

27  
207

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

CAMPUS ARAGÓN



"ESTABILIDAD MECÁNICA EN CAVIDADES SALINAS PARA  
EL ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL EN MÉXICO"

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

(ÁREA MECÁNICA)

P R E S E N T A N :

MARÍA DE LOURDES MARIN EMILIO

GABRIEL ALVAREZ CALDERÓN DE LA BARCA

ASESOR: M.I. CUITLAHUAC OSORNIO CORREA

MÉXICO D.F.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCION

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

G. ALVAREZ CALDERÓN DE LA BARCA  
P R E S E N T E.

En contestación a la solicitud de fecha 28 de octubre del año en curso, presentada por María De Lourdes Marin Emilio y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el M en I. CUITLAHUAC OSORNIO CORREA pueda dirigirles el trabajo de tesis denominado, "ESTABILIDAD MECÁNICA EN CAVIDADES SALINAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México., 9 de noviembre de 1998  
EL DIRECTOR

Lic. CARLOS EDUARDO LEVY VAZQUEZ



c c p Secretaría Académica.  
c c p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.  
c c p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/MCA/IIa.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
ARAGÓN  
DIRECCION

MARÍA DE LOURDES MARIN EMILIO  
PRESENTE.

En contestación a la solicitud de fecha 28 de octubre del año en curso, presentada por G. Alvarez Calderón de la Barca y usted, relativa a la autorización que se les debe conceder para que el M en I. CUITLAHUAC OSORNIO CORREA pueda dirigirles el trabajo de tesis denominado, "ESTABILIDAD MECÁNICA EN CAVIDADES SALINAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
San Juan de Aragón, México., 9 de noviembre de 1965  
EL DIRECTOR

Lic. CARLOS EDUARDO LEVY VAZQUEZ



c c p Secretaría Académica.  
c c p Jefatura de la Carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica.  
c c p Asesor de Tesis.

CELV/AIR/MCA/IIa.

*Gracias papas por haberse preocupado por mí, por enseñarme a vivir responsablemente... esta les aseguro es la mejor forma de demostrarles lo agradecido que estoy con ustedes.*

*A mis hermanos por brindarme su apoyo y ayudarme en esos momentos difíciles*

*A mi abuela María Teresa por darme el aliento, y sembrar en mí la motivación para seguir adelante*

*A mis amigos por compartir conmigo su amistad*

*Gracias por el tiempo que han dedicado a mí*

## AGRADECIMIENTOS

*A mis asesores  
por su dirección en este tema*

*Al jurado por sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar el trabajo*

*Un agradecimiento especial*

*En riguroso orden de aparición al*

**ING. DAVID AZPEITIA HERNANDEZ  
MC. IGNACIO R. CORTES MONROY  
Dr. J. HECTOR RODRIGUEZ H.  
ING. DAVID VELAZQUEZ C.  
ING. ARTURO E. ZAVALA**

*por su muy apreciada atención, consejos y consideración en mis diferentes inquietudes académicas*

*al personal administrativo de la UNICOTA, muy en particular a la Sra.  
SARA y CECILIA, por su dedicada y fina atención*

*por su amistad a mis compañeros de estudio*

**María de Lourdes, Carlos y Pedro**  
*quienes ante las situaciones más difíciles siempre mostraron gran capacidad  
y el más auténtico deseo por el conocimiento*

**Agradecemos al Instituto Mexicano del Petróleo, particularmente a la Línea de Mantenimiento de pozos por brindarnos todo el apoyo necesario para la culminación de este trabajo, e iniciar en él, nuestra carrera profesional, con especial agradecimiento a los ingenieros y amigos.**

---

---

*El final del camino es el principio  
si lo miras hacia atrás...*

*No todos los días, cuando amanece,  
la vida vuelve a comenzar.*

*Tú puedes a tu noche volver día.*

*De lo que son abismos formar cumbres.*

*De Convertir en ventura tu agonia.*

*De lo que son cenizas hacer lumbre.*

*Tú puedes hacer de cada instante  
el momento más grato de tu vida.*

*A un trozo de cristal volver diamante,  
porque todo es según como se mira.*

*Es por eso que no hay un fin...*

*cada día de tu vida es el principio y no el final...*

*Gabriel Álvarez Calderón de la Barca*

---

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A mis padres: Carlos y Ofelia**

Por ver en ellos la unidad y el cariño que se pregonan, el cual se refleja en cada uno de sus hijos ha sido una motivación que me ayudado a cumplir con esta meta.

### **A mis hermanos:**

Agradezco su gran apoyo y ayuda desinteresada.

### **A mi asesor: M. en I. Cuitláhuac Osornio Correa**

Por brindarme el apoyo y su dedicación haciendo posible este trabajo.

### **A todos mis profesores:**

Por cristalizar cada uno de los conocimientos adquiridos a lo largo de los años.

Al **Instituto del Petróleo** por darme la oportunidad del desarrollo de este trabajo, producto de la gran cooperación del Departamento de Mantenimiento de Pozos, sinceramente gracias a:

**Ing. David Azpeitia H.**  
**M. en C. Ignacio Cortés M.**  
**Dr. José Héctor Rodríguez H.**

---

**A mis amigos:**

Gabriel, Pedro, Sergio, Jorge, Daniel, Issac, Arturo, Armando, Lidia, Carlos, Silvio, Victoria, Beatriz, , Enrique, Mateo, Leonardo, Alejandro y Gail. Por recibir valiosos consejos y compartir grandes momentos de mi vida que me han ayudado a formarme como persona.

**A todos los que contribuyeron en la realización del presente.**

**GRACIAS**

**María de Lourdes Marín Emilio**

---

---

# INDICE

## AGRADECIMIENTOS

## PROLOGO

## CAPITULO 1 GENERALIDADES DEL GAS NATURAL

1.1	Origen Del Gas Natural	1
1.2	Composición	1
1.3	Características	2
1.4	Usos y ventajas del gas natural	2
1.5	Distribución del gas natural	5
1.6	Reforma de la industria del gas natural	7
1.7	Almacenamiento de gas natural en México	9
1.7.1	Regulación de la oferta y la demanda	9
1.7.2	Optimización de las redes de transporte y de los yacimientos de producción	10
1.7.3	Almacenamiento estratégico	10
1.7.4	Almacenamiento de regulación estacional, semanal o diaria	11
1.7.5	Almacenamiento de regulación de la compra	11
1.7.6	Regulación de la producción	12
1.8	Producción de gas natural	12
1.9	Reservas de gas natural en México	14
1.10	Consumo de gas natural en México	14
1.11	Evolución de la oferta y la demanda hasta 2005	16

## CAPITULO 2 ALMACENAMIENTOS SUBTERRANEOS

2.1	Alternativas para el almacenamiento de hidrocarburos	19
2.1.1	Acuíferos	21
2.1.2	Yacimientos agotados	23
2.1.3	Cavidades lixiviadas en sal o salinas	24
2.2	Ventajas del almacenamiento subterráneo	25
2.3	Beneficios del almacenamiento subterráneo	26
2.4	Requerimientos que debe satisfacer el almacenamiento subterráneo de gas natural en México	27

---

---

## **CAPITULO 3**

### **CAVERNAS SALINAS**

3.1	Antecedentes	30
3.2	Localización de depósitos salinos en México	31
	3.2.1 Origen de los depósitos de sal	32
	3.2.2 Formación de los domos	32
3.3	Requerimientos básicos para la selección del sitio	33
	3.4.1 Profundidad	33
	3.4.2 Espesor	33
	3.4.3 Pureza	33
	3.4.4 Abastecimiento de agua	37
	3.4.5 Disponibilidad de la salmuera	37
	3.4.6 Cercanía de los centros de producción	37
	3.4.7 Selección del sitio	37
3.4	Principio de construcción de las cavidades	38
	3.4.1 Inspección durante las etapas de desarrollo	40

## **CAPITULO 4**

### **ESTABILIDAD MECANICA EN DOMOS SALINOS**

4.1	Antecedentes	43
4.2	Desarrollo de modelo matemático	44
	4.2.1 Representación de los modelos reológicos	44
	4.2.1.1 Representación por analogía	44
	4.2.1.1.1 Modelo del cuerpo de Kelvin	45
	4.2.1.1.2 Modelo del cuerpo de Maxwell	46
	4.2.1.1.3 Hipótesis del modelo	47
	4.2.1.1.4 Modelo del cuerpo de Burges	48
	4.2.1.2 Representación por ecuaciones	49
4.3	Reología de la sal gema	50
	4.3.1 Ensayos de laboratorio	50
	4.3.1.1 Procedimiento experimental	51
	4.3.2 Resultados del ensayo experimental	56
	4.3.3 Parámetros Lemaitre	57
4.4	Resultados obtenidos	59
4.5	Gráficas de Esfuerzo- Deformación	60

## **CONCLUSIONES**

---

## PROLOGO

La infraestructura de la Industria Petrolera está constituida por diferentes tipos de instalaciones y una de las más importantes son los sitios de almacenamiento de hidrocarburos.

En México al igual que el resto del mundo, se requiere que día con día esta industria se apoye en un sistema de almacenamiento más eficiente y seguro, que a su vez le permita satisfacer puntualmente las demandas del país, razón por la cual igualmente día con día, Pemex en conjunto con el Instituto Mexicano del Petróleo investigan el mejoramiento de este servicio.

Tradicionalmente, esta necesidad ha sido satisfecha con contenedores superficiales. Sin embargo, trágicas experiencias como las de San Juanico, evidencian los grandes riesgos involucrados en esta técnica.

Durante las últimas tres décadas, en los países desarrollados, se emplea un nuevo concepto de almacenamiento: el subterráneo. Este tipo de almacenamiento posee importantes ventajas sobre el superficial entre las que podemos mencionar su bajo costo para almacenar grandes volúmenes, su alta seguridad y fácil operación, además de no perjudicar al medio ambiente.

Actualmente México requiere del almacenamiento de gas natural, esta necesidad surge de un análisis de balance de demanda en donde se definió que: la producción y el transporte deben ser continuos y también estar sujetos a interrupciones por causas de fuerza mayor, concluyendo que, el almacenamiento debe de ser capaz de cubrir en forma parcial o total las irregularidades o interrupciones de producción y a su vez mantener llenos al 100% los ductos de transportación, para así finalmente poder ajustar la demanda en forma estacional, mensual o diaria.

De acuerdo a un análisis realizado por Pemex y el Instituto Mexicano del Petróleo, se desarrollo esta nueva tecnología en México a partir del año de 1985 para almacenamiento de crudo en cavidades salinas, esto es considerando principalmente los aspectos económicos y operativos de los diferentes tipos de almacenamiento subterráneos.

A nivel mundial existen diversos tipos de almacenamientos subterráneos entre los que se tienen son: cavidades en rocas, en domos y lechos salinos, minas agotadas, acuíferos. Elegir el óptimo depende de las condiciones geológicas, económicas y tecnológicas de nuestro país. De acuerdo a las ventajas y necesidades anteriormente descritas se seleccionó el almacenamiento subterráneo en cavidades en domos salinos.

---

En este tipo de almacenamiento se aprovechan las formaciones salinas existentes en nuestro país, y debido a sus propiedades geotécnicas se hacen aptos para el almacenamiento de hidrocarburos en forma gaseosa, licuada y líquida.

El objetivo de este trabajo es analizar la deformabilidad de la sal, para determinar la factibilidad del almacenamiento de gas natural en cavidades salinas, para ello empleamos resultados de las pruebas de laboratorio elaboradas para núcleos de sal en Tuzándepelt, Veracruz desarrollados por el IIE (Instituto de Investigaciones Eléctricas). Para ello se determinó la presión la cual acoplamos al modelo reológico que determina de manera más cercano el comportamiento de la sal.

En el capítulo I se analiza un panorama general del gas natural en México como su evolución, las reglamentaciones, la distribución, producción y el papel que juega el almacenamiento para optimizar su producción, compra y venta.

En el capítulo II se mencionan los tipos de almacenamiento subterráneo que existen, tanto superficial como subterráneo en los cuales se puede almacenar gas natural y dependiendo sus características que poseen, elegir cual es el adecuado para nuestro país.

En el capítulo III se dan algunos antecedentes de las cavidades, se definen algunos de los requerimientos básicos para la selección de un sitio adecuado y la construcción de una caverna.

En el capítulo IV se establecen las bases para analizar la estabilidad mecánica en las cavidades en base a modelos reológicos establecidos y ecuaciones constitutivas para determinar el comportamiento de la sal, posteriormente con la ecuación de Lemaitre obtenemos la deformación, la cual es comparada con la que se obtuvieron de los datos experimentales a esas mismas condiciones,.

Finalmente se presentan las conclusiones generales del desarrollo y su aplicación.

---

## CAPITULO 1

## GENERALIDADES DEL GAS NATURAL

## 1.1 ORIGEN DEL GAS NATURAL

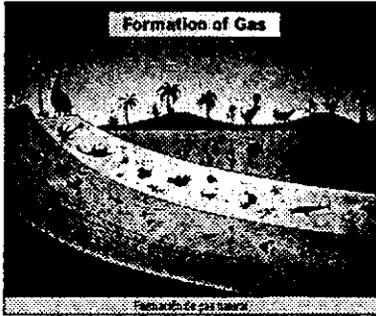


Figura 1.1 ORIGEN

En el interior de la corteza terrestre existen bolsas que contienen cantidades importantes de gas natural que se formaron hace millones de años cuando las plantas y pequeños animales marinos fueron enterrados por arena y piedra. Capas de lodo, arena, piedra, plantas y materia animal continuaron formándose hasta que la presión y el calor de la tierra los convirtieron en petróleo y gas naturales.

El gas natural es una mezcla gaseosa combustible de compuestos de hidrocarburo sencillo que generalmente se encuentra en depósitos subterráneos profundos formados por roca porosa. Puede encontrarse por sí solo o en Asociación con petróleo crudo o condensados de hidrocarburo.

## 1.2 COMPOSICION

El componente principal del gas natural es el metano ( $\text{CH}_4$ ). Asimismo, contiene cantidades menores de otros gases, incluyendo etano, propano, butano y pentano.

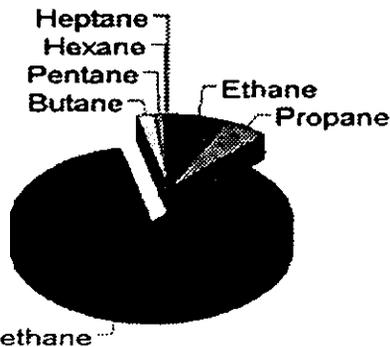


Figura 1.2 COMPOSICION DEL GAS NATURAL

### 1.3 CARACTERISTICAS

El gas natural es un gas incoloro, inodoro, principalmente compuesto por metano. Debido a que es un hidrocarburo muy sencillo (símbolo químico CH<sub>4</sub>), es más ligero que el aire y cuando se libera tiende a disiparse.

El gas natural es uno de los combustibles más limpios que produce principalmente bióxido de carbono, vapor de agua y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno cuando se quema, que resultan ser inofensivos al ser humano.

Este combustible es una de las formas de energía más populares hoy en día, ya que no genera contaminantes, es menos costoso que el uso de la electricidad u otros combustibles.

### 1.4 USOS Y VENTAJAS DEL GAS NATURAL

El gas natural es usado en diferentes sectores como son el industrial, comercial y residencial en México, el cuál tiene diferentes aplicaciones lo que lo hace un energético de gran importancia para el desarrollo del país:

#### Usos Industriales

- Generación de energía eléctrica
- Generación de vapor
- Petroquímica
- Proceso de alimentos
- Fundición
- Cocción de cerámica
- Hornos de cemento
- Manufactura de vidrio

#### Usos comerciales

- Procesos de alimentos
- Calentamiento y enfriamiento de espacios
- Combustible automotor
- Calentamiento de agua
- Incineración

#### Usos residenciales

- Calentamiento y enfriamiento de espacios
- Incineración de basura

- Cocinando
- Aire acondicionado

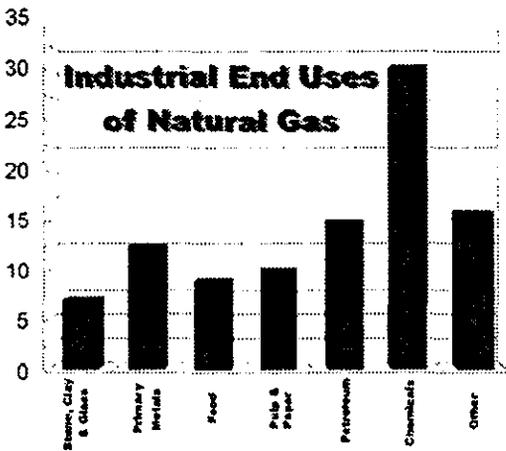
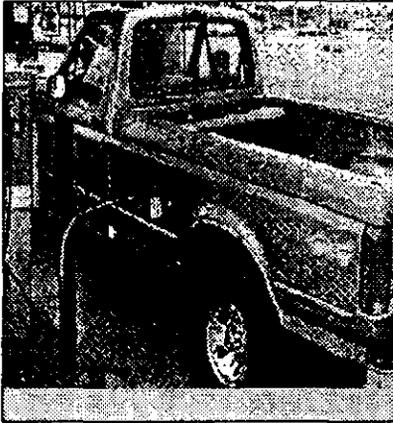


Figura 1.3 APLICACIONES DEL GAS NATURAL

Las ventajas que nos proporcionan el uso del gas natural en nuestra vida cotidiana se muestran en la tabla 1.1

<b>EFICIENCIA</b>	<p>Energía utilizable</p> <p>No requiere activación</p> <p>Sus gastos de mantenimiento de equipo mecánico de combustión</p>	<p>Alta eficiencia en la combustión, con aprovechamiento óptimo.</p> <p>No requiere cambio en tamaño físico, estado o composición química para su utilización.</p> <p>Se eliminan costos por mantenimiento en equipos de combustión usados con otros energéticos.</p>
<b>PRECIO</b>	<p>Tradicionalmente económico</p> <p>Sin subsidio</p>	<p>Históricamente más barato que otros energéticos, como el gas LP, diesel o gasolinas.</p> <p>El precio del gas natural no está subsidiado.</p>
<b>ECOLOGIA</b>	<p>Combustible limpio</p> <p>Nueva norma de emisiones al medio ambiente (1998)</p>	<p>Libre de emisiones de cenizas, humo y azufre. Conversión económica respecto a la adaptación en equipos contaminantes.</p> <p>Normas estrictas que penalizarán, a usuarios que no cumplan la especificación.</p>
<b>SUMINISTRO</b>	<p>Flujo continuo</p> <p>Fácil manejo y recepción</p>	<p>El usuario recibirá el gas conforme lo necesita.</p> <p>Su control es automático y no se supedita a contingencias de transporte.</p>
<b>SEGURIDAD</b>	<p>Más seguro que otros energéticos</p>	<p>Su baja densidad evita acumulación, y minimiza riesgos.</p>
<b>DISPONIBILIDAD</b>	<p>Reservas suficientes</p> <p>Disponibilidad permanente</p>	<p>Reservas probadas para los próximos 60 años.</p> <p>Alimentación diaria al sistema que garantiza la oferta.</p>

Tabla 1.1 VENTAJAS DEL USO DEL GAS NATURAL

## 1.5 DISTRIBUCION DEL GAS NATURAL

El gas natural que fluye de presión alta a baja es el principio fundamental del sistema de suministro de gas natural. La cantidad de presión en la tubería se mide en libras por pulgada cuadrada.

Desde el pozo, el gas natural pasa por líneas recolectoras que son como las ramas de un árbol, aumentando en tamaño a medida que se acercan al punto de recolección central.

El proceso de suministro requiere de sistemas de recolección, transmisión y distribución, así como estaciones de paso y traslado a los hogares. Figura 1.4

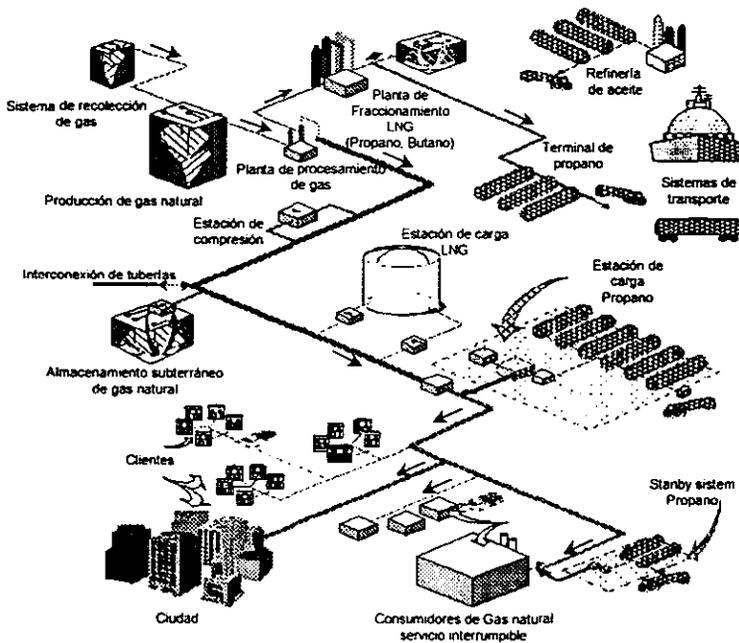


Figura 1.4 DISTRIBUCION DEL GAS NATURAL

Hasta ahora el mayor uso había sido en la industria debido a los altos costos de inversión en sistemas de transporte (gasoductos), ya que la única empresa encargada de ello era Pemex, pero con la apertura del mercado de gas natural se prevé una mayor comercialización del mismo.

Situación de la red de transporte

La vulnerabilidad actual de la red de transporte (gasoducto único entre el Norte y el Sur, Número limitado de centros de procesamiento) va aumentar en el futuro con el incremento del consumo y la saturación de la red. El empaque de la línea no será suficiente para garantizar el abastecimiento y la solución adecuada para asegurar la reserva en caso de incidente es el almacenamiento subterráneo.

