

22
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
"ARAGON"

**ESTUDIO DE LA ROCA SAL GEMA A TRAVÉS DE
ENSAYES DE FLUENCIA EN COMPRESIÓN
UNIAXIAL ISOTERMICA.**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JORGE HERRERA ESTRADA.



ENEP
ARAGON

Edo. De Méx., MEXICO

1997.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
ARAGÓN DE
MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCIÓN

JORGE HERRERA ESTRADA
PRESENTE.

En contestación a la solicitud de fecha 8 de julio del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Ing. JOSÉ PAULO MEJORADA MOTA pueda dirigirse el trabajo de Tesis denominado, "ESTUDIO DE LA ROCA SAL GEMA ATRAVÉS DE ENSAYES DE FLUENCIA EN COMPRESIÓN UNIAXIAL ISOTÉRMICA", 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 HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México., 12 de agosto de 1997
EL DIRECTOR

Claudio C. Merrifield Castro

c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería Civil.
c c p Asesor de Tesis.

CCMC/AIR/IIA.

**Dedico este trabajo a mis padres
por todo el amor que han vertido
en mí y que me ha cubierto de
entusiasmo para vivir.**

**A mis hermanos porque se que
siempre están conmigo.**

**Agradezco a la Universidad
Nacional Autónoma de México por
enseñarme que ser universitario es
trabajar por el engrandecimiento de
nuestra patria.**

Agradezco al M. en C. Eduardo Galván G. por haberme tenido la confianza y darme la oportunidad de participar en este proyecto.

Agradezco a todo el personal del departamento Civil Concreto en especial al Ing. Raúl López Chávez por el apoyo brindado.

A todos los compañeros y amigos que de alguna manera me ayudaron a la realización de este trabajo.

A Laura con mucho cariño.

INDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.	XI
SIMBOLOGÍA.	XIV
PROLOGO.	1
CAPITULOS.	
CAPITULO 1 .- INTRODUCCION.	4
1.1. Objetivos.	4
1.1.1. Objetivo general.	4
1.1.2. Objetivos particulares.	4
1.2. Alcances.	5
1.3. Hipótesis.	6

CAPITULO 2 .- ANTECEDENTES	7
CAPITULO 3.- LA SAL Y SU COMPORTAMIENTO MECÁNICO.	13
3.1. Formación de domos salinos.	13
3.2. Reología de la sal gema.	17
3.3. Cavernas lixiviadas en domos salinos.	18
CAPITULO 4.- PRUEBAS DE LABORATORIO.	22
4.1. Tipos de ensayos.	22
4.2. Reducción de resistencia de la roca sal gema en función del tiempo.	23
4.3. Estabilidad de la roca sal gema.	24
4.4. Características de las muestras de sal.	25
4.4.1. Esbeltez.	26
4.4.2. Comportamiento diferido	26
4.4.3. Ruptura	27
4.4.4. Efecto de escala.	28
4.5. Metodología de labrado y preparación de probetas de roca sal gema.	29

CAPITULO 5.- MODELOS APLICADOS AL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO.	30
5.1. Cuerpo elástico.	31
5.1.1. Ley de Hooke.	32
5.2. Cuerpo viscoso.	33
5.3. Cuerpo viscoelástico.	35
5.3.1. Cuerpo de Kelvin.	35
5.3.2. Cuerpo de Maxwell.	37
5.4. Cuerpo elastoviscoplastico.	39
5.5. Ley de Lemaitre.	41
CAPITULO 6.- APLICACIÓN DEL MODELO DE LEMAITRE.	45
6.1. Hipótesis del modelo.	45
6.2. Pruebas de fluencia.	47
6.2.1. Metodología de selección de muestras para desarrollo de pruebas de fluencia.	48
6.2.2. Equipo de laboratorio.	51
6.2.3. Descripción de pruebas de laboratorio.	56
6.3. Definición de parámetros de Lemaitre.	62
6.4. Cálculo de velocidades de deformación.	69

CAPITULO 7 .- ANÁLISIS COMPARATIVO.	76
7.1 Modelo modificado de Lemaitre (Lemaitre-Kelvin).	77
7.2. Comparación con el modelo de Lemaitre-Kelvin.	80
CAPITULO 8 .- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
8.1. Conclusiones.	86
8.2. Recomendaciones.	88
GLOSARIO.	91
BIBLIOGRAFIA.	92

INDICE DE FIGURAS.

