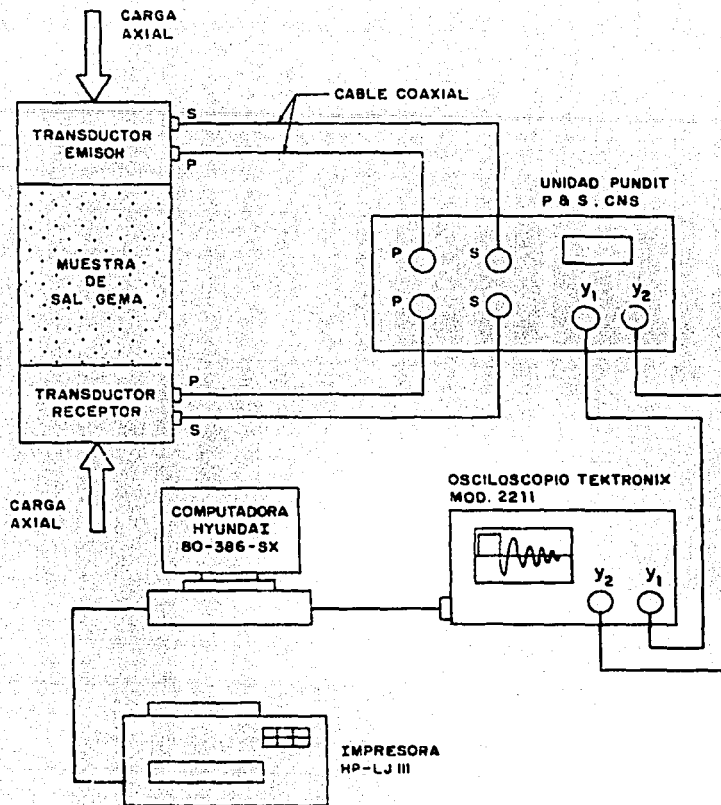


Figura 3.3 Diagrama esquemático del sistema experimental empleado para medir la velocidad de las ondas elásticas P y S.

**PARAMETROS DE LEMAITRE**  
Laboratorio (1985 – 1989)

	$\alpha$	$\beta$	K (b)	E (b)	C(b)	$\epsilon_{100,1000}$
Diseño básico	0.211	3.266	4.06	160 000	10	7.25
Fluencia final Laboratorio	0.227	3.033	8.27	49 800	0	0.93
Prueba de fluencia	0.364	3.534	14.16	39 000		1.22

Nota: los valores de  $\epsilon_0$  corresponden a la deformación axial que experimenta una muestra bajo una carga de 100 bares durante 1000 días, realizada por el profesor Vouille.

**IN SITU (1990-1991)**  
(Cavidades)

1	0.23	3.10	2.7	80 000		35.8
2	0.24	2.6	3	80 000		4.7
3	0.23	3	2.8	80 000		22.4
4						

**OTROS PROYECTOS**  
(Francia)

Tersanne	0.5	3.63	8.5	250 000		24.3
Etrez	0.44	3.9	19.5	250 000		1.2
Manosque	0.326	3.63	11.15	300 000		2.7

**PROYECTO GLP**

	0.36	3.1	5.8	250 000		8.1
	0.36	3.3	7.2	250 000		7.2
	0.35	3.48	8.6	250 000		5.6

Fuente: Tuzandépetl- México, 1991. Estudios de estabilidad de las cavidades tipo Géostock

**TABLAS 21** Resultados de los parámetros de Lemaitre y constantes elásticas.

### **III.6 Diseño de la cavidad.**

En el diseño de cavidades se involucran una serie de elementos importantes, dentro de los cuales es necesario definir el domo salino en el cual se desarrollará el proyecto, se deben tomar en cuenta criterios técnicos y geológicos.

Se selecciona un sitio adecuado con las características siguientes: no estar próximo a áreas pobladas, estar cerca de los recursos industriales beneficiados y disponer de agua necesaria para la lixiviación.

En el diseño de la cavidad se deben tomar en cuenta varios factores:

- Una revisión geológica del área en desarrollo.
- Características mecánicas y químicas de la sal y de la roca que la confina.
- Zonas de baja permeabilidad.
- Suficiente espaciamiento de la inter-caverna (que es la relación de 2:1).

En los criterios geológicos se investiga la estructura o geometría del domo y la calidad de la sal.

Se busca una estructura salífera de gran espesor, profundidad y que sea homogénea, con reducido coeficiente de insolubles, sin sales muy solubles y baja fluencia. Estas características son determinadas por los ensayos de laboratorio, las propiedades químicas determinan los coeficientes de solubles e insolubles; las propiedades mecánicas son determinadas por los resultados de las pruebas de fluencia.

Se realiza un estudio de sismica en la zona, en el caso de las cavernas construidas en Tuzandépetl se encuentran localizadas en una zona sísmicamente activa.

#### **III.6.1 Formas y dimensiones.**

En general, el requisito necesario para la construcción de una cavidad es una condición de volumen total. Es decir optimizar la geometría de la oquedad para asegurar un volumen requerido, asegurando la estabilidad mecánica de la cavidad y un funcionamiento de operación sin riesgos.

La forma ideal de una cavidad, desde el punto de vista de estabilidad mecánica, es la de una esfera. En realidad, muy pocas veces se realizan esferas. Se prefiere construir cavidades relativamente altas, que se asimilan a unos cilindros.

La forma de la cavidad es la de un cilindro con techo cónico. Se considera que es la forma más conveniente en el caso de un almacenamiento con varias cavidades.

Las cavidades salinas pueden tener formas geométricas poco regulares (figura 3.4). El grado de irregularidad depende de la heterogeneidad de la sal (distribución de los insolubles, factores de disolución) y el programa de lixiviación adoptado.

La distancia mínima que se debe mantener entre dos cavidades depende del diámetro de cada cavidad y de las características mecánicas de la sal.

Existe un diámetro máximo para una cavidad. Su valor está calculado de modo que esta cavidad tenga una estabilidad mecánica suficiente para que pueda utilizarse al menos unos veinte años.

Figura 3.4 Se muestran las diferentes posibles geometrías obtenidas en el proceso de lixiviación: figura A es una cavidad en forma de cilindro, en la parte inferior se ven los insolubles depositados. Figura B (cono) cavidad en forma de trompo. Figura C (cóncava) cavidad en forma de pera.

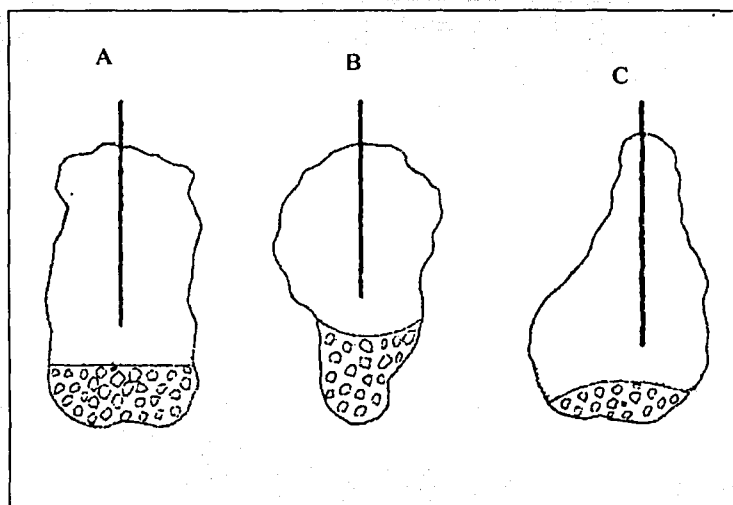
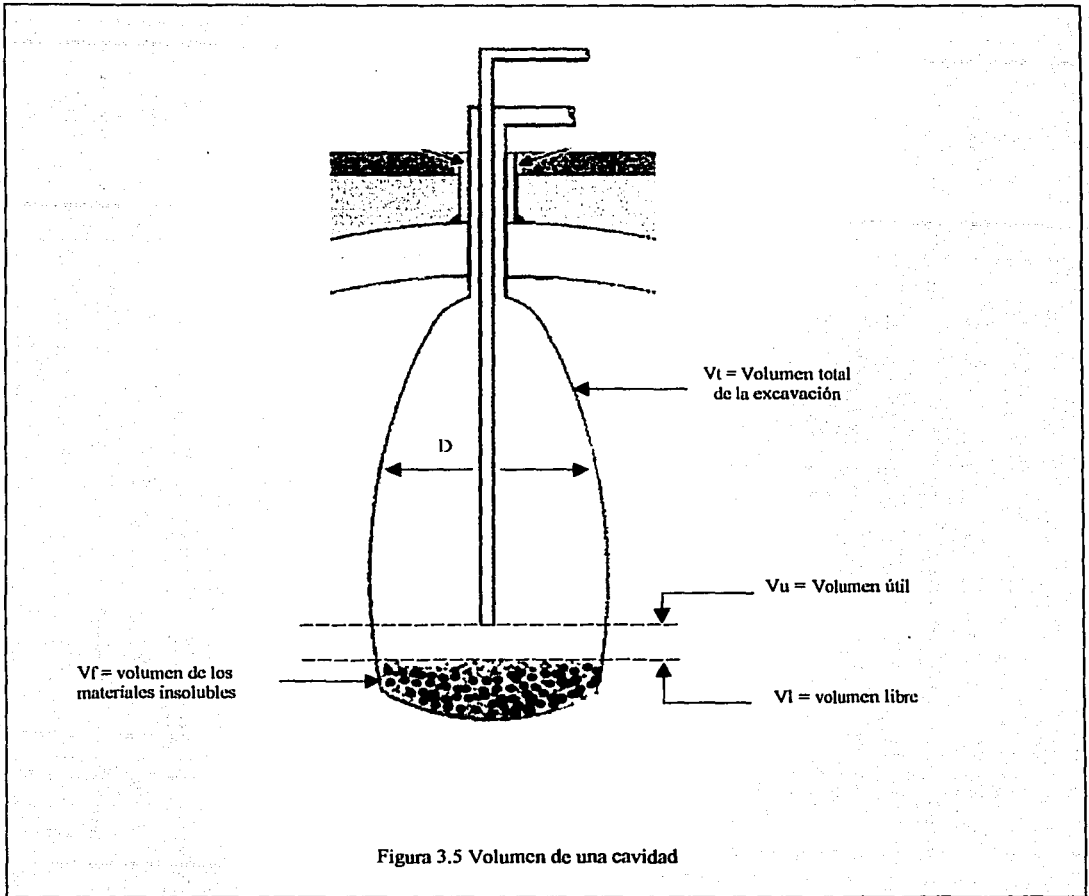


Figura 3.4 forma de una cavidad

### III.6.2. Volumen útil.

Como se ha mencionado antes (capítulo II) la calidad y la homogeneidad de la estructura salina, adquiere un valor significativo, ya que el porcentaje de insolubles en la sal repercute en el volumen útil logrado en la construcción de la cavidad. En el proceso de lixiviación la masa salina contiene partes insolubles que caen al fondo, disminuyendo el volumen útil de la caverna.

En la imagen (Figura 3.5) se ilustra el volumen útil dentro de una cavidad, el volumen de los materiales insolubles y el espaciamiento entre la tubería y los materiales insolubles que es de 4 metros (Góstock, 1991).



Donde :

$V_t$  = Volumen total de la excavación = volumen en el interior de las paredes.

$V_f$  = volumen ocupado por los materiales insolubles.

$V_c$  = Volumen de sal disuelta = Volumen de salmuera contenida en la cavidad.

$V_u$  = Volumen útil para almacenamiento.

$V_l$  = Volumen libre.

$x$  = porcentaje de insolubles.

El porcentaje de insolubles contenido en la estructura salina deberá ser menor al 5% para que el volumen útil de la cavidad no se reduzca notablemente. Este volumen aprovechable se calcula de la siguiente manera (Marin, 1999).

El volumen total de la excavación, es el volumen que se encuentra al interior de las paredes de la cavidad.

$$V_t = V_c + xV_t$$

En la expresión anterior,  $V_c$  es el volumen de sal disuelta, es también el volumen de la salmuera contenida en la cavidad al final de la lixiviación. En la ecuación se considera que la salmuera llena los vacíos de los materiales insolubles al fondo de la cavidad.

El volumen libre, es espacio registrado por el sonar:

$$V_l = V_t - V_f$$

Se debe considerar un coeficiente de aumento de volumen ( $f$ ) igual a 1.8 ya que los materiales insolubles aumentan un volumen aparente al amontonarse.

Si el coeficiente de aumento de volumen es ( $f$ ):

$$V_f = x V_t (f)$$

Por lo tanto el volumen libre es:

$$V_l = V_t - fx V_t = V_t (1 - xf)$$

Una parte del volumen libre no es disponible para el almacenamiento en razón:

- De la necesidad de colocar la tubería dos metros arriba del punto más alto de los materiales insolubles.
- De la observación de que los insolubles se depositan generalmente en una forma cónica, equivale a duplicar la altura dos metros más.

Entonces se pierde un volumen ( $V_p$ ):

$$V_p = \frac{\pi D^2}{4} h = \frac{\pi D^2}{4} 4 = \pi D^2$$

Los datos que se conocen de la lixiviación son:

- el volumen disuelto  $V_c$
- el porcentaje de materiales insolubles



Entonces, expresando  $V_u$  en función de estos parámetros:

$$V_u = V_c \frac{1 - fx}{1 - x} - \pi D^2$$

Como ejemplo, para una cavidad tipo en la cual se tendrá los siguientes valores:

$$V_c = 300\,000 \text{ m}^3$$

$$x = 5\%$$

$$f = 1.8$$

$D = 50$  metros nivel de los materiales insolubles.

Sustituyendo:

$$V_u = 300,000 \frac{1 - 1.8 (0.05)}{(1 - 0.05)} - 7,854$$

$$V_u = 279,514 \text{ m}^3$$

$$V_t = \frac{V_c}{1 - x} = \frac{300,000 \text{ m}^3}{(1 - 0.05)} = 315,789 \text{ m}^3$$

Obteniendo el porcentaje con la siguiente relación resulta:

$$\frac{V_u}{V_t} (100) = 88.5\%$$

Si  $x = 10\%$  de insolubles:

$$\frac{V_u}{V_t} (100) = 79.6\%$$

La pérdida de volumen por insolubles es importante, la calidad de la estructura salina debe contener un porcentaje máximo de 5% de insolubles para que sea rentable y se aproveche al máximo su capacidad.

### III.7 Definición de la envolvente geomecánica.

Dentro del marco del estudio sobre la estabilidad de las cavidades lixiviadas en sal, se presenta a continuación una modelización geomecánica de su comportamiento individual basada en la interpretación de las pruebas de fluencia (Géostock, 1991).

La modelización numérica basada en el método de elementos finitos, toma en cuenta las geometrías reales determinadas por sonar.

El método de elementos finitos es un procedimiento numérico (basado en ecuaciones diferenciales) que se utiliza en el análisis de estructuras y en el campo de la geotecnia. El método analiza esfuerzos, transferencias de calor, flujo de fluidos, lubricación, electricidad, etc.

El método de elementos finitos es un método de división en piezas o fragmentos, en el cual la función aproximada  $\phi$  está formada por una conexión de funciones simples, cada una definida por una pequeña región (elementos).

Un elemento finito es una región en el espacio, en la cual una función  $\phi$  se interpola de valores nodales de  $\phi$  en el límite de la región, en la cual la continuidad interelementos de  $\phi$  tiende a mantenerse en el conjunto (Chávez, 1995).

Un análisis por elemento finito envuelve los siguientes pasos. Citaremos de nuevo el análisis de esfuerzos y la transferencia de calor como aplicaciones típicas:

1. Dividir la estructura o cuerpo continuo en elementos finitos de generación de mallas o retículas, llamados procesadores.
2. Formular las propiedades de cada elemento. En el análisis de esfuerzos, esto significa determinar las cargas nodales asociadas con los estados de deformación del elemento que están dados. En transferencia de calor, significa determinar los flujos de calor en cada nodo, asociados con todos los campos de temperatura por el elemento en que están dados.
3. Agrupar los elementos para obtener el modelo de elemento finito de la estructura.
4. Aplicar las cargas conocidas: fuerzas nodales y/o momentos en el análisis de esfuerzos; flujos de calor por nodo en transferencia de calor.
5. En análisis de esfuerzos, especificar cómo está soportada la estructura. En transferencia de calor, donde son conocidas ciertas temperaturas, poner todos los valores conocidos de temperatura nodal.
6. Resolver ecuaciones lineales algebraicas simultáneas para determinar los grados de libertad nodales.
7. En análisis de esfuerzos, calcular las fuerzas por elemento a partir de los grados de libertad del nodo y de la interpolación del campo del desplazamiento del elemento. En transferencia de calor, calcular los flujos de calor por elemento a partir de la temperatura nodal y de la interpolación de la temperatura del elemento (Chávez, 1995).

En nuestro caso usaremos la ley de Lemaitre, integrada a un programa de cómputo utilizando los parámetros de la ecuación mencionada antes.

El objetivo es evaluar la incidencia de las condiciones actuales de explotación sobre la estabilidad de las cavidades y emitir una previsión sobre las pérdidas futuras de volumen a partir de los efectos de fluencia de la sal.

Este estudio permite conocer lo siguiente:

- Evaluar la pérdida global de volumen en el transcurso de 10 años de aprovechamiento.

- Analizar la estabilidad de los bloques voladizos, los cuales al caer pueden dañar el tubo de explotación.
- Determinar la convergencia de las paredes en las zonas de estrechamiento y el riesgo de bloque del tubo de explotación.
- Observar la incidencia de los movimientos en el hundimiento superficial.

El flujo de la sal por fluencia se representa con la ley de deformación visco-plástica de Lemaître (mencionada anteriormente en capítulo II), tipo ley de potencias:

$$\varepsilon_{vp} = \left( \frac{\sigma}{K} \right)^\beta t^\alpha e^{\left( \frac{-A}{T} \right)} \quad \text{ley de Lemaître}$$

recordemos que:

$\varepsilon_{vp}$	deformación visco-plástica
$\alpha, \beta, K$	parámetros de Lemaître
$t$	tiempo
$\alpha$	desviador de tensiones
$e^{\left( \frac{-A}{T} \right)}$	término corrector de las temperaturas ( A-coeficiente de Arrhenius; T-temperatura)

La deformación visco-plástica, tal como se le define aquí, implica un límite de plasticidad nulo.

### III.7.1 Medios de la modelización

Los medios utilizados son dos lógicos de cálculo bi-dimensional de elementos finitos, desarrollados por el Centro de Mecánica de Rocas (CMR) de la Escuela de Minas de París.

El programa CHEF (calor con elementos finitos) permite resolver los problemas de difusión del calor y establecer un plano térmico del terreno.

El lógico VIPLEF (visco-plasticidad con elementos finitos) permite conocer el estado de tensión y de deformación en la estructura.

Hay que proporcionar los coeficientes de Lemaître  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $K$  determinados durante la interpretación de los ensayos mecánicos de laboratorio.

VIPLEF realiza el cálculo final termo-mecánico para el acoplamiento con el programa lógico CHEF (Géostock, 1991).

### III.7.2 Parámetros de la modelización

#### Térmicos

Los calores específicos (de la masa y volúmico), la conductividad y difusividad térmica y los coeficientes de dilatación térmica de la sal y de la salmuera son valores comúnmente admitidos de la bibliografía. Estos parámetros no son indispensables para este tipo de cálculo (Géostock, 1991).

#### Físicos

Se considera un peso volúmico de la sal de 23 (kN/m<sup>3</sup>) para tener en cuenta la influencia de los terrenos de cubierta. Se considera una salmuera saturada de 12 (kN/m<sup>3</sup>).

#### Mecánicos

El módulo de elasticidad o de Young de la sal seleccionado sobre los ensayos de laboratorio es de 8000 MPa (mega pascales).

El coeficiente de Poisson es igual a 0.25 
$$\nu = \frac{\text{deformación lateral}}{\text{deformación axial}}$$

Consideramos para el conjunto del sitio, el juego de parámetros de fluencia siguientes:

$$\alpha = 0.23$$

$$\beta = 3.10$$

$$K = 2.7$$

El peso de estos parámetros que caracterizan el comportamiento de la sal en el sitio es preponderante. De su representatividad depende la validez de la previsión sobre la evolución de las cavidades.

Para la modelización de la cavidad se conoce perfectamente la geometría después de la lixiviación gracias a las medidas de sonar.

En este estudio hemos incluido, como elemento de comparación, el caso de una cavidad de tipo cilíndrico: altura = 300 m (cotas: techo = -600 m/Tn; fondo = -900 m/Tn; radio = 12 m) que permite un enfoque cualitativo de los fenómenos (Géostock, 1991).

## Mallado de elementos finitos

### Tipo de elementos:

- triángulos de 6 nodos (T6)
- cuadrilátero de 9 nodos (Q9)

### Procedimiento:

1. salmuera (T6)
2. sal de la envoltura cercana (T6)
3. sal de la envoltura lejana (Q9)

La sal de la envoltura lejana se define de tal manera que pueda englobar cada cavidad. Por lo tanto, es común para todos los modelos (Géostock, 1991). Para cada cavidad se digitaliza un perfil vertical de la pared y se determina la frontera entre la salmuera y la sal de la envoltura cercana.