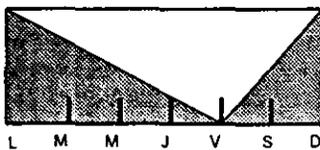
Situación actual:

- El empaque de la línea cae 50 MMPCD a la semana,
- Aumento en 125 MMPCD durante el fin de semana.
- Inyección promedio diaria de 2.54 BPC sin variación semanal,
- La extracción varía de 2.59 BPC entre semana a 2.41 BPCD en fin de semana.

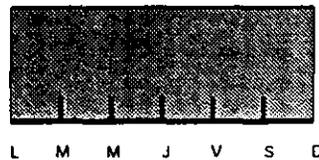
Situación con almacenamiento:

- El empaque de la línea puede mantenerse en su máximo rango toda la semana o permitir la máxima capacidad todos los días.
- La capacidad de inyección y extracción aumenta a 2.59 BPCD sin variación

Como se representa a continuación:



Situación actual



Situación con almacenamiento

 Empaque de línea

El valor adicional de 50 BPCD de capacidad es cuando el ducto es utilizado completamente.

Fuente: Contabilidad de gas

## 1.6 REFORMA DE LA INDUSTRIA DEL GAS NATURAL

Durante los primeros meses de 1995 el gobierno mexicano llevó a cabo una profunda reforma estructural de la industria del gas natural. Previo a 1995, Pemex era la única compañía que llevaba a cabo actividades de transporte, producción y exportación de gas natural y, además, era el principal consumidor figura 1.5

Estructura del Gas Natural en México

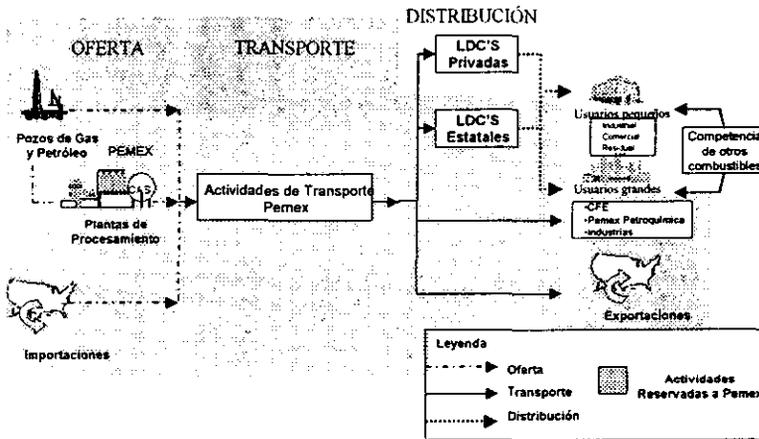


Figura 1.5 ESTRUCTURA DE LA INDUSTRIA DEL GAS NATURAL EN MEXICO ANTES DE 1995

El nuevo marco regulador para el sector del gas natural fue diseñado con una perspectiva de largo plazo de su organización industrial. Esta nueva organización mantiene el monopolio de Pemex sobre la producción y permite la inversión privada en los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución de gas. Así mismo, el nuevo marco permite el libre comercio internacional del gas natural figura 1.6.

Las metas del nuevo marco regulador son lograr una industria de gas competitiva, mejorar la eficiencia en la provisión de servicios y promover el uso de combustibles limpios. Este último objetivo responde a la nueva ley ambiental que impulsará el uso de gas natural en lugar de combustóleo y que entro en vigor en 1998.

Evolución Industrial del Gas Natural en México

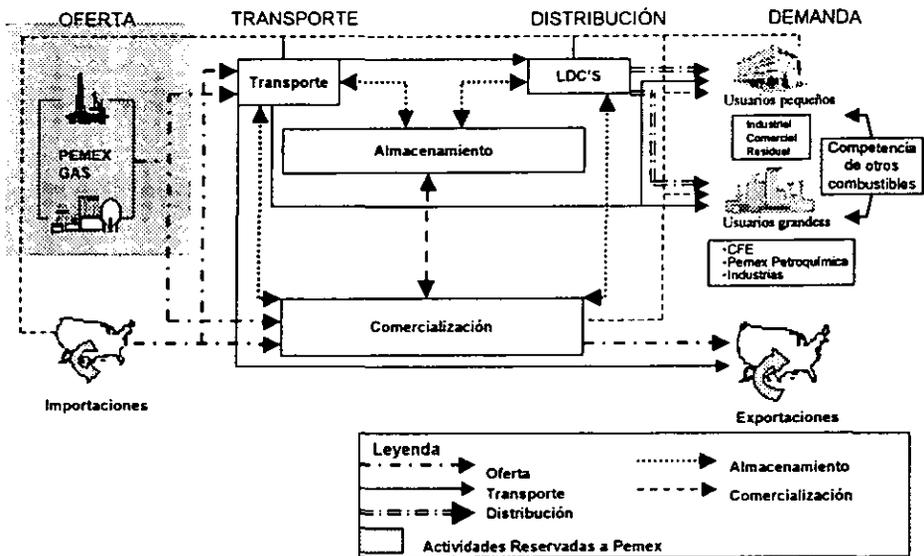


Figura 1.6 EVOLUCION ESPERADA DE LA INDUSTRIA DEL GAS NATURAL EN MEXICO.

Los medios para lograr estos fines son:

Enfocar las actividades de Pemex a las actividades de producción y exploración, y permitir la participación privada en las actividades de transporte, almacenamiento y distribución de gas.

Las nuevas regulaciones para la industria del gas natural están orientadas hacia la promoción de un mercado estable que proporcione transparencia, flexibilidad, e incluya procesos que sean claros, justos y expeditos. Esto con la finalidad de crear un ambiente de certidumbre que permita la atracción de inversión a dicha industria.

Por ello la importancia de contar con sistemas que permitan el buen aprovechamiento de este energético en México.

## 1.7 ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL EN MEXICO

La importancia del almacenamiento de gas natural es debido a la situación actual de la red de transporte, de la evolución de la oferta y la demanda esperada, y puesto que, Pemex-Gas y Petroquímica Básica (PGPB) deja de ser el único en abastecer el gas a todos los consumidores finales, de esta forma la responsabilidad de abasto será responsabilidad de nuevos distribuidores incluyendo a PGPB.

Estos cambios fundamentales, son los que principalmente crean la necesidad de contar con un servicio de almacenamiento de gas natural en el país, por lo que se mencionan las diferentes funciones que el almacenamiento subterráneo puede desempeñar en México.

- 1) Regulación de la oferta y la demanda
- 2) Optimización de las redes de transporte y de los yacimientos de producción
- 3) Almacenamiento estratégico
- 4) Almacenamiento de regulación estacional, semanal o diaria
- 5) Almacenamiento de regulación de la compra
- 6) Regulación de la producción

### 1.7.1 REGULACION DE LA OFERTA Y LA DEMANDA

#### Variaciones estacionales

La utilización generalizada del gas en los sectores domésticos y comerciales, principalmente para la calefacción y el aire acondicionado hace variar en mucho la demanda en función de las condiciones climáticas.

#### Variaciones a corto plazo

Semanal: La demanda de gas no está bien repartida durante la semana, ya que durante el fin de semana la demanda es menor que durante los días hábiles.

Horaria y diaria: El consumo sufre las fluctuaciones de la temperatura especialmente en invierno. También el consumo por la producción de electricidad tiene fluctuaciones debido al uso doméstico e industrial.

Otro motivo de variaciones diarias u horaria se debe a la diferencia existente entre las cantidades pedidas anticipadamente por los clientes durante el suministro normal, esto origina necesidades

inmediatas que requieren absorber o disponer de cantidades importantes de gas.

A menudo, estas fluctuaciones se pueden resolver con la utilización del empaque de línea así como con contratos de suministro interrumpible con industriales. Esto se podrá resolver con la utilización de los almacenamientos que disponen de una capacidad elevada de inyección y extracción.

#### Variaciones pluri-anales

En función del rigor del invierno o de los cambios dentro de la industria, el consumo residual y comercial puede variar significativamente de un año a otro y el almacenamiento permite resolver estas fluctuaciones.

### **1.7.2 OPTIMIZACION DE LAS REDES DE TRANSPORTE Y DE LOS YACIMIENTOS DE PRODUCCION**

Las compañías distribuidoras y transportistas deben encontrar un término medio entre sobre dimensionar las redes para responder a los picos de demanda e invertir en instalaciones de almacenamiento.

Las inversiones necesarias para la producción y el transporte son tan importantes que las instalaciones deben utilizarse al máximo de su capacidad (factor de carga lo más alto posible).

Además, con frecuencia los contratos de transporte suponen flujos constantes en la red. Para todos estos ámbitos, las capacidades significativas de los almacenamientos subterráneos permitirán regular las variaciones de la red y obtener condiciones de suministro más favorables.

Los mismos mecanismos se aplican para regular la producción en los yacimientos ya que las características de estos no siempre permiten un nivel de flexibilidad suficiente para responder a la demanda (restricciones técnicas de velocidad crítica para evitar el daño de las funciones o de las estimulaciones).

### **1.7.3 ALMACENAMIENTO ESTRATEGICO**

Para los países que dependen estrechamente de la importación de combustibles como el gas natural en situaciones de incremento de la demanda u otras circunstancias adversas, tal es el caso de México es importante por ello poder disponer de una capacidad de almacenamiento

que permita enfrentar un período largo de interrupción del abastecimiento.

Por ejemplo, para calcular sus reservas estratégicas, muchos países consideran como mínimo, un período de 20 días, tan sólo en Europa occidental la capacidad de los almacenamientos puede remplazar la principal fuente de suministro durante varios meses.

El almacenamiento estratégico permite cubrir los imprevistos eventuales debido a operaciones de mantenimiento o a incidentes técnicos en los yacimientos, en los centros de procesamiento, o en la red de transporte o a incumplimiento o fallas de un proveedor.

La función estratégica antes citada también se puede aplicar a un país exportador que dispone de contratos firmes.

#### **1.7.4 ALMACENAMIENTO DE REGULACION ESTACIONAL, SEMANAL O DIARIA**

El almacenamiento permitiría regular la fluctuación semanal correspondiente a 250 MMPCD [6.7 Mm<sup>3</sup>(n)] a almacenar durante el fin de semana y a reinyectar en la red los 5 días de la semana a razón de 50 MMPCD [1.3 Mm<sup>3</sup>(n)/d] (ver Situación de la red de transporte más adelante). Esta cantidad es demasiado reducida para justificar la creación de un almacenamiento pero obviamente constituiría un complemento de utilización a un almacenamiento de seguridad o estratégico. Con el crecimiento del consumo y el sector doméstico, las fluctuaciones de consumo serían mucho más importantes que las actuales y requerirían la creación de un almacenamiento para evitar el sobre dimensionamiento de la red.

#### **1.7.5 ALMACENAMIENTO DE REGULACION DE LA COMPRA**

El almacenamiento permitirá aprovechar la diferencia de precios durante la época de verano cuando el costo del producto es más barato, por otro lado con la apertura del mercado de gas natural el número de participantes aumentara y el precio del mismo fluctuara aun más en el futuro y suponiendo que México se convierta en exportador de gas el almacenamiento podría desempeñar también un papel en la regulación del precio de venta, ya que se almacenaría en verano, y se vendería en invierno cuando el consumo se incrementa por lo que los precios del producto aumentan.

### 1.7.6 REGULACION DE LA PRODUCCION

El almacenamiento permitiría mantener la producción de los yacimientos y de los centros de procesamiento a un nivel constante. Se podrán negociar contratos de compra más ventajosos y el factor de carga de los centros de procesamiento será más elevado.

### 1.8 PRODUCCION DE GAS NATURAL

En México actualmente se cuenta con 10 centros de procesamiento de gas, endulzamiento, fraccionamiento y recuperación de azufre. El 90% de la capacidad de procesamiento de gas está localizado en los centros productores de Cactus, Chiapas, Nuevo Pemex, Tabasco, y Ciudad Pemex; además de que existen centros productores que se encuentran en complejos petroquímicos como es el caso de Pajaritos y la Cangrejera; la mayoría de ellos se localizan en el estado de Veracruz (Figura 1.7).

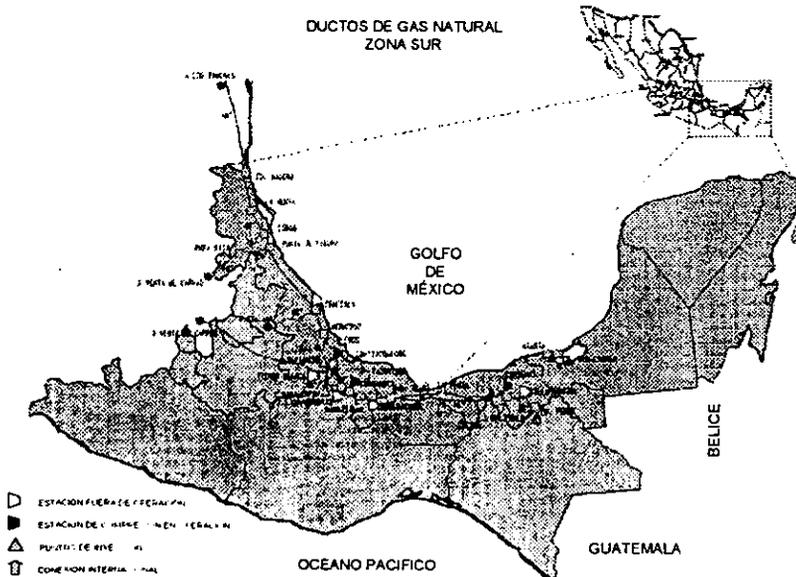


Figura 1.7 LOCALIZACION DE LOS CENTROS DE PRODUCCION ZONA SUR

Actualmente a nivel nacional la oferta de gas es prácticamente igual a la demanda. Algunas importaciones (2 a 3% del total) provenientes de los Estados Unidos permiten el abastecimiento de zonas más alejadas de la red principal como la zona noroeste. En algunos casos, puede haber exportaciones locales en la parte noreste hacia los Estados Unidos. En la tabla 1.2 se proporciona la producción del gas natural.

Producción de gas natural (millones de pies cúbicos diarios)							
	Total	Por tipo		Por región			
		Asociado	No asociado	Región Marina	Región Sur	Región Norte	
-1997-	4,467	3,631	837	1,648	2,046	773	
Ene	4,317	3,559	758	1,602	2,024	692	
Feb	4,331	3,579	752	1,593	2,040	697	
Mar	4,392	3,623	769	1,629	2,057	707	
Abr	4,398	3,588	809	1,604	2,056	738	
May	4,422	3,612	810	1,639	2,040	743	
Jun	4,412	3,584	828	1,639	2,008	766	
Jul	4,488	3,633	855	1,661	2,035	792	
Ago	4,561	3,692	869	1,694	2,062	804	
Sep	4,571	3,705	866	1,703	2,064	804	
Oct	4,564	3,672	892	1,686	2,047	831	
Nov	4,542	3,646	897	1,654	2,054	834	
Dic	4,597	3,670	927	1,671	2,060	866	
-1998-	4,779	3,702	1,078	1,681	2,070	1,027	
Ene	4,666	3,688	978	1,699	2,046	921	
Feb	4,747	3,741	1,006	1,742	2,053	952	
Mar	4,822	3,788	1,034	1,758	2,084	979	
Abr	4,811	3,768	1,043	1,744	2,075	992	
May	4,768	3,719	1,049	1,748	2,018	1,002	
Jun	4,742	3,696	1,045	1,695	2,044	1,003	
Jul	4,797	3,720	1,077	1,684	2,080	1,034	
Ago	4,844	3,726	1,118	1,671	2,105	1,068	
Sep	4,785	3,630	1,156	1,558	2,122	1,105	
Oct	4,679	3,517	1,162	1,499	2,071	1,110	
Nov	4,913	3,731	1,182	1,704	2,075	1,134	

Tabla 1.2 PRODUCCION DEL GAS NATURAL

## 1.9 RESERVAS DE GAS NATURAL EN MEXICO

En el caso del gas natural México cuenta con reservas probadas de gas seco de 70 billones de pies cúbicos y en función al ritmo actual de producción son suficientes para 65 años.

En términos geológicos resulta difícil estimar el nivel de reservas al año 2005, ya que a medida que el pronóstico es de más largo plazo la imprecisión se hace mayor. Se prevé que los proyectos de inversión que desarrolla Pemex Exploración y Producción den como resultado la incorporación anual de 1.3 billones de pies cúbicos (BPC) de gas entre 1996 y 2001. Sin embargo, como resultado de la elevación en el nivel de extracción, las reservas disminuirán en el orden del -0.9 % anual, por lo que al final del periodo ascenderían a 63.6 BPC. Ver la tabla 1.3.

	1996	1997	1998	1999	2000	2001
{PRIVATE}Reservas al Inicio del Año	67,688.00	67,122.50	66,608.90	66,229.30	65,312.90	64,530.50
Pronóstico de Extracción Anual	1,544.20	1,658.70	1,839.90	2,066.20	2,261.50	2,306.80
Incorporación de Reservas	998.70	1,145.10	1,460.30	1,149.80	1,479.10	1,389.10
Pronóstico de Reservas	67,122.50	66,608.90	66,229.30	65,312.90	64,530.50	63,312.80

FUENTE: Elaboración con Base en Pemex Exploración y Producción.

Tabla 1.3 PRONOSTICO DE RESERVAS DE GAS NATURAL 1996-2001  
(MMMPC)

## 1.10 CONSUMO DE GAS NATURAL EN MEXICO

La estimación del consumo nacional de gas natural seco por sector para los próximos años se observa en la Tabla 1.4:

{PRIVATE}Sector	1996	1997	1998	1999	2000
Eléctrico	526.2	534.0	910.8	933.9	1,073.7
Pemex (autoconsumo)	1,329.6	1,640	1,850.8	2,028.4	2,202.6
Pemex (materia prima)	262.3	266.9	270.7	277.3	277.3
Industrial	950.9	982.0	1,174.3	1,308.1	1,359.9
Doméstico	96.3	100.9	99.6	109.8	139.4
<b>Total Nacional</b>	<b>3,165.3</b>	<b>3,523.8</b>	<b>4,306.1</b>	<b>4,658.6</b>	<b>5,052.9</b>

Tabla 1.4 CONSUMO NACIONAL DE GAS NATURAL SECO POR SECTOR, 1996-2000  
(MILES DE MILLONES DE PIES CUBICOS DIARIOS)

Los consumidores de gas natural en México por sectores son mencionados a continuación en la Figura 1.8.

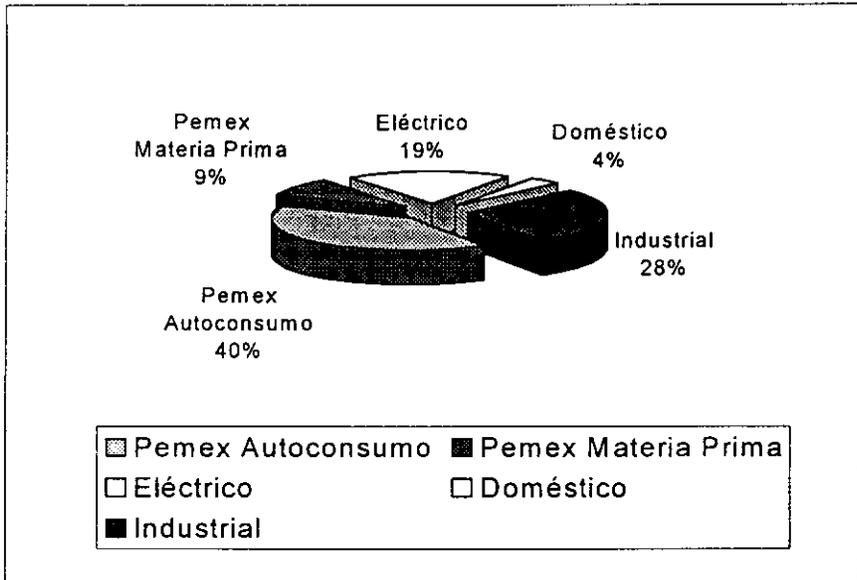


Figura 1.8 CONSUMIDORES POR SECTOR EN MEXICO

Estos diferentes consumidores tienen un factor de carga muy elevado y uno de variación muy bajo lo que significa que las fluctuaciones de consumo son limitadas. Esto se explica por la utilización casi exclusivamente industrial del gas natural en México y por la reducida penetración actual de sector doméstico. Por otro lado, salvo en algunas zonas del Norte y del Centro del país, las variaciones climáticas son muy poco significativas.

Actualmente se puede observar una disminución en el consumo durante el fin de semana de aproximadamente 125 MMPCD [ $3.4 \text{ Mm}^3 \text{ (n)/d}$ ]. Hoy en día, esta situación se maneja por la variación del empaque de la línea por que la red de transporte no está saturada.