1. Perfil de un domo salino.	16
2. Proceso de lixiviación.	21
3. Gráfica esfuerzo-deformación.	32
4. Gráfica deformación-tiempo.	32
5. Gráfica esfuerzo deformación para cuerpos viscosos.	34
6. Cuerpo análogo del modelo de Kelvin.	36
7. Cuerpo análogo del modelo de Maxwell.	38
8. Probetas de roca sal gema ensayadas.	51
9. Fluviómetro uniaxial.	52
10. Arreglo interior del fluviómetro uniaxial.	53
11. Colocación de muestra de sal en el fluviómetro uniaxial.	54
12. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N1-P26(1).	58
13. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N1-P30(1).	59
14. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N1-P30(2).	59
15. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N3-P1(2).	60
16. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N3-P2(1).	60
17. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N3-P2(2).	61
18. Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N1-P26(1).	63

19.Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N1-P30(1).	64
20.Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N1-P30(2).	64
21.Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N3-P1(2).	65
22.Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N3-P2(1)..	65
23.Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N3-P2(2).	66
24.Velocidades de deformación de la muestra N3-P2(1).	71
25.Velocidades de deformación de la muestra N1-P30(2).	71
26.Velocidades de deformación de la muestra N1-P30(1)	72
27.Velocidades de deformación de la muestra N3-P1(2).	72
28.Velocidades de deformación de la muestra N3-P2(2).	73
29.Velocidades de deformación de la muestra N1-P26(1).	73
30.Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N1-P26(1).	81
31.Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N1-P30(1).	81
32.Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N1-P30(2).	82

33. Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N3-P1(2).	82
34. Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N3-P2(1).	83
35. Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N3-P2(2).	83

SIMBOLOGIA.

t = Tiempo en días.

E = Módulo de elasticidad.

E_M = Módulo de elasticidad del modelo de Maxwell.

E_K = Módulo de elasticidad del modelo de Kelvin.

G = Módulo de rigidez al corte.

G_K = Módulo de rigidez al corte del modelo de Kelvin.

$k, \alpha, \beta,$ = Parámetros de Lemaitre.

ϵ = Deformación

ϵ_T = Deformación total.

ϵ_v = Deformación volumétrica.

ϵ_{ax} = Deformación distorsional axial.

ϵ^e = Deformación elástica.

ϵ^{vp} = Deformación viscoplástica.

ϵ^v = Deformación viscosa.

ϵ_k = Deformación de Kelvin.

ϵ_A = Deformación del amortiguador.

ϵ_R = Deformación del resorte.

μ = Relación de Poisson.

μ_k = Relación de Poisson del modelo de Kelvin.

ν = Viscosidad dinámica.

ν_k = Viscosidad dinámica del modelo de Kelvin.

σ = Esfuerzo desviador.

σ_k = Esfuerzo aplicado al modelo de Kelvin.

σ_R = Esfuerzo sobre el resorte.

σ_A = Esfuerzo sobre el amortiguador

PRÓLOGO

Los llamados domos salinos son formaciones de roca sal gema de origen sedimentario, dichos macizos salinos tienen su origen por la intrusión de la misma roca en capas más cercanas a la superficie, debido a la presión geostática de las rocas sobreyacentes, y por movimientos tectónicos; sus características físico-químicas hacen de este un material natural ideal para el almacenamiento de hidrocarburos, debido a que su nula permeabilidad ante estos fluidos, permite crear en su interior cavidades herméticas.

El diseño y construcción de una cavidad en un domo salino para almacenamiento de hidrocarburo es en esencia un proyecto de mecánica de rocas, en el cual ha de estudiarse el comportamiento mecánico del macizo salino.

Actualmente para el análisis de estabilidad de una cavidad se emplea el método de elementos finitos, para lo cual se aplica una ecuación constitutiva cuyos parámetros son definidos mediante pruebas de fluencia en campo y laboratorio.

El presente trabajo de tesis describe un método para la obtención de estos parámetros mediante pruebas de laboratorio realizadas en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y la aplicación de la ecuación constitutiva de Lemaitre, considerando los parámetros mecánicos definidos en la Ref. 4, y cuyo objeto es que sean aplicables con un alto grado de confiabilidad al análisis de estabilidad de una cavidad minada en un domo salino, susceptible a ser utilizada para almacenamiento de hidrocarburo.

En el primer capítulo se presentan objetivos, hipótesis y alcances del presente trabajo de investigación.