En la figura 3.6 se muestra el mallado lejano y cercano que se utilizó en la modelización de la cavidad.

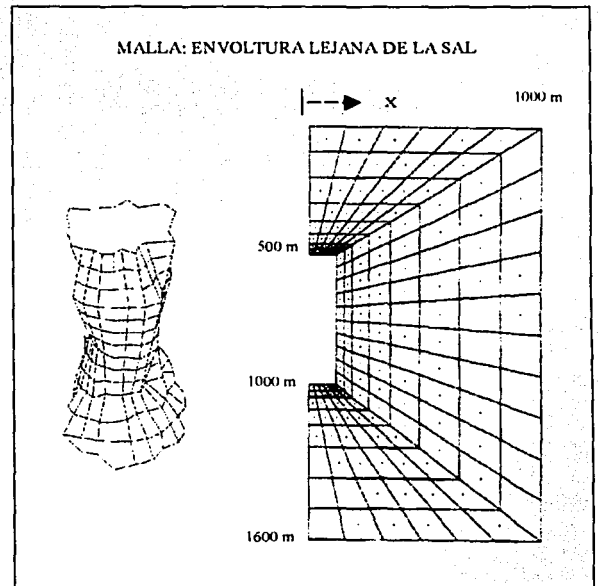
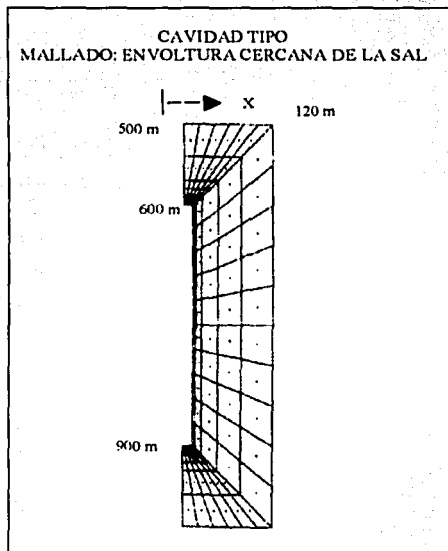


Figura 3.6 mallado de elemento finito de una cavidad

La realidad termo-mecánica del fenómeno de lixiviación es una cavidad que aumenta regularmente de volumen bajo presión y temperatura de salmuera prácticamente constantes. Se puede demostrar que no hay mucha diferencia si se impone una disminución lineal de la presión en la pared, desde la presión geostática hasta la presión de la columna de salmuera (respectivamente de la temperatura inicial de la sal de 50° C a la temperatura de la salmuera a 35° C)

Los ciclos de explotación corresponden a la alternancia de períodos de cavidades llenas de salmuera saturadas con una densidad de 1.2 y de almacenamiento de petróleo con una densidad de 0.85, separados por fases cortas de llenado y vaciado (4 días).

Teniendo en cuenta que el tubo interno está constantemente lleno de salmuera, el caso más desfavorable a la estabilidad corresponde al estado de vaciado. Hemos seleccionado la hipótesis más conservadora y la carga aplicada a la pared es la presión de la columna de salmuera a la temperatura de esta; el cálculo se realiza para un tiempo de 10 años explotación (Géostock, 1991).

### III.7.3 Resultados

El desviador de tensiones aumenta con la profundidad. Se observa una concentración en las zonas de pared cóncava (parte inferior de una cornisa) y gradientes significativos en la mitad inferior estrecha de las cavidades (Géostock, 1991).

La deformación visco-plástica puede alcanzar 13% de manera localizada (extremos de cornisas). En pared regular, aumenta de 3 a 8% con la profundidad.

Los desplazamientos máximos en pared se escalonan entre 0.66 m y 0.95 m en cavidades aisladas y entre 0.81 m y 2.13m para las no aisladas (Géostock, 1991).

En síntesis de este estudio se obtuvieron los siguientes resultados:

- la pérdida de volumen considerada, al término de 10 años de explotación, se sitúa entre 4% y 7%, lo cual es aceptable.
- El desconchado de la pared debido a la fragilización de la sal puede darse en la parte baja, al igual que caídas localizadas de bloques prominentes, sin mucho riesgo de propagación.
- El riesgo de bloqueo del tubo de explotación originado sólo por convergencia de las paredes podría eliminarse.

En las siguientes ilustraciones (Figura 3.7) se muestra el resultado del mallado de una cavidad llena con salmuera y el mallado de la envolvente cercana en la misma cavidad (imagen 1). Y en la imagen 2 se ilustra un sonar de una cavidad tipo junto con su mallado de envolvente cercana.

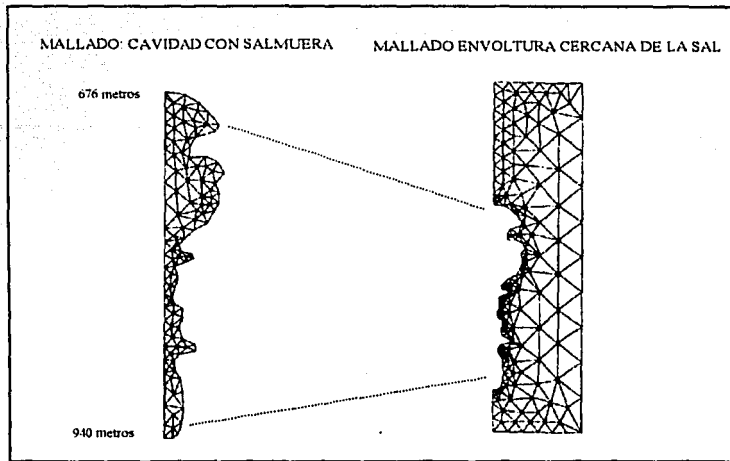


Figura 3.7 (1)

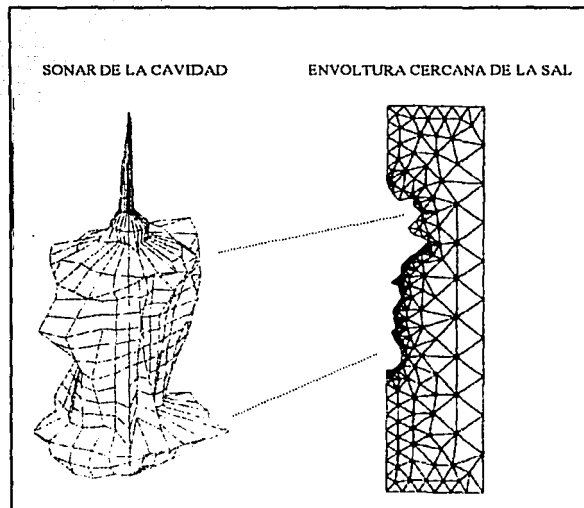


Figura 3.7 (2)

## **CAPÍTULO IV.**

### **CONSTRUCCIÓN DE CAVIDADES.**

**OBJETIVO ESPECIFICO.** Descripción del proceso de construcción de cavidades en domos salinos.

#### **IV.1 Definición y selección de sitios**

Las formaciones salinas localizadas en el subsuelo presentan diferentes características en cuanto a su composición, espesores y profundidades, entonces de acuerdo con la geometría y con las necesidades específicas de almacenamiento o confinamiento, se debe seleccionar una estructura adecuada.

Es necesario considerar el fin de la caverna ya que esta puede ser utilizada para el almacenamiento de hidrocarburos o para el confinamiento de residuos peligrosos, ya que en el primer caso la cavidad debe ser controlada por las fuertes presiones litostáticas que presenta el entorno, y en el segundo la sal se deja fluir para que confine los residuos.

#### **Criterios de localización**

Al seleccionar los sitios para las cavernas de sal, se deben considerar dos criterios:

##### Fondo

- Profundidad en la cima de la sal
- Profundidad de la base de la sal
- Variabilidad del espesor salino
- Extensión lateral de la masa salina
- Calidad de la sal.

##### Superficie

- Distancias de las áreas pobladas.
- Proximidad a recursos industriales.
- Corriente y uso futuro de las características adyacentes que pueden retirar cantidades grandes de agua subterránea y potencialmente aumentar tarifas de hundimiento.
- Dirección de la salmuera.
- Proximidad a las tierras húmedas y a los acuíferos ambientalmente sensibles del agua potable.
- Proximidad al límite de la sal.
- Proximidad a otras actividades subsuperficies activas o abandonadas.
- Controlar la adquisición de terrenos



## Profundidad

En el aspecto técnico como económico, la profundidad de la cavidad es primordial para el almacenamiento de gas.

La profundidad mínima para el desarrollo de la caverna se determina sobre la base de la presión que ejerce el producto a almacenar o material a confinar, la cual no debe ser mayor al gradiente de fractura de formación salina. La asociación americana de gas (AGA) de los Estados Unidos ha establecido un gradiente de  $0.8 \text{ lb/pulg}^2/\text{pie}$ , esto quiere decir que existe una presión de  $0.8 \text{ lb/pulg}^2$  por una profundidad en pies (Marín, 1999).

En cuanto al límite máximo, debe tomarse en cuenta que la sal se comporta como un fluido plástico a medida que la profundidad crece, normalmente las cavernas no son diseñadas para profundidades mayores de 1800 metros (6000 pies), a fin de evitar que las cavidades se cierren o queden atrapadas las tuberías (Marín, 1999).

Tomando como base lo anterior y considerando que el intervalo adecuado para desarrollar una caverna debe estar comprendido entre 300 y 800 metros de profundidad. La masa salina debe ser lo mas homogénea posible y cuidar los materiales insolubles como se explica en el capítulo anterior.

En la ilustración (Figura 4.1) se ejemplifica un estrato salino con la profundidad necesaria y con sus elementos litológicos.

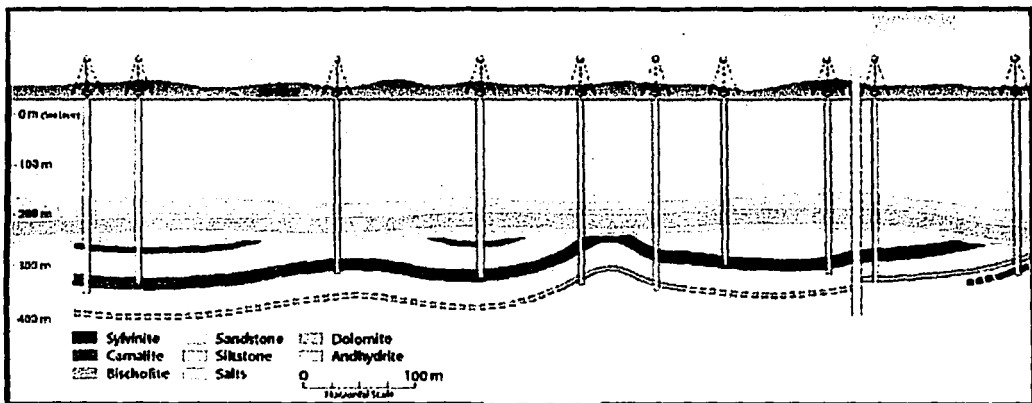


Imagen de Géostock, 1999.

Figura 4.1 Estructura salina

## IV.2 Etapas de construcción.

Una cavidad lixiviada (disolución de la sal mediante la inyección de agua dulce) es una abertura subterránea estable y hermética a los hidrocarburos líquidos, gas líquido de petróleo o a los residuos peligrosos.

En la construcción de la cavidad el primer paso es una perforación en la cual se introducen tuberías revestidas a una profundidad de acuerdo al diseño y las características de la masa evaporítica, se continúa disolviendo la sal con agua dulce o poca saturada y se extrae la salmuera resultante por otra tubería. Y controlando las presiones originadas por el producto almacenado (Géostock, 1997).

En la construcción de las cavidades se utilizan las técnicas perfeccionadas para las perforaciones petrolíferas y las soluciones de la industria minera.

Construcción de las cavidades:

Se elabora un programa de perforación en el cual se establece el mínimo número de tuberías de revestimiento a utilizar:

- Tubería de revestimiento de superficie
- Tubería de revestimiento intermedia
- Tubería de revestimiento final

En la figura 4.2 se muestran la tubería y la zapata utilizada en la explotación de una cavidad disuelta en sal.

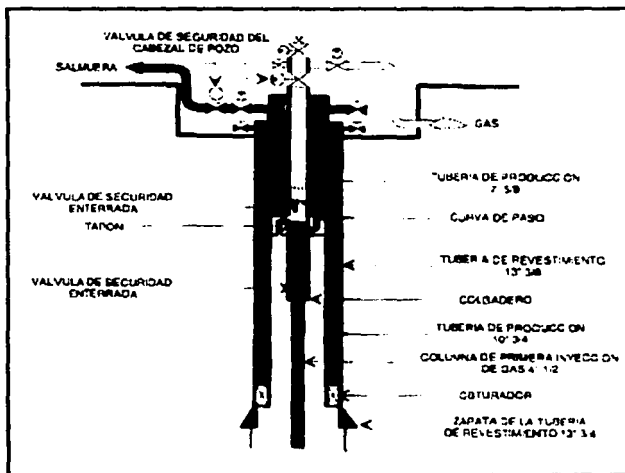


Figura 4.2 Tuberías y zapatas de explotación.

La tubería de revestimiento de superficie sirve para proteger los niveles acuíferos superiores. Esta tubería se colocará a unos 50 metros (Géostock, 1997).

En la supuesta ausencia de acuíferos desarrollados en el Terciario, la tubería de revestimiento intermedia se colocará lo más bajo posible en la serie evaporítica, o sea en la parte inferior de las intercalaciones de sales solubles y fluentes (a unos 800 m de profundidad) para reforzar la protección contra los efectos de cizalladura de estas sales mediante las dos tuberías de revestimiento cementadas (tubería de revestimiento intermedia y tuberías de revestimiento final).

Se realiza una perforación en diámetro reducido (8<sup>1/2</sup>" optimizar) hasta unos 1500 m. de profundidad. Se continua la perforación a 17<sup>1/2</sup>", hasta la profundidad total de la cavidad antes de colocar la tubería de revestimiento final. Antes de hacerlo se coloca un tapón de cemento para completar la cementación de la tubería. Después del fraguado del cemento se limpia el agujero para permitir el paso de los tubos de lixiviación (Géostock, 1997).

La tubería de revestimiento final se colocará a 15 m encima del techo de la cavidad.

Fluidos utilizados en la perforación:

El programa de fluidos de perforación se debe establecer para impedir una lixiviación no controlada (sales muy solubles) durante las fases de lixiviación. Debe permitir garantizar el calibrado y la estabilidad del agujero para proporcionar las condiciones óptimas para el registro y la cementación de las tuberías. Se recomienda lodo de emulsión inversa.

Cementación de las tuberías de revestimiento:

La cementación depende de la calidad y de la compatibilidad de la lechada de cemento y de la estabilidad y geometría del agujero. Se debe considerar una lechada de cemento insensible a las diversas sales y que proporcione la fuerzas compresivas necesarias (Géostock, 1997).

Para 1 m<sup>3</sup> de lechada:

- 700 kg Escorias de alto horno
- 300 kg Cemento Portland
- 300 kg Cenizas volantes
- 125 kg Sal (NaCl)
- 500 lt Agua dulce

Se verifica la calidad del cemento mediante diagrfias adaptadas.

Una vez que termina la perforación del pozo de explotación y sus pruebas de presión respectivas, se acondiciona éste para iniciar la etapa de lixiviación.

### Fases y equipo de lixiviación:

El procedimiento de lixiviación seguirá 3 fases:

1. Creación de la bolsa de insolubles.
2. Creación de la sección principal de la cavidad.
3. Creación del techo de la cavidad.

Se cuenta con varias técnicas para controlar la evolución de la cavidad:

1. Tipo de lixiviación: directo, inverso o lixiviación inversa modificada.
2. Posición de los tubos de lixiviación y nivel del fluido inerte.

La lixiviación de la sal es el proceso de inyectar agua en la masa salina por medio de tuberías, acción que disuelve la sal y el producto resultante (salmuera) es extraído por otra tubería y tratado de manera adecuada (Géostock, 1997). La lixiviación directa: es la inyección de agua por la tubería de menor diámetro, generando el crecimiento más rápido en la parte inferior de la caverna.

En la figura 4.3 se muestra como es la lixiviación directa, la inyección de agua se realiza por la tubería de menor diámetro y colocada a mayor profundidad, la salmuera es extraída por la tubería en la parte superior de la cavidad logrando un crecimiento mayor en la parte inferior.

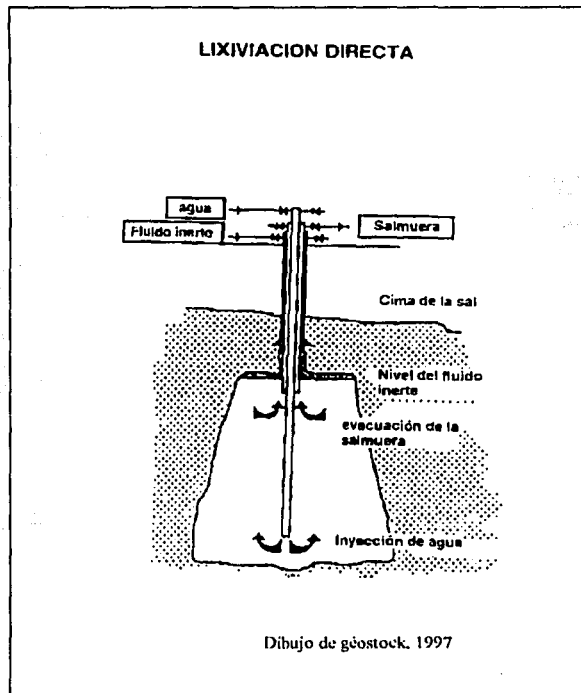


Figura 4.3 Lixiviación directa

La lixiviación inversa: La inyección de agua es realizada por el espacio anular de la tubería, creando un desarrollo veloz en la parte superior de la cavidad (Góstock, 1997).

La figura 4.4 ejemplifica los métodos de lixiviación inversa e inversa modificada, donde el agua dulce es inyectada en la parte superior y extraída en la parte inferior de la tubería.

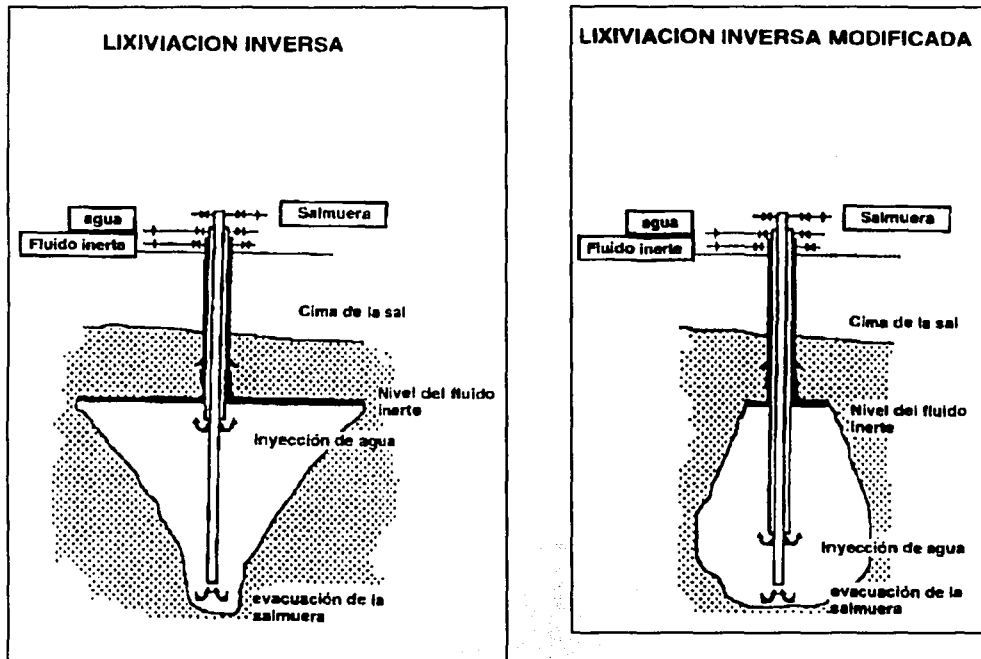


Figura 4.4 Lixiviación inversa

El método directo se utiliza para la creación de la bolsa de insolubles y una parte de la sección principal de la oquedad. El método inverso modificado se utiliza para el resto de la cavidad y el techo.