## 1.11 EVOLUCION DE LA OFERTA Y LA DEMANDA HASTA 2005

Esta evolución esta marcada principalmente por un aumento muy fuerte del consumo que se duplico a partir de 1996, y seguirá incrementando hasta el 2005 pasando de 2533 a 5263 MMPCD [52 Gm<sup>3</sup> (n)/año], mientras que la producción debería pasar de 2533 a 3579 MMPCD [25 a 35 Gm<sup>3</sup> (n)/año], observándose una diferencia que será cubierta mediante importación, o de la producción de la cuenca de Burgos o Cantarell como se muestra en la siguiente tabla 1.5

Región	1996	Incremento	2005
<b>Zona Norte</b>			
Consumo	787		1931
Oferta	364	X 3.7	1231
Diferencia	-423	X 1.5	-637
	Viene del sur		Importación y/o cuenca de Burgos o Cantarell
<b>Zona Sur</b>			
Consumo	1811	X 1.83	3332
Oferta	2169	X 1.05	2285
Diferencia	+358	X 2.80	-1047
	hacia el norte		Importación y/o cuenca de Burgos o Cantarell
<b>Total</b>			
Consumo	2598	X 20	5263
Oferta	2533	X 1.4	3579
Diferencia	-65	X .60	-1684

Duplicación del consumo entre 1996 y 2000

Inversión de los movimientos de Sur a Norte (1996) y pasa de Norte a Sur (2000)

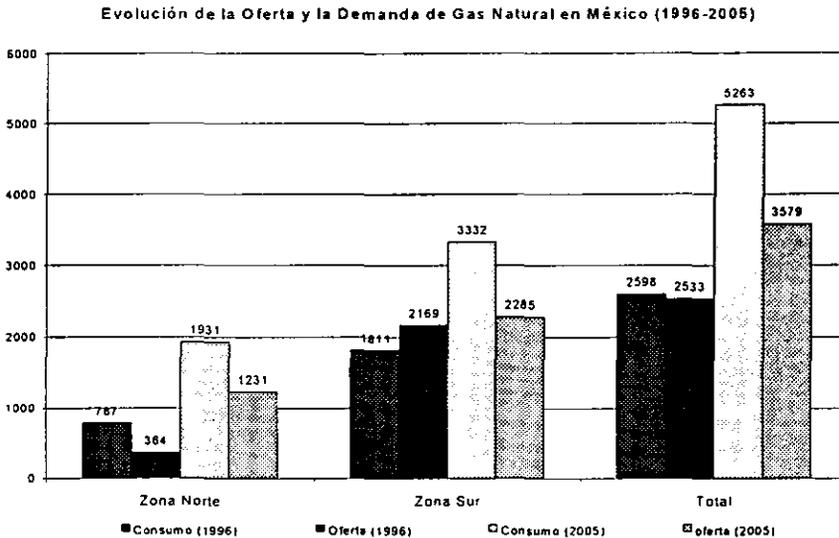
Incremento de la oferta en 40%

La importación representa el 30% del consumo

Fuente: elaboración propia con base Pemex Gas y Petroquímica Básica Secretaría de Energía Perspectivas del mercado de gas natural 1996-2005.

Tabla 1.5 EVOLUCION DE LA OFERTA Y LA DEMANDA DE GAS NATURAL EN MEXICO 1996-2005

La información de la tabla anterior se representa gráficamente en la figura 1.9.



**Figura 1.9 EVOLUCION DE LA OFERTA Y LA DEMANDA DE GAS NATURAL EN MEXICO (1996-2005)**

El análisis a este pronóstico permite establecer las siguientes conclusiones:

- El desequilibrio entre la oferta y la demanda conduce a un aumento creciente de las importaciones,
- El aumento significativo del consumo y de las importaciones supone inversiones para incrementar la capacidad de transporte de la red (estaciones de compresión y ductos),
- A partir del año 2000 los movimientos de gas se invierten y se convierten de Norte a Sur.

Cabe señalar que estas cifras son las de escenarios básicos estudiados por PGPB y PEP. Si se consideraran los escenarios, alto y bajo de la demanda la diferencia es de  $\pm 20\%$  (4537 – 5652 MMPCD).

Para la evolución de la oferta la diferencia es mucho más importante. El escenario bajo corresponde a 1733 MMPCD, el escenario básico es de 3579 MMPCD, el

escenario alto no ha sido cifrado y no aparece en los documentos remitidos por PGPB. Recientes declaraciones revelan, un elevado crecimiento de la producción en los próximos años gracias sobre todo al desarrollo de la zona de Burgos y el yacimiento gigante de Cantarell. Con este escenario México se convertiría en exportador de gas natural. Sin embargo esto no cambiara los flujos de transporte de la República.

El motor principal de la demanda es la CFE, quien con sus proyectos de nuevas centrales y de conversión al gas natural de algunas ya existentes, se convertirá en el consumidor más importante de Pemex Gas pasando de un consumo de 493 MMPCD en 1995 a 2131 MMPCD en 2005.

El sector doméstico también debería tener un cierto auge con el desarrollo de nuevas zonas de distribución (desincorporación de Pemex Gas y llegada de particulares). El resto del crecimiento es del sector industrial.

Por lo tanto la necesidad de los almacenamientos en México se resumen en la tabla 1.9:

HOY 1998	MAÑANA 2005	ALMACENAMIENTO
Demanda aproximadamente igual a la Oferta	Oferta X 1.5 Demanda X 2	Estratégico Aprovechamiento diferencia de precios
La red de transporte tiene capacidad suficiente pero es vulnerable (gasoducto único N-S pocos centros de procesamiento)	La red de transporte esta saturada	Optimizar la utilización de la red de transportes
Sin variación estacional poca variación semanal	Gran probabilidad de aumento de la variación mensual, semanal y diaria	Variación semanal, diaria, mensual y temporal
Mercado con pocos participantes	Mercado abierto con intervención de varios participantes para vender y comprar el gas	Optimizar contratos Compra/venta
Oferta = 2500 MMPCD 25 Gm <sup>3</sup> (n)/año	Oferta = 3600 MMPCD 36Gm <sup>3</sup> (n)/año	Optimización y regulación de la producción

Tabla 1.9

## CAPITULO 2

### ALMACENAMIENTOS SUBTERRANEOS

#### 2.1 ALTERNATIVAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS

El almacenamiento de hidrocarburos desempeña un papel muy importante para el mercado, ya que asegura el abastecimiento eficiente y seguro durante periodos de demanda pico y sirve de respaldo de la oferta en caso de emergencia, por una interrupción de la producción o dificultades en el transporte; además de permitir a los transportistas mantener sus balances de flujo y controlar sus inventarios.

Hoy en día los diferentes sistemas de almacenamiento, utilizados a nivel mundial, se clasifican en dos grandes grupos:

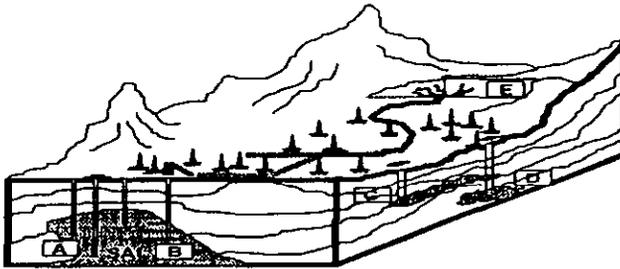
- Almacenamientos superficiales
- Almacenamientos subterráneos

Los almacenamientos superficiales están conformados por tanques atmosféricos cuyas capacidades varían de 50,000 a 500,000 bl. (1 lb $\approx$ 159 lts), y son fácilmente accesibles para introducir y extraer el producto, pero son demasiado peligrosos y presentan serios inconvenientes como son: Las grandes extensiones de terreno que cubren, su hermeticidad no son del 100 % lo que induce a elevados índices de contaminación y daños ecológicos, pero además los riesgos de conflagración son muy elevados.

Los almacenamientos subterráneos son una tecnología que se estima tuvo sus inicios en Alemania en el año de 1916 sin grandes avances; posteriormente en décadas de los 40s y 50s, se impulsó nuevamente en Canadá y E.U., continuando en Europa e iniciando esta tecnología en México en el año de 1985. Los tipos de almacenamientos subterráneos para gas natural (figura 2.1) cada vez son más diversos y a la fecha se tienen los siguientes:

- a) Acuíferos
- b) Yacimientos agotados
- c) Cavidades salinas
- d) Cavernas en roca
- e) Minas abandonadas

Tipos de Almacenamientos Subterráneo



- A Cavernas de sal
- B Minas abandonadas
- C Acuíferos
- D Yacimientos agotados
- E Cavernas de roca

Figura 2.1 TIPOS DE ALMACENAMIENTOS SUBTERRANEOS

Para elegir cuales son los sitios favorables para el almacenamiento de gas natural utilizaremos una matriz de decisión, la cual evalúa las alternativas de almacenamiento en las diferentes formaciones, tabla 2.1

ALMACENAMIENTOS	PRODUCTOS									
	HIDROCARBUROS								RESÍDUOS	
	Crudo	Acetite Diesel	Gasolina	Queroseno	GPL	GNL	Gas natural	Aire a presión	Fijos	Líquidos
Acuíferos	-	-	-	-	-	-	+	+	-	0
Yacimientos agotados	-	-	-	-	-	-	+	0	-	0
Cavidades salinas	+	+	+	+	+	-	+	+	+	*
Cavernas en roca	+	+	0	-	+	0	*	0	+	-
Minas abandonadas	+	0	-	-	-	-	0	0	+	0
Tanques superficiales	X	X	X	X	X	+	X	X	0	0

+ Condiciones excelentes

0 Posibilidades de almacenamiento

\* En estudio

x Buenas condiciones (Antieconómico para grandes volúmenes)

Tabla 2.1 ALTERNATIVAS DE ALMACENAMIENTO DE GAS NATURAL

De acuerdo con la tabla 2.1 los sitios favorables para el almacenamiento subterráneo para gas natural serán:

- 1) Acuíferos
- 2) Yacimientos agotados
- 3) Cavidades salinas

### 2.1.1 ACUÍFEROS

La formación geológica deberá ser porosa y permeable (reservorio) puede servir para el almacenamiento de gas natural a condición de que:

Esté recubierta por una capa impermeable (cobertera) para evitar toda migración vertical del gas,

Tenga una forma de trampa (anticlinal por ejemplo) para asegurar un confinamiento lateral (vea figura 2.2), y esté situada a una profundidad tal entre 500 y 2000 m que se obtenga una compatibilidad óptima entre los regímenes de presión en la red de transporte y en el reservorio.

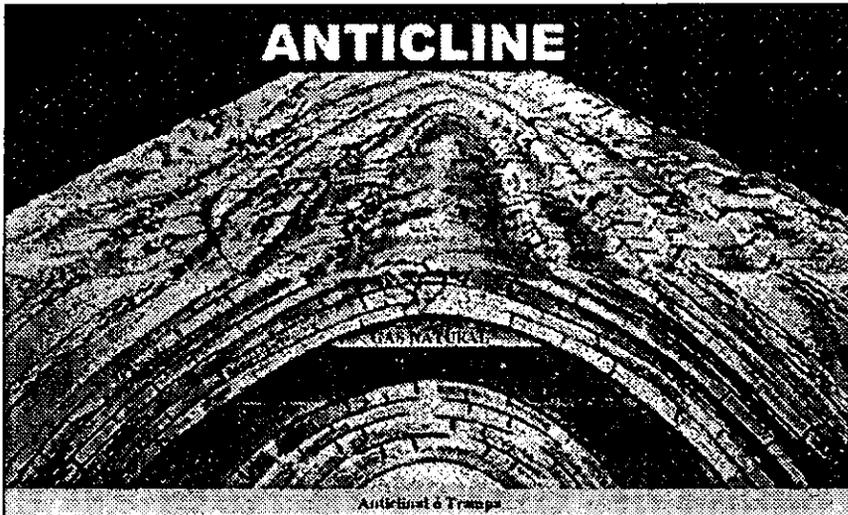


Figura 2.2 ANTICLINAL O TRAMPA

Dicha formación puede ser un yacimiento agotado o una capa acuífera que no haya contenido hidrocarburos, ya que de ser así contaminarían el gas natural a almacenar. Este tipo de almacenamiento generalmente es de gran capacidad, de algunos centenares a varios miles de millones de  $m^3$  en condiciones normales, es uno de los principales medios de regulación de la cadena de gas natural.

## Principio de almacenamiento.

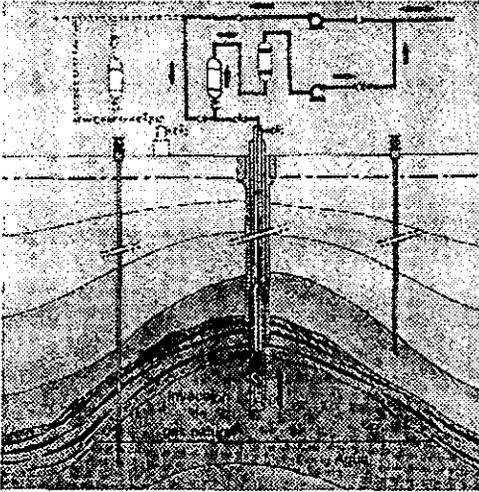


Figura 2.3 ACUIFERO

El producto a confinar es comprimido e inyectado en el almacenamiento, desplazando el agua que ocupa inicialmente los intersticios de la roca, para su extracción el producto es expulsado por efecto de su propia presión y el agua puede eventualmente volver a ocupar el espacio liberado.

La inyección y extracción son realizadas por medio de un conjunto de pozos de explotación que se asemejan a los pozos de producción de los yacimientos de gas, la instalación de superficie comprende principalmente instalaciones de compresión, de tratamiento y de medida del producto (Figura 2.3).

## Características típicas del almacenamiento en acuíferos

Gran capacidad de almacenamiento (de 250 a 10 000 Mm<sup>3</sup> – 10 a 300 BPC de capacidad útil).

Capacidad de extracción dependiente de las características del almacenamiento (gasto diario medio igual o superior al 1% del volumen útil).

Rigidez en la operación para cambiar de inyección a extracción (ciclos de producción anuales).

Se requiere de una inversión alta de gas colchón aproximadamente del 60%.

Su desarrollo es más largo y costoso debido a los trabajos de exploración geológica necesarios para evaluar el reservorio y demostrar la existencia de una cobertura estructural.

## 2.1.2 YACIMIENTOS AGOTADOS

El almacenamiento de gas natural en yacimientos agotados de gas es el más antiguo, por tanto, la forma de almacenamiento subterráneo más desarrollada y en uso actualmente. El gas ha estado atrapado y almacenado ahí por millones de años antes del descubrimiento del campo y su producción subsecuente, así que la existencia de un almacenamiento contenedor y su habilidad para retener gas en forma segura sobre la presión original de descubrimiento esta probada mas allá de cualquier duda.

### Principio de almacenamiento.

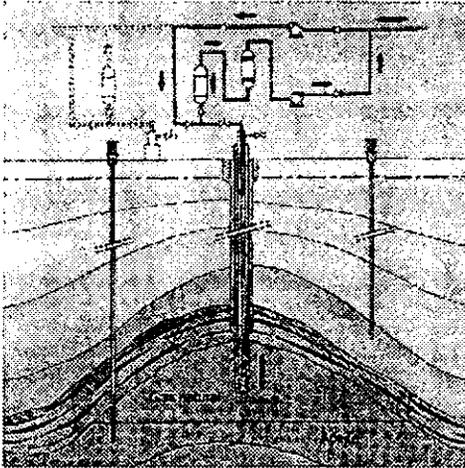


Figura 2.4 YACIMIENTOS

El producto a confinar es comprimido e inyectado en el almacenamiento, desplazando el agua que ocupa inicialmente los intersticios de la roca, para su extracción el producto es expulsado por efecto de su propia presión y el agua puede eventualmente volver a ocupar el espacio liberado.

La inyección y extracción son realizadas por medio de un conjunto de pozos de explotación que se asemejan a los pozos de producción de los yacimientos de gas, la instalación de superficie comprende principalmente instalaciones de compresión, de tratamiento y de medida del producto (Figura 2.4).

### Características típicas del almacenamiento en yacimientos agotados

Gran capacidad de almacenamiento (de 250 a 10 000 Mm<sup>3</sup> – 10 a 300 BPC de capacidad útil)

Capacidad de extracción dependiente de las características del almacenamiento (gasto diario medio igual o superior al 1% del volumen útil)

Rigidez en la operación para cambiar de inyección a extracción (ciclos de producción anuales).

Debido al comportamiento del repertorio no se puede pasar rápidamente de la inyección a la extracción

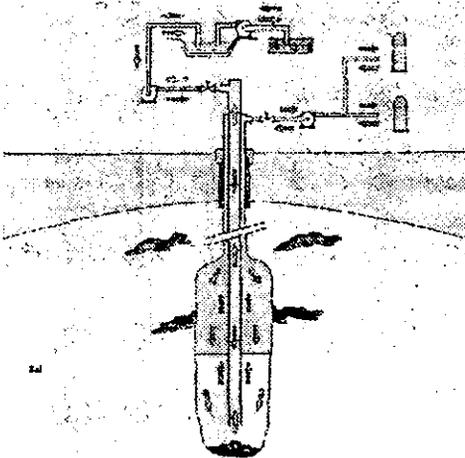
El gas colchón representa entre el 30 y el 60% de la capacidad del repertorio.

### 2.1.3 CAVIDADES LIXIVIADAS EN SAL O SALINAS

Debido a la presencia de sal en el subsuelo en forma de capas extensas y gruesas o en forma de domos y ya que es un material de fácil extracción, por medio de la inyección de agua dulce se puede disolver progresivamente la sal permitiendo alcanzar un volumen de vacío requerido, esta operación se realiza por una perforación de tipo petrolero mediante dos tuberías concéntricas, por una se inyecta agua dulce y por la otra se evacua la salmuera producida.

Las propiedades de la sal hacen que las cavidades creadas se presten para el almacenamiento de productos líquidos o gaseosos, ya que es lo suficientemente resistente como para que las cavidades sean lo suficientemente estables, es impermeable y asegura la estanqueidad absoluta de las cavidades, es físico-químicamente inerte respecto a la mayoría de los líquidos no-acuosos y de los gases, además la sal obtenida puede ser rentabilizada por las instalaciones industriales próximas al lugar de extracción ya sea en producción de sal cristalizada, de cloro, de sodio, ..., etc.

Principio de almacenamiento.



El producto a confinar es inyectado a la cavidad por medio de una estación de compresión a presiones que están en función de la profundidad del almacenamiento subterráneo y su extracción es debida a la descompresión de la misma (efecto de pulmón), Figura 2.5.

Figura 2.4 Cavernas salinas

Características típicas de almacenamiento en cavidades salinas

Volumen medio de almacenamiento (100 a 500 Mm<sup>3</sup> de 4 a 20 BPC de capacidad útil)

Capacidad de extracción del volumen útil (extracción del volumen útil en 10 ó 20 días)

Gran flexibilidad para cambiar de inyección a extracción en períodos reducidos (en unas horas, en ciclos de producción múltiple).

Permite la regulación de gas en los ductos, en períodos pico y asegura el suministro de gas a corto plazo.

## 2.2 VENTAJAS DEL ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO

### Económicas

La inversión necesaria para la creación de un almacenamiento subterráneo de gas natural es con frecuencia inferior a la necesaria para la realización de instalaciones convencionales de superficie de igual capacidad. Los factores que influyen considerablemente en la importancia de esta inversión comprenden:

Las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del sitio seleccionado para la ubicación del almacenamiento.

- La capacidad requerida.
- Las condiciones de explotación impuestas.
- Las características del producto por almacenar.

Actualmente, favorecen el almacenamiento subterráneo en detrimento del almacenamiento convencional:

- El costo del acero
- La importancia de las capacidades requeridas
- El valor creciente de los terrenos industriales.
- La severidad de los reglamentos de seguridad

En la mayoría de los casos los costos de explotación y de mantenimiento también son inferiores a los de las instalaciones superficiales (como se muestra en la tabla comparativa de costos de almacenamiento).

### Seguridad

El principio mismo de almacenamiento reduce considerablemente los riesgos de incendio y/o de explosión siempre y cuando se construya bajo el criterio establecido (los cuales serán mencionados posteriormente). El concepto de almacenamiento subterráneo permite eludir numerosos accidentes y reducir significativamente sus eventuales consecuencias especialmente:

- En caso de inadvertencia humana, los hidrocarburos al no estar en contacto con la atmósfera no pueden inflamarse.

En caso de catástrofe natural, la acción de los elementos naturales afecta más fácilmente a las instalaciones convencionales de superficie incrementando los riesgos de interrupción de la explotación en ella e incluso de destrucción total.

- En caso de guerra, las ventajas del almacenamiento subterráneo son obvias, la multiplicación de actos de terrorismo contra instalaciones de almacenamiento de hidrocarburos se ha incrementado cada vez más, por ello las instalaciones superficiales de almacenamiento están más expuestas a sabotajes, en cambio en los almacenamientos subterráneos las instalaciones requeridas son limitadas y por ello más fácil de proteger.

### Protección al medio ambiente

Además de que la superficie del terreno necesario es muy reducida, los equipos superficiales que requiere la explotación del almacenamiento se pueden integrar más fácilmente al medio ambiente natural. Más aún, si se observan estrictamente las condiciones definidas para la realización y la explotación de la obra, se pueden eliminar casi completamente los riesgos de contaminación por hidrocarburos. Además, no se desfigura el medio ambiente con baterías de separación que se despliegan en varios metros cuadrados. En estas condiciones es posible crear un almacenamiento subterráneo en muchas situaciones en las que una alternativa convencional no fuera autorizada.

## **2.3 BENEFICIOS DEL ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO**

### Productores:

- Permite a los productores alcanzar una mayor eficiencia en la producción,
- Ofrece ventajas contractuales,
- Puede usarse como un instrumento para administrar los riesgos contractuales o de precio.

### Consumidores:

- Permite optimizar los costos del transporte por ducto, al elevar el factor de carga de los clientes,
- Facilita a los clientes satisfacer con rapidez sus requerimientos pico,
- Con el desarrollo de los distribuidores en México, las nuevas compañías serán posiblemente los principales clientes potenciales de la utilización de los almacenamientos ya que con ello garantizarán la disponibilidad del gas a sus clientes,

- Puede usarse como un instrumento para administrar los riesgos contractuales (desbalances y penalizaciones) o de precio.

Comercializadores:

- Permite la creación de nuevos puntos para comprar y vender el gas (Market Hubs),
- Facilita la oferta de nuevos servicios como “parking, loaning, wheeling and title transfer”,
- También se asocia a la oferta de servicios financieros, cuanto estos puntos adquieren importancia en el mercado pueden fijar precios en forma independiente (como el Henry Hub).