Para tener un concepto más claro del trabajo que desempeñan estas cavidades como almacenadoras de crudo, en el segundo capítulo se desarrollan de manera general, los antecedentes y características respecto a este tipo de almacenamiento.

En el tercer capítulo se desarrolla brevemente como esta constituida la roca sal gema, su reología, la formación de los domos salinos y el concepto de cavernas lixiviadas para almacenamiento de combustible.

En el cuarto capítulo se abordará de una manera general lo referente a las pruebas de laboratorio que se realizan a la roca sal gema, los datos que pueden obtenerse

de las mismas, así como las condiciones que se deducen en cuanto a las características de esta roca, también se describen las características que deben cumplir las muestras de sal gema escogidas para ser ensayadas.

En el quinto capítulo se hace referencia a los modelos aplicados al análisis del comportamiento mecánico de la roca sal gema, la reología de la misma y se revisa la formulación de esta ley, asimismo se realiza el análisis de las bases teóricas del modelo matemático de Lemaitre y su aplicación a la mecánica de rocas.

En el sexto capítulo se expone la metodología utilizada para la definición de los parámetros que permitan reproducir las curvas deformación-tiempo aplicando el modelo de Lemaitre, y que se puedan aplicar al análisis de estabilidad de cavidades en domos salinos, además se explica el desarrollo para la obtención de velocidades de deformación de cada una de las muestras ensayadas.

En el capítulo séptimo se hace un análisis comparativo del modelo de Lemaitre y otros utilizados anteriormente, para la definición de parámetros.

En el capítulo octavo se dan conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General:

Estudiar el comportamiento de fluencia en el laboratorio de la roca sal gema, para diseño de cavidades almacenadoras de combustibles.

1.1.2 Objetivos particulares:

- Determinar los parámetros del modelo matemático de Lemaitre aplicables al análisis de estabilidad de cavidades lixiviadas en domos salinos para almacenamiento de combustible, utilizando una tecnología propuesta por el Instituto Mexicano del Petróleo.**

- **Definir las características de deformabilidad y velocidad de deformación de la roca sal gema a través de ensayos de fluencia en compresión uniaxial isotérmica.**
- **Verificar a través de la velocidad de deformación obtenida en el presente trabajo, la deformabilidad inferida en la Ref. 4.**
- **Establecer la eficiencia del modelo propuesto.**

1.2 ALCANCES.

- **Análisis del comportamiento de fluencia de seis muestras de roca sal gema sometidas a ensayos de fluencia en compresión uniaxial isotérmica.**
- **Definición de parámetros aplicables al modelo de Lemaitre, de las seis muestras sometidas a ensayos de fluencia, esto a través de la reproducción de las curvas deformación-tiempo obtenidas en laboratorio.**
- **Determinación de las velocidades de deformación con base en las curvas deformación-tiempo de las seis muestras ensayadas en laboratorio.**

- Verificación de la deformabilidad inferida en la *Ref.4* de las mismas seis muestras.

1.3 HIPOTESIS.

- A través del modelo matemático de Lemaitre es posible reproducir las curvas deformación-tiempo de las muestras sometidas a compresión uniaxial isotérmica.
- Es posible definir la deformabilidad de la roca sal gema correlacionando los ensayos de fluencia en compresión uniaxial isotérmica con la metodología desarrollada en la *Ref. 4*

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

México es uno de los principales países productores de hidrocarburos, con lo cual satisface muchas de las demandas nacionales de combustible, además de producir grandes volúmenes de este producto para exportar a diversos países del mundo; es entonces cuando se vuelve difícil el manejo del petróleo crudo.

La necesidad de almacenar grandes cantidades de combustible durante lapsos de tiempo considerables; ya sea para disposición inmediata del producto, explotación ininterrumpida, resguardo para procesos químicos, la espera de transportación etc.; ha llevado a los especialistas a crear diferentes sistemas de almacenamiento para alcanzar este fin, como son tanques superficiales y diversos tipos de almacenamiento subterráneo, aprovechando formaciones naturales como son cavidades criogénicas, depósitos de gas, en acuíferos y domos salinos, así como otras creadas por el hombre tales como cavidades minadas en roca, tanques enterrados, minas abandonadas, etc.

En el caso de los tanques superficiales las condiciones de seguridad son reducidas, por la presión de vapor del producto, toxicidad, corrosividad y condiciones ambientales adversas; dentro de los sistemas subterráneos existen sistemas muy costosos, de difícil construcción y operación.