#### IV.2.1 Descripción del proceso de lixiviación.

El desarrollo de las etapas de lixiviación, bajo condiciones normales de operación, es general y con diferentes alternativas para todas las cavidades:

1. Se inyecta diesel por el espacio anular de las tuberías revestidas (TR) de 18" y 11<sup>3/4</sup> ".

2. Se ajusta la interfase a la profundidad programada y se verifica con un registro TDT (tiempo de decaimiento termal), para comprobar también la posición de las TR (tubería revestida), de disolución.
3. Se efectúa prueba hidrostática y se prueban líneas de lixiviación.
4. Se inicia el bombeo de agua dulce a un gasto mínimo de 50 m<sup>3</sup>/hr, el cual se va incrementando durante las próximas horas, de acuerdo a la capacidad disponible, hasta el gasto máximo.
5. Para tener un control adecuado del proceso es necesario registrar los valores de los parámetros involucrados, con una periodicidad de al menos 2 horas.
6. A la mitad de la etapa (volumen a crear entre dos) es conveniente suspender la lixiviación para verificar la posición de la interfase sello-salmuera, mediante la toma de un registro TDT (tiempo de decaimiento termal), ya que suele arrastrarse parte de este líquido durante el transporte de la salmuera a la superficie.
7. Continuar la lixiviación hasta concluir la etapa (volumen creado programado). Para este entonces, un equipo de perforación de pozos petroleros deberá estar disponible para intervenir al pozo.
8. Una vez que concluya la lixiviación, se liberan las líneas de lixiviación y se instala el equipo de perforación. Se elimina el cabezal de 7" y se levanta la tubería de revestimiento de 7" hasta unos metros por arriba de la zapata de la tubería de revestimiento de 11 <sup>3/4</sup>".
9. Se baja la canasta calibradora para verificar el estado de las tuberías de disolución y se checa la profundidad inferior (PI), la cual seguramente será menor a la profundidad total (PT), pues la precipitación de insolubles se confinará obviamente en el fondo del pozo.
10. Se corre un registro sonar a partir de la zapata de la tubería de revestimiento de 11 <sup>3/4</sup> " hasta la PI. posteriormente, se interpreta este registro y de su resultado se podrá observar si las dimensiones y forma del intervalo de lixiviación cumplen con lo programado ó es necesario volver a lixiviar, ya sea una parte o todo el intervalo de esta etapa.
11. En caso de cumplir con el programa, se procede a recuperar toda la tubería de 7", conectar líneas del interior de la Tubería de 11 <sup>3/4</sup>" y el EA 18" - 11 <sup>3/4</sup>", para compensar hidráulicamente las columnas de salmuera y diesel, y con ello poder eliminar el cabezal de 11 <sup>3/4</sup>" a la profundidad programada para la siguiente etapa.
12. En caso de no cumplir el programa, se omite el punto anterior.
13. Se introduce tubería de 7" a la nueva profundidad programada, se instalan conexiones superficiales.

14. Se repite el proceso para la siguiente etapa.

Una vez que concluye el proceso de lixiviación se realiza una prueba de presión a la cavidad para verificar la estanqueidad de la tubería cementada, y en caso de alguna fuga, detectar el flujo y el nivel para elaborar el programa de reparación.

El agua dulce utilizada para la disolución de la sal se requiere en grandes cantidades, se necesitan entre 7 y 15 m<sup>3</sup> de agua para crear un volumen de 1 m<sup>3</sup>, según la concentración de sal de la salmuera. El gasto de lixiviación será al principio del orden de 100 m<sup>3</sup>/h para alcanzar 300 m<sup>3</sup>/h cuando la cavidad tenga su dimensión definitiva (Géostock, 1997).

Las cavidades se crearán con forma cilíndrica y techo cónico; la relación diámetro/altura es de aproximadamente 1/3. En la figura 4.5 se expone las etapas de lixiviación en una cavidad donde se muestra, la creación del receptáculo de insolubles, el cuerpo de la cavidad y finalizando en la creación del techo.

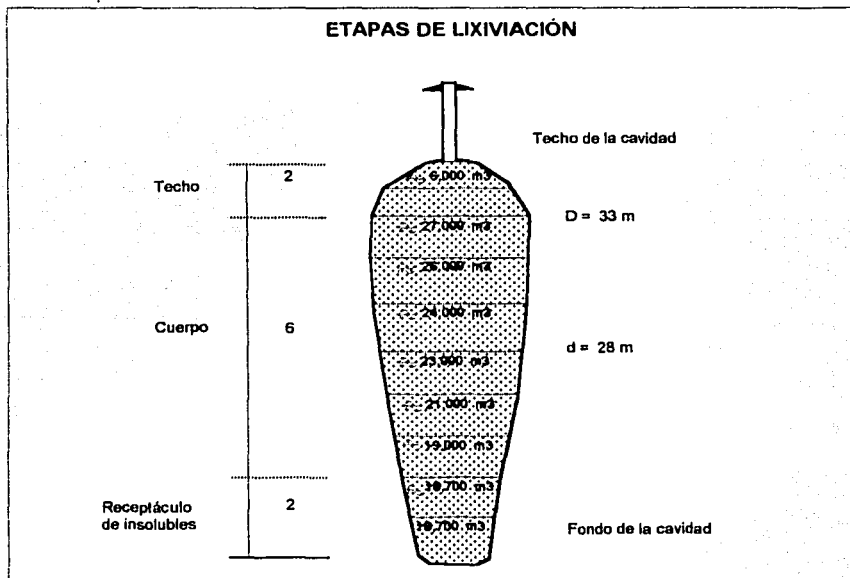


Figura 4.5 Etapas de lixiviación

**TABLA 22 Programa de lixiviación**

	<b>Insolubles</b>	<b>Sección principal</b>	<b>Techo</b>
Inyección (m)	1210	1160	1045
Método de lixiviación	Directo	Inverso modificado	Inverso modificado
Producción (m)	1035	1180	1180
Gasto (m <sup>3</sup> /h)	100-300	300	200-300
Volumen de sal disuelta (m <sup>3</sup> )	123 000	154 000	74 000
Volumen libre de cavidad (m <sup>3</sup> )	117 000	146 000	70 000
Volumen de salmuera (m <sup>3</sup> )	1 1445 000	1 152 000	633 000
Duración (días)	160	160	88
Sonares	2	2	2

La figura 4.6 muestra un cabezal de pozo utilizado para inyectar los productos almacenados o extrae la salmuera, en la Tabla 23 se describen las partes que lo conforman.

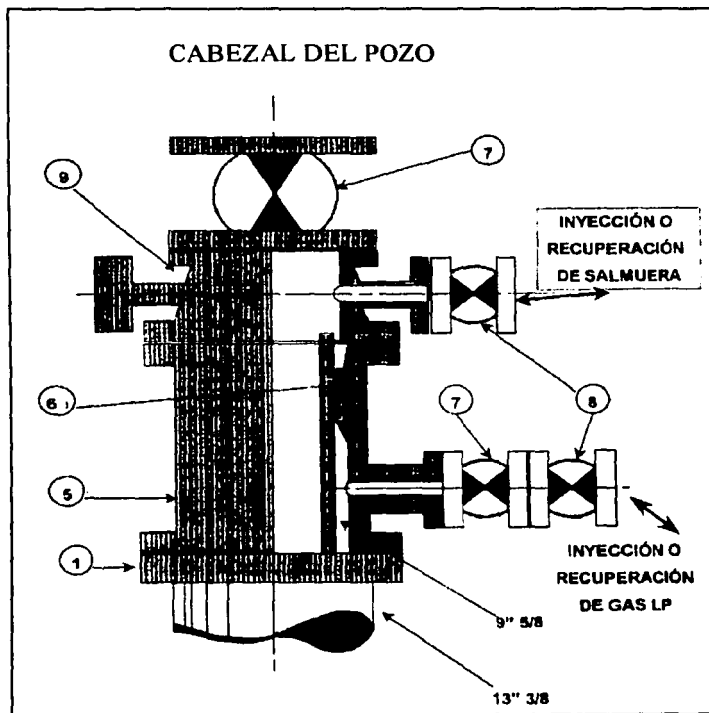


Figura 4.6 Cabezal de un pozo

Copyright 1998



**TABLA 23 Características del cabezal.**

No.	CANTIDAD POR POZO	DESCRIPCIÓN
1	1	Brida de 13 <sup>3/8"</sup> 2000 API 6B con enroscado de 13 <sup>3/8"</sup> Buttress hembra
5	1	Tubing Head para tubo de lixiviación de 7" y tubo de explotación de 11 <sup>3/4"</sup> con una brida de 13 <sup>5/8"</sup> 2000 Bottom Una brida 11" -2000 Top 2 salidas laterales de 7 <sup>1/16"</sup> x 2000 con bridas
6	1	Tubing Hanger con cuñas y estanqueidad colocado en el ítem 5 para tubo de 9 <sup>5/8"</sup>
7	3	Válvulas con bridas de 2" x 2000
8	2	Válvulas automáticas de 7 <sup>1/16"</sup> -2000 con brida y su operador
9	1	Té de circulación 11" x 2000 x 7 <sup>1/16"</sup> x 2000

La disolución en las oquedades produce salmuera que debe ser parcial o completamente evacuada. La evacuación de la salmuera lixiviada se lleva a cabo mediante uno o la combinación de varios métodos de desalajo. El procedimiento aplicado depende de las condiciones locales y de la legislación regional y/o nacional (Géostock, 1997).

Los métodos de evacuación son:

- utilización en industria química
- utilización en industria alimenticia
- evacuación al mar o al río
- re-inyección en capas acuíferas profundas

En Figura 4.7 se ilustra el proceso de construcción de una cavidad lixiviada en sal:

- a) Perforación de la cavidad.
- b) Comienzo de la lixiviación.
- c) Lixiviación en desarrollo.
- d) Extracción de la salmuera.
- e) Cavidad vacía, en el fondo la bolsa de insolubles.



**Figura 4.7 Proceso de lixiviación**

### **IV.3 Evaluación de la cavidad.**

La seguridad se funda en dos aspectos: la estabilidad y la hermeticidad de la cavidad.

La estabilidad se evalúa en función de las características mecánicas y químicas de la formación salina.

La estanqueidad está garantizada por el hecho de que el producto almacenado o confinado no disuelve la sal. La cementación de las tuberías de revestimiento impide la migración del producto a las formaciones subyacentes.

Antes del primer llenado de gas se somete cada cavidad a ensayos de recepción cuyo objetivo es demostrar su estanqueidad y, durante la explotación, a un seguimiento sistemático de la estabilidad de las cavidades que incluye monitoreo sísmico, control de la forma con mediciones sonar y seguimiento de la corrosión del equipo de pozo

La evaluación de la forma de la cavidad es realizada por medio de un sistema sonar, que es efectuado periódicamente en función de las cantidades disueltas de sal (Géostock, 1986).

El mínimo de revisiones que se debe realizar por cavidad con el sonar es de cuatro.

El principio de medición con sonar es el siguiente:

La cabeza rotativa de medición envía un impulso acústico. El eco de la pared es captado por la sonda, obteniéndose por definición la distancia. La cabeza rotativa puede emitir tanto impulsos horizontales como verticales (Géostock, 1986).

Impulsos horizontales: se acostumbra hacer una medición de 24 puntos (1 cada 15°). Si necesita una precisión complementaria, se pueden medir de 47 o de 73 puntos.

Impulsos verticales: es posible medir 16 planos (cada 6°), arriba o abajo.

El análisis de la medición permite desarrollar cortes de la cavidad; un programa de computación permite calcular el volumen de la cavidad.

El objetivo de los registros es:

- a) Determinar la estructura (el techo, el cuerpo y la cama de la cavidad)
- b) Determinar el volumen obtenido
- c) Determinar la forma de la cavidad.

El equipo consiste en:

- Sondas de medición
- Equipo de superficie para interpretar y registrar datos

La sonda de medición instalada en el extremo del cable se introduce en la perforación, emite los impulsos y el equipo de superficie que permite subir y bajar la sonda, registra la información obtenida por medio del material electrónico.

La totalidad del equipo de superficie está instalado en un camión, incluye una oficina.

Durante la vida útil de las cavidades es frecuente el desprendimiento de bloques de sal ocasionando daños a las tuberías de explotación, obstrucción en las zonas reducidas de las cavidades y formación de zonas de inestabilidad. Así mismo se presentan cristalizaciones de sal causadas por el enfriamiento de la salmuera, lo que ocasiona el atrapamiento de tuberías.

De acuerdo a lo anterior se deberá realizar una verificación periódica de la cavidad para su adecuado funcionamiento, esta revisión incluye las actividades expresadas en la siguiente tabla:

**TABLA 24** Mantenimiento y cuidados de una cavidad.

<b>ACTIVIDAD</b>	<b>PERIODICIDAD</b>
Registro de presiones	Diaria
Verificación del nivel de la interfaces GLP-salmuera durante el primer llenado (registro TDT)	Cada 20,000 m <sup>3</sup> inyectados
Verificación del nivel de la intrface GLP-salmuera cuando la cavidad está en reposo	Mensual
Verificación de las condiciones de la tubería de explotación (registro de calibración y CCL)	Mensual
Instalación de un sistema de subsidencia	Permanente
Verificación de la temperatura del fluido dentro de la cavidad (registro de temperatura)	Si la cavidad está en reposo, cada 3 meses
Registros de calibración en el cuello de la cavidad para evitar atrapamiento de la tubería.	Anualmente, cuando la cavidad esté llena de salmuera
Registros sonares	Anualmente
Prevención de corrosión	Instalación de protección catódica
Cambio de tubería de explotación	Cada que se dañe la tubería
Verificación de los cabezales (corrosión, bridas, válvulas, etc.)	Semestral
Lixiviación técnica (lixiviar zonas de obstrucciones)	Cada que se detecte una obstrucción

Fuente bases técnicas de concurso para licitación

NOTA GLP= GAS LICUADO A PRESIÓN

## IV.4 Almacenamiento y confinamiento.

### IV.4.1 Almacenamiento

Al finalizar la lixiviación la cavidad está saturada de salmuera. Después de sacar los tubos de lixiviación se instala la terminación de explotación.

La explotación de este tipo de trasiego consiste en la inyección y el almacenamiento del producto por compensación hidráulica, de tal manera que las cavidades estén siempre llenas en fase líquida (salmuera o gas L.P.)

La inyección y el trasiego del producto (hidrocarburos) se realiza por el espacio anular entre la tubería de explotación y la de revestimiento del pozo (Figura 4.8).

La salmuera producida se extrae de la cavidad durante el primer llenado de gas y es depositada en una presa de almacenamiento. Cuando esta es puesta en operación, se inyecta el gas en la cavidad mediante un compresor hasta una presión máxima, luego se produce el gas bajando la presión de la cavidad hasta una presión mínima. Los valores de  $P_{max}$  y  $P_{min}$  son función de la profundidad y de las características de la sal.

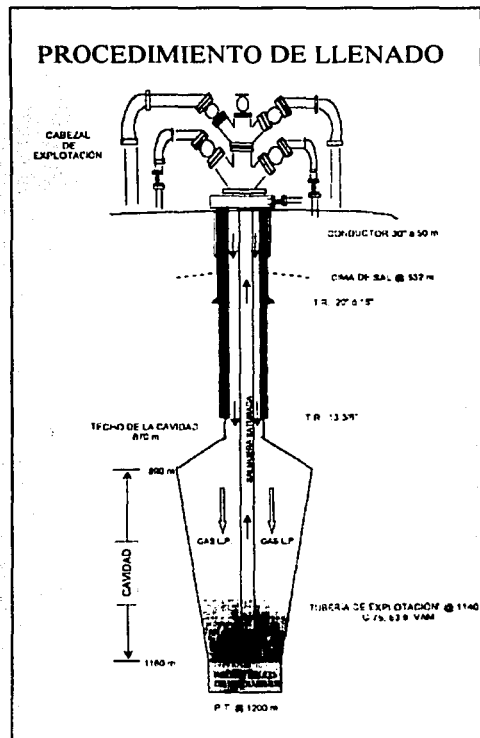


Figura 4.8 Procedimiento de llenado de una cavidad

La estanqueidad de una cavidad de almacenamiento está asegurada por la impermeabilidad intrínseca de la sal, la cual resulta de su estructura.

La diferencia de presión entre la densidad del gas L.P y la de la salmuera asegura el mantenimiento de la presión del gas L.P. en el cabezal del pozo a un valor muy superior al de la tensión del vapor, lo cual impide que el producto se evapore.

En la figura 4.9 se muestra el proceso de extracción del producto almacenado.

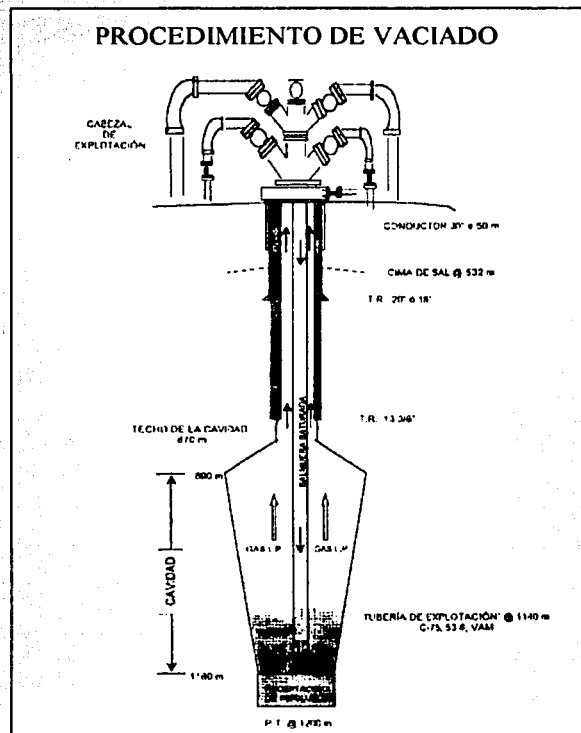


Imagen de Géostock, 1998

Figura 4.9 procedimiento de vaciado de una cavidad

#### IV.4.2 Confinamiento

Los residuos peligrosos se presentan en diferentes estados físicos, como sólidos, líquidos o gases y poseen un potencial significativo para dañar la salud humana o la calidad ambiental (RCRA, 1976). Dichos residuos deberán destinarse para su disposición final en sitios adecuados (Hunter, 1997).

Existen muy diversas tecnologías para el tratamiento de los residuos peligrosos que van desde los métodos físicos, químicos, biológicos, térmicos, etc., hasta los llamados de estabilización y solidificación.

Los procesos de estabilización están enfocados a reducir la solubilidad o la reactividad química de los residuos, esto se logra cambiando su estado químico o por medio del entrapamiento físico llamado comúnmente encapsulamiento.

La solidificación tiende a convertir al residuo en un cuerpo fácilmente manejable, donde el peligro de volatilización, lixiviación o derrame es minimizado (Hunter, 1997).

Los sistemas de estabilización por solidificación más ampliamente difundidos son los que utilizan la adición de cemento portland y/o materiales puzolámicos.

El proceso empleado es a base de cemento portland junto con ceniza fina, aditivos u otros agregados para formar una masa monolítica parecida a la roca. Existen compuestos químicos que alteran los procesos normales de solidificación, retardando el fraguado y reduciendo sensiblemente la resistencia. Otro problema se presenta con los residuos ácidos, ya que siendo el cemento muy alcalino (ph de 11) se reducirá antes de transformarse, esto hace necesario agregar cal o cenizas finas para incrementar el ph (Hunter, 1997).

La figura 4.10 muestra residuos solidificados y estabilizados, listos para ser confinados.

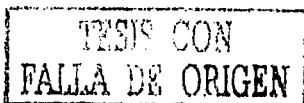


Imagen de KBB, 1998

Figura 4.10 Residuos solidificados

El manejo y la disposición final de residuos solidificados en el interior de una estructura salina , bajo las estables condiciones químicas, termodinámica y cinéticas del interior de un domo salino, es un procedimiento ambientalmente seguro que establece condiciones de confinamiento a profundidad, sin provocar peligro de contaminación.

El confinamiento de residuos peligrosos sigue el siguiente proceso:



- Las cavernas de sal se encuentran llenas inicialmente de salmuera.
- La basura se inyecta como mezcla de la basura y del agua o de la salmuera.
- La basura entrante desplazará la salmuera que se extrae a la superficie.
- Las cavernas actúan como los separadores gigantes de aceite/ agua/ sólidos.
- Los sólidos se hunden al fondo y el aceite y otros hidrocarburos flotan a la tapa de la caverna.
- Con el tiempo el volumen de una caverna de sal disminuirá debido al arrastramiento de la halita (debido a la fluencia y a las presiones altas).

Se considera que la presión de 10.34 MPa (megapascales) estimada para la presión de confinamiento de las cavernas garantiza las propiedades de construcción con baja permeabilidad de la sal en estas condiciones.

La densidad del material de relleno no tiene efecto significativo en las propiedades del almacenamiento en las cavernas de residuos sólidos peligrosos a largo plazo (10,000 años).

En la figura 4.11 se ilustra como es el llenado de las cavidades con residuos solidificados con cemento por una tubería en la parte inferior, y la salmuera es extraída por otra tubería en la parte superior.

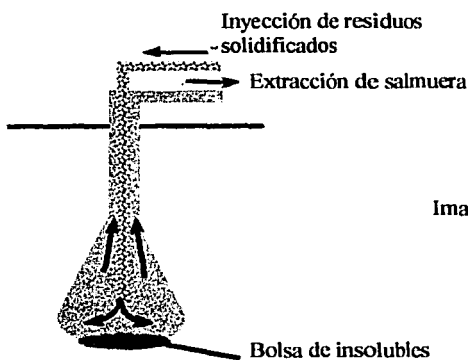


Imagen de NPTO, 1999

Figura 4.11 Inyección de residuos.