Pemex Gas

- Dependiendo su localización, será posible elevar los márgenes de maniobra para comercializar los excedentes o faltantes de gas, en el mercado internacional,
- Facilitaría el cumplimiento de los compromisos contractuales de las ventas de primera mano, ante posibles variaciones en los niveles de producción de gas,
- Dependiendo su localización, se podría crear un nuevo punto de intercambio que permitiría introducir un nuevo mecanismo de precios para determinar el valor de las ventas de primera mano,
- Se podría garantizar una mejor programación de la producción, evitando la necesidad de cerrar pozos por problemas de desbalance entre la oferta y la demanda.

Lo anterior demuestra claramente que la solución óptima consiste en dar dimensiones medianas a las instalaciones de producción y transporte, a fin de reducir sus costos, y de contar con una capacidad de almacenamiento suficiente para enfrentar las variaciones mensuales y diarias de la demanda.

## **2.4 REQUERIMIENTOS QUE DEBE SATISFACER EL ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE GAS NATURAL EN MEXICO**

Los requerimientos que debe cumplir el almacenamiento subterráneo de gas natural en México para satisfacer sus necesidades las cuales son:

Garantizar los consumos pico (horario y diario) con varios ciclos anuales.

Absorber las variaciones a corto plazo para mantener constante el empaque de la línea.

Garantizar un abastecimiento a corto plazo en caso de emergencia.

Permitir la compra de gas natural a corto plazo en periodo de precio bajo.

Flexibilidad para cambiar de proceso (inyección/extracción) en un periodo corto.

Asegurar el confinamiento de gas natural sin peligro de explosión.

Asegurar el confinamiento de gas natural sin peligro de contaminación del mismo.

Respeto al medio ambiente minimizando la posibilidad de contaminación.

Recuperación de la mayoría del producto a almacenar.

Una vez descritos los diferentes tipos de almacenamientos subterráneos para el confinamiento de gas natural, se muestra en la tabla 2.2 la matriz de decisión para determinar cual de los diferentes tipos de almacenamiento subterráneo es el más conveniente para satisfacer los requerimientos descritos anteriormente.

Requerimientos Almacenamiento	Garantizar los consumos pico (horario/diario)	Absorber variaciones a corto plazo	Garantizar abastecimiento a corto plazo	Flexibilidad para cambiar de proceso (inyec/extrc)	Garantizar el confinamiento sin riesgo de explosión	Garantizar el confinamiento sin riesgo de contaminación	Respeto al medio ambiente	Construcción y operación por diversas Clas. interesadas
Acuíferos	NO	NO	NO	NO	Si	si	Si	NO
Yacimientos agotados	NO	NO	NO	NO	Si	si	si	NO
Cavidades Salinas	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 2.2 MATRIZ DE DECISION PARA EL ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO

De acuerdo a la información arrojada por la matriz podemos decir que los yacimientos agotados y acuíferos se adaptan para desempeñar un almacenamiento de gran volumen destinado principalmente a las siguientes necesidades:

Almacenamiento estratégico  
Almacenamiento plurianual  
Almacenamiento estacional

Por lo que quedan descartados, además los yacimientos agotados y acuíferos sólo pueden ser explotados por Pemex lo que monopoliza el mercado de gas natural limitando su comercialización.

Debido a la apertura del mercado de gas natural en México, en lo que se refiere a las actividades de almacenamiento, distribución y comercialización la única alternativa disponible para almacenar gas natural bajo la superficie es en cavidades salinas, debido a que las compañías interesadas en cualquiera de las actividades anteriores podrán explotar este tipo de formación para la creación de cavernas salinas para el almacenamiento de gas natural, ya que no existe ningún reglamento que restrinja la explotación de dichas formaciones como sucede con las dos anteriores en que Pemex es el único beneficiado, por ello se mencionaran más detalladamente en el capítulo siguiente.

## CAPITULO 3

### CAVIDADES SALINAS

#### 3.1 ANTECEDENTES

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 salinas de solución minera para el almacenamiento subterráneo de gas natural y destilados para confinar de manera segura sus combustibles.

Las primeras cavernas planeadas para el almacenamiento de hidrocarburos en Estados Unidos fueron realizadas a principios de los años 50's.

En 1960 en Michigan E.U. se almaceno exitosamente por primera vez gas natural en cavernas subterráneas que anteriormente eran utilizadas para la producción de sal.

En México se perforó en 1961 el pozo Tuzandépetl 7 (Veracruz), con el fin de almacenar 79500 m<sup>3</sup> de propano líquido, pero el proyecto tubo que abandonarse porque las tuberías se taponaron con cristales de sal, al suspender temporalmente la construcción por falta de equipo.

En 1963, Pemex perforó el pozo Tuzandépetl 202 y en 1967 el 201<sup>a</sup> con el propósito de investigar la calidad de la sal y terminarlos como productores de salmuera para abastecer el Complejo de Pajaritos.

El proyecto fue transferido a otra compañía, en virtud de que Pemex carecía de calidad jurídica para explotar la sal (un mineral).

En los últimos 40 años el almacenamiento de hidrocarburos se ha incrementado de manera drástica. En 1991, la Asociación de Procesadores de Gas (GPA) calculó tan sólo en E:U: la capacidad de almacenamiento en 83.3 billones de litros en 1122 cavernas separadas, de estas 70 son cavernas de roca dura y el resto cavernas en depósitos salinos, lo que refleja las ventajas sobre otro tipo de almacenamientos.

Las cavernas de almacenamiento de hidrocarburos se operan actualmente en diversos países como son: México, E:U:, Canadá, Inglaterra, Francia, Alemania, Holanda, Suecia, Noruega,....,etc. Así como otros países del mundo.

### 3.2 LOCALIZACION DE DEPOSITOS SALINOS EN MEXICO

Debido a que la República Mexicana cuenta con innumerables depósitos de sal localizados la gran mayoría en el sureste del país y en los cuales se pueden desarrollar cavidades salinas para el almacenamiento de hidrocarburos, en general estos sitios se describen en la siguiente tabla 3.1

Domo	Estado	Domo	Estado
Abanicos	Veracruz	Magallanes	Tabasco
Acalapa	Veracruz	Manati	Veracruz
Achotal	Veracruz	Mazate	Veracruz
Almagres	Veracruz	Medellin	Chiapas
Amezquite	Veracruz	Medias aguas	Veracruz
Buena vista	Veracruz	Metate	Veracruz
Cabritos	Veracruz	Moloacan	Veracruz
Cascajal	Veracruz	Moralar	Veracruz
Chichon	Veracruz	Nopalapa	Veracruz
Chichonal	Veracruz	Nuevo Teapa	Veracruz
Chinameca	Veracruz	Ogarrio	Tabasco
Cinco presidentes	Tabasco	Pailebot	Tabasco
Coatzacoalcos	Veracruz	Pajaritos	Veracruz
Colorado	Veracruz	Pedregal	Veracruz
Cosoleacaque	Veracruz	Pochitoque	Veracruz
El burro	Veracruz	Potrerillos	Veracruz
El dorado	Tabasco	Punta gordo	Veracruz
El encanto		Rabon 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	Tuzandepell	Veracruz
Las limas	Veracruz	Yucatecal	Veracruz
Los muertos	Veracruz	Zanapa	Tabasco
Los soldados	Veracruz		

Tabla 3.1 DOMOS SALINOS EN MEXICO

### 3.2.1 ORIGEN DE LOS DEPÓSITOS DE SAL

Para poder desarrollar una caverna salina primero se debe localizar en el subsuelo un depósito, estrato o domo salino. La formación de estos depósitos subterráneos de sal, se debió a que en un principio durante épocas de extrema aridez en la tierra se produjeron evaporaciones de agua marina en mares de poca profundidad por lo que el área de evaporación fue grande en comparación con el tirante de agua, provocando hundimientos constantes e inundaciones de aguas marinas y evaporaciones nuevamente, hasta que estas capas de sal fueron posteriormente cubiertas por sedimentos hasta formar estratos de sal de gran espesor.

### 3.2.2 FORMACION DE LOS DOMOS

Los domos se encuentran en áreas en las que existen grandes depósitos evaporíticos de sal, y la sal relativamente plástica se deforma intensamente debido a su menor densidad que los estratos que la cubren, y cuando la columna de tales sedimentos tiene un espesor de 4000 a 5000 metros, este ejerce una presión suficiente para generar el flujo ascendente de la sal, y si además existen fracturas y/o fallas, esto favorece y facilita el ascenso de la sal formando así estructuras domícas, otras circunstancias que favorecen la formación de estas estructuras son las condiciones geológicas del lugar y las fuerzas tectónicas del área, la naturaleza intrusiva de los depósitos de sal se muestra en la siguiente figura 3.1.

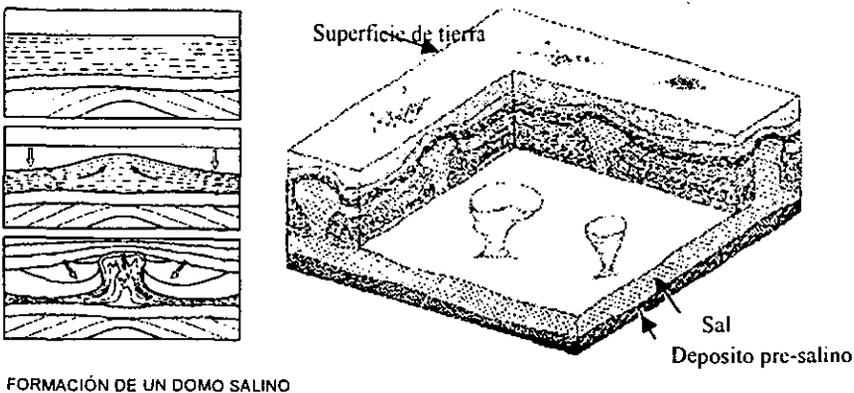


Figura 3.1 FORMACION DE DOMOS SALINOS

### 3.3 REQUERIMIENTOS BASICOS PARA LA SELECCION DEL SITIO

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

Además de la formación salina, es necesario considerar otros aspectos para elegir el sitio donde se localizarán las cavernas para el almacenamiento, a continuación se señalan algunos de los requerimientos principales para efectuar dicha selección.

#### 3.3.1 PROFUNDIDAD

La profundidad mínima para el desarrollo de la caverna se determina sobre la base de la presión del producto a almacenar, la cual no debe ser mayor al gradiente de fractura de la formación salina. La Asociación Americana de Gas (AGA) de los estados Unidos ha establecido un gradiente de 0.8 lb/pulg<sup>2</sup>/pie.

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 m (6000 pies), a fin de evitar que las cavidades se cierren o queden atrapadas las tuberías.

Tomando como base lo anterior, se considera que el intervalo adecuado para desarrollar una caverna debe estar comprendido entre 300 y 1800 m de profundidad.

#### 3.3.2 ESPESOR

El espesor de la formación dependerá del volumen que se planea almacenar y del diámetro máximo de la caverna.

#### 3.3.3 PUREZA

El porcentaje de insolubles contenidos en el domo salino deberá ser menor al 5% para que el volumen útil de la cavidad no se reduzca notablemente como se demuestra a continuación:

Calculo del Volumen Util del Almacenamiento Referencia (Geostock)

Al construir una caverna, debe considerarse que no todo el volumen excavado puede ser utilizado para almacenamiento como se ve en la figura 3.2.

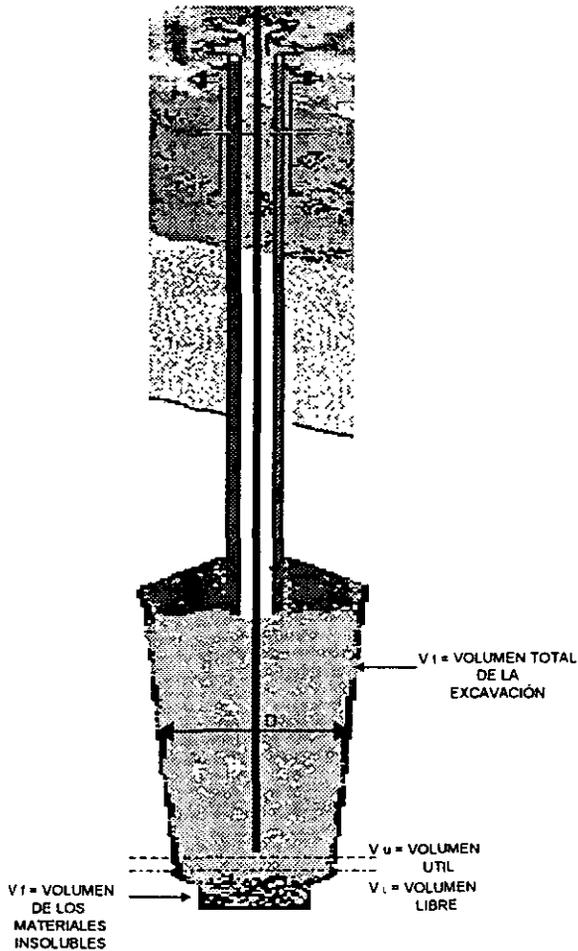


Figura 3.2 VOLUMEN UTIL DE ALMACENAMIENTO

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 par almacenamiento.
- $V_l$  = Volumen libre.
- $x$  = Porcentaje de insolubles.

D = Diámetro de la cavidad.  
f = Coeficiente de aumento de volumen.

Entonces:

$$V_c = V_i(1-x) \quad (3-1)$$

Debe notarse que en esta ecuación, se considera que la salmuera llena los vacíos insolubles, que se encuentran en el fondo de la cavidad.

El volumen libre, es el volumen "visto" por un sonar:

$$V_l = V_i - V_f \quad (3-2)$$

Los materiales insolubles aumentan de volumen aparente al amontonarse; pueden existir hasta bloques de sal no disueltos. Para tomar en cuenta este "Esponjamiento", se debe considerar un coeficiente de aumento de volumen (f) = 1.8.

Por lo tanto el volumen de insolubles es:

$$V_f = xV_i f = xV_i 1.8 \quad (3-3)$$

y el volumen libre:

$$V_l = V_i - V_f = V_i(1 - xf) \quad (3-4)$$

Se deberá colocar la tubería dos metros arriba del punto más alto de los materiales insolubles, para evitar que el arrastre de bloques de sal al interior de los tubos, pudiera causar obstrucciones hasta el punto de impedir toda circulación.

Además de esto, en experiencias anteriores se observó que cuando los insolubles se depositan, generalmente adoptan una forma cónica, por lo cual se duplicara la distancia de dos metros, propuesta inicialmente.

Por estas dos razones, una parte del volumen libre, no estará disponible para el almacenamiento de crudo y será llamado volumen perdido, ( $V_p$ ):

$$V_p = \frac{\pi D^2}{4} h = \frac{\pi D^2}{4} 4 = \pi D^2 \quad (3-5)$$

Con lo cual, el volumen útil es:

$$V_u = V_l - V_p = V_i(1 - fx) - \pi D^2 \quad (3-6)$$

ó

$$V_u = V_c \frac{(1-fx)}{(1-x)} - \pi D^2 \quad (3-7)$$

Como ejemplo se consideraron los siguientes datos:

$$V_c = 300 \text{ Mm}^3$$

$$x = 5\%$$

$$D = 50 \text{ metros}$$

Sustituyendo:

$$V_u = 300000 \left[ \frac{1 - 1.8(0.05)}{1 - 0.05} \right] - \pi(50)^2 = 287368 - 7854 = 279514 \text{ m}^3$$

$$V'_i = \frac{V_c}{1-x} = \frac{300000 \text{ m}^3}{1-0.05} = 315789 \text{ m}^3$$

$$\frac{V_u}{V'_i} \times 100 = 88.5\%$$

$$\text{Si } x = 10\% \quad \frac{V_u}{V'_i} \times 100 = 79.6\%$$

$$\text{Si } x = 15\% \quad \frac{V_u}{V'_i} \times 100 = 73\%$$

$$\text{Si } x = 20\% \quad \frac{V_u}{V'_i} \times 100 = 64\%$$

Puede observarse que independientemente de las malformaciones de la cavidad, la pérdida de volumen por insolubles, es una importante razón para elegir estratos salinos con un porcentaje máximo de insolubles de 5%, así como un contenido máximo de sales más solubles que el cloruro de sodio de 15%, de ser posible, en forma diseminada en la masa salina.

Estos materiales son molestos cuando se presentan en forma de capas, estratos o relleno de fractura, porque podrían relocalizarse y ocasionar rupturas en las tuberías.

Con objeto de no tener problemas de derrumbe y controlar de mejor manera la forma de la caverna, es necesario evitar la presencia de intercalaciones de arcilla, camalila o anhidrita.

### **3.3.4 ABASTECIMIENTO DE AGUA**

Es necesario contar con una fuente de abastecimiento de agua dulce, capaz de suministrar los volúmenes requeridos para el desarrollo de la cavidad.

### **3.3.5 DISPONIBILIDAD DE LA SALMUERA**

Durante el desarrollo de una caverna se produce salmuera por lo que es necesario contar con algún medio para su manejo, tal como una presa posteriormente este producto se podrá inyectar a alguna formación porosa de alta permeabilidad, arrojarse al mar o bien entregarse a alguna planta donde se recupere la sal para su uso industrial.

### **3.3.6 CERCANIA DE LOS CENTROS DE PRODUCCION, CONSUMO Y DISTRIBUCIÓN DEL PRODUCTO**

Es importante localizar los centros de almacenamiento lo mas cerca posible a los centros de producción, consumo y distribución para tener una disponibilidad de transporte del producto hacia las áreas de consumo más eficiente y a menor costo.

### **3.3.7 SELECCION DEL SITIO**

Como se puede apreciar en el mapa tabla 3.1, el estado de Veracruz cuenta con la presencia de depósitos de sal, además de contar con la infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto y por estar cerca de los principales centros de producción de gas natural aparte de todo esto, la Cuenca del Istmo de Tehuantepec específicamente en Tuzándepetl Ver. es en donde se han desarrollado las primeras cavernas salinas para el almacenamiento subterráneo de gas natural, por lo cual se cuenta con la infraestructura y experiencia necesaria que podrían hacer factible la construcción de almacenamientos de gas natural en cavidades salinas.

La información geológica que se tiene acerca de Tuzándepetl debido a los trabajos anteriormente publicados es:

- a) La cima de la formación salina se encuentra a poca profundidad, aproximadamente a 700 metros, y su espesor es mayor de 1000 metros.
- b) La sal es de buena calidad, ya que contiene pocas impurezas y bajo contenido de sólidos insolubles.
- c) Se cuenta con la presencia del río Coatzacoalcos el cual puede aportar el agua necesaria para la formación de una o más cavernas.
- d) En cuanto a la disponibilidad de la salmuera, ésta puede arrojarse al mar o entregarse a las compañías IQUISA y Sales del Istmo S.A. cuyas plantas de procesamiento se encuentran cercanas.

### 3.4 PRINCIPIO DE CONSTRUCCION DE LAS CAVIDADES

Para crear una cavidad en una formación salina, se crea una abertura lixiviando la sal a partir de un agujero que se perfora a una profundidad tal que las características mecánicas de la sal sean compatibles con las presiones consideradas tanto para el producto a almacenar como de la salmuera producida por la lixiviación.

Generalmente, esta profundidad varía en función de la presión del almacenamiento.

La construcción de las cavidades utiliza las técnicas perfeccionadas para las perforaciones petrolíferas y las soluciones de la industria minera, llevándose a cabo en dos etapas como se menciona a continuación:

a) Primera etapa.

Se comienza con la perforación de un pozo en la capa salina por debajo de una determinada profundidad, con dos o más tuberías de revestimiento para aislar las formaciones, sobretodo las acuíferas, de la cavidad a desarrollar.

b) Segunda etapa

Lixiviación de la sal, la cual consiste en inyectar agua al domo a través de un sistema de tuberías concéntricas lo cual hace que la sal se vaya disolviendo y por la otra tubería se ira recuperando el fluido generado (salmuera), encima de la cavidad se coloca un fluido inerte a la sal y con una densidad menor a la del agua, para evitar cualquier lixiviación

imprevista por encima del nivel considerado, este fluido puede ser diesel, gas L.P. ó aire.

En la figura 3.3 se muestran las dos etapas para la formación de una cavidad salina.

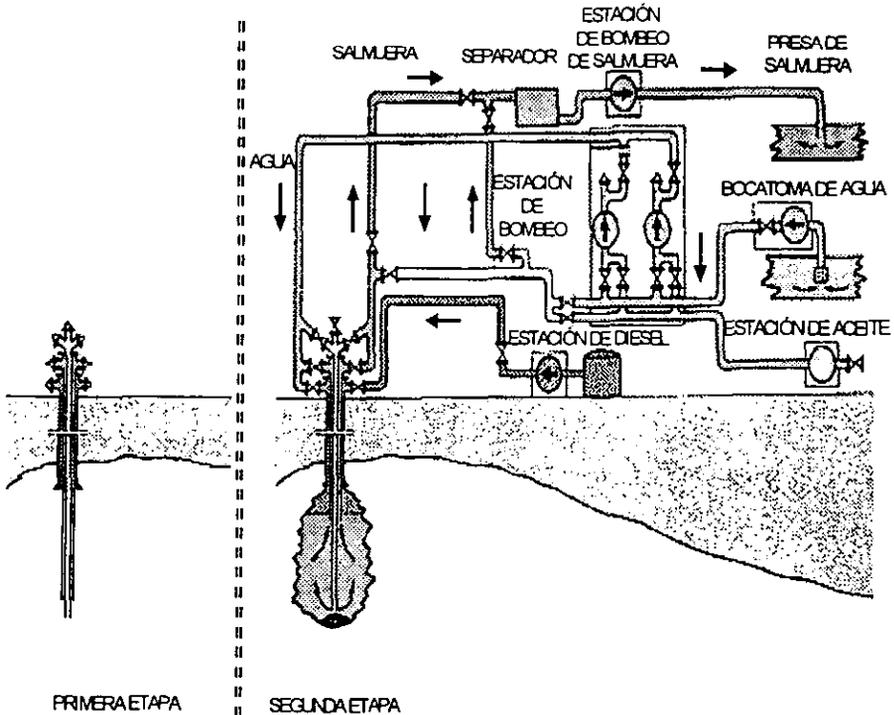


Figura 3.3 ETAPAS EN LA FORMACION DE UNA CAVIDAD SALINA

La forma de la cavidad esta en función al producto a almacenar y se lleva acabo por diferentes métodos de lixiviación, los cuales pueden ser:

- 1) Lixiviación directa:  
La inyección de agua es por la tubería de menor diámetro.  
Crecimiento más rápido en la parte inferior de la cavidad.