Uno de los métodos de almacenamiento subterráneo de hidrocarburos ampliamente difundido en países como Francia y Estados Unidos, es el que tiene lugar en cavidades creadas por lixiviación en domos salinos, el cual ofrece un rango de seguridad bastante alto por las características de la roca, como son su impermeabilidad y las profundidades de almacenamiento. Tiene la gran ventaja de poder almacenar grandes cantidades de hidrocarburo a un costo relativamente menor con respecto a otro tipo de depósitos, lo cual es útil cuando por cuestiones atmosféricas no se permite una transportación constante o cuando por motivos de seguridad nacional se debe tener cuidado con el manejo del mismo.

Dentro de las ventajas que representa este tipo de almacenamiento en cavidades lixiviadas en domos salinos las más significativas son las siguientes:

- Son más económicas con respecto a otro tipo de almacenamiento.**
- Tienen un rango de seguridad bastante más considerable que en los almacenamientos superficiales ante accidentes naturales o aquellos provocados por descuido humano.**

- Requiere un área superficial reducida.
- Almacenamiento de productos a altas presiones.
- Existe una muy baja probabilidad de derramamiento de líquido.
- Factibilidad técnica para su construcción.
- Almacenamiento de grandes volúmenes.

Los domos salinos son formaciones de rocas sedimentarias evaporíticas que se asemejan a un hongo gigantesco y cuya base se encuentra a varios kilómetros de profundidad sobre un estrato de depositación de sales. El origen de estas sales proviene del atrapamiento de aguas marinas producidas en alguna era geológica, de las cuales el agua se evaporó e infiltró en el subsuelo y las sales se cristalizaron y solidificaron; posteriormente la acumulación de sedimentos sobre los estratos salinos fue incrementando la presión geostática hasta generar el flujo viscoso de la roca salina, a través de una falla, dando origen al domo salino, la parte superior del domo se puede encontrar a flor de tierra o a varios cientos de metros. Se les distingue de otras formaciones geológicas que involucran a la sal, por la forma burdamente circular o elíptica que tienen en sección horizontal y por tener dimensiones horizontales del mismo orden de magnitud, o menores, que sus dimensiones verticales.

Para efectuar el estudio de factibilidad que permitiera confirmar la construcción de este tipo de almacenamientos en México, se seleccionó el área del Istmo de

Tehuentepec y se inició con un reconocimiento preliminar apoyado en un levantamiento geológico y otro geofísico, concluyendo en la aceptación del domo conocido como "Domo de Tuzandépetl", que se localiza en el Municipio de Ixhuatlán del Sureste, en el Estado de Veracruz, entre los poblados de Tuzandépetl y Amatián y el cual a su vez se localiza dentro de la zona de mayor actividad de explotación petrolera, aspecto que reduce los costos de operación y transporte.

Este tipo de cavidades como toda obra de ingeniería requiere un cierto tiempo de vida útil para que sea costeable, por ello es necesario hacer los estudios pertinentes para su conservación y buen funcionamiento.

Uno de los principales problemas que se presentan en cavidades lixiviadas en domos salinos es el de la estabilidad, que determina directamente la vida útil de una cavidad, por lo que es de gran importancia hacer un análisis lo más cercano a la realidad, que nos permita predecir con un alto grado de confiabilidad el tiempo de uso de la cavidad en caso de alguna contingencia, como podría ser la caída de bloques de las paredes de la caverna, y poder así tomar las medidas y acciones pertinentes, asimismo establecer los programas de operación y manejo, para optimizar el uso de las cavidades.

Las observaciones acumuladas en minas, almacenamientos subterráneos y en laboratorio, han demostrado que la roca de sal gema tiene una gran deformabilidad,

en lo que difiere en gran medida con el comportamiento de otras rocas, ya que es capaz de soportar grandes deformaciones sin llegar a la ruptura. Se considera que la sal se comporta como un líquido viscoso.

Uno de los modelos para analizar la estabilidad de una cavidad, es el debido a Lemaitre, que inicialmente se utilizó en la industria metalúrgica, pero se estima que constituye una muy cercana representación del comportamiento dúctil de la sal gema, se ha llegado a esta conclusión por la interpretación de diversos ensayos en laboratorio.

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se realizó el primer ciclo de pruebas de laboratorio a núcleos de rocas sal gema del domo salino de Tuzandépetl, Ver, posteriormente en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) se ha continuado el estudio del comportamiento mecánico de esta roca al ser sometida en el laboratorio a esfuerzos desviadores constantes y variables, estudio que ha propiciado el desarrollo de modelos, técnicas y equipo de laboratorio para efectuar pruebas con ciclos de carga y descarga.