Figura 4.12

KBB,1998

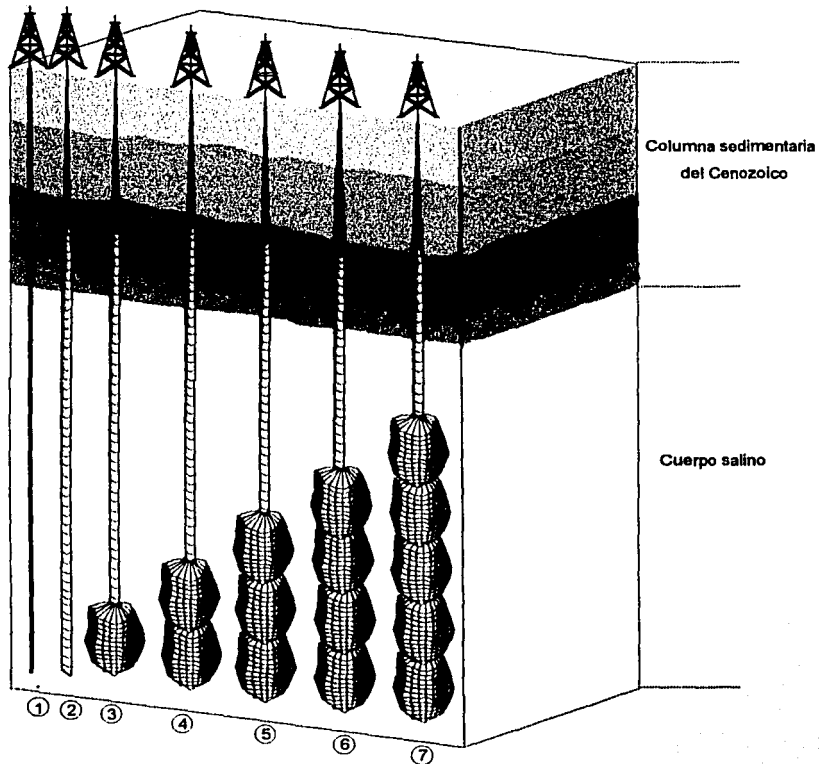
En la imagen (Figura 4.12) se muestra un corte en un domo salino, donde se observan cavidades disueltas en proceso de llenado con residuos sólidos:

- a) Cavidad vacía con la bolsa de insolubles en el fondo.
- b) Cavidad en proceso de llenado.
- c) Cavidad llena hasta la mitad.
- d) Cavidad en estado final de llenado.
- e) Cavidad llena y en proceso de sellado.
- f) Cavidad llena, sellada herméticamente.

Después del relleno de la cavidad disuelta en sal se cierra la perforación herméticamente. La superficie se devuelve a su uso original, después de su reacondicionamiento (KBB,1999).

En la figura 4.13 se muestra un confinamiento de residuos en Ixhuatlán del sureste en México





#### Etapas

- 1 Perforación del pozo de desarrollo.
- 2 Lixiviación de la columna de aproximadamente 5 metros de diámetro.
- 3 Formación de la 1ª celda y la bolsa de insolubles.
- 4 Desplazamiento de tuberías y lixiviación de la 2ª celda.
- 5 Desplazamiento de tuberías, lixiviación de la 3ª celda.
- 6 Registro sonar parcial, evaluación de la forma y lixiviación de la 4ª celda.
- 7 Lixiviación de la parte superior de la cavidad y configuración del techo o bóveda de la cavidad.

CONFINAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS EN CHIHUATLÁN DEL SURESTE  
 Diseño geológico para ubicación de la cavidad piloto destinada a confinamiento de residuos peligrosos.

A. Rodríguez, 2000

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## **CAPÍTULO V.**

### **IMPACTO ECOLÓGICO Y ANÁLISIS FINANCIERO.**

#### **OBJETIVO ESPECIFICO. Evaluación del impacto ecológico y elaboración del análisis financiero.**

##### **V.1 Beneficios de este tipo de almacenamiento y confinamiento.**

Las tres principales ventajas del almacenamiento y confinamiento subterráneo con respecto al almacenamiento en superficie y depósitos a cielo abierto de residuos son: la seguridad, la economía y el respeto al medio ambiente.

##### Seguridad:

El producto es almacenado profundamente en un medio subterráneo el cual está completamente aislado y por lo tanto a salvo de actos de sabotaje y de las consecuencias de desastres naturales como los terremotos.

Así, el producto permanece perfectamente confinado sin contacto alguno con oxígeno y protegido de riesgos de explosión o de incendios.

El equipo de control, los dispositivos y válvulas de seguridad limitan las consecuencias de cualquier accidente o de algún eventual error humano.

Este tipo de almacenamiento está bien adaptado a las zonas sísmicamente activas porque es mucho menos vulnerable a sus efectos que los almacenamientos de superficie.

##### Economía:

En la sección final de este capítulo se comparan los costos de confinamiento contra otros métodos de disposición de residuos peligrosos solidificados los cuales varían considerablemente.

##### Inversión:

El costo por m<sup>3</sup> de material confinado es generalmente menor que en el caso de un almacenamiento convencional, ejemplo el costo de 1m<sup>3</sup> de confinamiento en superficie de un producto cuesta \$132.00 USD mientras que el valor de 1m<sup>3</sup> dispuesto en una cavidad salina es de \$25.00 USD.

La reducida superficie ocupada por las instalaciones disminuye el costo por adquisición de terrenos.

##### Explotación:

La duración de vida de las cavidades supera la de los almacenamientos de superficie.

La reducida superficie ocupada por las instalaciones disminuye significativamente los efectos de la corrosión.

## **V.2 Impacto ambiental.**

### **V.2.1 Conceptos y legislación.**

En la construcción de cavidades en estructuras salinas el impacto ambiental adquiere un valor importante ya que al almacenar hidrocarburos o confinar residuos peligrosos en forma subterránea está implícito el respeto al medio ambiente.

El punto del impacto ambiental es tratado de manera muy superficial ya que el tema es muy extenso y amplio, podría ser objeto principal de un trabajo de investigación, y el objetivo de este estudio es otro.

La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) establecen las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas (LGEEPA).

Se entiende por impacto ambiental: la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza según la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).

Residuos peligrosos: todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente (LGEEPA).

El artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente establece que: La ejecución de obras o actividades causantes de alteraciones de interdependencia entre los elementos naturales que forman el ambiente señalados en los reglamentos y normas técnicas ecológicas por la federación para proteger el ambiente, requerirán previamente la autorización de la Secretaría (LGEEPA).

El artículo 29 de la Ley dice que será competencia de la Federación evaluar:

1. Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos, carbonductos y poliductos.
2. Industria del petróleo, petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica.
3. Exploración, explotación, extracción, tratamiento y refinación de sustancias minerales y no minerales reservadas a la federación.

4. Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radioactivos.

En las evaluaciones de impacto ambiental se tomará en cuenta:

- El ordenamiento ecológico
- Las declaratorias de áreas naturales protegidas
- Las Normas Oficiales Mexicanas (art. 16 del Reglamento en Materia de Impacto Ambiental)

El artículo 150 de la Ley (LGEEPA) dice que los materiales y residuos peligrosos deberán ser manejados con arreglo a la presente ley, su reglamento y las normas oficiales mexicanas que expida la Secretaría. La regulación del manejo de esos materiales y residuos incluirá según corresponda, su uso, recolección, almacenamiento, transporte, rehuso, reciclaje, tratamiento y disposición final.

Según el artículo 151 de la Ley (LGEEPA) la responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En las autorizaciones para el establecimiento de confinamientos de residuos peligrosos, sólo se incluirán los residuos que no puedan ser técnica y económicamente sujetos de rehuso, reciclamiento o destrucción térmica o físico química, y no se permitirá el confinamiento de residuos peligrosos en estado líquido.

Requiere de autorización previa de la Secretaría ( artículo 151 BIS LGEEPA ):

1. La prestación de servicios a terceros que tenga por objeto la operación de sistemas para recolección, almacenaje, transporte, rehuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos.
2. La instalación y operación de sistemas para el tratamiento o disposición final de residuos peligrosos, o para su reciclaje cuando éste tenga por objeto la recuperación de energía, mediante su incineración.
3. La instalación y operación, por parte del generador de residuos peligrosos, de sistemas para su rehuso, reciclaje y disposición final, fuera de la instalación en donde se generaron dichos residuos.

Entre las normas usadas se aplican las NOM siguientes, relativas a rellenos sanitarios:

NOM 083 -ECOL-1996

NOM 084 -ECOL-1997 (pendiente de publicación)

### **V.2.2 Posibles afectaciones ambientales.**

En la creación de las cavidades para el almacenamiento de hidrocarburos o confinamiento de residuos peligrosos los puntos importantes que podrían posiblemente repercutir en la naturaleza se pueden separar en superficiales y en subterráneos.

## Superficie

En el desarrollo y construcción de oquedades en estructuras salinas se deben tomar en cuenta los siguientes procesos en la ejecución de la obra en superficie que posiblemente afectarían a la naturaleza:

1. Adecuación del sitio.
  - asentamientos humanos
  - infraestructura de explotación
2. Construcción de la cavidad.
  - uso de emulsiones en la perforación
  - captación de agua lixiviante
  - generación de salmuera producto de la lixiviación
  - creación de una presa de salmuera
3. Operación de la cavidad.
  - el proceso de llenado y vaciado del producto en la cavidad (posibles fugas)
4. transportación de los residuos peligrosos.
5. tratamiento de los residuos peligrosos.

## Subsuelo

En las cavidades para almacenamiento de hidrocarburos -basados en la geología- son mínimas las posibilidades de fugas del producto guardado, como se menciona anteriormente (capítulo IV), las cavidades son sometidas a una prueba de estanqueidad lo que impide la migración del producto almacenado a las formaciones geológicas subyacentes o a las capas acuíferas.

En el confinamiento de residuos peligrosos la permeabilidad de la roca de sal es baja, esto logra una hermeticidad alta, los espesores de sal que contienen la cavidad actúan como barreras geológicas aislando totalmente los desechos.

La Environmental Protection Agency de U.S.A (EPA) patrocinó investigaciones sobre los confinamientos de residuos peligrosos en formaciones salinas, concluyendo que la hermeticidad de la sal asegura al menos en 10.000 años que los desechos contenidos en la oquedad no emigraran a los estratos adyacentes.

No se han observado fallas o filtraciones en las oquedades usadas en el confinamiento, pero existen algunas preocupaciones sobre un potencial riesgo de falla o filtraciones, durante el proceso de llenado las presiones utilizadas son relativamente bajas, esto hace inseguro la inyección de los desechos o la extracción de la salmuera, al ocurrir la descarga de fluidos en la caverna en el momento del cierre podría haber posiblemente filtraciones.

Otras posibles opciones de falla podrían ser: una intrusión inadvertida, un fracaso en el sellado, derrumbamiento del tejado a poca profundidad. En el proceso de confinamiento

cuando la sal fluye (después de varios años) y atrapa a los residuos la presión en la cavidad aumenta calentándose la masa circundante, existen reacciones químicas en el material confinado creando producción de gases y degradación en el material según el caso.

Los contaminantes filtrados de preocupación para evaluarse en posibilidad de falla o filtraciones son:

#### Químicos

- el arsénico
- el benceno
- el cadmio
- el cromo

#### radiológico

- la radio 226
- el radón 222
- la radio 228

Las principales consecuencias de estos contaminantes son los riesgos de afectación a la naturaleza, a los acuíferos, fauna y los riesgos a la salud humana.

### **V.2.3 Acciones para el control ecológico.**

Se deberán eliminar, prevenir y controlar las fugas y derrames de aguas y materiales contaminados originados durante las actividades de perforación, lixiviación y operación de la cavidad, con la finalidad de operar en localizaciones limpias, seguras y proteger el entorno ecológico.

Las acciones que deberán realizarse son:

1. CAMISA COLECTORA.- Sirve para evitar derrames del fluido de perforación en el piso de la mesa rotatoria al desconectar la tubería
2. LIMPIADOR NEUMÁTICO.- Sirve para evitar derrames del fluido de perforación al sacar la tubería.
3. VÁLVULAS CHECK.- Sirve para evitar fugas del fluido de perforación a través del kelly.
4. BOMBA DE ACHIQUE DEL CONTRAPOZO.- Recuperación de aguas residuales enviándolas al cárcamo a través de las cunetas perimetrales.
5. CAJAS COLECTORAS EN BOMBA DE LODOS.- Recuperación del fluido de perforación al cambiar partes de las bombas de lodos.
6. CENTRÍFUGA PARA RETORNO.- Sirve para enviar el fluido recuperado en las cajas colectoras hacia las presas de operación.
7. PISO CEMENTADO EN LA RAMPA PARA MATERIAL QUÍMICO.- Sirve para evitar filtraciones de productos químicos hacia el subsuelo.
8. PROTECCIÓN LATERAL DE RAMPAS DE MATERIAL QUÍMICO.- Proteger el material químico de las lluvias y vientos para evitar escurrimientos y diseminación de los mismos.

9. **CONTENEDORES METÁLICOS.**- Confinamiento temporal de recortes de formación.
10. **PRESAS AUXILIARES.**- Recuperación de fluidos excedentes durante la perforación, para evitar la contaminación de terrenos aledaños.
11. **LÍNEA DE DESCARGA DE DIESEL.**- Sirve para evitar derrames al descargar las pipas a los tanques auxiliares.
12. **LETREROS ECOLÓGICOS.**- Concientizar al personal sobre el cuidado del entorno ecológico.
13. **DEPÓSITOS DE ACEITE QUEMADO.**- Recuperación de aceites quemados de máquinas de combustión interna.
14. **ESCAPES ECOLÓGICOS.**- Reducción de las emisiones de aceites de las máquinas a la atmósfera.
15. **PLATAFORMAS DE BOMBAS DE AGUA.**- Sirve para evitar derrames de aceite de la bomba de agua a los acuíferos.
16. **CONTROL DE SÓLIDOS CONVENCIONALES.**- Disminución de derrames de recortes impregnados con lodos base agua.
17. **MEDIDOR DE FLUJO.**- Controlar el consumo de agua, evitando su desperdicio.
18. **CÁRCAMO.**- Confinamiento de aguas residuales para ser tratadas en las plantas de tratamiento.
19. **PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS.**- Tratamiento químico de las aguas residuales para su integración al sistema.
20. **FOSA SÉPTICA.**- Sirve para evitar la contaminación del entorno ecológico por desechos orgánicos.
21. **FILTROS PARA POLVOS.**- Sirve para evitar la contaminación del medio ambiente por los polvos generados durante la descarga de barita.
22. **MAMPARAS PARA QUEMA.**- Sirve para evitar la quema de cultivos en terrenos aledaños.
23. **CONTENEDORES DE BASURA.**- Recopilación de la basura generada en el equipo para su posterior confinamiento en lugares autorizados por las dependencias oficiales.
24. **CERCA PERIMETRAL.**- Impedir el paso del ganado o las personas a la localización.

Las instalaciones de tratamiento e inyección de las cavidades para confinamiento, son un conjunto de recintos cubiertos con techo y piso de concreto; toda el área de los edificios se dota de aditamentos y adecuaciones ingenieriles (geomembranas y filtros) para contener, reducir y evitar efectos adversos por posibilidad de derrames.

En general el equipo e instalaciones ocupan un área reducida y no causan mayor problema al equilibrio ecológico, ocupan una superficie limitada y se integran de manera discreta y fácilmente al medio ambiente.

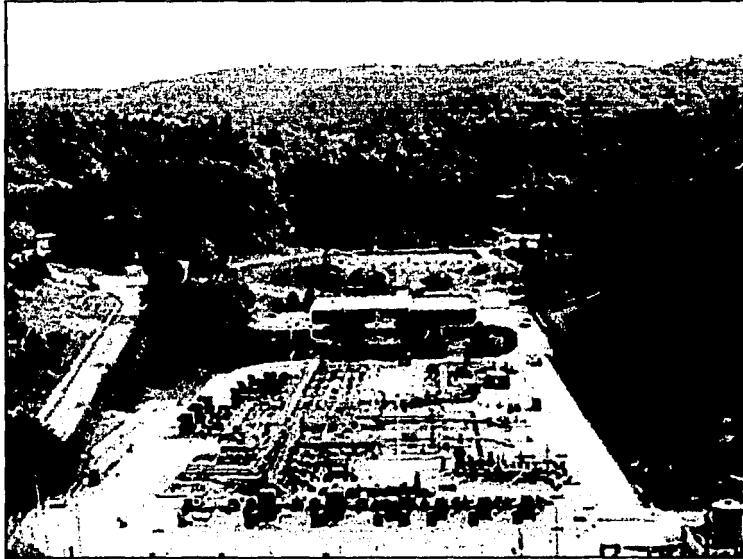


Imagen de Géostock, 19998

Figura 5.1 Instalaciones de superficie de las cavidades

En las imágenes (Figura 5.1 y 5.2) se ilustran las instalaciones en superficie utilizadas en las cavidades de Tuzandépetl, Veracruz.

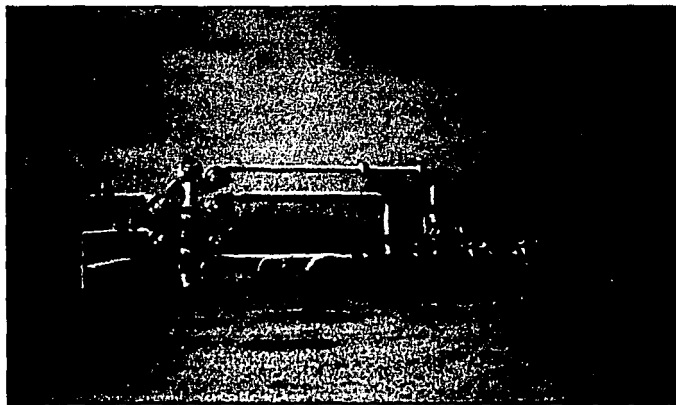


Figura 5.2 Instalaciones en superficie de Tuzandépetl



La salmuera producto de la lixiviación es almacenada en una presa, esta es utilizada en el llenado o en la extracción del producto almacenado, la salmuera no utilizada para este proceso es desalojada mediante la combinación de varios métodos de evacuación, el procedimiento aplicado depende de las condiciones locales y de la legislación regional; estos métodos son los siguientes:

- Utilización en industria química.
- Utilización en industria alimenticia.
- Dispersión en el mar o al río.
- Re-inyección en capas acuíferas profundas.

En la ilustración (Figura 5.3) se muestra el sistema de dispersión de salmuera en el mar, utilizado en Tuzandépetl donde la salmuera es desalojada al mar del golfo de México mediante un difusor

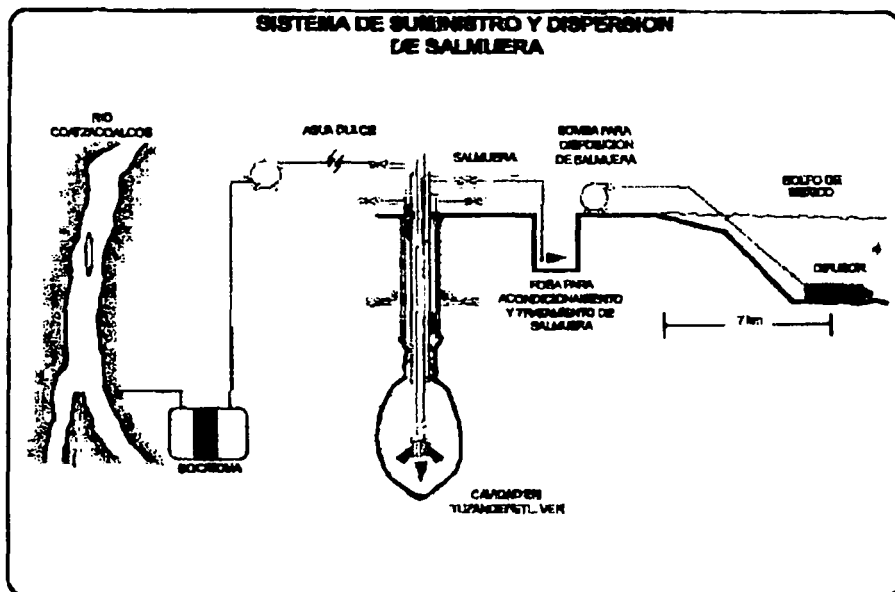


Imagen de IMP, 1990

Figura 5.3 Sistema de suministro y dispersión de salmuera

**TIPO CON FALLA DE ORIGEN**

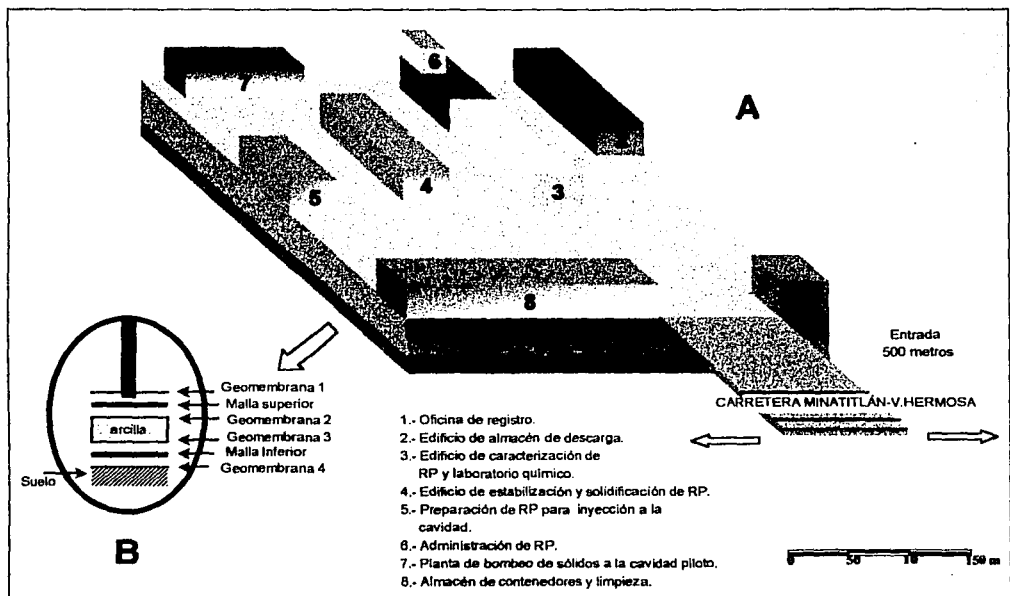


Figura 5.4 Instalaciones superficiales de confinamiento

En la figura 5.4 se muestran las instalaciones superficiales (A) de una cavidad para confinamiento, donde se ilustran las membranas (B) de protección para evitar la contaminación del suelo en caso de derrames, se enumera y enuncia la infraestructura que las compone.