- 2) Lixiviación inversa:  
 La inyección de agua es por el espacio anular de la tubería.  
 Crecimiento más rápido en la parte superior de la cavidad.

En la figura 3.4 se muestran los métodos de lixiviación.

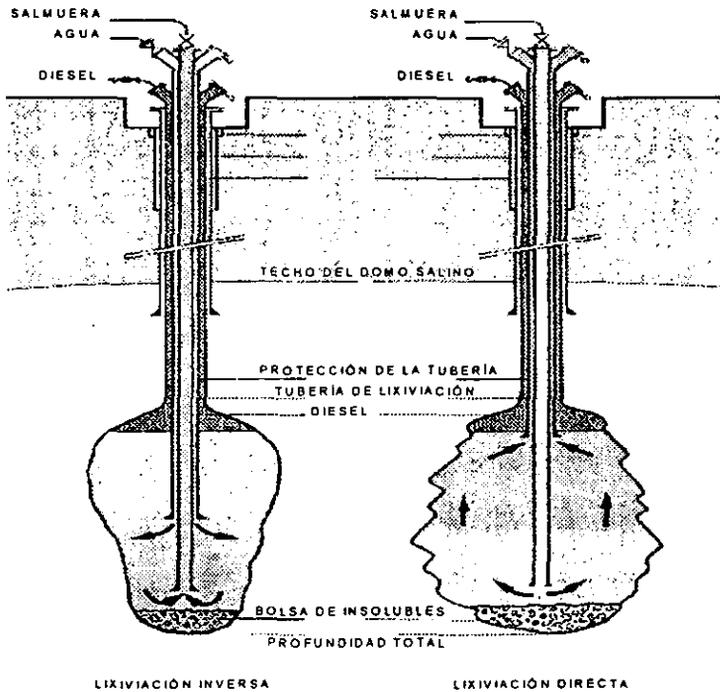


Figura 3.4 METODOS DE LIXIVIACION

### 3.4.1 INSPECCION DURANTE LAS ETAPAS DE DESARROLLO

Cada etapa se dará por terminada cuando se haya disuelto el volumen programado, lo cual se podrá comprobar por medio de un registro Sonar.

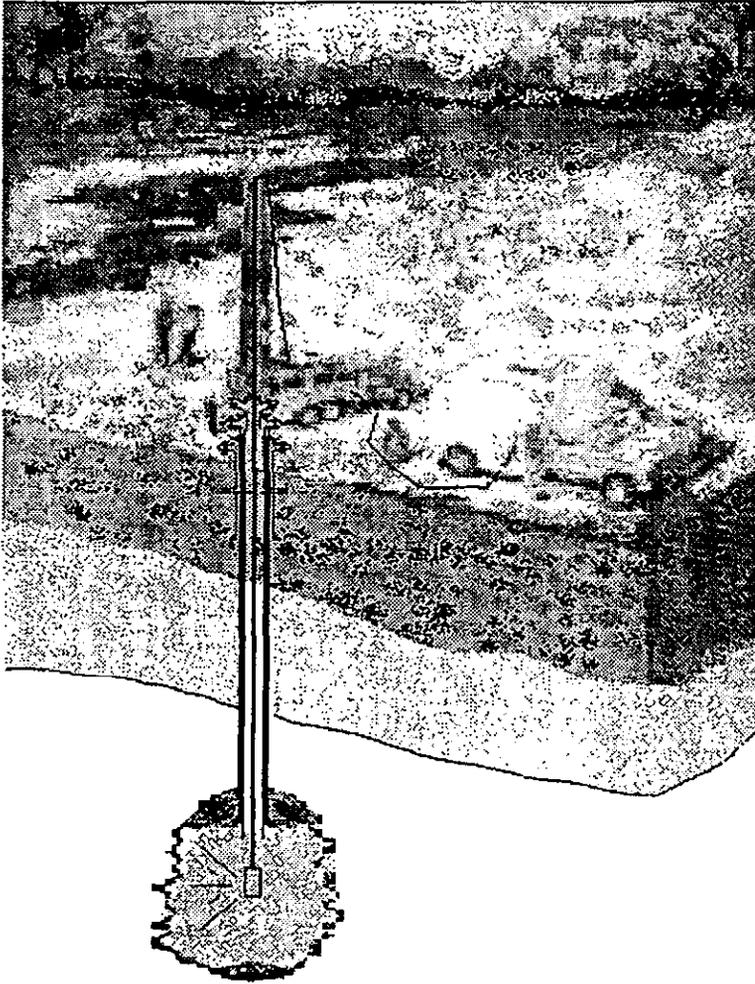


Figura 3.5 REGISTRO SONAR

La figura 3.5 ilustra el uso de este dispositivo, el cual emite pulsaciones sónicas y recibe el retorno de éstas.

El objetivo de los registros es:

- a) Determinar la estructura.

Si el soporte del techo fuese inadecuado, la resistencia de la formación podría excederse y resultar en hundimientos que requerirían costosas operaciones para remediarlo. A veces las tuberías se dañan y es necesario reemplazarlas a un costo muy alto.

- b) Determinar el tamaño real de la caverna.
- c) Determinar la forma de la cavidad.
- d) Revisión del programa de lixiviación.
- f) Verificar que se toma una acción correctiva adecuada.
- g) Como una guía para la terminación.

El equipo utilizado consiste esencialmente de tres partes:

- 1) El silbato o bocina
- 2) La fuente de poder
- 3) El registrador

El aparato se introduce en el pozo con un solo cable, el silbato produce una pulsación sónica intermitente, la cual es enfocada a un lugar en particular. La onda sonora viaja a través del fluido en la cavidad chocando con las paredes y reflejándose hacia el receptor.

Cuando se desea hacer una caverna debe considerarse que no todo el volumen excavado puede ser utilizado para almacenamiento como se determino anteriormente (vea 3.3.3).

La evolución de la forma se verifica con mediciones sonares periódicamente durante la lixiviación.

## CAPITULO 4

### ESTABILIDAD MECANICA

#### 4.1 ANTECEDENTES

En la ingeniería de proyecto de estos almacenamientos, el análisis de estabilidad de las cavidades que lo conforman, es una parte muy importante, ya que proporciona información muy útil para buscar en un principio su diseño óptimo en cuanto a su dimensión, forma y localización dentro del domo, para posteriormente servir como medio de control para aprovechar al máximo el volumen de almacenamiento disponible.

El primer análisis de estabilidad de las cavidades actualmente en lixiviación en el domo salino de Tuzándepel, fue realizado por IMP\Geostock durante el estudio de factibilidad, en el año de 1984. Como resultado de este análisis se diseñaron 12 cavidades con una capacidad de 833,000 BLS cada una para almacenar un total de 10 MMBLS de crudo; en él se definieron sus dimensiones, profundidades, distancia entre cavidades así como las consideraciones generales y criterios que deberían seguirse para su explotación.

Durante el año de 1985, en los laboratorios de la Escuela de Minas de París, del Instituto de Ingeniería de la UNAM, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), realizaron ensayos de laboratorio a temperatura ambiente a varias probetas obtenidas de núcleos, el objetivo fue caracterizar el macizo rocoso y determinar los parámetros mecánicos de la sal; cabe destacar que entre los valores obtenidos en París y los obtenidos en laboratorios nacionales existieron diferencias tomándose a criterio del asesor, los parámetros determinados en la Escuela de Minas como más representativos para realizar el análisis de estabilidad de las cavidades, con el cual pudieron concluir que el proyecto era factible y además se podía considerar, como de buena calidad la sal del primer estrato del Domo donde se ubicarían las cavidades (aun cuando fuera heterogénea).

Posteriormente, al analizar los resultados de las pruebas de presión realizadas a los pozos en 1988, IMP\Geostock considero necesario efectuar un segundo análisis de estabilidad para rectificar las conclusiones del primero.

Para este segundo análisis se tomaron como datos de entrada los registros del comportamiento IN SITU de los pozos, por lo que se puede considerar más realista que el basado en ensayos de muestras de sal en laboratorio. Este segundo análisis reveló una sal más deformable y un domo compuesto por estratos de sal con diferentes propiedades mecánicas que daban al domo un carácter heterogéneo.

Ante la incertidumbre y sabiendo la importancia y el carácter esencial que tiene el análisis de estabilidad para la definición de las condiciones de operación, las cuales repercuten en la vida útil del almacenamiento.

Cabe señalar que se requerirán análisis en el futuro donde se consideren otros factores como: las propiedades mecánicas de la sal consideradas en el modelo ajustadas al comportamiento de las cavidades, la definición del proceso de operación y los nuevos registros de campo.

## 4.2 DESARROLLO DEL MODELO MATEMATICO

En el desarrollo de este tipo de problemas es de vital importancia, ya que, se sabe que la roca sal gema sometida a un esfuerzo desviador constante presenta un comportamiento elastoviscoplastico. A la fecha (1993) no se ha definido con precisión un modelo analógico que represente el comportamiento mecánico de esta roca, pero si se han desarrollado algunos modelos matemáticos empíricos capaces de reproducir tal comportamiento, como es el desarrollo en la Escuela de minas de París apoyado en la ecuación establecida por Lemaitre para el análisis de fluencia de la roca sal gema, o también el modelo analítico desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM por el profesor Jesús Alberro y que significó el primer modelo establecido en México para desarrollar el análisis de estabilidad de cavidades creadas en domos salinos.

El análisis de las deformaciones distorcionales para la ecuación constitutiva que aquí presenta se apoyó en la teoría planteada por Burgers para cuerpos viscoelásticos, cuerpos que requieren ser sometidos a cargas constantes para representar el comportamiento establecido por dicho modelo.

### 4.2.1 REPRESENTACION DE LOS MODELOS REOLOGICOS

#### 4.2.1.1 REPRESENTACION POR ANALOGIA

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

Se utiliza entonces:

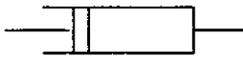
El resorte para representar la ley de Hooke es:  $\sigma = G\varepsilon$  (4-1)



donde:

$\sigma$  Esfuerzo  
 $G$  Modulo de elástico del resorte  
 $\varepsilon$  Deformación

El amortiguador para representar la ley de Newton es:  $\sigma = \mu \varepsilon$  (4-2)



donde:

$\mu$  Coeficiente de viscosidad

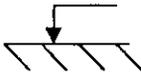
El patín de Saint-Venant para representar la plasticidad:

$$-S \leq \sigma \leq S, \quad (4-3)$$

$$\varepsilon = 0$$

$$|\sigma| \geq S, \quad (4-4)$$

$\varepsilon$  indeterminado



donde:

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

#### 4.2.1.1.1 MODELO DEL CUERPO DE KELVIN

El modelo analógico del cuerpo de Kelvin está constituido por dos elementos, un amortiguador y un resorte conectados en paralelo como se muestra en la figura 4.1

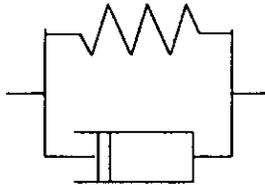


Figura 4.1 MODELO DE KELVIN

Como se puede apreciar, el esfuerzo o carga constante  $\sigma$ , se distribuirá entre ambos elementos en una proporción que dependerá de las características mecánicas de cada elemento, o sea de la  $G$  del resorte y de la  $\mu$  del amortiguador. En el instante de aplicación de la carga, el amortiguador de ésta y conforme transcurre el tiempo ambos elementos se deforman con la misma magnitud, es obvio que la rapidez de deformación del modelo estará definida por la rapidez de deformación del amortiguador y por ende, por la viscosidad de éste; así, la carga se transfiere al resorte al resorte conforme ambos elementos se deforman y al final el resorte tomará el total de la carga.

El proceso de deformación del modelo puede ser definido por la siguiente ecuación constitutiva (4-5)

$$\varepsilon_K = (\sigma / 2G_K)(1 - e^{-\lambda t}) \quad (4-5)$$

Donde:

- $\sigma$  Esfuerzo o carga constante
- $G_K$  Modulo de rigidez al corte del modelo de Kelvin
- $\mu_K$  Coeficiente de viscosidad del modelo de Kelvin
- $\nu_K$  Relación de Poisson del modelo de Kelvin
- $E_K$  Modulo de elasticidad del modelo de Kelvin
- $\varepsilon_K$  Deformación del modelo de Kelvin

$\lambda = G_K / \mu_K$ , pero considerando que  $G_K = E_K / [2(1 + \nu_K)]$ , se obtiene:

$$\varepsilon_K = (\sigma(1 + \nu_K) / E_K)(1 - e^{-\lambda t}) \quad (4-6)$$

Se debe remarcar que en este modelo no existe plastificación, ya que al retirar la carga, el resorte obliga al amortiguador a regresar a su posición original, pero claro está que el tiempo de regresión también dependerá de la viscosidad del amortiguador.

#### 4.2.1.1.2 MODELO DEL CUERPO DE MAXWELL

El modelo analógico del cuerpo de Maxwell está conformado por un amortiguador y un resorte conectados en serie, como se muestra en la figura 4.2.

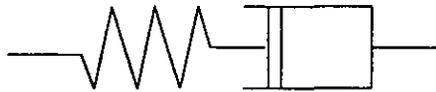


Figura 4.2 MODELO DE MAXWELL

De un análisis sencillo del comportamiento del modelo, se puede ver que al aplicar la carga ésta se concentrará con la misma intensidad en ambos elementos, puesto que son colineales, pero el proceso de deformación será diferente en cada elemento; es decir, el resorte por sus características mecánicas se deformará la longitud necesaria para equilibrar la carga aplicada en el momento de su aplicación, pero el amortiguador se deformará en forma continua a velocidad constante durante todo el tiempo que actúe la carga, y la magnitud de la velocidad dependerá tanto de la viscosidad del fluido que constituye al amortiguador, como de la intensidad de la carga. Por lo tanto, se puede deducir que la magnitud de

deformación del modelo dependerá de las características mecánicas de cada elemento, de la magnitud de la carga y del tiempo de aplicación de ésta. El comportamiento del modelo bajo carga constante puede ser reproducido por la ecuación constitutiva dada por la ecuación 4-7

$$\varepsilon_M = (\sigma/2)(2(1 + \nu_M)/E_M + t/\mu_M) \quad (4-7)$$

donde:

$\sigma$	Esfuerzo o carga constante
$\mu_M$	Coefficiente de viscosidad del modelo de Maxwell
$\nu_M$	Relación de Poisson del modelo de Maxwell
$E_M$	Modulo de elasticidad del modelo de Maxwell
$\varepsilon_M$	Deformación del modelo de Maxwell

En este modelo, a diferencia del modelo de Kelvin, se observa que al cesar la acción de la carga la deformación del amortiguador ya no se recupera, pero sí la del resorte, por lo tanto, en este caso si quedan deformaciones permanentes ya no se recupera, pero si la del resorte, por lo tanto, en este caso si quedan deformaciones permanentes en el modelo, deformaciones que, aunque ocurren bajo la acción de un esfuerzo constante, no son de plastificación debido a que son ocasionadas por la fluencia de un fluido y no por la reestructuración del material.

#### 4.2.1.1.3 HIPOTESIS DEL MODELO

Para el desarrollo de la ecuación constitutiva se plantean las siguientes hipótesis:

- 1) La deformación de la roca sal-gema, en cualquier dirección, es posible definirla en función de su deformación distorsional se genera únicamente durante la aplicación del esfuerzo desviador.
- 2) La deformación volumétrica del material, producida por la aplicación de esfuerzos controlados (isotrópicos o distorsionales), es de tipo barril y está definida por la ecuación (4-8)

$$\varepsilon_{VT} = 2\varepsilon_t + \varepsilon_a \quad (4-8)$$

Donde:

$\varepsilon_{VT}$	Deformación transversal por variación del volumen
$\varepsilon_t$	Deformación transversal
$\varepsilon_a$	Deformación axial

- 3) La deformación distorsional del material es posible definirla a través del modelo analógico del cuerpo de Burgers sometido a un esfuerzo desviador variable controlado (variación constante de incremento).

- 4) Se considera que el comportamiento del material tiene las siguientes características:
- Es altamente viscoso no lineal
  - En la descarga el tiempo de recuperación de las deformaciones elásticas dependen de la viscosidad del material.
  - Es completamente heterogéneo, pero se considera homogéneo en la dirección de los esfuerzos principales intermedio y menor.
  - Es un material isotrópico.

#### 4.2.1.1.4 MODELO DEL CUERPO DE BURGERS

El modelo está conformado por el cuerpo de Maxwell y otro de Kelvin conectados en serie como se muestra en la figura 4.3

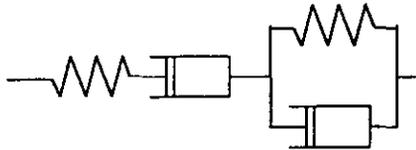


Figura 4.3 MODELO DE BURGERS

Es posible deducir que la deformación del cuerpo de Burgers seguirá el comportamiento dado por la suma de deformaciones de los cuerpos que lo constituyen, o sea:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_M + \varepsilon_K \quad (4-9)$$

donde:

$\varepsilon_B$  Deformación del modelo de Burgers

El análisis del comportamiento del modelo no se está considerando como el de un material viscoelástico, debido a que no se analiza la velocidad de fluencia del material ocasionada por la acción de una carga constante, pero se estima que, definiendo las características mecánicas de los diferentes elementos del modelo a partir de la interpretación de resultados de las pruebas de laboratorio y considerando la aplicación de un esfuerzo desviador controlado o incrementando con una variación constante, o sea en forma lineal respecto al tiempo ( $\sigma = mt$ ), el

modelo será capaz de representar el comportamiento distorsional de la roca sal gema sometida a esfuerzos desviadores variables.

La ecuación (4-10), nos proporciona la deformación total,

$$\varepsilon_T = \varepsilon_v + \varepsilon_o = \varepsilon_v + \varepsilon_M + \varepsilon_K \quad (4-10)$$

donde:

$\varepsilon_T$	Deformación total
$\varepsilon_v$	Deformación volumétrica total
$\varepsilon_o$	Deformación distorsional total

#### 4.2.1.2 REPRESENTACION POR SISTEMAS DE ECUACIONES

Los modelos reológicos esquematizados anteriormente nada más funcionan en el caso uniaxial. 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.

Ciertas leyes no pueden representarse gráficamente, como por ejemplo la ley de Lemaitre utilizada para representar el comportamiento de la sal .

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{vp} \quad (4-11)$$

$$\sigma = E \varepsilon_e \quad (4-12)$$

$$\varepsilon_{vp}(t) = \left[ \frac{\sigma - 2c}{K} \right]^{\beta} t^{\alpha} \quad (4-13)$$

donde:

$\alpha, \beta, K$	Parámetros de Lemaitre
$\varepsilon_{vp}$	Deformación unitaria viscoplástica
$\varepsilon_e$	Deformación unitaria elástica

con la condición inicial:  $\varepsilon_{vp}(0) = 0$

En efecto, 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  $S$ .

$$S = \sigma_{axi} - \sigma_{lat} \quad (4-14)$$

Observación sobre la Ley de Lemaitre:

En los diferentes tipos de enfoque de los problemas de fluencia, se pueden mencionar tres tipos:

- Un enfoque global, que pretende ligar diferentes parámetros medidos en un ensayo mecánico.
- Un enfoque local, que consiste en estudiar a la partícula elemental del material cristalino: el monocristal. Este método investiga los mecanismos de comportamiento a nivel de átomos.
- Un enfoque local-global, que investiga una síntesis entre los dos enfoques precedentes.

La ley de Lemaitre corresponde al primer tipo de enfoque, ya que consiste en representar los resultados por leyes exponenciales o logarítmicas.

Esta representación puede caracterizar un solo tipo de ensayo. A priori no existe ningún lazo entre una relación especial que caracteriza un ensayo en particular y otra relación válida para otro ensayo.

El modelo de Lemaitre es sencillo en su representación por el número limitado de parámetros, que se ajustan para cada sitio por ensayos de laboratorio.

### 4.3 REOLOGIA DE LA SAL GEMA

La sal es un material muy dúctil capaz de tolerar grandes deformaciones sin romperse. En laboratorio, para medir sus características intrínsecas deben tomarse precauciones, ya que su comportamiento está situado en la frontera entre el sólido y el líquido muy viscoso. Su comportamiento depende también, de las diferencias naturales de las probetas según su origen e inclusive para un mismo pozo exploratorio de detectan divergencias.

#### 4.3.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

El objetivo de los ensayos de laboratorio es determinar experimentalmente el comportamiento mecánico de las rocas. Para ello, se reproducen en probetas con muestras extraídas del sitio (núcleos), diferentes estados de esfuerzos y deformaciones observando el comportamiento instantáneo de la probeta (ensayos de corta duración) y la evolución del comportamiento de la probeta en el tiempo (ensayos de larga duración).

Los diferentes ensayos pueden ser:

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

El número creciente de medidas disponibles después de muchos ensayos condujeron al Centro de Mecánica de Rocas de la Escuela Nacional Superior de Minas de París, a utilizar la formulación de una ley de comportamiento, utilizada en 1970 por Lemaitre para el estudio del comportamiento de los metales.