Con respecto a los modelos se ha desarrollado una ecuación constitutiva que permite analizar la deformación distorsional, que es la que rige principalmente la deformación del material, aplicable al análisis de núcleos sometidos a esfuerzos desviadores variables a temperatura constante y se aplicó inicialmente a la

selección de muestras para desarrollo de pruebas de fluencia y posteriormente en otros estudios, al análisis del comportamiento del domo salino, durante la lixiviación de una cavidad.

CAPITULO 3

LA SAL Y SU COMPORTAMIENTO MECANICO.

3.1 FORMACIÓN DE DOMOS SALINOS.

La sal se presenta originalmente en capas estratificadas, en rocas sedimentarias marinas. Es en sí una evaporita de origen marino (con menos frecuencia, también de origen lagunar), formada en un medio de aridez extrema, donde la evaporación es mayor que la aportación de agua nueva a la cuenca marina, dando lugar de esta manera a la sobresaturación de la solución salina y a la precipitación de las sales disueltas en el agua de mar. Por lo general, el mar que tiene estas condiciones debe ser también de poca profundidad, para que el área de evaporación sea grande en comparación con el tirante de agua.

Las sales que se depositan lo hacen en el orden inverso a su grado de solubilidad; así, primero se precipitan los carbonatos (calizas), después los sulfatos (yeso y anhidrita) y por último los cloruros, primero los de sodio y después los de potasio y

de magnesio. La cristalización de la halita (NaCl) requiere que la concentración del agua de mar por evaporación haya aumentado 11 veces, lo que da la idea del ambiente de aridez que se requiere para su precipitación.

El depósito de la sal cesa cuando cambian las condiciones del medio marino, por ejemplo, por hundimiento acelerado del fondo del mar y por modificaciones climáticas drásticas, con lo que entonces, sobre la sal comienzan a depositarse otro tipo de sedimentos, tales como arenas, arcillas, limos y carbonatos entre otros, estos nuevos depósitos marinos pueden alcanzar a su vez espesores considerables, de cientos o miles de metros.

En cualquier sitio en que se formen sales solubles, estas están dispuestas para ser disueltas otra vez, a no ser que estén protegidas en cierta medida contra la disolución. En general cuando se han depositado sobre ellas barro y arcillas, que desplazan al agua, se presentan las condiciones para la depositación de la sal.

Algunos ambientes paleogeográficos, tales como el Jurásico del Golfo de México, o el pérmico del suroeste de los Estados Unidos, fueron propicios para la acumulación de sal de varios miles de metros de espesor y decenas de miles de kilómetros cuadrados de extensión.

El agua salada y la salmuera se encuentran con frecuencia en sondeos profundos, y cristales de sal pueden presentarse en pizarras y otros sedimentos debajo de la superficie. Estas salmueras pueden ser agua del mar, detenida en los sedimentos en la época de su formación. Sin embargo algunas son más concentradas que el agua de mar y probablemente han cambiado mucho desde que se formaron en el mar.

Una característica interesante de la roca de sal es la manera que puede deformarse por el flujo plástico. La presión diferencial sobre los estratos de la roca de sal ocasiona "hongos" de sal que se levantan en forma vertical, introduciéndose en los sedimentos que forman las capas superiores y creando estructuras que se llaman domos salinos. Esto resulta al parecer, de que la sal es de menor densidad que los sedimentos que la cubren; cuando la columna de tales sedimentos tienen un espesor de 4,000 o 5,000 por ejemplo, esta ejerce una presión suficiente para generar el flujo. Si en el fondo marino sobre el que la sal se depositó existen irregularidades, como colinas sepultadas, la carga de las rocas suprayacentes genera un componente que tiende a desplazar la sal hacia arriba, introduciéndola poco a poco entre las capas que la cubre. Si además, existen fracturas y/o fallas, esto favorece y facilita el ascenso de la sal. (fig. 1).

Es este el modelo de acuerdo con el cual la sal fluye formando el domo a consecuencia de las diferencias en densidad, pero en muchos casos el movimiento

de la sal puede estar notablemente influenciado por las condiciones geológicas y por las fuerzas tectónicas del área. Parece ser que la sal tiene que estar cubierta por cuando menos 3,000 metros de sobrecarga antes de que se inicie el flujo que forma los domos. Esto sugiere que la sal puede llegar a ser más plástica bajo la presión ejercida por una gruesa cubierta de sedimentos.