**V.3 Análisis financiero.**

El análisis de rentabilidad de un almacenamiento de hidrocarburos o confinamiento de residuos peligrosos se basa en el balance entre los costos de realización de la obra y las ganancias o beneficios que esta produce. En un estudio de rentabilidad específico habría que establecer costos detallados en función del sitio seleccionado lo que solo es posible después de un estudio de factibilidad.

El costo en la construcción comprende:

- a) Trabajos de exploración geológica
- b) Construcción de las cavidades: perforación, lixiviación, equipo de pozos
- c) Instalaciones superficiales: inyección, compresión, tratamiento, etc.
- d) Gasoducto de conexión a la red

Los costos que se presentan comprenden los servicios de ingeniería y de supervisión de los trabajos. Estos no incluyen tasas, impuestos, derechos de aduana, gastos financieros, seguros, trámites administrativos, compra de terrenos, costos del propietario de la obra, costos del gas colchón e imprevistos; ya que estos dependen de factores específicos y características de cada proyecto, lugar o zona donde se construya la cavidad.

a) Trabajos de exploración geológica

Los trabajos de exploración son con el fin de obtener información de la zona donde se ejecutarán las labores de construcción de las cavidades.

- Campaña geofísica: 0.5 MUSD (millones de dólares)
- Sondeo: 2 a 3 MUSD (millones de dólares)

b) Construcción de las cavidades

Costo por grupos de cavidades:

- Perforación de los pozos, equipo de lixiviación y equipo de pozo para el gas: 3.5 a 4 MUSD (millones dólares)
- Lixiviación y primer llenado, incluyendo la energía, el suministro de agua, la evacuación de la salmuera, los movimientos de tubos, los sonares, el mantenimiento de las instalaciones de lixiviación, los equipos de primer llenado: 2.5 a 3 MUSD (millones de dólares)

c) Instalaciones superficiales

Las instalaciones superficiales del almacenamiento comprenderán principalmente:

- gasoducto de empalme a la red de transporte existente
- las interconexiones de empalme a los pozos
- una estación de compresión
- Una instalación de procesamiento del gas a la salida del almacenamiento: secado, expansión, procesamiento eventual del H<sub>2</sub>S, separación de líquidos
- Instalaciones comunes, conteo del gas, cuarto de control, etc.

Para un proyecto tipo de 300 Mm<sup>3</sup> con 8 cavidades de un volumen útil unitario de 37.5 Mm<sup>3</sup>, el costo total de las instalaciones es de 38 MUSD y el costo de conexión al gasoducto se estima de 1.5 a 2 MUSD (Frias Hinojosa, 1996).

	MUSD (millones de dólares)
Trabajos de exploración	2.5 a 3
Cavidades	2.6 a 30
Instalaciones superficiales y gasoducto	40
<b>TOTAL</b>	<b>68.5 a 73</b>

### Costos de energía eléctrica

La energía de inyección y de extracción utilizada es: 1.5 a 3% del volumen del gas inyectado.

0.02 USD por el porcentaje de m<sup>3</sup> de volumen total almacenado.

Se asume un costo de mantenimiento de las cavidades aproximado de 150,000 USD.

**TABLA 25 Costos de operación y mantenimiento. (USD por año) en cavernas salinas.**

Descripción Resumen del proyecto			Materiales		Equipo y operación		COSTO TOTAL
	Cantidad	Unidades	Costo por unidad	Subtotal	Costo por unidad	Subtotal	
Superintendente de tiempo completo.	2,080	Hrs.		\$10	\$10	\$20,800	\$20,810
Operador de la planta tiempo completo.	2,080	Hrs.		\$2.8	\$2.8	5,824	\$5,827
Tres operadores de tiempo completo	5,204	Hrs.		\$8.5	\$8.5	\$44,234	\$44,242
Un ingeniero de ¼ de tiempo.	520	Hrs.		\$5	\$5	\$2,600	\$2,605
Secretaría de ¼ de tiempo.	520	Hrs.		\$2.8	\$2.8	\$1,456	\$1,459
Costo total de mano de obra.						\$74,914	\$74,943
Otros costos directos							
Vehículo.	12	Meses	\$416.67	\$5,000		\$0	\$5,000
Equipo y suministro para oficina.	12	Meses	\$800.0	\$9,600		\$0	\$9,600
Artículos diversos.	12	Meses	\$150.0	\$1,800		\$0	\$1,800
							\$16,400
Costos de operación							
Eléctricos	300	Mm <sup>3</sup>			\$0.02	\$180,000	\$180,000
Trietilenglicol	12	ton			\$500	\$6,103	\$6,103
Pruebas de sonar e integridad mecánica	1				\$8,000	\$8,000	\$8,000
							\$194,103
Mantenimiento							\$150,000
<b>TOTAL</b>							<b>\$435,446</b>

Frías Hinojosa

### **V.3.1 Análisis para la justificación del proyecto**

Para desarrollar los cálculos que ayuden a determinar la justificación técnica económica para la creación del almacenamiento subterráneo; se consideran los siguientes datos para realizar las operaciones: un periodo de 30 años de vida útil de la obra y un 50% de interés

sobre las inversiones, factores que se tomarán como base para poder realizar los análisis de justificación por los métodos de valor presente y periodo de recuperación.

De acuerdo con el análisis de rentabilidad antes mencionado, en un periodo no mayor de 5 años se planea recuperar la inversión, para que esta sea justificada.

El método del valor presente consiste en desarrollar la suma algebraica de los ingresos y egresos que se van a hacer en un proyecto de inversión, afectándolos con un factor que logra el efecto de transformar los valores al presente (Frias Hinojosa, 1996).

Se tiene que matemáticamente el método de valor presente está definido por:

$$VP = \pm P \pm A \left( \frac{P}{A}, I, N \right) \pm F \left( \frac{P}{F}, I, N \right)$$

Donde:

VP = Valor Presente

$\pm P$  = es el resultado de la suma algebraica de los costos realizados en el presente.

$\pm A$  = es el resultado de la suma algebraica de los costos anuales realizados en el proyecto.

$\left( \frac{P}{A}, I, N \right)$  = Factor de conversión de anualidades a presente, a un interés I, durante N periodos, factor que está definido por:

$$\left( \frac{P}{A}, I, N \right) = \frac{(1+I)^N - 1}{I(1+I)^N}$$

$\frac{P}{A}$  = valor presente dado a una anualidad.

$\pm F$  = es la suma algebraica de los costos futuros que se hagan en el proyecto.

$\left( \frac{P}{F}, I, N \right)$  = factor de conversión de costo futuro a presente a un interés I, durante N periodos, factor que está definido por:

$$\left( \frac{P}{F}, I, N \right) = \frac{1}{(1+I)^N}$$

$\frac{P}{F}$  = valor presente dado un valor futuro.

Con el método de periodo de recuperación se obtiene el periodo en el cual se recupera la inversión de un proyecto, en este caso se sabe que PEMEX Gas Petroquímica Básica quiere recuperar su inversión en un periodo de 5 años para que su almacenamiento sea rentable (Frias Hinojosa, 1996).

Para este caso se utiliza la ecuación anterior de valor presente igualada a cero para un periodo de 5 años.

$$\pm P \pm A \left( \frac{P}{A}, I, N \right) \pm F \left( \frac{P}{F}, I, N \right) = 0$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$\$ - 70,750,000 + (E + \$435,446) \left( \frac{P}{A}, 50\%, 5 \right) = 0$$

Despejando:

$$(E + \$435,446) = \frac{\$70,750,000}{\left( \frac{P}{A}, 50\%, 5 \right)}$$

donde:

$$\left( \frac{P}{A}, 50\%, 5 \right) = \frac{(1 + 0.50)^5 - 1}{0.50(1 + 0.50)^5} = 1.736$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$(\$E + \$435,446) = \frac{\$70,750,000}{1.7366} = \$40,740,527$$

$$E = \$40,740,527 + \$435,446 = \$41,175,973$$

donde:

E = ingresos necesarios por concepto de almacenamiento en cavernas salinas.

Método de valor presente

$$P = -\$70,750,000$$

$$A = \$41,175,973 - \$435,446 = \$40,740,527$$

$$\left(\frac{P}{A}, I, N\right) = \left(\frac{P}{A}, 50\%, 30\right) = \frac{(1+0.50)^{30}}{0.50(1+0.50)^{30}} = 1.9999$$

Sustituyendo en la ecuación estos valores:

$$VP = -\$70,750,000 + \$40,740,527(1.9999) = \$10,726,979.95$$

por lo tanto:

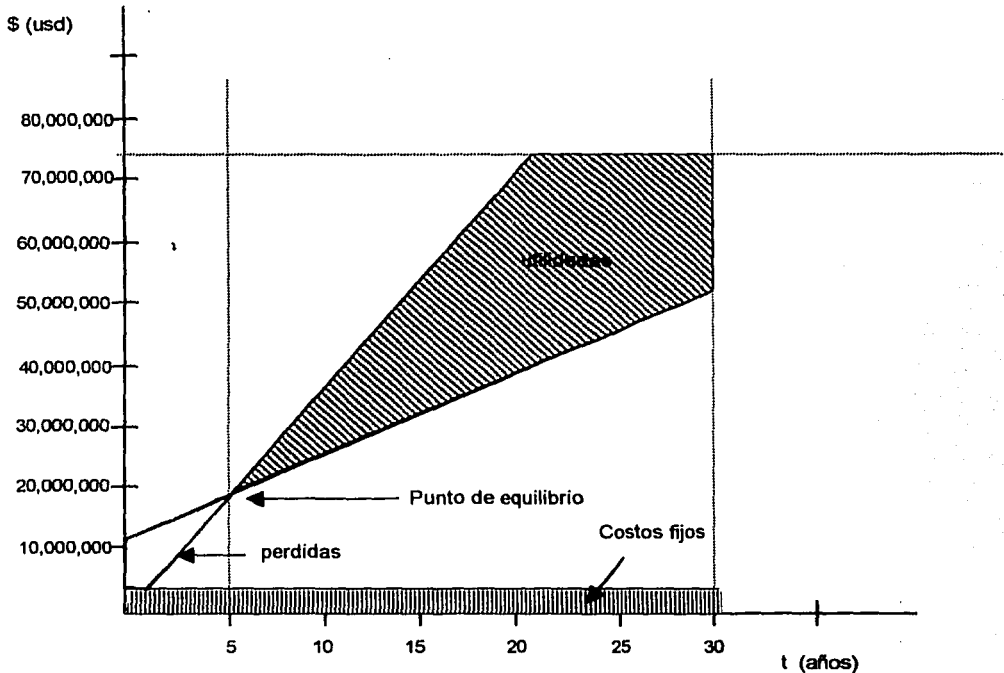
$$\text{Valor Presente} = \$10,726,979.95$$

**TABLA 26** Resultados del análisis financiero.

Concepto	Cavernas salinas
Costos por construcción del almacenamiento	\$70,750,000 USD
Costos de operación y mantenimiento (egresos anuales)	\$435,446 USD
Vida útil del proyecto.	30 años
Periodo estimado de recuperación (PR)	5 años
Valor presente (VP)	\$10,726,979.95 USD
Ingresos anuales necesarios por concepto de almacenamiento	\$41,175,973 USD

Frias Hinojosa

Gráfica de costo-beneficio



En la gráfica de costo-beneficios se aprecian de mejor manera los resultados obtenidos en la tabla 26 (resultados del análisis financiero), se puede observar como las cavidades de almacenamiento de hidrocarburos son rentables ya que la inversión se recupera aproximadamente a los 5 años de operación de la cavidad, y genera ingresos anuales de \$41 millones de dólares.

Con certeza las cavidades salinas son económicas para almacenar o confinar productos o desechos en ellas independientemente del beneficio de seguridad, responsabilidad y obligaciones que impone la LGEEPA (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente) a la industria nacional.

El análisis financiero realizado en párrafos anteriores fue elaborado por el autor el cual se basó en un estudio anterior realizado por Ing. Frías Hinojosa e información proporcionada por el IMP (Instituto Mexicano del Petróleo), los valores de la gráfica costo-beneficio no son exactos pero son aproximados y ejemplifican de una manera adecuada el proceder económico de las oquedades a través del tiempo y de su vida útil. No se pretende profundizar en los costos de los diversos conceptos que intervienen en un proyecto de esta magnitud, en virtud de que por su extensión sería motivo de un trabajo de investigación por separado.

Los valores obtenidos para el costo de almacenamiento en cavidades salinas cambian para el concepto de confinamiento, como a continuación se muestra.

El total de costos para el confinamiento de residuos en cavidades disueltas en sal, abarca varios conceptos, a los cuales deben adicionarse costos de transporte, inspección física, análisis químicos, análisis radiológico (según el caso), desinfección de recipientes, tratamiento (Veil, 1998).

El transporte de lugares remotos a los sitios de confinamiento incrementa los valores de costo.

Estos son costos que se han tomado de compañías dedicadas en el ramo, basados en experiencias de proyectos similares en otros países:

Análisis radiológico	\$100 – \$500 USD por muestra
Análisis químico	\$250 - \$500 USD por muestra
Transporte	\$6 - \$40 USD por tambor



Entre compañías se menciona la KBB, cuyos estudios de costos se han tomado como razonablemente correctos y aplicables para esta tesis.

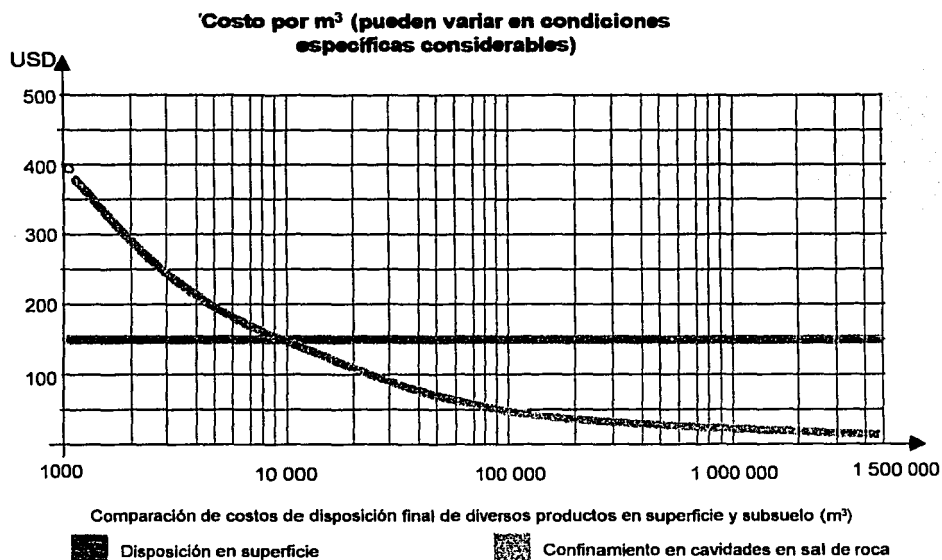


Figura 5.5 Grafica de análisis económico

En la gráfica de comparación de costos específicos se consideran los relativos a volumen creado. Se sintetiza el costo por metro cúbico para confinamiento de un producto. Se observa que su evolución parte de un valor unitario alto (\$375.00 USD aproximadamente) para creación de cavidades de 1000 m<sup>3</sup>, y a medida que aumenta el volumen de almacenamiento decrece considerablemente.

A partir de 1,000,000 m<sup>3</sup> la curva de costos baja hasta el nivel de \$25.00 USD/m<sup>3</sup>, luego se vuelve asintótica. Por lo tanto esta capacidad de almacenaje constituye su punto óptimo de costo inferior.

Para confinamiento superficial controlado de 1,400,000 ton (toneladas) de azufre, recientemente una compañía nacional lo cotizo en \$60.00 USD/ton, sin tratamiento.

Esta cotización es independiente de su volumen; puesto que, en esta cotización, como valor de la densidad del azufre se consideró 2.2 (gr/cm<sup>3</sup>), dentro de una cavidad ocuparía menos metros cúbicos que otra sustancia menos densa.

Un metro cúbico aloja 2.2 ton de azufre, el costo de colocación de un metro cúbico de azufre en cavidades salinas es:

$$1\text{m}^3 \times \$25.00 \text{ USD} = 25.00 \text{ USD}$$

Para comparar el costo de confinar en superficie 1 m<sup>3</sup> de azufre es:

$$1(\text{m}^3) = 2.2 (\text{ton}) \text{ de azufre}$$

$$2.2 (\text{ton}) \times \$60.00 \text{ USD/ton} = \$132.00 \text{ USD}$$

$$\text{confinamiento en superficie de } 1 (\text{m}^3) = \$132.00 \text{ USD}$$

$$\text{confinamiento en cavidad salina } 1 (\text{m}^3) = \$25.00 \text{ USD}$$

Como conclusión; comparando con superficie y en cavidad salina, para el caso específico del azufre el costo por volumen utilizado (m<sup>3</sup>) la relación es de 5 a 1 más caro en superficie.

En Estados Unidos, país donde más se utiliza esta técnica para confinar, los costos en el año de 1998 para la disposición de residuos sólidos y aceites del NOW (Nonhazardous Oil Field wastes) desechos de los campos de aceite de Nonhazardous, en cavidades disueltas en sal contra otros métodos se muestran en la tabla 27:

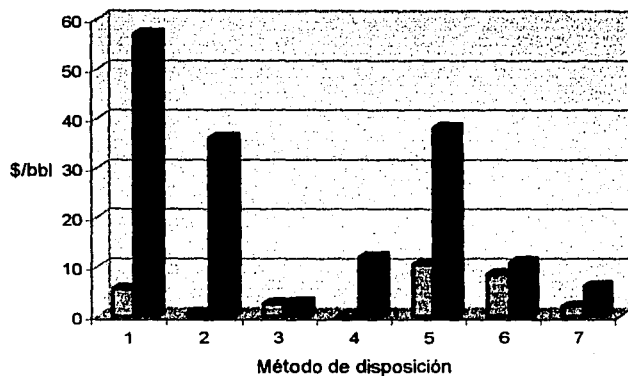
TABLA 27 Costos de confinamiento en cavidades salinas contra otros métodos.

Método	\$/ bbl	\$/yd	\$/ton
Landsread	5.50 - 57	14 - 40	20 - 95
Landfill/pit	0.50 - 36	6.50 - 37.50	17 - 150
Evaporación	2.50 - 2.75	4.20 - 18.90	-----
Treta/reuse	0 - 12	12.50 - 28.50	12 - 45
Incineración	10.50 - 38	-----	20 - 100
Inyección	8.50 - 11	-----	-----
Cavidad en sal	1.95 - 6	50	-----

Laboratorios Nacionales Argonne

## Costos por disposición de desechos sólidos por barril

	Método	\$/ bbl
1	Landsread	5.50 - 57
2	Landfill/pit	0.50 - 36
3	Evaporación	2.50 - 2.75
4	Treta/reuse	0 - 12
5	Incineration	10.50 - 38
6	Inyección	8.50 - 11
7	Cavidad en sal	1.95 - 6



TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación, confirman que las estructuras salinas (domos salinos), son una buena opción para construir cavidades por medio de lixiviación para el almacenamiento de hidrocarburos o bien para confinar residuos peligrosos. Los hidrocarburos almacenados pueden ser líquidos, licuados y gaseosos (Petróleo crudo, gas LP, gas natural y derivados como la gasolina, gasóleo, diesel, etc.), los residuos peligrosos solidificados a ser confinados son los siguientes: químico-tóxicos y desechos radioactivos (en estos últimos se siguen realizando investigaciones).

La mejor selección de hidrocarburos a almacenar en cavidades lixiviadas en sal son comúnmente:

- gas natural.
- Gases licuados (GLP).
- Productos con baja presión, como crudo, gasoleo y gasolina.

En el confinamiento de residuos previamente solidificados se depositan:

- residuos químico-tóxicos.
- residuos radioactivos.

Existen cavidades que ya confinan desechos radiactivos, aunque en estos se siguen realizando muchas investigaciones por los laboratorios Argonne, por el departamento de Energía de Estados Unidos y la empresa alemana KBB que tiene gran experiencia en este ramo.