El trabajo experimental efectuado consistió esencialmente en medir las deformaciones axial y transversal como función del esfuerzo desviador en seis muestras sometidas a un determinado valor de presión de confinamiento y a la temperatura constante de 50 °C. Se ensayaron muestra a la presión confinante de 200, 300 y 400 bar. El esfuerzo desviador compresivo se aplicó en todos los casos hasta el punto de lograr en espécimen una deformación unitaria longitudinal de 7.5 %.

#### 4.3.1.1 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la figura 4.4 se muestra el diagrama simplificado del sistema experimental que se empleó para efectuar los ensayos. Los principales componentes son el vaso de presión o cámara triaxial, la estructura de carga, el actuador hidráulico servocontrolado, el intensificador de la presión de confinamiento y el sistema computalizado de adquisición de datos.

En la cámara triaxial (figura 4.5) se aloja la muestra adecuadamente instrumentada para poder medir las deformaciones axial y transversal que resultan de la aplicación de carga mecánica compresiva en la dirección del eje longitudinal de la muestra.

En la figura 4.6 se muestra el arreglo experimental conforme al cual se instrumentaron los especímenes de la sal gema para los ensayos de compresión triaxial, identificándose sobre esta misma figura los principales componentes del arreglo.

Después de disponer el ensamble de la muestra instrumentada dentro de la cámara triaxial se procedió a llenar la cámara con el fluido de confinamiento. Para este propósito se empleó un aceite mineral que puede soportar temperaturas muy elevadas sin vaporizarse, aún a bajas presiones. La siguiente fase del procedimiento consistió en incrementar la temperatura del espécimen desde su

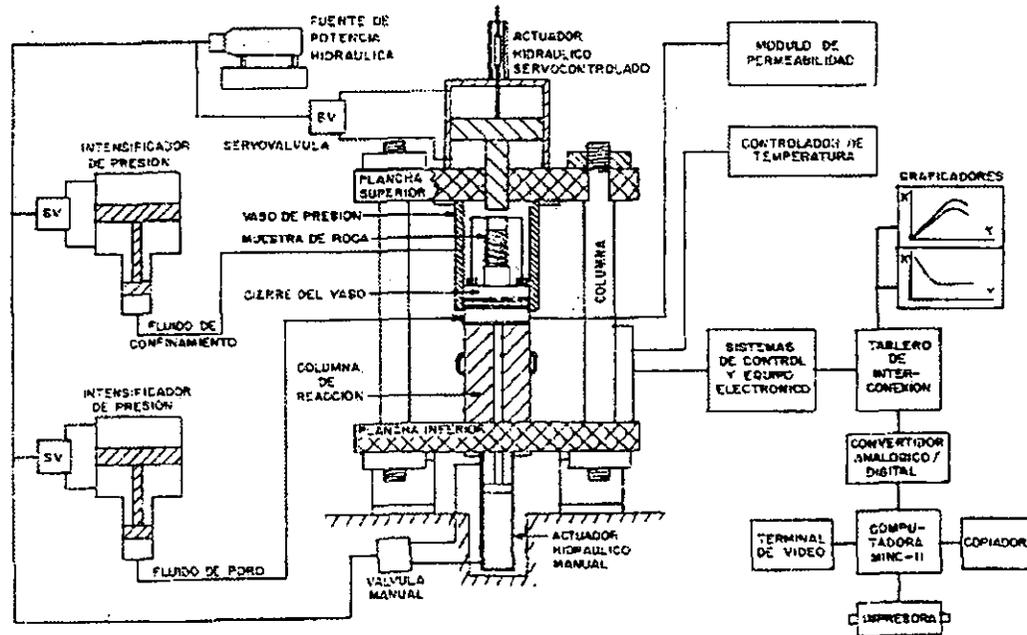


Figura 4.4

DIAGRAMA DEL SISTEMA EXPERIMENTAL QUE SE EMPLEO PARA EFECTUAR LOS ENSAYOS DE COMPRESION TRIAXIAL EN LA SAL GEMA

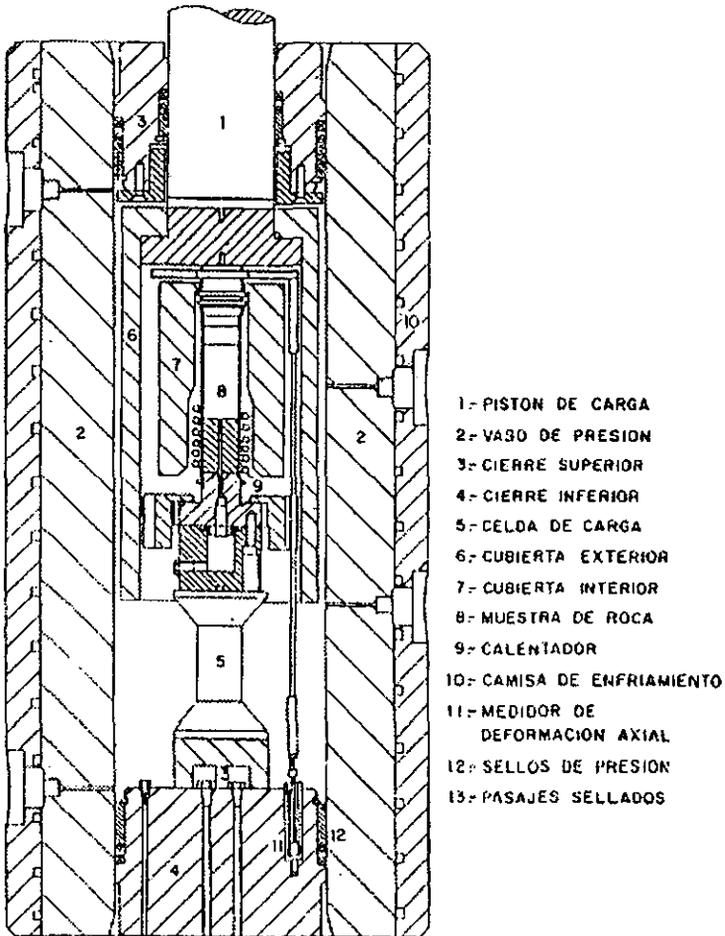


Figura 4.5 ESQUEMA DETALLADO DEL VASO DE PRESION MOSTRANDO LA CONFIGURACION EXPERIMENTAL Y LA INSTRUMENTACION EMPLEADAS EN LAS DETERMINACIONES DE COMPORTAMIENTO MECANICO

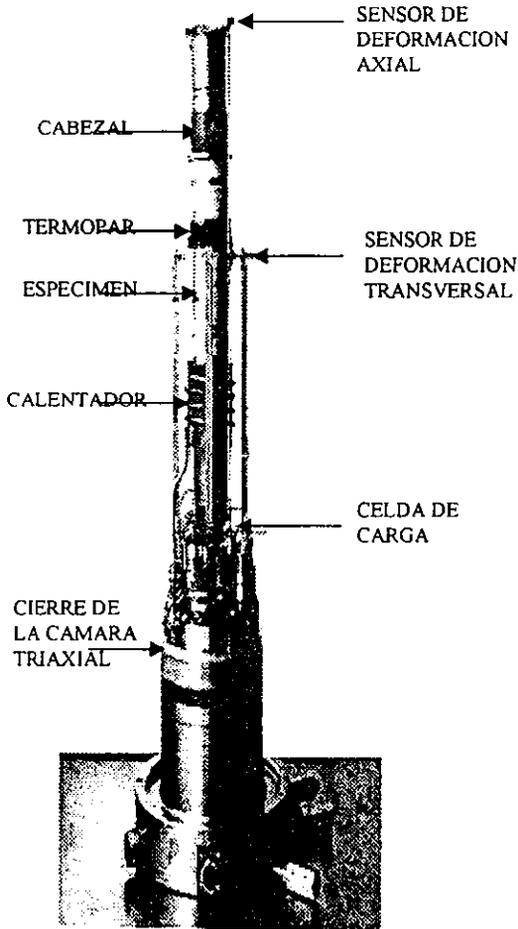


Figura 4.6 DETALLE DE LA INSTRUMENTACION DE LOS ESPECIMENES DE SAL GEMA QUE SE EMPLEO EN LOS ENSAYOS DE COMPRESION TRIAXIAL

valor inicial a condiciones ambiente hasta los 50°C especificados para los ensayos. Manteniendo la presión del fluido de confinamiento a un valor bajo, esencialmente igual a la presión atmosférica local, se procedió a incrementar la temperatura del espécimen con una rapidez uniforme de aproximadamente 1°C por cada cuatro minutos. Una vez que se alcanzó la temperatura de 50°C en el espécimen, ésta se mantuvo constante durante el resto del ensayo dentro de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Al término de la etapa de calentamiento se permitió un período de estabilización de por lo menos 30 minutos para garantizar la uniformidad de la temperatura del espécimen. Posteriormente se procedió a incrementar la presión de confinamiento hasta el valor determinado para el ensayo en cuestión. La aplicación y el control de la presión de confinamiento se llevaron a cabo mediante un intensificador de presión servocontrolado. La aplicación de la presión se efectuó uniformemente con una rapidez de aproximadamente 8 bar/min. Una vez alcanzado el valor de la presión deseado, éste se mantuvo constante dentro de  $\pm 0.1\%$  durante el resto del ensayo. Para evitar la penetración del fluido de confinamiento a los poros y microcavidades posiblemente existentes en el material, las muestras de sal gema se revistieron con un compuesto ahulado a base de silicones y con una cubierta de teflón termo-contraíble.

La siguiente fase en la secuencia del procedimiento consistió en la aplicación del esfuerzo desviador. Con este objeto, se aplicó esfuerzo mecánico en la dirección del eje longitudinal del espécimen, al tiempo que la presión de confinamiento y la temperatura se mantuvieron constantes. El esfuerzo mecánico se aplicó mediante un pistón actuando hidráulicamente y gobernado por medio de un sistema de control automático. El esfuerzo desviador se aplicó en todos los casos con una rapidez uniforme de aproximadamente 10 bar/min, hasta alcanzarse el nivel de esfuerzo que indujo una deformación unitaria axial de 7.5 %. Este valor de deformación se empleó en todos los casos como criterio para dar por concluido el ensayo. La duración típica de la etapa de aplicación del esfuerzo desviador fue de aproximadamente 40 minutos.

Durante la etapa de aplicación del esfuerzo desviador se registraron como datos experimentales primario la deformación axial total y la deformación transversal total del espécimen, así como la magnitud de la carga mecánica aplicada en la dirección del propio espécimen. La carga mecánica se midió con una celda de carga, la deformación axial se midió con un sensor de desplazamiento lineal construido con transformadores diferenciales linealmente variables (LVDT) como elementos transductores, y la deformación transversal se midió con un dispositivo en el que se usan extensómetros eléctricos como elementos sensores. Se capturaron datos durante toda la etapa de aplicación de esfuerzo desviador con frecuencia de cuatro veces por minuto, lo que da un total de aproximadamente 160 puntos-dato para cada uno de los ensayos.

### 4.3.2 RESULTADOS DEL ENSAYO EXPERIMENTAL

Se ensayaron 6 muestras de sal-gema obtenidas a dos diferentes profundidades (promedio) de 535 m y 670 m bajo condiciones de esfuerzo radial constante (presión de confinamiento=constante) y aplicando la sollicitación en esfuerzo controlado monotónica.

La relación de muestras aparece en la tabla 4.1 Cada uno de los dos paquetes de muestras quedó integrado por 3 probetas correspondiendo a núcleos extraídos de una misma profundidad promedio ( $\pm 1$  m) que fueron ensayadas bajo presiones de confinamiento de 20, 30 y 40 MPa (1 MPa=10 bars).

Con los registros obtenidos durante el desarrollo de cada prueba fue posible calcular el esfuerzo, la relación de Poisson, la deformación, el modulo de elasticidad. (Referencia IIE)

Ensayo No.	Pozo	$L_0$ mm	$D_0$ mm	T °C	$P_0$ MPa	Prof. m	Intervalo elástico [bars] del esfuerzo desviador	Relación de Poisson ( $\nu$ )	E MPa	$S_{max}$ MPa	$\epsilon_{max}$ %
1	306	100.7	48.30	50	20	534.1	20-100	>0.5	9000	38.44	7.5
2	306	100.6	48.27	50	30	535.2	80	0.3	5300	44.00	8.0
3	306	100.3	48.28	50	40	535.3	30-70	0.5	2700	40.00	7.5
4	331	100.3	48.23	50	20	670.4	10-40	0.4	7500	42.37	7.5
5	331	100.6	48.36	50	30	670.4	10-50	0.45	5700	41.00	7.6
6	331	100.3	48.20	50	40	670.0	10-80	0.34	5000	42.30	7.5

$1 \times 10^{-4} \mu\text{m/m}$  (micrón metro)  $\Rightarrow \epsilon = 1.0\%$

1MPa=1000kPa=1E+06 N/m<sup>2</sup>=10 bars

Tabla 4.1 RESUMEN DE DATOS INICIALES Y RESULTADOS EN ENSAYOS

Donde:

- $L_0$  Longitud de la probeta
- $D_0$  Diámetro original de la probeta
- T Temperatura del ensayo
- $P_0$  Presión a la que se realizó el ensayo
- Prof. Profundidad de la muestra
- E Modulo de elasticidad
- $S_{max}$  Esfuerzo desviador máximo
- $\epsilon_{max}$  Deformación máxima

Los resultados experimentales se obtuvieron de las curvas de Esfuerzo-Deformación (Apéndice A, figuras 1 a 12), en la tabla se presentan los resultados obtenidos de las gráficas.

En cuanto a la relación de Poisson a emplear dentro del dominio elástico del material, su valor podría variar entre 0.10 y 0.40. Un valor promedio de  $\nu=0.25$  puede satisfacer las necesidades dentro del dominio elástico del material, en tanto no se tengan mediciones precisas dentro de los niveles de deformación que corresponden.

En este estudio se obtuvieron como valores de algunas propiedades mecánicas del material los siguientes: desviador máximo  $S=41.5$  MPa; el módulo tangente inicial de la curva  $(\varepsilon_r, S)$  resultó:  $2700 \leq E \leq 9000$  MPa; la relación de Poisson que puede tomarse para este rango de valores de E es de  $\nu=0.25$ .

### 4.3.3 PARAMETROS DE LEMAITRE

Los investigadores G. Vouille S. M. Tijani y B. Hugout han mostrado que la sal se comporta como un líquido de alta viscosidad. Esta alta viscosidad explica que el análisis de resultados de corta duración haya conducido a atribuir a la sal una viscosidad que no es más que aparente. Además, varios ensayos de relajación muestran una cohesión más débil cuando la velocidad es más lenta, lo cual es un indicador de un material viscoso.

En consecuencia, el límite de plasticidad de la sal gema es muy débil y puede considerársele nulo. En efecto, ese límite es igual a dos veces la cohesión, por lo que podemos considerar la cohesión de la sal nula ( $C=0$ ).

La sal es un material que nunca está en equilibrio bajo un desviador no nulo de esfuerzos.

La ley de Lemaitre se simplifica en la ecuación (4-13)

$$\varepsilon_{vp}(t) = \left[ \frac{\sigma - 2c}{K} \right]^n t^n$$

Acabamos de ver que la sal es un líquido viscoso regido por la ley de Lemaitre y que el ajuste de esta ley se hace por medio de ensayos de laboratorio. La ley de Lemaitre implica conocer historia del material para deducir su comportamiento futuro.

El primer valor de los parámetros considerados en los primeros cálculos fueron los obtenidos en laboratorio a partir de los ensayos de fluencia de la sal de Tuzandépetl.

$E = 50,000 \text{ bar (5,000 Mpa)}$   
 $\nu = 0.25 \text{ (valor promedio admitido)}$   
 $C = 0 \text{ bar}$   
 $\alpha = 0.227 \text{ (coeficiente de Lemaitre)}$   
 $\beta = 3.033 \text{ (coeficiente de Lemaitre)}$   
 $K = 8.27 \text{ bar (coeficiente de Lemaitre)}$

Los valores de los coeficientes de Lemaitre se dan a título indicativo; puesto que evidentemente evolucionaron durante el ajuste.

$\alpha$  es un parámetro que depende nada más del origen de la sal (edad, origen, cristalización).

El modelo propuesto por el Centro de Mecánica de Rocas de la Escuela Nacional de Minas de París en Fontainebleau, da entonces una fluencia como ley exponencial del tiempo exponente  $\alpha$  variando de 1 a 0 y una ley exponencial del desviador de esfuerzos, exponente  $\beta$  mayor que 2.

El coeficiente  $K$  se expresa en bares y se calcula en función de la unidad de tiempo o sea el día. En efecto su cálculo se efectúa a partir de los ensayos de fluencia que tienen por unidad de tiempo el día. Esta aclaración es importante y permite contar con unidades homogéneas, en particular con los parámetros térmicos. La cohesión  $C$ , se tomó como nula apoyándose en la hipótesis del profesor Vouille de que la sal se comporta con un líquido muy viscoso. Si se sujeta a la sal a una sollicitación, su respuesta será la "suma" de una respuesta elástica,  $\epsilon_e$  y de una respuesta diferida (fluencia de desplazamientos y relajación de esfuerzos  $\epsilon_{vp}$ ).

#### 4.4 RESULTADOS

La composición del gas natural se muestra en la tabla 4.2 (Pemex Gas)

	Mmolar	w	Tc/k	Pc /bars	Zc	Vc/ cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup>	y/%
Metano	16.043	0.012	190.6	45.99	0.286	98.6	0.84005
Etano	30.07	0.1	305.3	48.72	0.279	145.5	0.1093
Propano	44.097	0.152	369.8	42.48	0.276	200	0.03514
Nitrogeno	28.014	0.038	126.2	34	0.289	89.2	0.01514
CO2	44.01	0.0224	304.2	73.83	0.274	94	0.00037

Tabla 4.2 COMPOSICION DEL GAS NATURAL

En la tabla 4.3 de resultados de la cantidad de masa para una caverna de  $3.21 \cdot 10^{13} \text{ cm}^3$ .

Z <sub>m</sub>	n <sub>m</sub> [gramos/mol]	Masa [Ton]
0.901589	795490753.5	1491.83

Tabla 4.3 CANTIDAD DE MASA

En la tabla 4.4 se presentan los resultados de la presión mínima calculada con la ecuación (Apendice B ecuación (B- 4), (B-5)) cúbica de estado.

a [cm <sup>6</sup> mol <sup>-2</sup> k <sup>5</sup> ]	b [cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ]	V <sub>m</sub> [cm <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> ]	R [cm <sup>3</sup> bar <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup> ]	T [°k]	P [bars]
41061937.14	32.6309	403.5244	83.14	323	59.4228

Tabla 4.4 RESULTADOS DE LA PRESION MINIMA

De donde  $V_m$ ,  $n_m$  y  $P_m$  se calcularon con las siguientes fórmulas:

$$V_m = V_{\text{físico}} / n_m \quad (4-1)$$

$$n_m = m / P_m \quad (4-2)$$

$$P_m = N_{\text{moles}} \times Y\% \quad (4-3)$$

A continuación (tabla 4.5) se muestran los resultados obtenidos en el estudio de factibilidad para el almacenamiento de gas natural IMP/Geostock

Profundidad de la zapata de la tubería de revestimiento	1000 m
Presión operacional máxima	180 bares
Presión operacional mínima	60 bares
Volumen libre por cavidad para el almacenamiento de gas	321000 m <sup>3</sup>
Propiedades del gas a 180 bares	
- Gravedad	0.65 (aire=1)
- Z	0.828
- T	333°K
Volumen de gas estándar por cavidad llenada	58 Nm <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup>
Propiedades del gas a 60 bares	
- Gravedad	0.65 (aire=1)
- Z	0.841
- T	303°K
Volumen de gas estándar por cavidad vacía	20.5 Nm <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup>
Volumen de gas útil por cavidad	37.5 Nm <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup>
Número de cavidades necesarias	8 para 300 Nm <sup>3</sup> *10 <sup>6</sup>

Tabla 4.5 RESULTADOS DEL ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

#### 4.5 GRAFICAS DE ESFUERZO- DEFORMACION

Para este cálculo se utilizaron las ecuaciones cúbica de estado para determinar la presión y posteriormente se sustituye en la ecuación de Lemaitre, obteniendo los resultados en las tablas 4.6 , 4.7 , y 4.8 junto con las respectivas gráficas en donde se calcularon para las temperaturas de 323°K, 333°k y 343°K

Masa molecular mol	Temperatura °K	Presión bars	Deformación micro m/m
14918281500	323	59.423	0.057
15718281500	323	62.295	0.066
16518281500	323	65.144	0.075
16526281500	323	65.173	0.075
17326281500	323	68.001	0.086
18126281500	323	70.809	0.097
18926281500	323	73.598	0.109
19726281500	323	76.370	0.122
20526281500	323	79.126	0.136
21326281500	323	81.867	0.151
22126281500	323	84.594	0.167
22926281500	323	87.310	0.183
23726281500	323	90.015	0.201
24526281500	323	92.711	0.220
25326281500	323	95.398	0.240
26126281500	323	98.079	0.261
26926281500	323	100.755	0.283
27726281500	323	103.427	0.306
28526281500	323	106.096	0.331
29326281500	323	108.764	0.357
30126281500	323	111.432	0.384
30926281500	323	114.102	0.413
31726281500	323	116.774	0.443
32526281500	323	119.451	0.474
33326281500	323	122.134	0.507
34126281500	323	124.824	0.542
34926281500	323	127.523	0.578
35726281500	323	130.232	0.616
36526281500	323	132.952	0.656
37326281500	323	135.686	0.698
38126281500	323	138.434	0.742
38926281500	323	141.198	0.788
39726281500	323	143.980	0.836
40526281500	323	146.781	0.886
41326281500	323	149.602	0.939
42126281500	323	152.446	0.994
42926281500	323	155.314	1.052
43726281500	323	158.207	1.112
44526281500	323	161.127	1.175
45326281500	323	164.076	1.242
46126281500	323	167.055	1.312
46926281500	323	170.066	1.385
47726281500	323	173.111	1.461
48526281500	323	176.191	1.541
49326281500	323	179.309	1.626
50126281500	323	182.466	1.714
50926281500	323	185.664	1.807
51726281500	323	188.904	1.904
52526281500	323	192.189	2.006
53326281500	323	195.521	2.114
54126281500	323	198.901	2.227
54926281500	323	202.331	2.345
55726281500	323	205.814	2.470
56526281500	323	209.351	2.601
57326281500	323	212.945	2.738
58126281500	323	216.598	2.883
58926281500	323	220.311	3.036