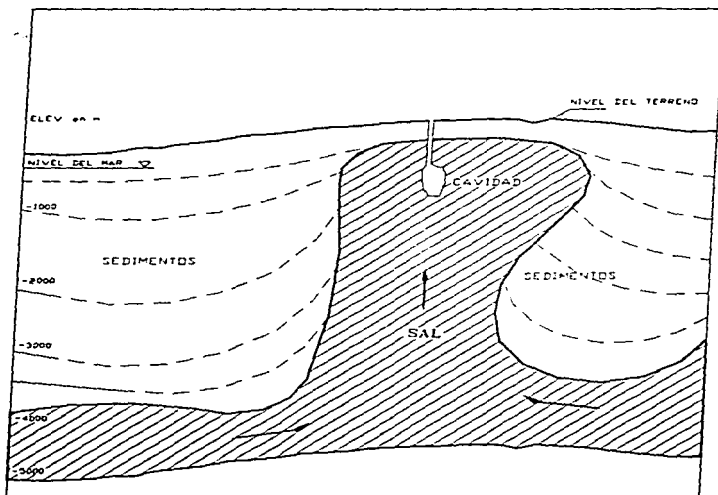


Figura 1. Perfil de un domo salino.

Por otra parte, el incremento en la plasticidad puede ser causado en medida, por el natural incremento de la temperatura de la roca con la profundidad, pues ha podido demostrarse experimentalmente una marcada disminución en la resistencia de la sal a la deformación, a medida que aumenta la temperatura.

En los último años se han descubierto una gran cantidad de estos en las regiones cercanas al golfo de México.

3.2 REOLOGÍA DE LA SAL GEMA.

Reología es la ciencia que estudia el comportamiento de deformación y fractura de los materiales como una función de esfuerzo, temperatura y tiempo. Las principales características del tratamiento de procesos reológicos en roca de sal resultan del análisis de deslizamiento, plasticidad y fractura.

Este tratamiento involucra mediciones empíricas de laboratorio *in situ*, investigación teórica y consideraciones microfísicas como dislocaciones y estructura granular. Los conocimientos del comportamiento mecánico de la roca de sal es una parte esencial de una evaluación de la estabilidad de obras subterráneas como, cavernas, minas y pozos.

El principal objetivo de la reología es el establecimiento de las llamadas leyes constitutivas las cuales caracterizan la relación entre esfuerzo y la deformación de la materia.

En un estricto sentido, el comportamiento reológico asimismo incluye la dependencia del tiempo y temperatura del comportamiento de deformación (deslizamiento y plasticidad), y en un sentido general también la dependencia del tiempo del comportamiento de fractura.

La sal es un material muy dúctil, capaz de tolerar grandes deformaciones sin romperse. En laboratorio, para medir sus características intrínsecas deben extremarse 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 se detectan divergencias.

3.3 CAVERNAS LIXIVIADAS EN DOMOS SALINOS.

Para la utilización de la roca sal gema como almacenadora de hidrocarburo se construye una cavidad, la cual se crea por disolución del domo salino con agua dulce (lixiviación), en el cual el volumen de la salmuera (agua saturada al 100% con

sal) es ocupado por el producto a almacenar; la disolución juega un papel muy importante en la creación de la cavidad, generando esfuerzos desviadores que provocan el cierre efectivo de la sal porosa y permeable, evitando pérdidas.

Para garantizar la completa seguridad de las cavidades para almacenamientos subterráneos se requieren técnicas especiales; la perforación del núcleo, el techo y para algunas zonas del domo se consideran estudios de laboratorio y análisis de muestras, siendo esto lo primero en el reconocimiento del área en estudio.

Para el desarrollo de una cavidad son necesarios cuatro requisitos principales:

- La sección transversal del macizo salino o domo debe ser lo suficientemente grande, la sal debe tener una buena pureza lo cual debe representarse en el hecho de ser impermeable en el proceso de disolución.
- Las condiciones del techo deben ser lo suficientemente estables.
- La cavidad debe ser lo suficientemente profunda para permitir el confinamiento y la compatibilidad de la sección transversal de la cavidad y la superficie para asegurar una efectiva terminación del pozo.
- Contar con las instalaciones superficiales adecuadas para la dotación de agua dulce, así como para su disponibilidad y almacenamiento.