Se ha comprobado que el comportamiento de la sal es afectado por sus características mineralógicas y por los aumentos de temperatura (termofluencia). En laboratorio las pruebas de calidad de sal demuestran que las cavidades deben ser construidas en sal lo más homogénea posible o con pocas impurezas (anhidrita, silvita, carnalita y potasio) que deberán ser menores al 5%; los materiales insolubles tendrán que ser menor al 5% para el mejor aprovechamiento del volumen útil en la oquedad.

La resistencia a la compresión simple en los ensayos aplicados a las probetas de sal indican que la halita es influenciada por el porcentaje de anhidrita e impurezas, variando los resultados de 235.8 bares a 341 bares la resistencia más alta.

La forma de la cavidad es la de un cilindro con techo cónico; sus dimensiones oscilan entre diámetros de 20 a 40 metros con profundidades de 200 a 400 metros, con espaciamiento intercavidades del diámetro de  $2 > 1$ .

De la modelización realizada se obtuvieron los siguientes valores de fluencia y comportamiento de pérdida de volumen de las cavidades. La fluencia de la sal debe mantenerse entre un rango del 3% al 9% en un tiempo de 10 años, según el tipo de explotación, para que esta sea aceptable y reafirme su capacidad para la construcción de oquedades.

Por otra parte, el comportamiento elasto-plástico fuerte de la sal garantiza que no habrá fugas, ya que las cavidades a fluir se sellan solas. Evitando así la emigración del producto almacenado o confinado.

La práctica de almacenar productos o confinar desechos subterráneamente es por el respeto al medio ambiente y no afectar la ecología ya que estos son depositados en el subsuelo y no afectan la superficie en lo más mínimo, esta tecnología de almacenar y depositar productos cubre las normas existentes de calidad y de seguridad extendidas por la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) y por la Procuraduría Federal de protección al Ambiente (PROFEPA)

Económicamente las cavidades utilizadas para almacenamiento de hidrocarburos son rentables, la inversión inicial es mayor que un almacenamiento superficial pero es recuperable en pocos años, ya que los volúmenes almacenados son mayores en una proporción de 5 a 1 y esto genera mayores utilidades.

En el confinamiento de residuos peligrosos los costos varían en proporciones de 4 a 1 en un depósito tradicional a un confinamiento en oquedades construidas en sal:

- otros métodos de disposición	\$/bbl	0.50 - 38
- cavidad en sal	\$/bbl	1.95 - 6
- otros métodos de disposición	\$/ton	132
- cavidad en sal	\$/ton	25

El almacenamiento de hidrocarburos y el confinamiento de residuos peligrosos en estructuras salinas garantiza por 10,000 años el aislamiento de los desechos garantizando el cuidado del medio ambiente y siendo esta tecnología factible.

Por último un logro obtenido en los estudios anteriores en este tema y en las investigaciones actuales, es el hecho que la vida útil de las cavidades inicialmente era de 15 años y actualmente se considera de 30 años.

## RELACIÓN DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

- Figura 1.1 Domo salino en un corte geológico.
- Figura 1.2 Evolución y forma estructural de los domos.
- Figura 1.3 Evolución de los diapiros.
- Figura 1.4 Mapamundi de países con domos salinos.
- Figura 1.5 Mapa indicando la localización de Tuzandépetl.
- Figura 1.6 Torre Eifel en comparación de una cavidad.
- Figura 1.7 Roca de sal y sus derivados.
- Figura 1.8 Cavidades lixiviadas en un corte geológico.
- Figura 1.9 Procedimiento de lixiviación y llenado de cavidades.

- Figura 2.1 Probetas de sal.
- Figura 2.2 Gráfica de fluencia.
- Figura 2.3 Gráfica de elasticidad.
- Figura 2.4 Gráfica de fluencia en tracción triaxial de la sal.
- Figura 2.5 Gráfica de fluencia en compresión simple.
- Figura 2.6 Gráfica de velocidad de fluencia.
- Figura 2.7 Modelos Reológicos.
- Figura 2.8 Estructura salina.

- Figura 3.1 Diagrama del sistema de laboratorio empleado en los ensayos.
- Figura 3.2 Esquema detallado del vaso de presión.
- Figura 3.3 Diagrama del sistema para medir la velocidad de las ondas elásticas.
- Figura 3.4 Forma de una cavidad.
- Figura 3.5 Volumen de una cavidad.
- Figura 3.6 Mallado de elemento finito de una cavidad.
- Figura 3.7 Mallado de elemento finito de una cavidad.

- Figura 4.1 Estructura salina.
- Figura 4.2 Tubería y zapatas de explotación.
- Figura 4.3 Lixiviación directa.
- Figura 4.4 Lixiviación inversa.
- Figura 4.5 Etapas de lixiviación.
- Figura 4.6 Cabezal de un pozo.
- Figura 4.7 Proceso de lixiviación.
- Figura 4.8 Procedimiento de llenado de una cavidad.
- Figura 4.9 Procedimiento de vaciado de una cavidad.
- Figura 4.10 Residuos solidificados.
- Figura 4.11 Inyección de residuos.
- Figura 4.12 Inyección de residuos en una cavidad.

Figura 4.13 confinamiento de residuos peligrosos en Ixhuatlán del sureste

Figura 5.1 Instalaciones de superficie de las cavidades.

Figura 5.2 Instalaciones en superficie de Tuzandépetl.

Figura 5.3 Sistema de suministro y dispersión de salmuera.

Figura 5.4 Instalaciones superficiales de confinamiento.

Figura 5.5 Grafica de análisis económico.

## TABLAS

Tabla 1 Cavidades existentes en Alemania.

Tabla 2 Cavidades existentes en Canadá.

Tabla 3 Cavidades existentes en Francia.

Tabla 4 Cavidades existentes en Estados Unidos.

Tabla 5 Cavidades existentes en Portugal.

Tabla 6 Cavidades existentes en Africa.

Tabla 7 Cavidades existentes en México.

Tabla 8 Tipos de confinamientos para residuos.

Tabla 9 Evaporitas de los pozos de Tuzandépetl.

Tabla 10 Tipos de sal.

Tabla 11 Clasificación de la sal.

Tabla 12 Clasificación de la roca basada en la resistencia.

Tabla 13 Porcentaje de fluencia.

Tabla 14 Calidad de la sal y resistencia a compresión simple

Tabla 15 Cavidad y su posible resistencia a compresión simple

Tabla 16 Características de las probetas.

Tabla 17 Resultados de los ensayos de compresión uniaxial.

Tabla 18 Resultados de los ensayos de compresión uniaxial.

Tabla 19 Resultados de compresión diametral.

Tabla 20 Resultados del ensayo de compresión triaxial.

Tabla 21 Constantes elásticas y parámetros de Lemaitre.

Tabla 22 Programa de lixiviación.

Tabla 23 Indicaciones del cabezal.

Tabla 24 Mantenimiento y cuidados de una cavidad.

Tabla 25 Costos de operación y mantenimiento.

Tabla 26 Costos de construcción de una cavidad.

Tabla 27 Costos de confinamiento de residuos.

## **GLOSARIO**

**Anhidrita:** Es una roca sedimentaria formada por evaporación de disoluciones salinas y la consiguiente precipitación de las sales.

**Diapiros:** Estructura geológica salina en forma de hongo que es formada si se somete la sal a una presión y a una temperatura suficiente.

**Halita:** Mineral de la clase de los halogenuros, que cristaliza en el sistema cúbico y es incoloro (sal gema).

**Hidrocarburos:** Cualquiera de los compuestos hidrógeno y carbono, como los que forman la nafta, el metano y otros productos del petróleo.

**Litología:** Hace referencia a las características mineralógicas, a la textura y a la fábrica, junto con un nombre o un término descriptivo de algún sistema de clasificación de las rocas.

**Lixiviación:** Proceso químico por medio del cual son separados los materiales solubles utilizando agua o algún otro disolvente.

**Lutita:** Roca sedimentaria, producto de la descomposición de minerales inestables, lo que resulta en silicatos complejos hidratados.

**PH:** Coeficiente que indica la acidez de un medio.

**Salmuera:** Agua saturada en sal producto del proceso de lixiviación.



## REFERENCIAS.

- 1.-Beer, P. F., 1996. Mecánica de Materiales, segunda edición, Editorial McGraw-Hill, Colombia, pág. 48-93.
- 2.-Benavides, L., 1983 Domas salinos del sureste de México, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, Vol. XXXV, No.1, México.
- 3.-Chávez Aguirre, J.M. 1995. Cuaderno de postgrado, serie b, número 5: Generalidades sobre el elemento finito, Universidad Nacional Autónoma de México, ENEP Acatlan.
- 4.-Foucault, A., 1986. Diccionario de Geología, Masson Editores, México.
- 5.-Frias Hinojosa, J.E., 1997. Tesis: Proyecto para el almacenamiento subterráneo de gas natural en la República Mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México. Capítulo I, pág. 1-8.
- 6.-Géostock, Seminario II A, Diseño de una caverna, Instituto Mexicano del Petróleo, transferencia de tecnología.
- 7.-Géostock, 1986. Registros sonar realizado en las cavidades de Tuzandépetl, Informe técnico interno, Instituto Mexicano del Petróleo.
- 8.-Géostock, 1991. Proyecto de almacenamiento de gas LP en cavidades salinas en Tuzandépetl. Instituto Mexicano del Petróleo -PEMEX. Paquete tecnológico - Fase 2, Vol. 1-2 Informe técnico provisional (inédito). Francia.
- 9.-Géostock, 1991. Estudio de estabilidad de las cavidades 306-334-338-340. Stockage souterrain Géostock Underground Specialist, México.
- 10.-Géostock Underground Specialist, 1997. Estudio de Factibilidad de Almacenamiento de Gas Natural en Tuzandépetl (ISO 9001). Pág 12-30 técnicas de almacenamiento subterráneo; pág 38-46 principios para la construcción de cavidades; pág 19-25 diseño preliminar.
- 11.-Geo Energía, 1993. Determinación de propiedades físicas, químicas y mecánicas en roca de sal gema para el estudio del comportamiento de cavidades subterráneas para el almacenamiento de gas L.P. en Tuzandépetl, Veracruz.
- 12.-Hunter mexicana, S.A. de C.V., México. Capítulo. IV Método de evaluación tecnológica; V Evaluación de la Tecnología; VII Conclusiones y síntesis bibliográfica.
- 13.-Hunter Salt Group, Inc.. 1997. Evaluación de la Tecnología de Hunter Mexicana para el confinamiento de desechos industriales peligrosos solidificados en cavidades salinas.
- 14.-Jackson M.P.A. y Talbot C.J., 1986. External Shelves, strain rates, and dynamics of salt structures. Geological Society of America Bulletin, V.97, pp. 305-323.
- 15.-John A. Veil, 1997. Costs for off-site disposal of Nonhazardous oil field wastes: salt caverns versus other disposal methods. Argonne national Laboratory.

16.-Kavernen Bau-und Betriebs-Gmbh (KBB)-1999. Eliminación de residuos peligrosos, Hannover, Alemania.

17.-Marín Emilio, L. y Alvarez G., 1999. Tesis: Estabilidad mecánica en cavidades salinas para el almacenamiento de gas natural en México, Universidad Nacional Autónoma de México. Capítulo IV, pág. 43-60 Estabilidad mecánica en domos salinos.

18.-Nuñez Farfán, J., 1994. Tesis: "Análisis estructural de cavidades excavadas en domos salinos para almacenar hidrocarburos", Instituto Politécnico Nacional. Capítulo I, 11-24 Leyes de comportamiento.

19.-Rodríguez, A.,1988. Informe del seguimiento geológico de la primera parte de la lixiviación de los pozos Tuzandépetl 306, 334, 338 y 340. Informe técnico interno. Instituto Mexicano del Petróleo.

20.-Rodríguez, A., 1999. Selección de sitios para el almacenamiento de gas natural. Domo salino de Tuzandépetl Ver. México. Capítulos: IV Geología, V Definición de sitios potenciales.

21.-Rodríguez Correa A., 2000. Tesis: Confinamiento de residuos peligrosos en domos salinos, Instituto Politécnico Nacional.

22.-SEMARNAP,1997. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, Delitos Ambientales. México.

23.-Stagg-Zienkiewicz, 1968. Mecánica de rocas aplica en la ingeniería práctica, Editorial Blume, España.

24.-Torres M., 1990. Disposición de residuos generados en refinerías y centros petroquímicos. Informe interno . Instituto mexicano del petróleo.

26.-Vel J. et al., 1998. Disposal of NORM (Naturally ocuring radioactive materials)-contaminad oil fuel wastes in salt caverns. Argonne National Laboratory, operated by de University of Chicago, for U.S. Department of Energy.

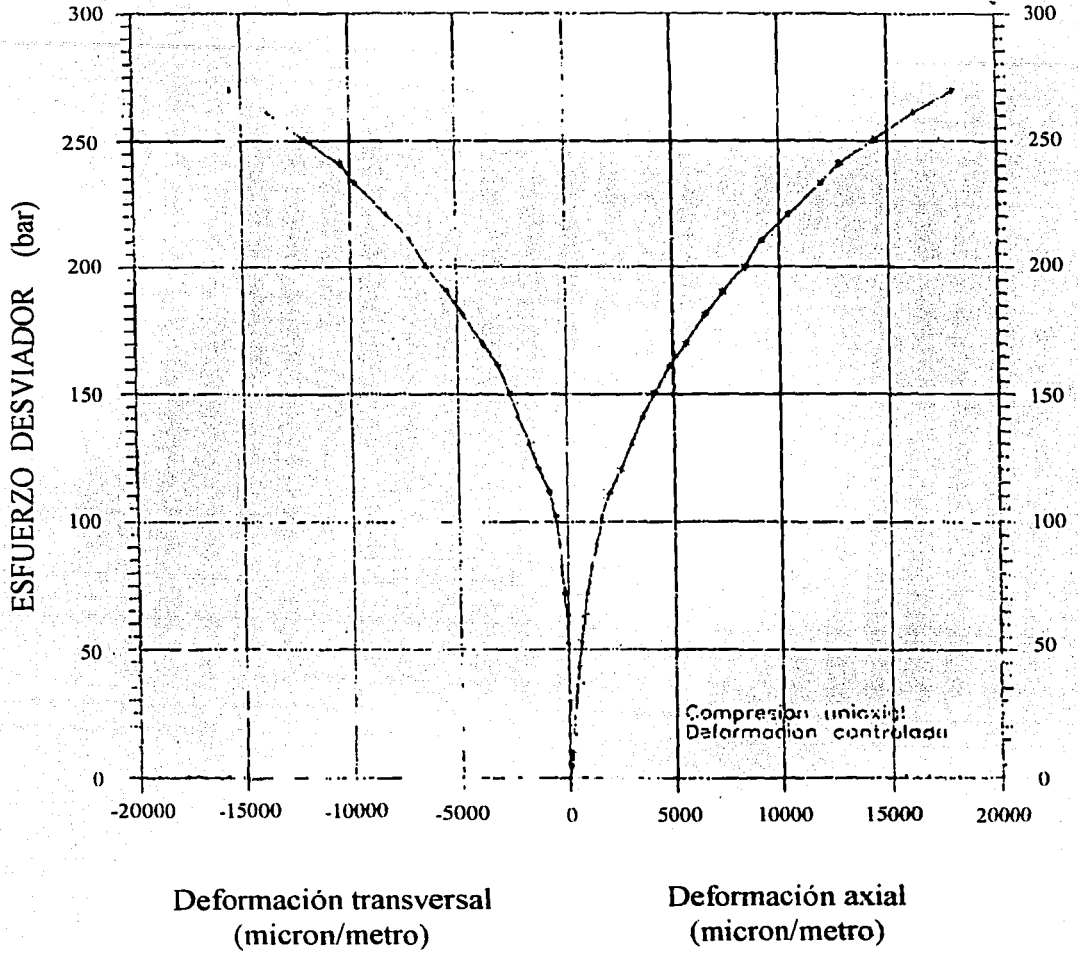
27.-\_\_\_\_\_, 1989. Anatomy of mushroom-shaped diapirs. Journal of Structural Geology, Vol. 11, No.1/2, p.p.211 a 230.

## **APENDICE A**

### **Gráficas de los ensayos realizados en laboratorio**

(Muestras extraídas de Tuzandépetl,  
Veracruz, tabla 17 y tabla 18 del capítulo  
III)

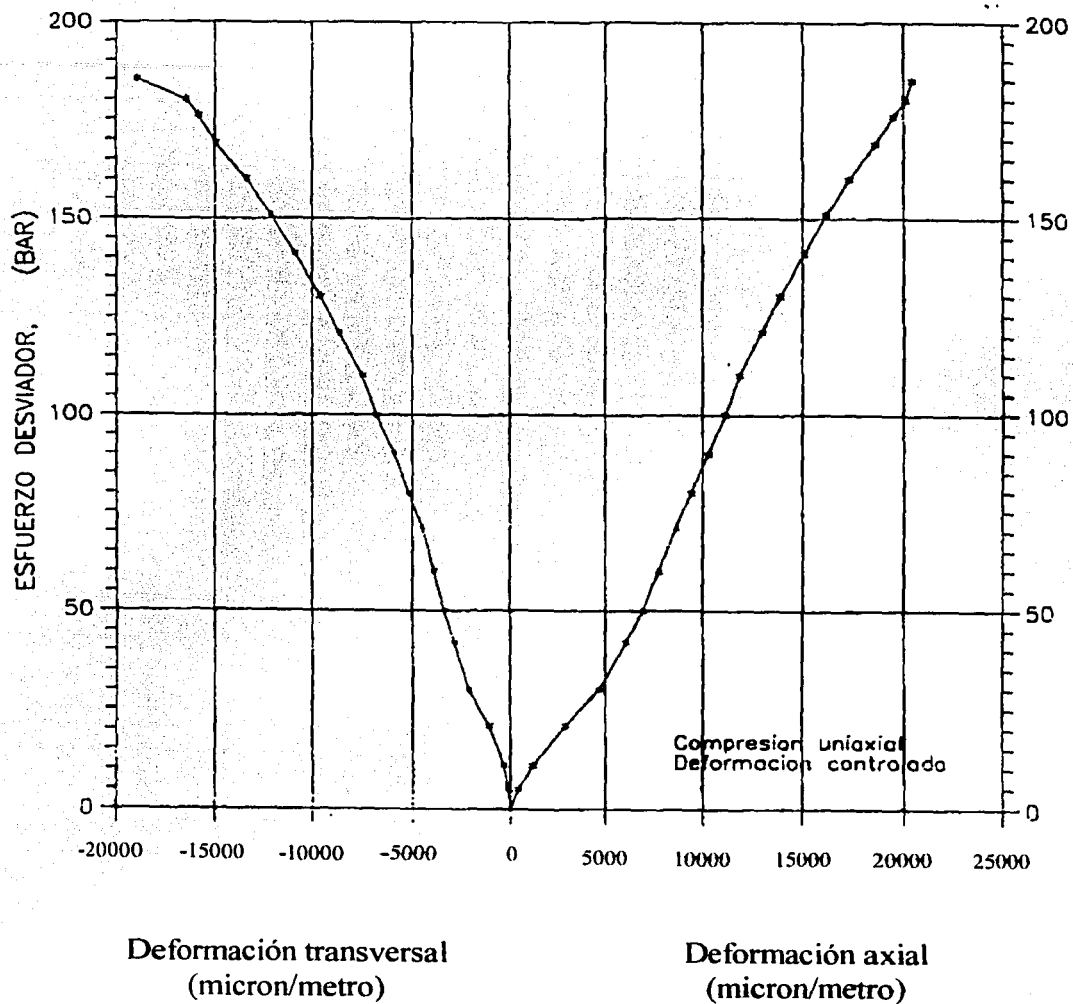
### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