Tabla 4.6 ESFUERZO-DEFORMACION (LEMAITRE) A TEMPERATURA 323°K

Masa molecular mol	Temperatura °K	Presión bars	Deformación micro m/m
14918281500	333	61.861	0.064
15718281500	333	64.885	0.074
16518281500	333	67.889	0.085
16526281500	333	67.919	0.086
17326281500	333	70.903	0.097
18126281500	333	73.870	0.110
18926281500	333	76.821	0.124
19726281500	333	79.756	0.139
20526281500	333	82.677	0.155
21326281500	333	85.586	0.173
22126281500	333	88.484	0.191
22926281500	333	91.372	0.210
23726281500	333	94.251	0.231
24526281500	333	97.124	0.253
25326281500	333	99.991	0.277
26126281500	333	102.853	0.301
26926281500	333	105.713	0.327
27726281500	333	108.571	0.355
28526281500	333	111.428	0.384
29326281500	333	114.287	0.415
30126281500	333	117.149	0.447
30926281500	333	120.014	0.481
31726281500	333	122.885	0.517
32526281500	333	125.763	0.554
33326281500	333	128.649	0.594
34126281500	333	131.545	0.635
34926281500	333	134.452	0.679
35726281500	333	137.371	0.725
36526281500	333	140.305	0.773
37326281500	333	143.254	0.823
38126281500	333	146.220	0.876
38926281500	333	149.206	0.931
39726281500	333	152.211	0.989
40526281500	333	155.238	1.050
41326281500	333	158.288	1.114
42126281500	333	161.364	1.181
42926281500	333	164.466	1.251
43726281500	333	167.596	1.325
44526281500	333	170.756	1.402
45326281500	333	173.948	1.483
46126281500	333	177.172	1.568
46926281500	333	180.432	1.657
47726281500	333	183.729	1.750
48526281500	333	187.064	1.848
49326281500	333	190.439	1.952
50126281500	333	193.856	2.060
50926281500	333	197.317	2.173
51726281500	333	200.825	2.293
52526281500	333	204.379	2.418
53326281500	333	207.984	2.550
54126281500	333	211.640	2.688
54926281500	333	215.350	2.833
55726281500	333	219.116	2.986
56526281500	333	222.940	3.147
57326281500	333	226.823	3.316
58126281500	333	230.769	3.495
58926281500	333	234.779	3.682

Tabla 4.7 ESFUERZO-DEFORMACION (LEMAITRE) A TEMPERATURA 333°K

Masa molecular mol	Temperatura °K	Presión bars	Deformación micro m/m
14918281500	343	64.290	0.072
15718281500	343	67.466	0.084
16518281500	343	70.623	0.096
16526281500	343	70.654	0.096
17326281500	343	73.795	0.110
18126281500	343	76.919	0.125
18926281500	343	80.029	0.141
19726281500	343	83.127	0.158
20526281500	343	86.213	0.176
21326281500	343	89.288	0.196
22126281500	343	92.355	0.217
22926281500	343	95.414	0.240
23726281500	343	98.467	0.264
24526281500	343	101.515	0.290
25326281500	343	104.559	0.317
26126281500	343	107.602	0.345
26926281500	343	110.644	0.376
27726281500	343	113.687	0.408
28526281500	343	116.731	0.442
29326281500	343	119.780	0.478
30126281500	343	122.833	0.516
30926281500	343	125.893	0.556
31726281500	343	128.960	0.598
32526281500	343	132.037	0.643
33326281500	343	135.124	0.689
34126281500	343	138.224	0.738
34926281500	343	141.337	0.790
35726281500	343	144.465	0.844
36526281500	343	147.610	0.901
37326281500	343	150.773	0.961
38126281500	343	153.956	1.024
38926281500	343	157.160	1.090
39726281500	343	160.387	1.159
40526281500	343	163.639	1.232
41326281500	343	166.916	1.308
42126281500	343	170.221	1.388
42926281500	343	173.555	1.473
43726281500	343	176.920	1.561
44526281500	343	180.318	1.654
45326281500	343	183.750	1.751
46126281500	343	187.219	1.853
46926281500	343	190.725	1.960
47726281500	343	194.270	2.073
48526281500	343	197.858	2.191
49326281500	343	201.488	2.316
50126281500	343	205.163	2.446
50926281500	343	208.886	2.583
51726281500	343	212.657	2.727
52526281500	343	216.480	2.879
53326281500	343	220.355	3.038
54126281500	343	224.285	3.205
54926281500	343	228.272	3.381
55726281500	343	232.318	3.566
56526281500	343	236.425	3.761
57326281500	343	240.596	3.966
58126281500	343	244.832	4.181
58926281500	343	249.137	4.408

Tabla 4.8 ESFUERZO-DEFORMACION (LEMAITRE) A TEMPERATURA 343°K

ESFUERZO-DEFORMACION A 323°K

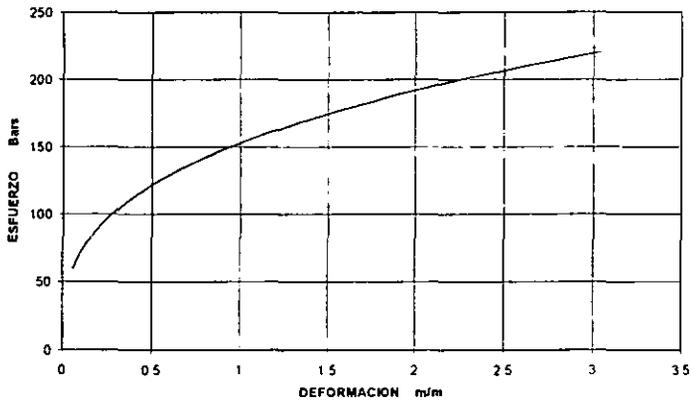


Figura 4.7 ESFUERZO-DEFORMACION (LEMAITRE) A TEMPERATURA 323°K

ESFUERZO-DEFORMACION A 333°K

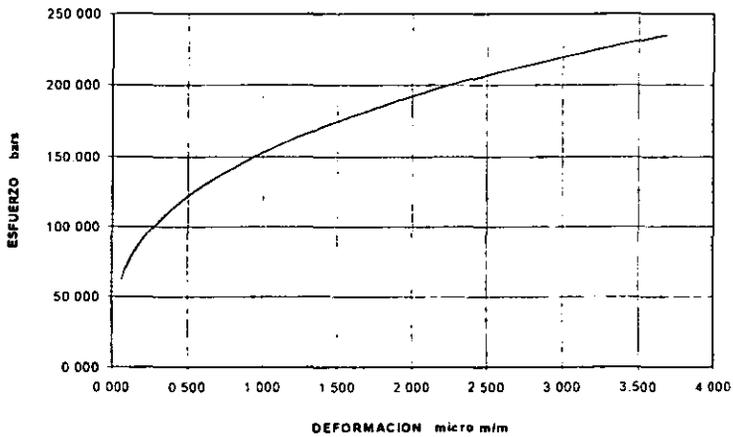


Figura 4.8 ESFUERZO-DEFORMACION (LEMAITRE) A TEMPERATURA 333°K

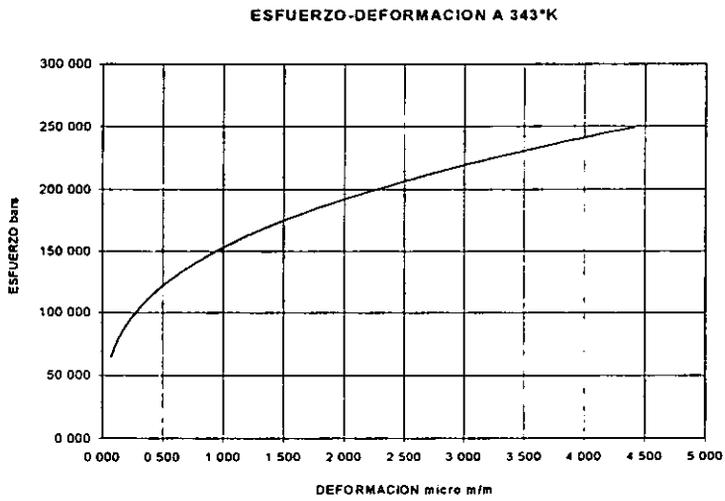


Figura 4.9 ESFUERZO-DEFORMACION (LEMAITRE) A TEMPERATURA 343°K

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos empleando la ley de Lemaitre que define el comportamiento de la sal gema, se determinaron las deformaciones unidimensionalmente de la sal misma (los cuales se pueden ver en las tablas 4.6, 4.7 y 4.8 y las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 ). Se puede apreciar que la temperatura es un factor importante, ya que a mayor temperatura existe un incremento en la deformabilidad de la sal, lo cual es positivo ya que nos indica que este material puede absorber las deformaciones y así disminuir la posibilidad de fracturamiento evitando así la pérdida del producto a almacenar lo que hace de ella una excelente material para la construcción de la caverna de almacenamiento. Además de confinar de manera segura el producto sin riesgo de explosión y protegiendo el medio ambiente.

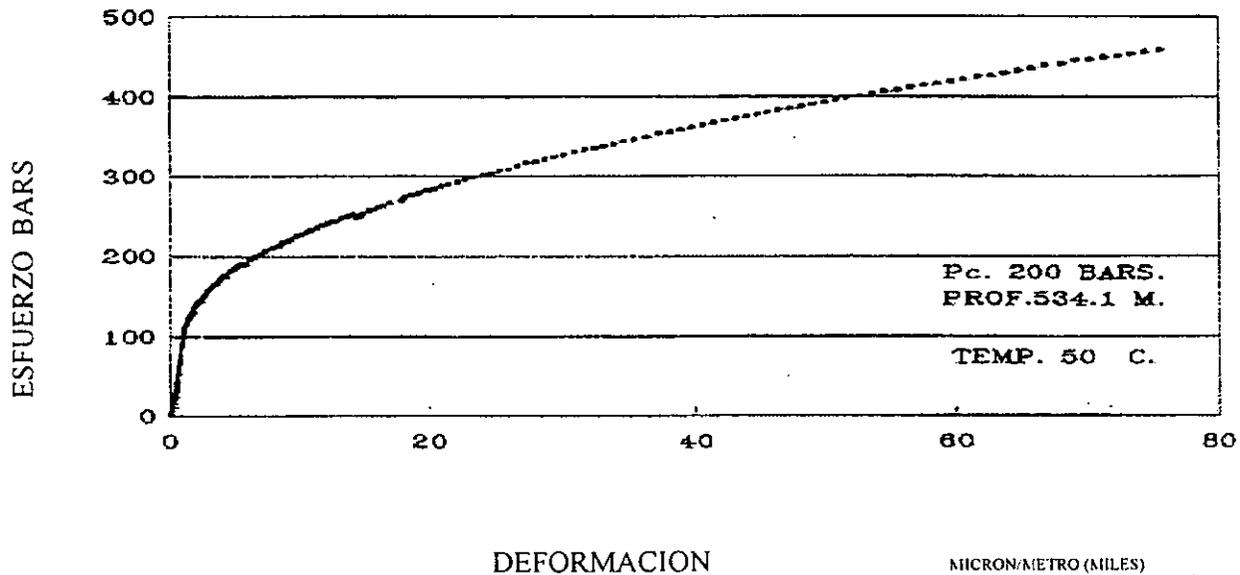
---

## APENDICE A

Gráficas experimentales obtenidas  
durante las pruebas de laboratorio.

ESFUERZO-DEFORMACION

---

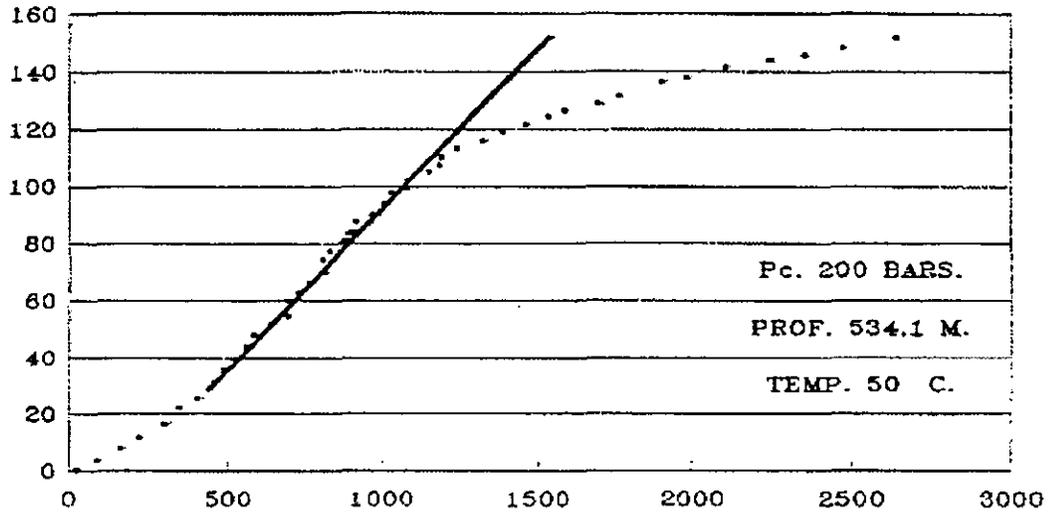


ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 306 NUCLEO 1 PARTE 26

FIGURA 1

ESFUERZO BARS



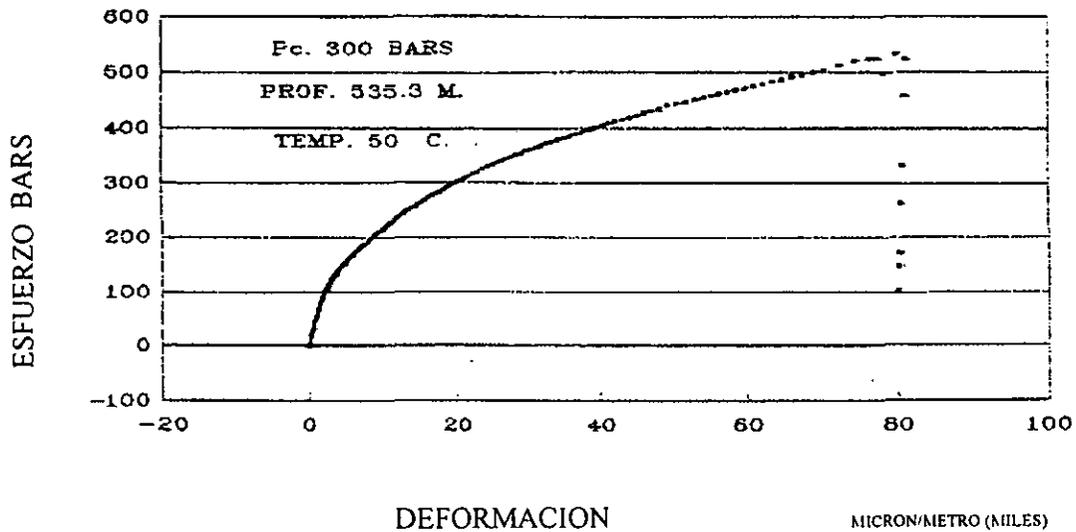
DEFORMACION  
ESFUERZO - DEFORMACION

MICRON/METRO (MILES)