Es también de gran importancia realizar pruebas que garanticen la seguridad antes del uso, lo cual garantice una efectiva recuperación del producto almacenado y eliminar posibles riesgos para el control de su forma.

Su construcción es sencilla: a partir de una perforación de tipo petrolero, se hace circular agua dulce en la formación salina. Esta agua se satura de sal, por la disolución de la roca, con lo cual la cavidad se va ensanchando poco a poco. El volumen se obtiene mediante un balance diario de la sal, a este método se le denomina lixiviación; la siguiente fase es la de la explotación de la cavidad, la cual se lleva a cabo mediante dos secuencias de operación que son la inyección y la extracción de los hidrocarburos. (fig. 2)

La fase de inyección consiste básicamente en inyectar crudo a la presión necesaria y succionar la salmuera producto de la lixiviación, teniendo como limitante el hecho de no poder rebasar una presión máxima de 124 kg/cm² en la zapata de la tubería cementada que es la parte más vulnerable de la cavidad.

La fase de extracción consiste en la inyección de salmuera a la cavidad y succionar el combustible existente en el interior de la cavidad, la salmuera deberá desplazar al combustible a una presión adecuada, debido a que por condiciones de estabilidad, la cavidad nunca puede estar vacía.

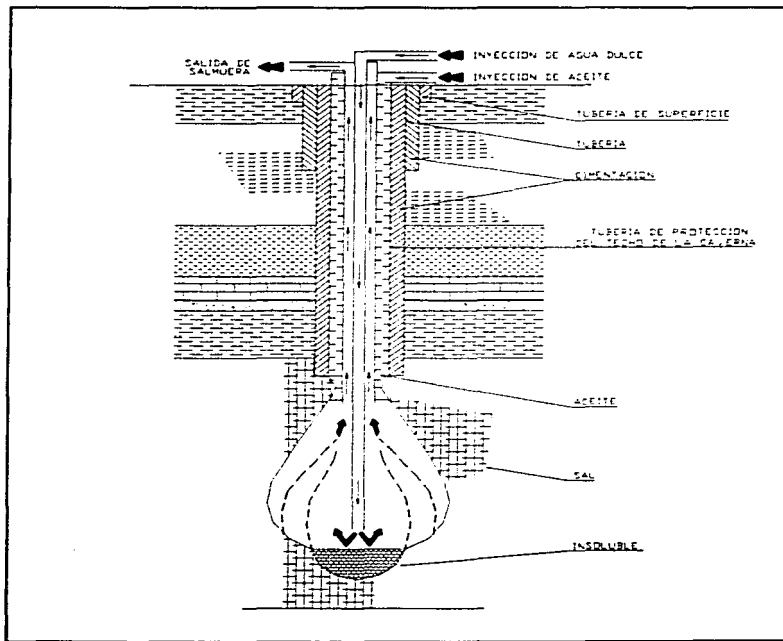


Figura 2. Proceso de lixiviación.

CAPITULO 4

PRUEBAS DE LABORATORIO.

4.1 TIPOS DE ENSAYES.

El objetivo de los ensayos de laboratorio es el de determinar experimentalmente el comportamiento mecánico de las rocas. Para ello se reproducen, en probetas de ensayo extraídas del sitio, diferentes estados de esfuerzo y deformaciones, y se observa, ya sea el comportamiento instantáneo de la probeta (ensayos de corta duración), o 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 imponen una deformación constante (ensaye de relajación) o lineal en el tiempo (ensaye de endurecimiento); en estos se observa la evolución del esfuerzo axial.**

2.- Ensaye 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 1920 por Lemaitre para el estudio del comportamiento de los metales.

4.2 REDUCCIÓN DE RESISTENCIA DE LA ROCA SAL GEMA EN FUNCION DEL TIEMPO.

Los efectos de la dependencia del tiempo son observados en el laboratorio de pruebas sobre rocas. Estos efectos varían con el material de la roca, confinamiento y esfuerzos diferenciales y temperatura. Estas son las características que se pueden obtener de los ensayos de laboratorio, tomando en cuenta el efecto del tiempo de prueba:

a) Deformación en el tiempo bajo esfuerzos diferenciales constantes y condiciones específicas de temperatura.

- b) **Esfuerzos de relajación axial de mantener a un espécimen a una presión de confinamiento constante y ciertas condiciones de temperatura.**

- c) **Relación entre esfuerzo axial y de confinamiento y deformación durante una prueba triaxial al variarse coeficientes de deformación.**

En rocas que demuestran una fuerte dependencia del tiempo, como las evaporitas, es común para su descripción, la utilización de ecuaciones empíricas basadas en la dependencia del tiempo de deformación o esfuerzo de relajación.