MUESTRA A.1

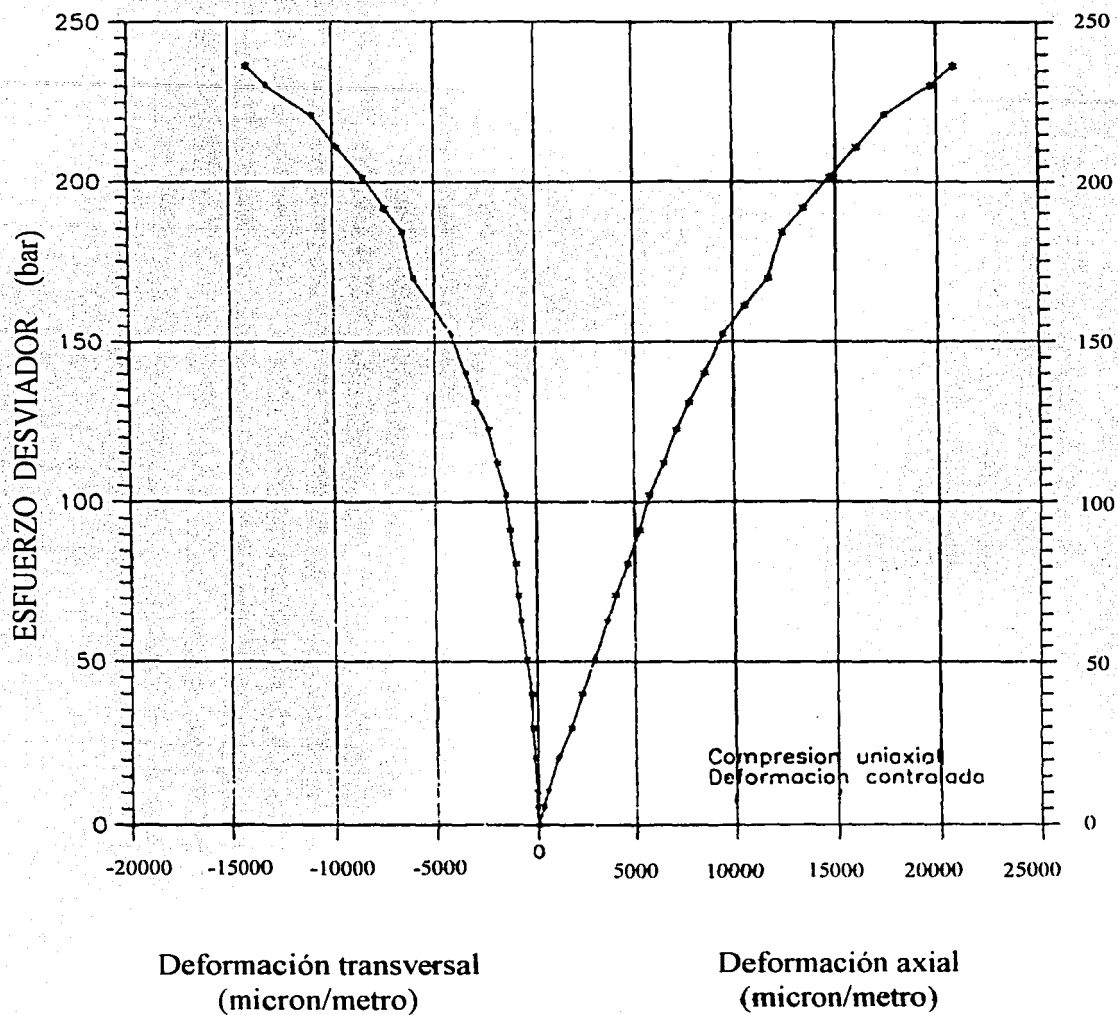
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



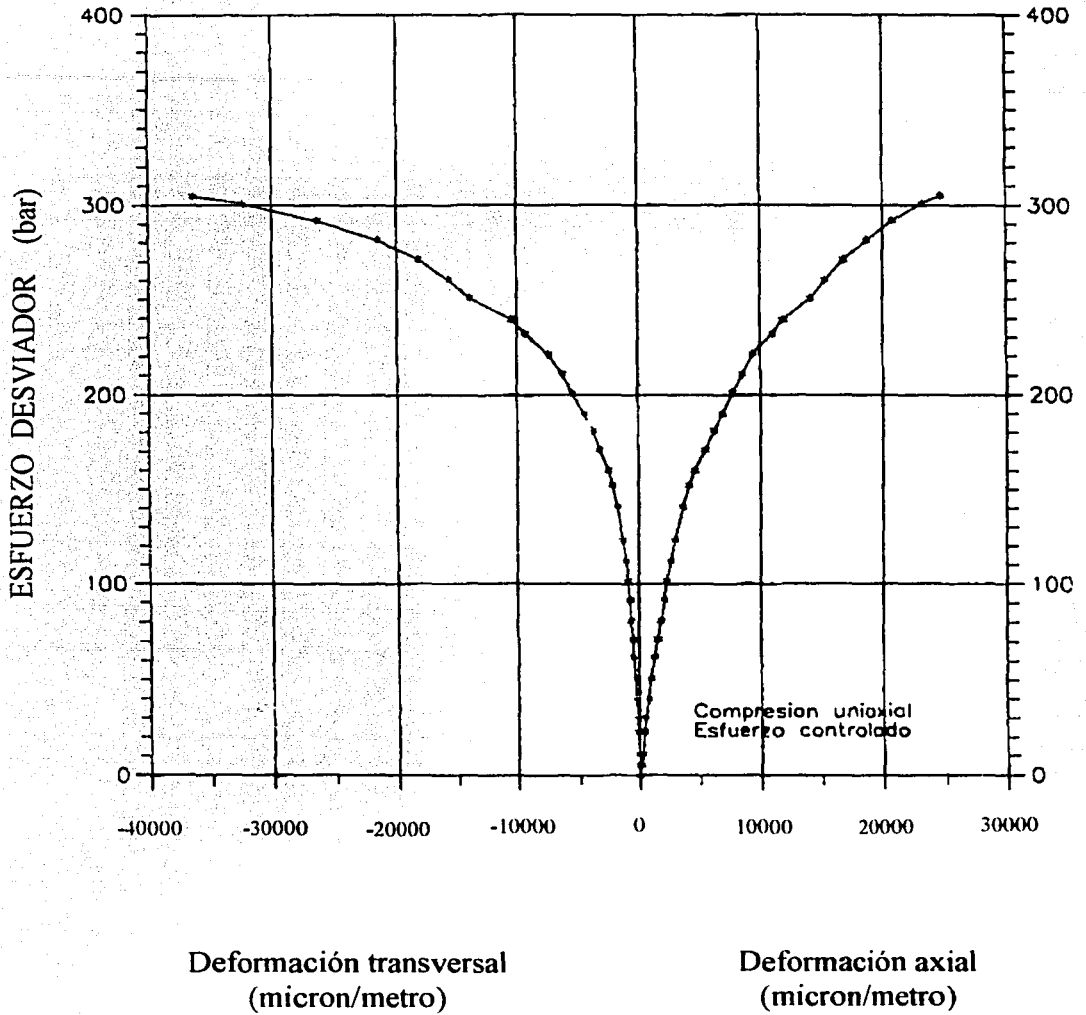
MUESTRA A.2

### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



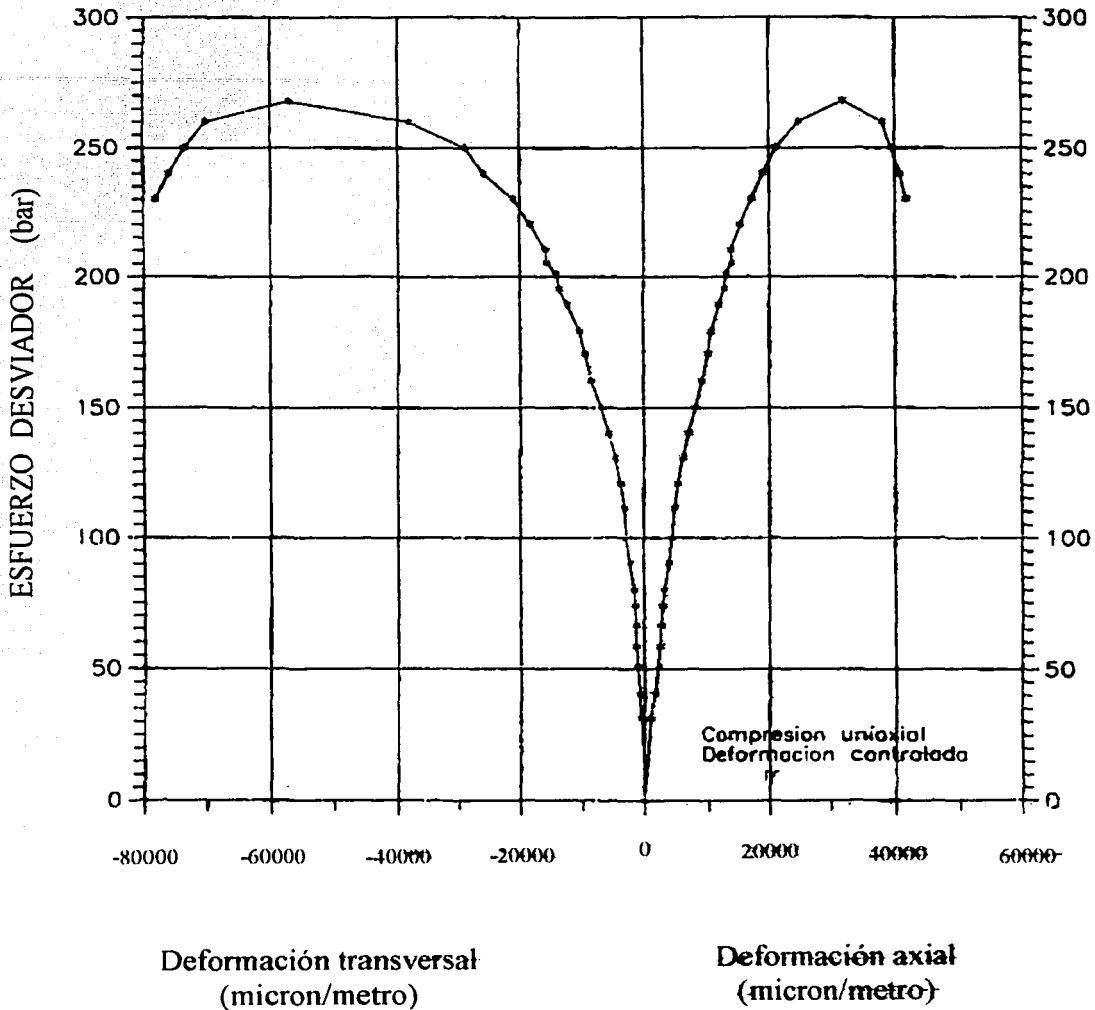
MUESTRA A.4

### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



MUESTRA A.5

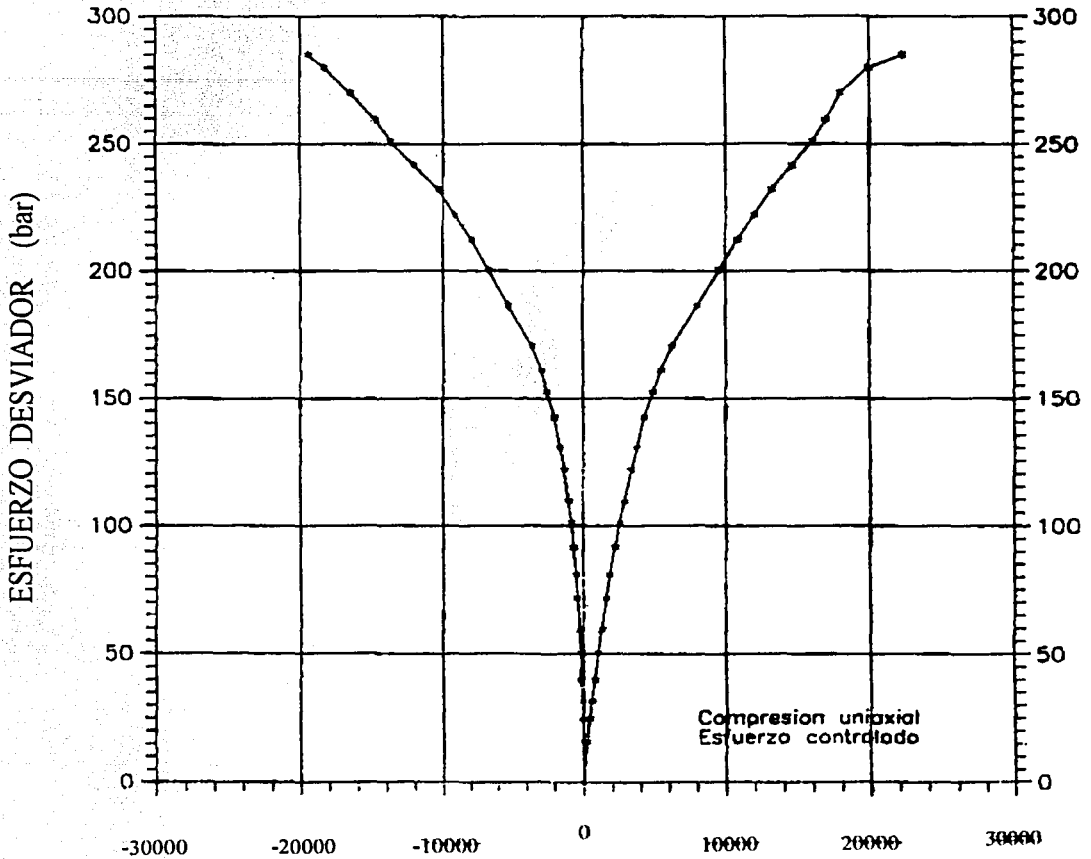
### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



MUESTRA A.9



### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial

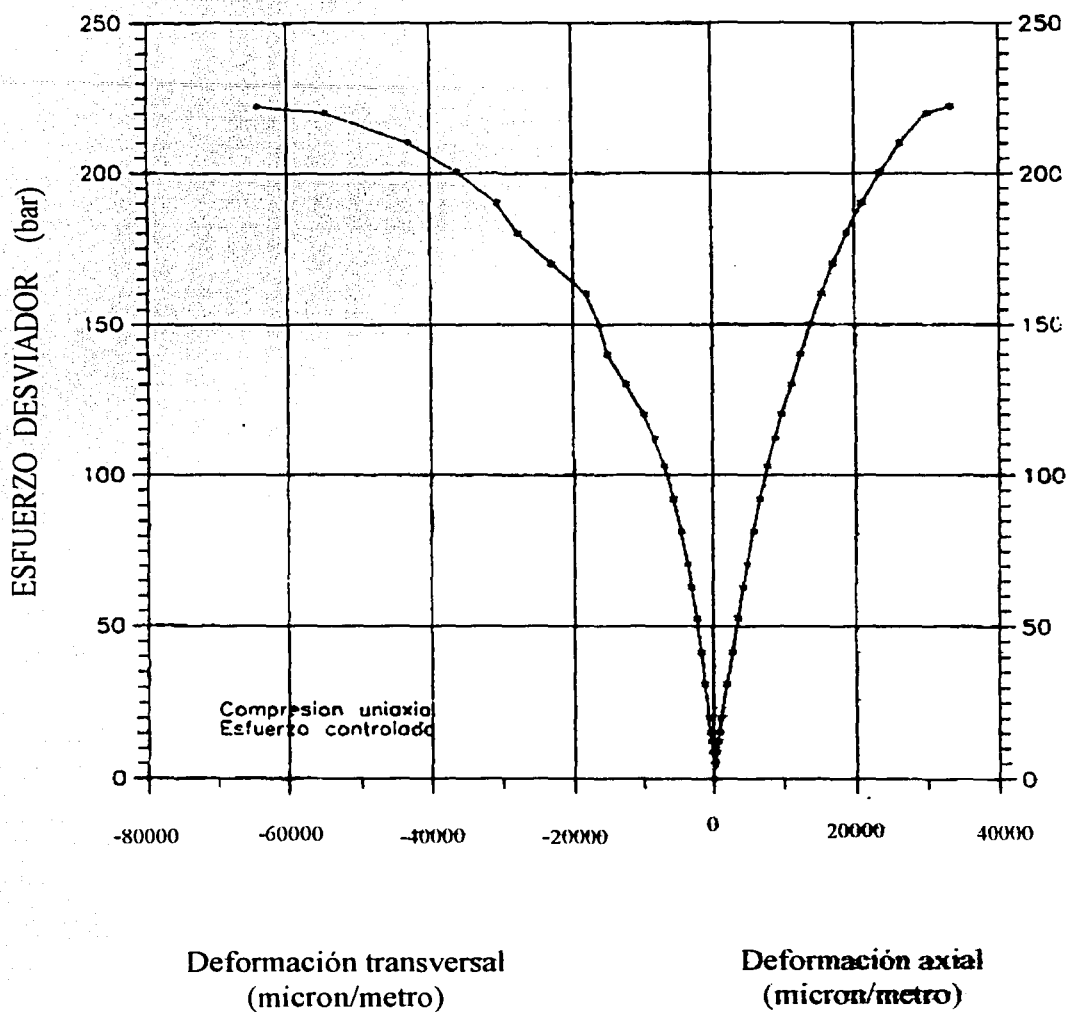


Deformación transversal  
(micron/metro)

Deformación axial  
(micron/metro)

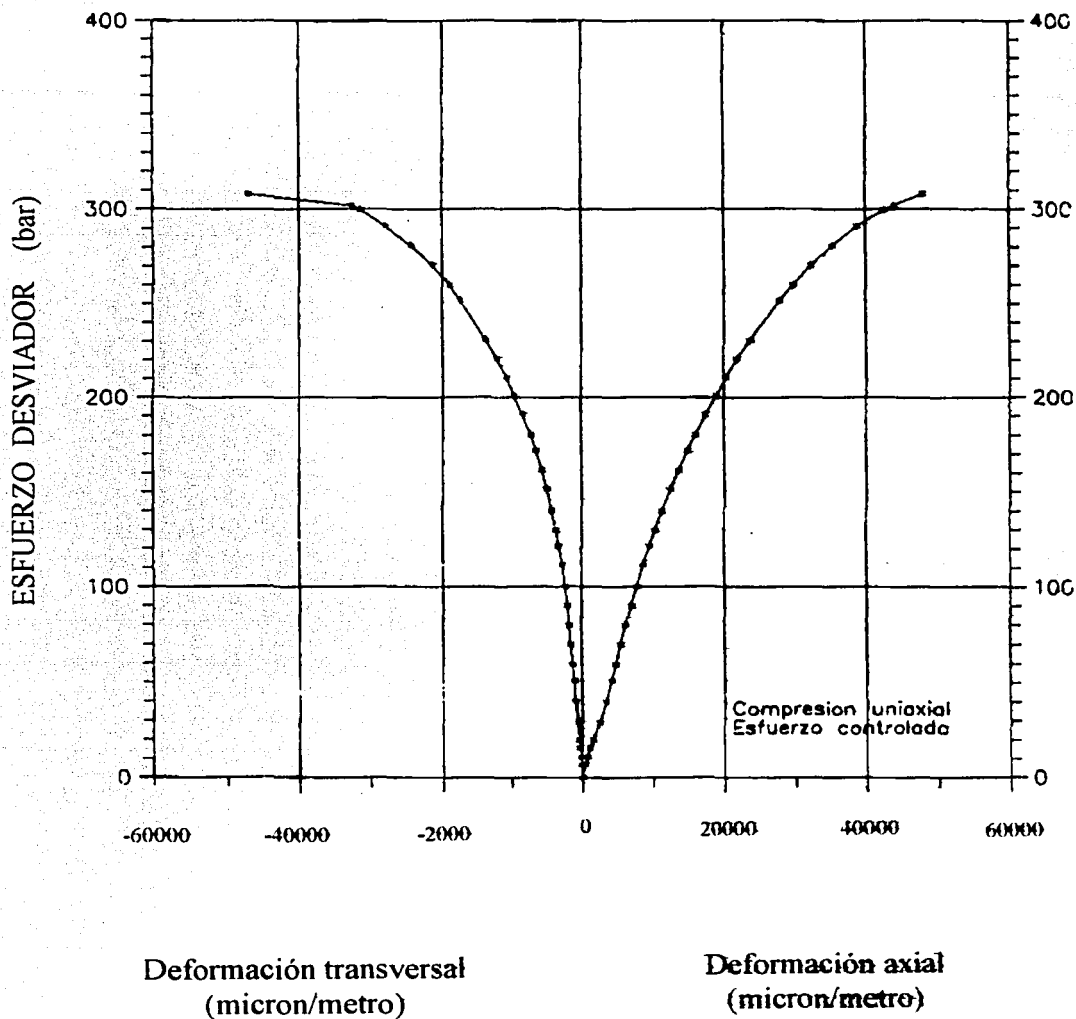
MUESTRA A.7

Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



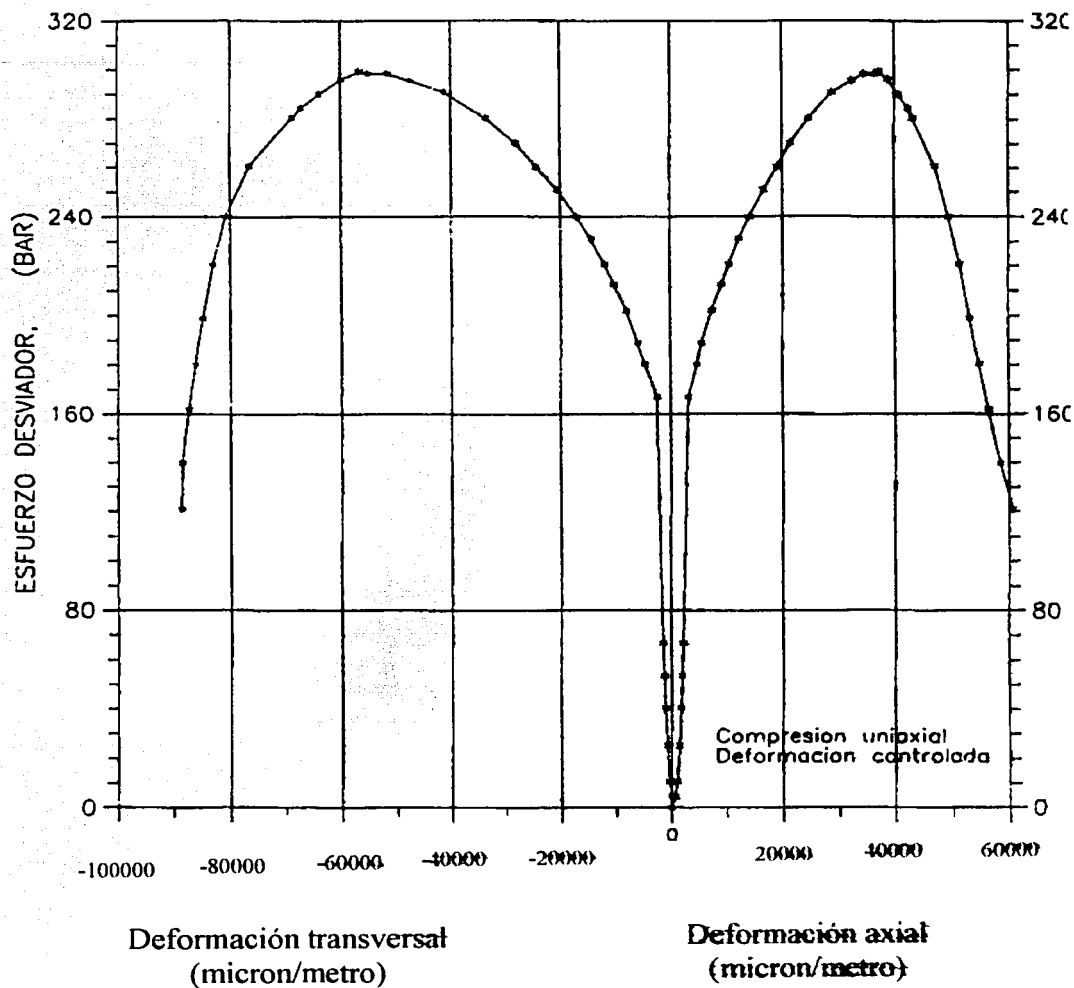
MUESTRA A.6

### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



MUESTRA A.9

### Gráfica esfuerzo-deformación unitaria de compresión uniaxial



MUESTRA A.10

## **APENDICE B**

### **Gráficas de los ensayos realizados en cavidades**

A pesar de las precauciones que se toman para eliminar los efectos parásitos del análisis de los ensayos, persiste la duda sobre considerar la sal de Tuzándepetl como sal fuente.