POZO 306 NUCLEO 1 PARTE 26

FIGURA 2

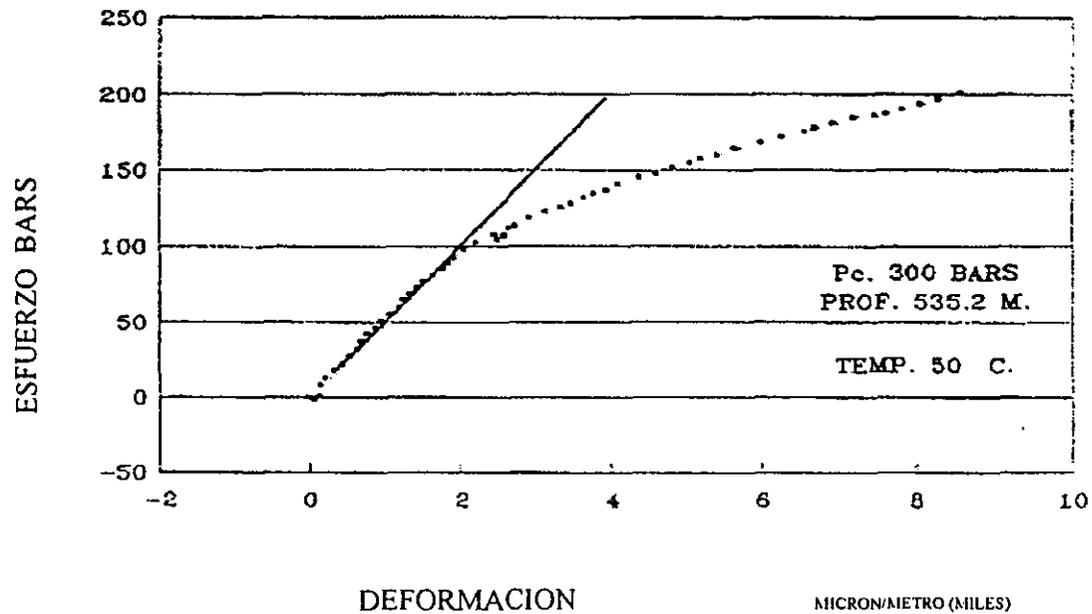
APENDICE



ESFUERZO - DEFORMACION

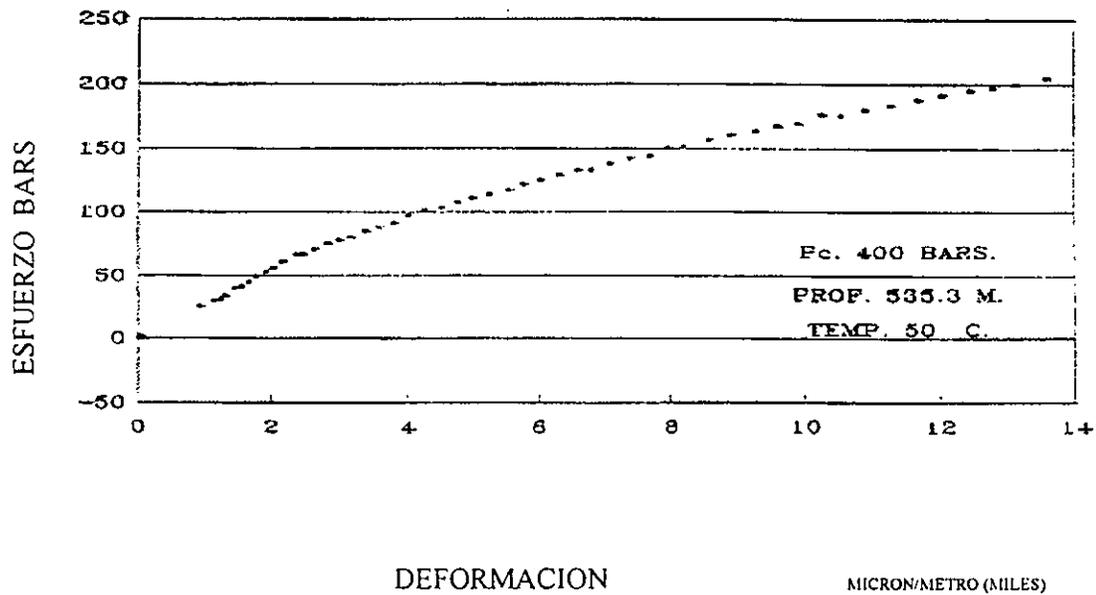
POZO 306 NUCLEO 1 PARTE 30, 1/2

FIGURA 3



ESFUERZO - DEFORMACION  
POZO 306 NUCLEO 1 PARTE 30, 1/2

FIGURA 4

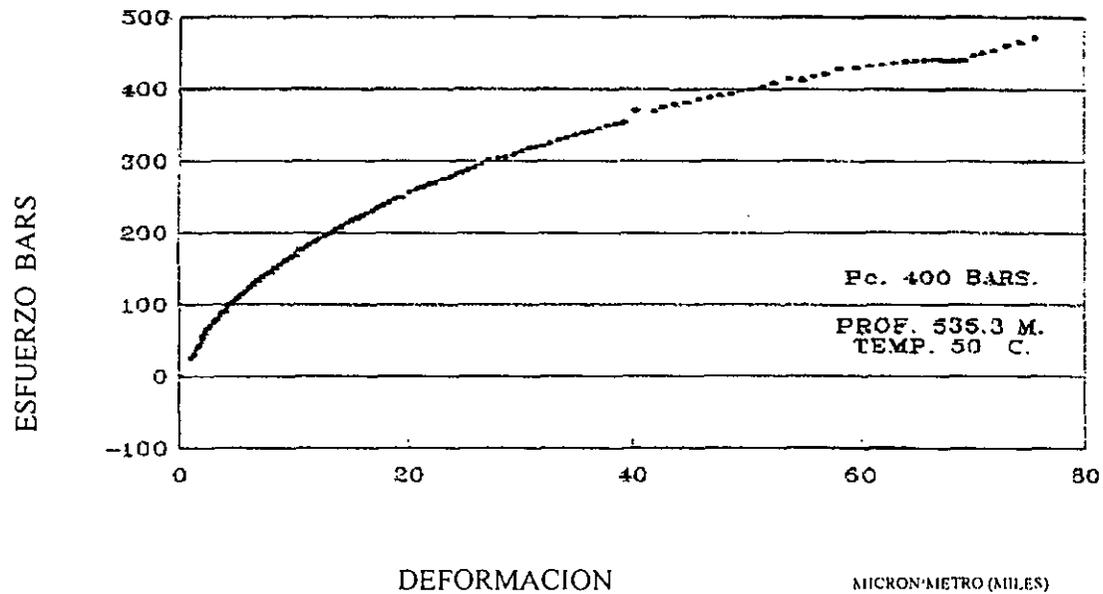


ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 306 NUCLEO 1 PARTE 30, 2/2

FIGURA 5

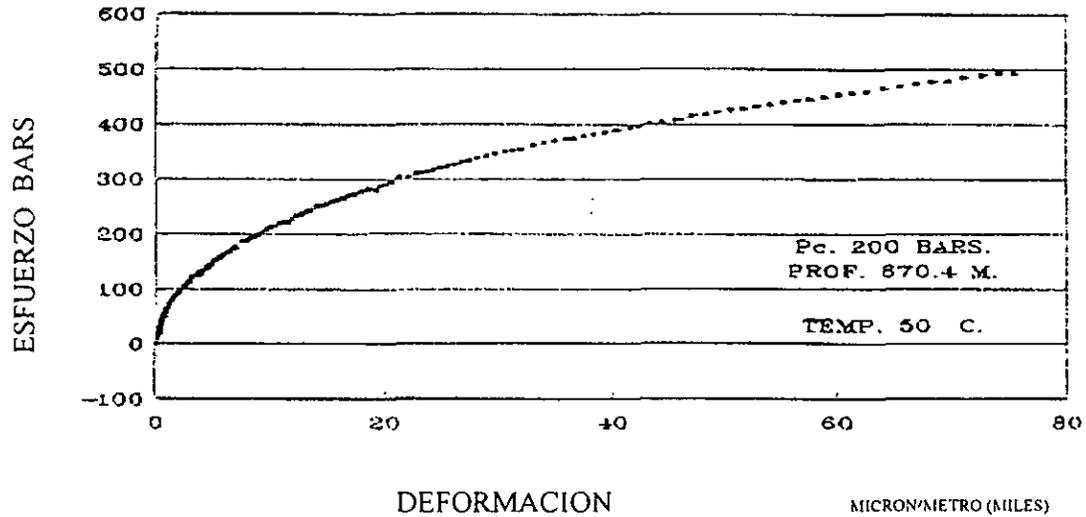
APENDICE



ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 306 NUCLEO 1 PARTE 30, 2/2

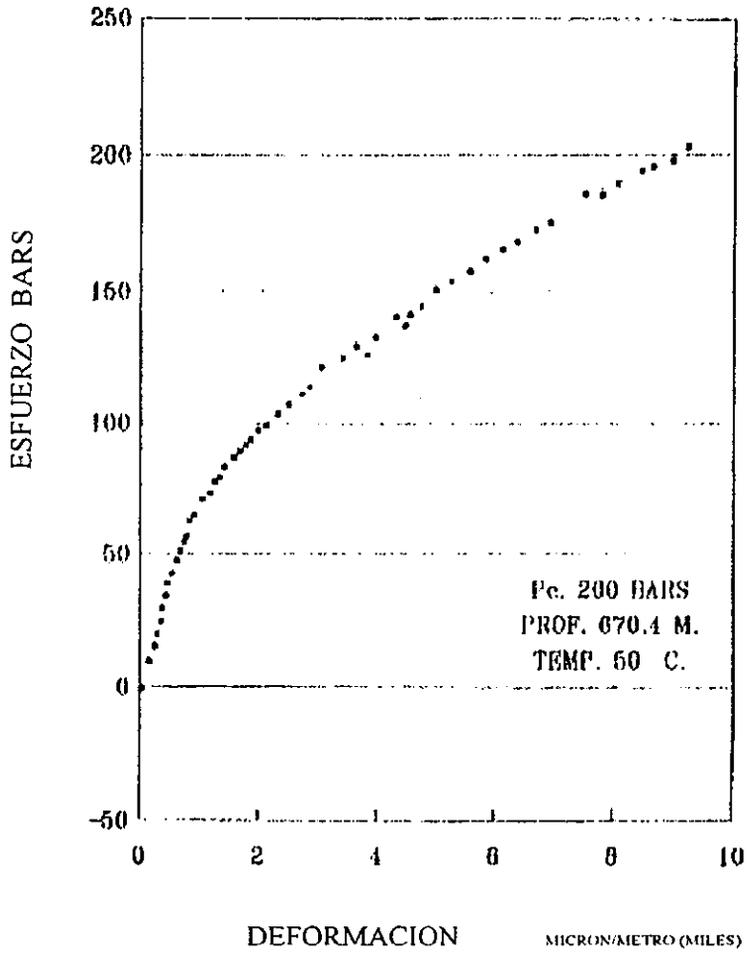
FIGURA 6



ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 331 NUCLEO 3 PARTE 2, 1/2

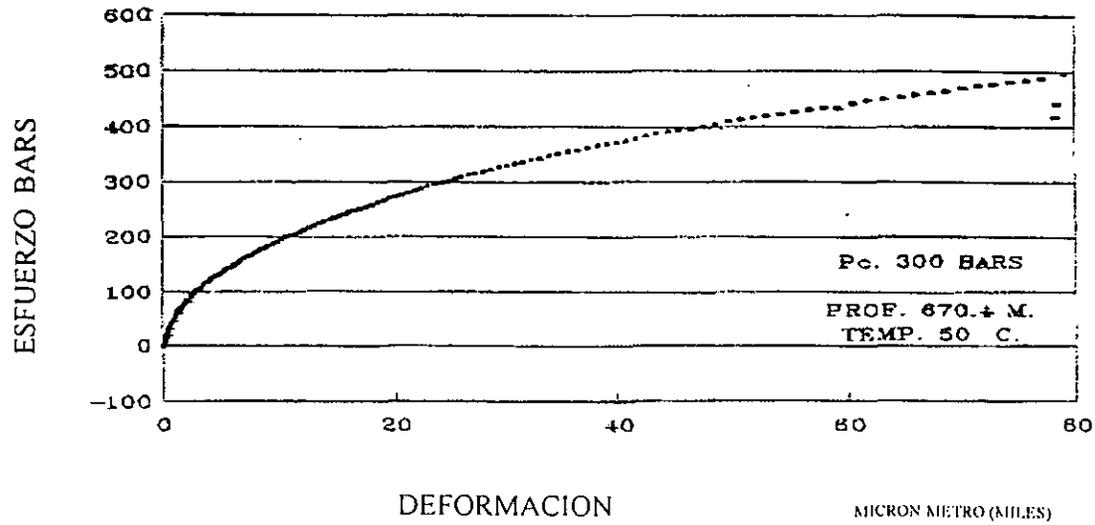
FIGURA 7



ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 331 NUCLEO 3 PARTE 2, 1/2

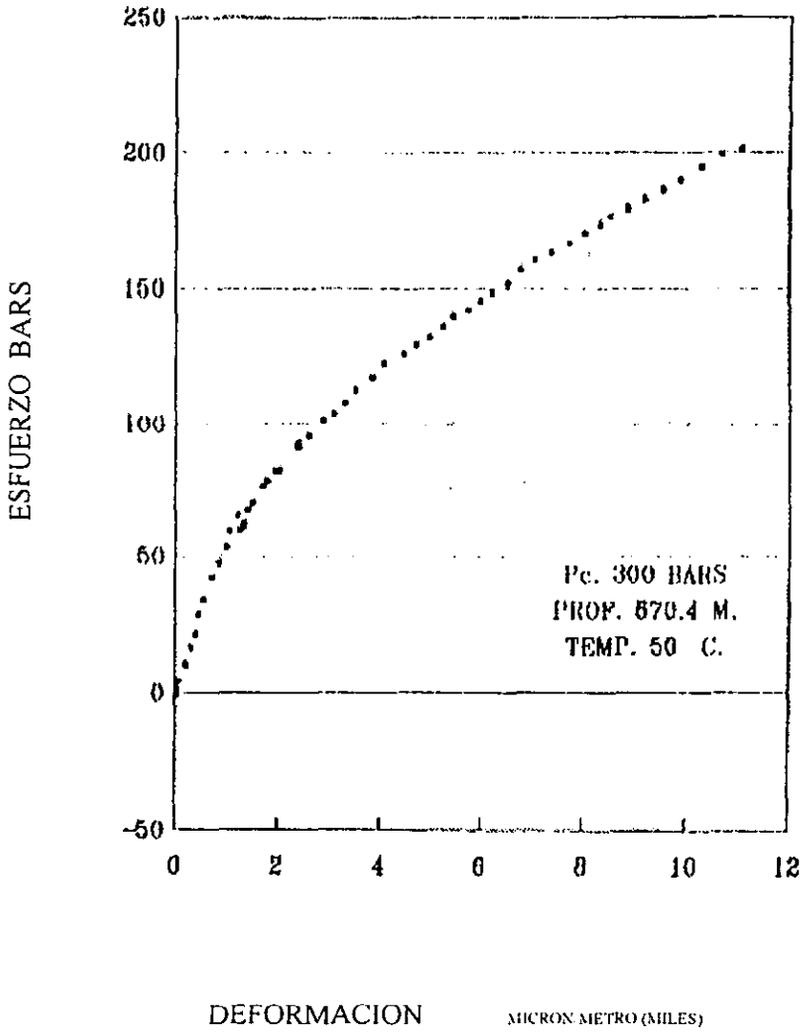
FIGURA 8



ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 331 NUCLEO 3 PARTE 2, 2/2

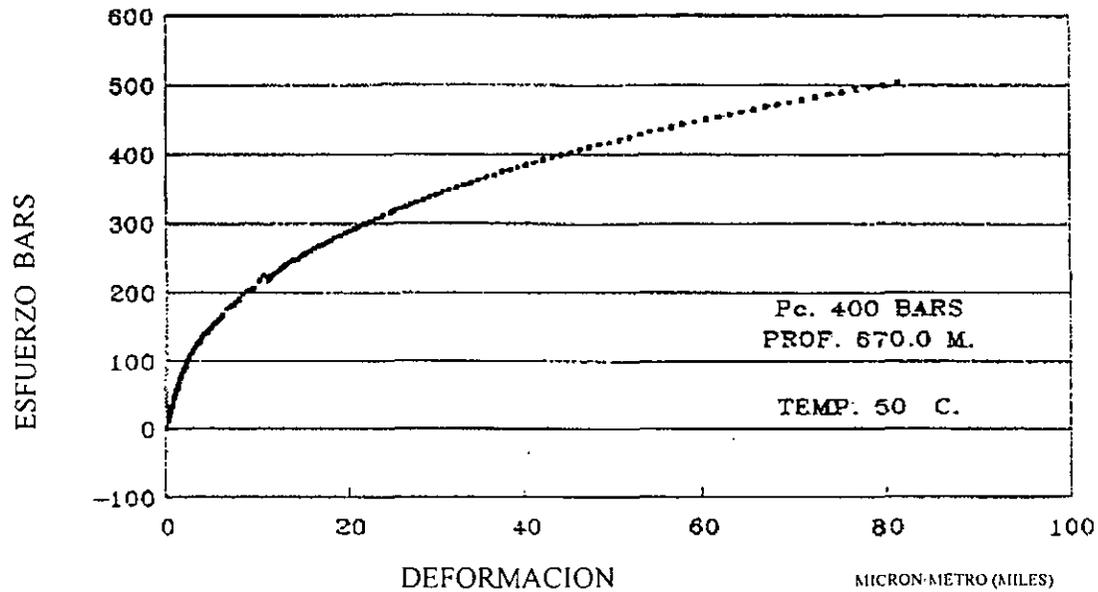
FIGURA 9



ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 331 NUCLEO 3 PARTE 2, 2/2

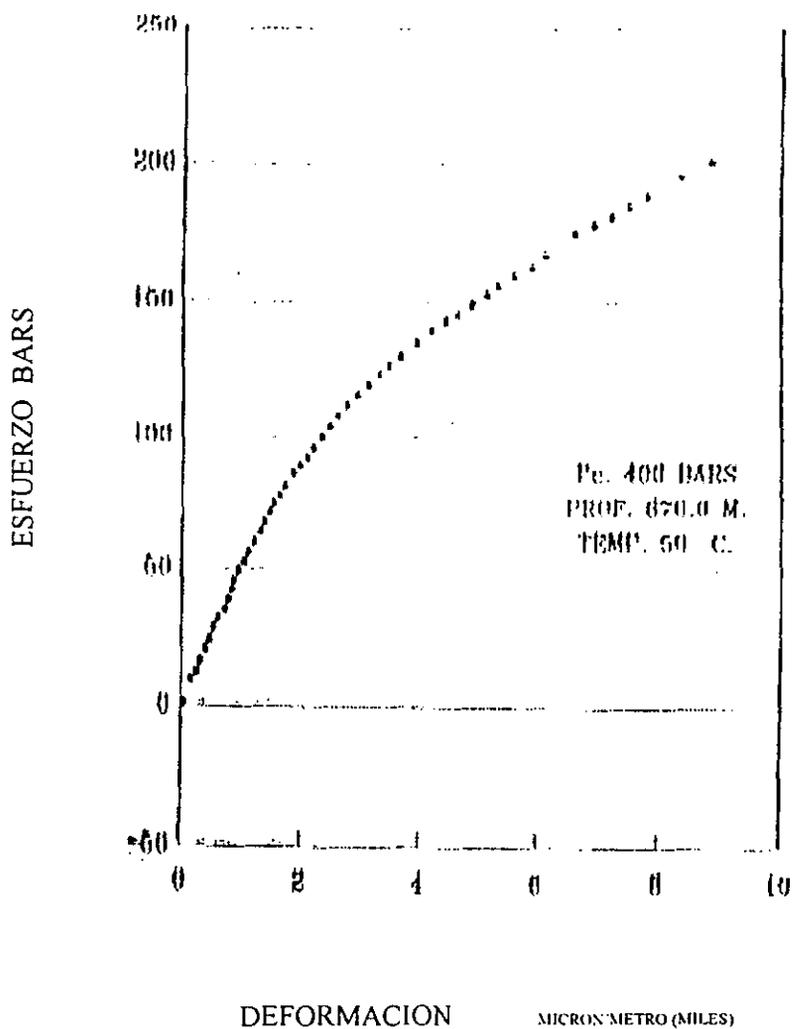
FIGURA 10



ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 331 NUCLEO 3 PARTE 1, 2/2

FIGURA 11



ESFUERZO - DEFORMACION

POZO 331 NUCLEO 3 PARTE 1, 2/2

FIGURA 12

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

## APENDICE B

Ecuaciones cúbicas  
de estado.

---

Estas ecuaciones se ocuparon para representar el comportamiento de la mezcla del gas natural, en los intervalos de temperatura y volumen para determinar la presión ,ya que su manejo no presenta dificultades analíticas en su aplicación.

La aplicación de estas ecuaciones a las mezclas requieren que los parámetros de la ecuación de estado se expresen como funciones de la composición. No hay ninguna teoría exacta semejante a la de las ecuaciones viriales que prescriba esta dependencia de la composición, la cual de preferencia se impone por reglas de mezclado empíricas. Para la ecuación de Redlich/Kwong.

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{T^{1/2} V_m (V_m - b)} \quad (B-1)$$

Las reglas de mezclado que se han encontrado con uso frecuente son:

$$a = \sum_i \sum_j y_i y_j a_{ij} \quad (B-2)$$

$$b = \sum_i y_i b_i \quad (B-3)$$

Las  $a_{ij}$  son de dos tipos: los parámetros para especies puras (subíndices iguales) y los parámetros de interacción (subíndices diferentes). Las  $b_i$  son parámetros para las especies puras.

Un procedimiento para la evaluación de los parámetros es una generalización de las ecuaciones de Redlich/Kwong:

$$a_{ij} = \frac{0.42748 R^2 T_{ci}^{2.5}}{P_{cij}} \quad (B-4)$$

Y

$$b_i = \frac{0.08664 R T_{ci}}{P_{ci}} \quad (B-5)$$

Los parámetros generales para la ecuación de Redlich/Kwong:

$$T_{ri} = T/T_{ci} \quad (B-6)$$

$$P_{ri} = P/P_{ci} \quad (B-7)$$

$$m_i = 0.48 + 1.574w_i + 0.176w_i^2 \quad (B-8)$$

$$A_i = 0.42747 a_i P_{ri} / T_{ri}^2 \quad (B-9)$$

$$B_i = 0.08664 P_{ri} / T_{ri} \quad (B-10)$$

Constantes de la mezcla gaseosa/líquida

Para vapor  $Y_i = Y_i$

Para líquido  $Y_i = X_i$

Las reglas de mezclado se obtienen de la siguiente forma:

$$A_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_i Y_j A_{z1ij} \quad (B-11)$$

$$B_1 = \sum_{i=1}^n Y_i B_i$$

De donde  $A_{z1ij} = (A_i \cdot A_j)^{1/2}$  (B-12)

Para la expansión polinomial del factor acéntrico:

$$Z^3 - Z^2 + Z (A_1 - B_1 - B_1^2) - A_1 B_1 = 0 \quad (B-13)$$

De la ecuación anterior obtenemos tres raíces, de las cuales la mayor corresponde a la fase gaseosa, la menor a la fase líquida y la intermedia no tiene interpretación física.

Para el cálculo de  $T_{cij}$ ,  $P_{cij}$ ,  $Z_{cij}$ ,  $V_{cij}$  se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$T_{cij} = (T_{ci} T_{cj})^{1/2} (1 - K_{ij}) \quad (B-14)$$

De donde  $K_{ij} = 0$  para los gases

$$P_{cij} = \frac{Z_{cij} R T_{cij}}{V_{cij}} \quad (B-15)$$

En donde:

$$Z_{cj} = \frac{Z_{ci} + Z_{cj}}{2} \quad (B-16)$$

Y

$$V_{cj} = \left( \frac{V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3}}{2} \right)^3 \quad (B-17)$$

Los resultados se muestran en la tabla B-1

	Vc(i,j)	Zc(i,j)	Tc(i,j)	Pc(i,j)	a(i,j)	b(i)
<b>1.1</b>	98.6	0.286	190.6	45.9645	32241931.22	29.853
<b>1.2</b>	120.5335	0.2825	241.2264	47.0052	56813611.98	
<b>1.3</b>	143.3785	0.281	265.488	43.2591	78445998.08	
<b>1.4</b>	93.8215	0.2875	155.0926	39.5127	22401504.23	
<b>1.5</b>	96.2817	0.28	240.7914	58.2191	45663906.03	
<b>2.2</b>	145.5	0.279	305.3	48.6719	98872341.07	45.1383
<b>2.3</b>	171.3078	0.2775	336.0059	45.2525	135132645.7	
<b>2.4</b>	115.06451	0.284	196.2877	40.2791	39599389.7	
<b>2.5</b>	117.8816	0.2765	304.7495	59.4295	80610456.97	
<b>3.3</b>	200	0.276	369.8	42.4283	183145855.3	62.7063
<b>3.4</b>	137.2333	0.2825	216.0295	36.9728	54819685.95	
<b>3.5</b>	140.4001	0.275	335.4	54.6183	11456420.8	
<b>4.4</b>	89.2	0.289	126.2	33.994	15551843.06	26.7368
<b>4.5</b>	91.579	0.2815	195.9338	50.0728	31710815.5	
<b>5.5</b>	94	0.274	304.2	73.7211	64690711.27	29.6794

Tabla B-1 RESULTADOS DE LAS ECUACIONES

## **BIBLIOGRAFIA**

- 1) **ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO DE GAS NATURAL**  
Instituto Mexicano del Petróleo
- 2) **DETERMINACION DE PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS DE LA ROCA SAL GEMA PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE CAVIDADES EN DOMOS SALINOS, TUZANDEPETL, VERACRUZ**  
Instituto de Investigaciones Eléctricas, Informe IIE/42/2715, Cuemavaca Morelos, Mayo 1990
- 3) **EXCAVACIONES SUBTERRANEAS EN ROCA**  
E. Hoek, E. T. Brown, Mc Graw Hill, 1985
- 4) **FORMACION DE DOMOS SALINOS EN MEXICO**  
Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros
- 5) **INTRODUCCION A LA TERMODINAMICA EN INGENIERIA QUIMICA**  
J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott, 5ª Edición, Mc Graw Hill, 1997
- 6) **MODELIZACION DE LOS POZOS DE TUZANDEPETL MEDIANTE LOS PROGRAMAS ACOPLADOS CHEF Y VIPLEF, Primer análisis cualitativo GKPMX/89/053, Marzo 1989**
- 7) **NEW CONCEPTS IN UNDERGROUND STORAGE OF NATURAL GAS**  
Tek Wilkes, Katz, Bavage, The American Gas Association, 1966
- 8) **ORGANIZACION DEL GAS NATURAL EN MEXICO**  
[www.naturalgas.org](http://www.naturalgas.org)
- 9) **PERSPECTIVAS DEL MERCADO DE GAS NATURAL EN MEXICO**  
Secretaría de Energía en México

- 10) REPORTE DEL ANALISIS DE ESTABILIDAD DE LA CAVIDAD TUZ-334  
PARA SU PRIMER AÑO DE EXPLOTACION, Noviembre 1990
  
- 11) SALT DOMES GULF REGION, UNITED STATES AND MEXICO  
Michel T. Halbouty, 2° edition, 1967
  
- 11) THE IDENTIFICATION OF POTENCIAL UNDERGROUND NATURAL GAS  
STORAGE SITES IN MEXICO  
Draxco International
  
- 12) TUZANDEPETL-MEXICO ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LAS  
CAVIDADES 306-334-338-340  
GK/GPL/TUZ-91/076, Octubre 1991
  
- 13) UNDERGROUND STORAGE OF NATURAL GAS  
M. R. Tek, Gulf Publishing Company, Houston, Vol. 3