Para tomar en cuenta estas incertidumbres se han simulado dos situaciones:

### CASO BASICO

En esta fase de factibilidad y en espera de datos específicos se han aplicado modelos numéricos con ciclos típicos de operación y dos valores de presión mínima:

- Un ciclo anual de tipo estacional con una bajada de presión mínima cada año durante un periodo de más o menos un mes o un ciclo de periodo más corto (unos dos meses) durante el cual se oscila entre la Pmin y la Pmax
- Un valor de presión mínima igual a 80 o 60 bares.

Datos de cálculo (fijos)

- Pmax fijada a 0.18 veces la profundidad o sea 180 bares a 1000 m
- Presión geostática de 230 bares
- Modelo reológico correspondiente a la última campaña de ensayos (1993):

E	=	160 000 bares
v	=	0.3
$\alpha$	=	0.36
$\beta$	=	3.30
$\kappa$	=	7.26
( $\epsilon$ 100,1000)	=	7.1%

Los principales resultados se dan en términos de pérdida de volumen y de deformación visco-plásticas hasta una distancia de 2.5 de radio y permiten establecer el siguiente cuadro al cabo de 10 años de operación.

Pérdida de volumen	Ciclo largo	Ciclo corto
Pmin 60 bares	7.7 %	9.6%
Pmin 80 bares	7.0%	8.6%

Deformación visco- plástica	Ciclo largo	Ciclo Corto
Pmin 60 bares	0.9%	1.1%
Pmin 80 bares	0.8%	1.0%

Estos cuadros reflejan la influencia consiguiente que puede tener el procedimiento operatorio en el comportamiento de fluencia del almacenamiento y la influencia de la presión mínima admisible en la duración del almacenamiento.

### PEOR CASO

Como peor caso se ha considerado los resultados que darían los ensayos realizados sobre el comportamiento de algunas cavernas de crudo utilizadas para la explotación de gas

Parámetros:

E	=	80 000 bares
v	=	0.3
$\alpha$	=	0.23
$\beta$	=	3.10
$\kappa$	=	2.7
( $\epsilon$ 100,1000)	=	35.7%

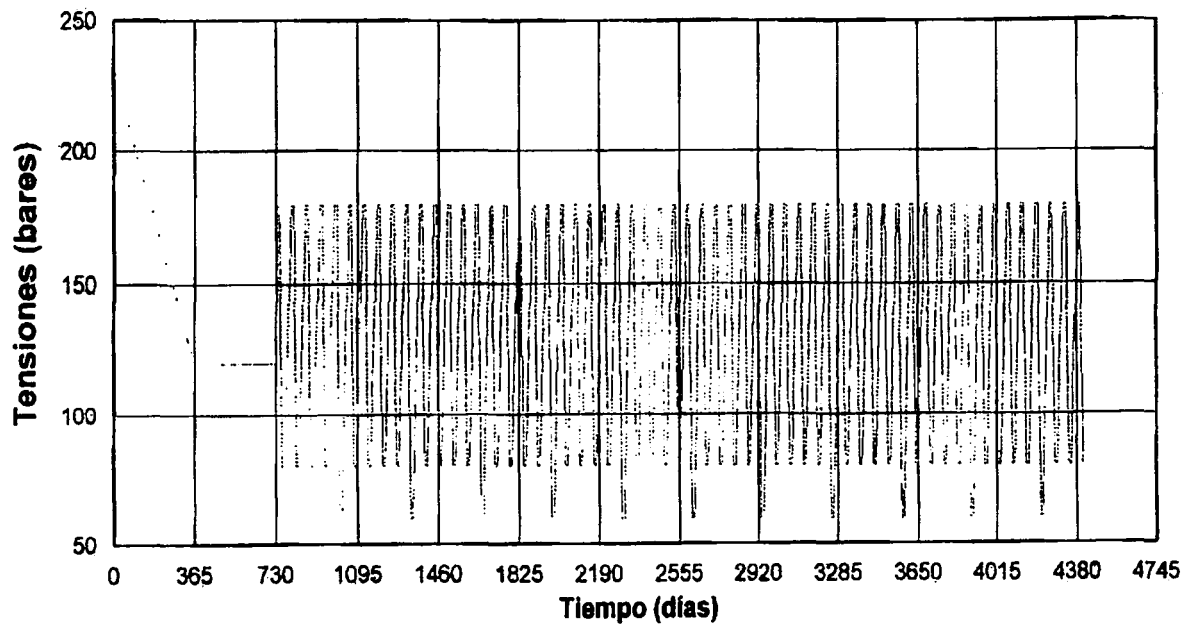
Esta serie de parámetros corresponde al calibrado del comportamiento de la cavidad 306 durante los ensayos de recibo de 1991.

La pérdida de volumen y la deformación visco plástica correspondiente a este ciclo se presenta en cuadros similares.

Pérdida de volumen	Ciclo largo	Ciclo corto
Pmin 60 bares	34%	39%
Pmin 80 bares	31%	35%

Deformación visco-plástica	Ciclo largo	Ciclo corto
Pmin 60 bares	3.93%	4.45%
Pmin 80 bares	3.58%	4.02%

### Tensiones en la pared de la cavidad

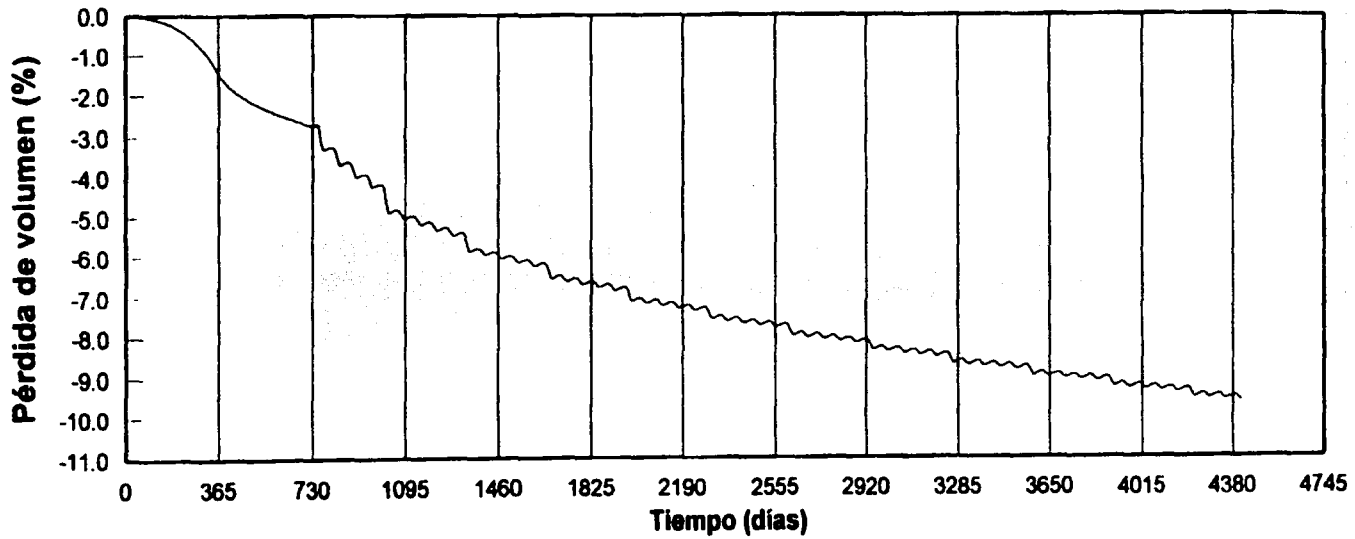


PARAMETROS REOLOGICOS FAVORABLES  
CICLO CORTO: PRODUCCION 15d,  $P_{min}=80$  a 80 bares 10d, INYECCION 30d,  $P_{max}=180$  bares 10d

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



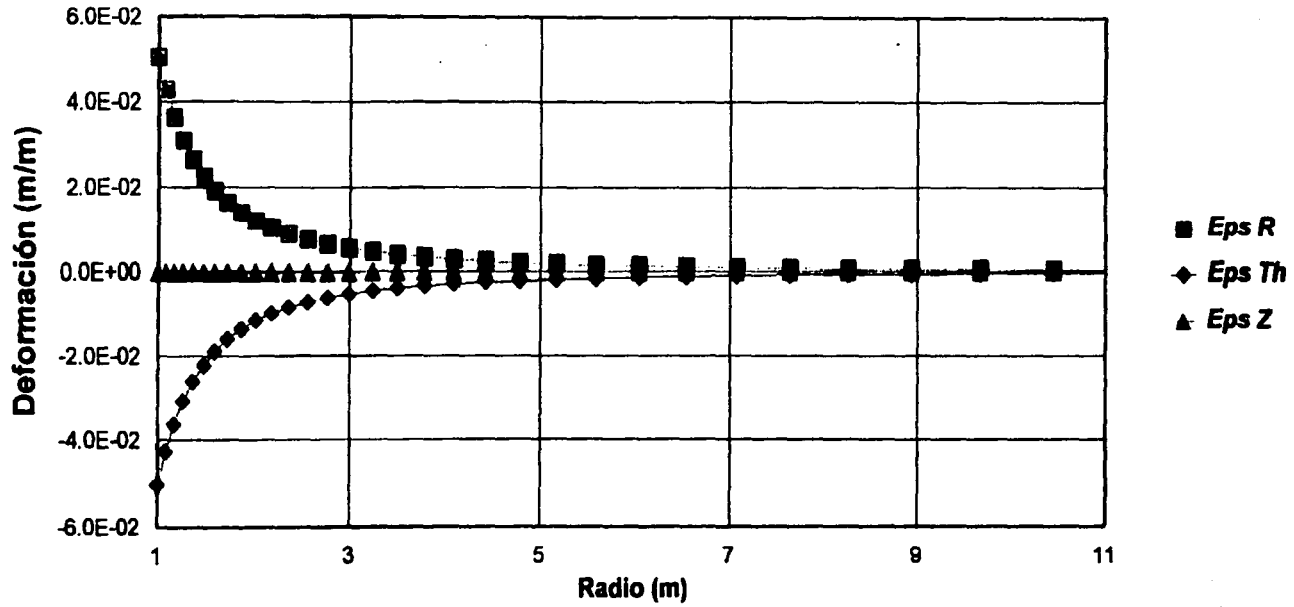
### PERDIDAS DE VOLUMEN



— pérdidas de volumen

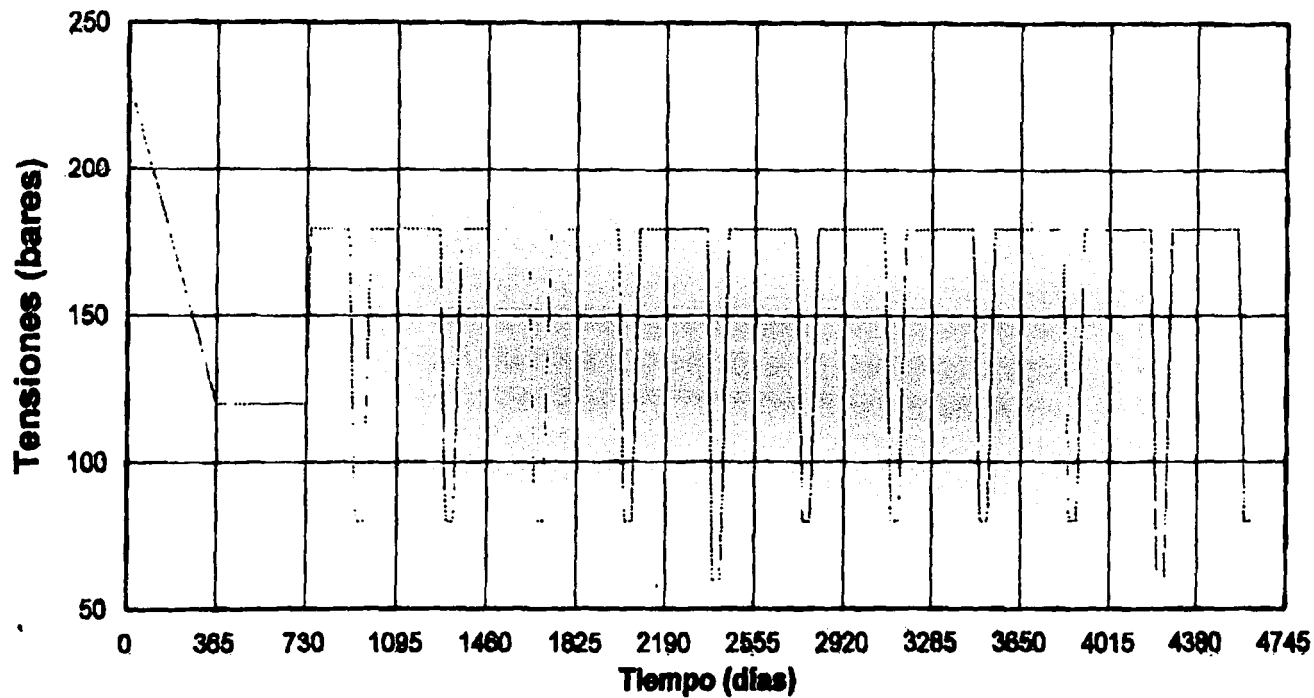
PARAMETROS REOLOGICOS FAVORABLES  
CICLO CORTO: PRODUCCION 15d, P<sub>min</sub>=60 a 80 bares 10d, INYECCION 30d, P<sub>max</sub>=180 bares 10d

Perfil de la deformación visco-plástica en el macizo



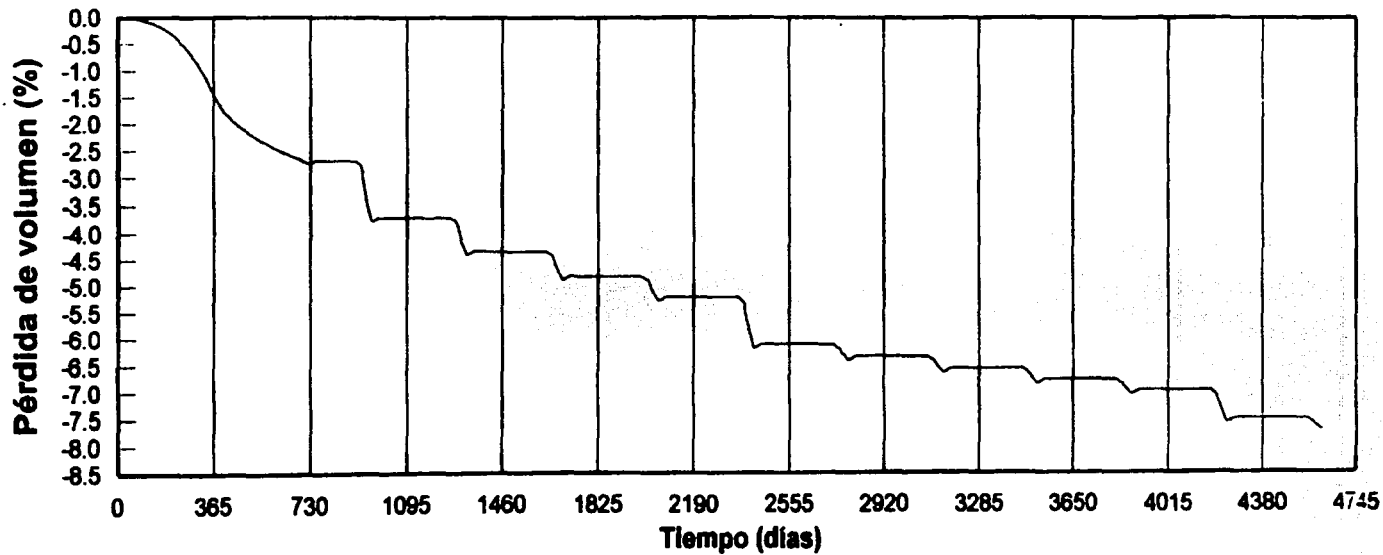
PARAMETROS REOLOGICOS FAVORABLES  
CICLO CORTO: 53 año ciclo, término la fase de producción de 10 días

### Tensiones en la pared de la cavidad



PARAMETROS REOLOGICOS FAVORABLES  
CICLO LARGO: PRODUCCION 30d, Prens-60 o 80 bares 30d, INYECCION 30d, Prens-180 bares 275d

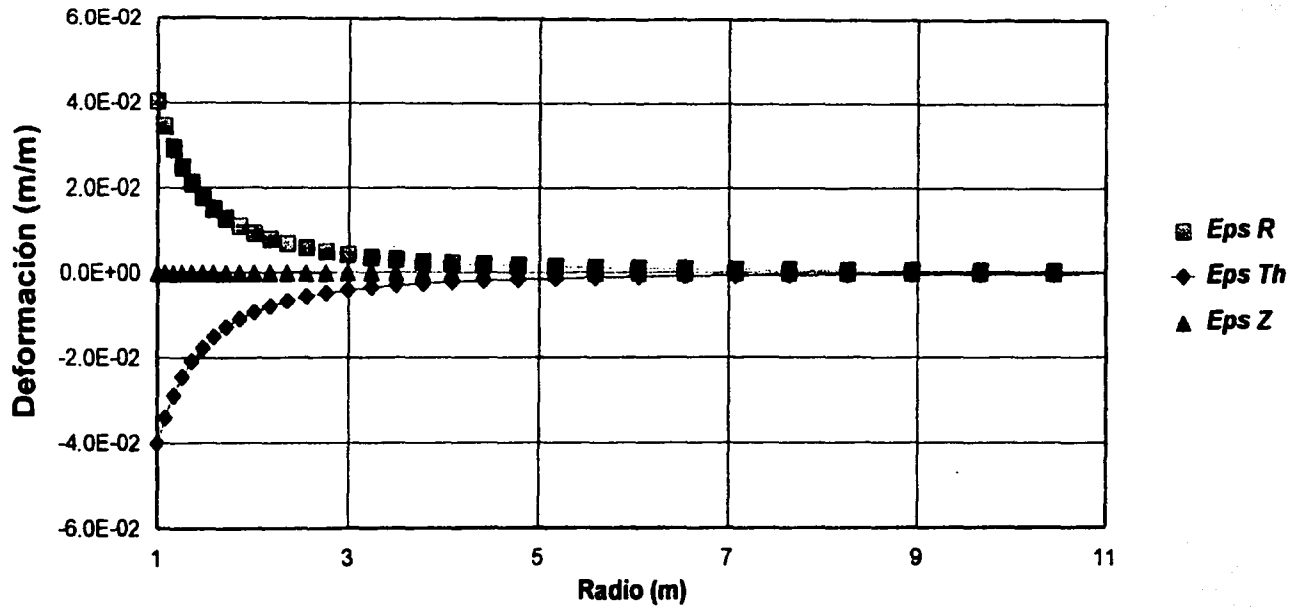
### PERDIDAS DE VOLUMEN



— pérdidas de volumen

PARAMETROS REOLOGICOS FAVORABLES  
CICLO LARGO: PRODUCCION 30d, P<sub>min</sub>=60 o 80 bares 30d, INYECCION 30d, P<sub>max</sub>=180 bares 275d

Perfil de la deformación visco-plástica en el macizo



PARAMETROS REOLOGICOS FAVORABLES  
CICLO LARGO: 53 año ciclo, mínimo la fase de producción de 30 días