Es importante en las pruebas de laboratorio considerar que con el tiempo la roca sufre continuamente redistribución de esfuerzos afectando su estabilidad.

4.3 ESTABILIDAD DE LA ROCA DE SAL.

El concepto de estabilidad es importante en cualquier consideración de deformación de un espécimen en periodos del estado crítico del modelo.

El comportamiento del espécimen durante ciertos periodos en cuanto a su estabilidad considera los siguientes dos conceptos:

a) Estabilidad de la microestructura, la cual se refiere a microfracturas en las rocas, aunque en la roca de sal algunas deformaciones están asociadas típicamente con imperfecciones en los cristales. En otro caso la deformación es estable, esto es causado por un nivel microestructural, debido a un pequeño incremento de esfuerzo creciente que induce un nuevo estado de equilibrio.

b) Estabilidad estructural del espécimen, el cual existe si para un punto particular de la relación esfuerzo-deformación, la nueva deformación requiere adicionar energía al espécimen.

En práctica la segunda condición es restringida por la relación de deformación y dureza del material. El cambio de inestabilidad estructural a estabilidad estructural ocurre debido a la transición de frágil a dúctil.

4.4 CARACTERISTICAS DE LAS MUESTRAS DE SAL.

Son importantes las condiciones de la probeta para poder definir las características mecánicas de la roca. De estas las de mayor consideración son las debidas a la esbeltez y efecto de escala.

4.4.1 Esbeltez.

Para los ensayos de compresión, se obtienen generalmente probetas cilíndricas de relación de esbeltez 2. Esta relación se escoge para evitar dos fenómenos:

- El pandeo de la probeta, se vuelve importante para probetas con relación de esbeltez de 2.5.
- Una repartición no axial de los esfuerzos debidos a la fricción con las placas de la prensa, que puede afectar a las probetas con relaciones de esbeltez inferiores a 1.5.

Estas reglas son aplicables a cualquier tipo de roca, y con ciertas precauciones es aplicable a la sal, que por sus características muestra un comportamiento diferente a las rocas en general.

4.4.2 Comportamiento diferido.

El comportamiento de la sal gema difiere bastante al de las otras rocas por su **capacidad de soportar deformaciones importantes sin fracturarse.**

La interpretación de ensayos de laboratorio ha permitido establecer una ley de comportamiento que es el modelo de Lemaitre, utilizado inicialmente por metalurgistas. Se puede estimar que constituye una buena representación del comportamiento dúctil de la sal, si se toman en cuenta las observaciones siguientes:

- El incremento de temperatura aumenta la ductilidad de la sal.
- 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.

4.4.3 Ruptura

En este dominio, es conveniente señalar que no se tiene, actualmente, un criterio intrínseco de ruptura. Se puede pensar que la ruptura se produce por una deformación o una velocidad de deformación o un esfuerzo o una energía de deformación muy grande.

Sin embargo, hay que pensar siempre que la sal es un material complejo. La presencia de heterogeneidades, su repartición, el tamaño de los cristales, son entre otros la explicación a las diferencias de comportamiento tan importantes.

La ruptura de la sal tiene lugar cuando existen zonas de tracción en la muestra de sal durante el ensaye de compresión según lo enuncia la hipótesis establecida por S.M. Tijani. Estas zonas de tracción estarían actuando en función al contacto imperfecto entre la muestra y las placas de la prensa. Debido a esto no existe deslizamiento sin frotamiento y conducen a un campo de esfuerzos no homogéneo en la probeta.

La estructura cristalina de la sal y su reacción al agua permiten deformaciones importantes, pero también se restaura y cicatriza. Todas estas propiedades confieren a la sal gema un lugar especial en la mecánica de rocas.

4.4.4 Efecto de escala.

El efecto de escala es el resultado de la extrapolación de los resultados obtenidos en laboratorio en pequeñas probetas a macizos rocosos de grandes dimensiones.

Dreyer observó, en prismas de sal gema de 1.5 a 2.7 cm. de aristas homotéticas a pilares que la resistencia aumentaba con el tamaño de los prismas (efecto de escala inverso) para prismas de 1.5 a 10 cm. de aristas y que solo se conserva constante para prismas de aristas mayores a 10 cm.

4.5 METODOLOGÍA DE LABRADO Y PREPARACIÓN DE PROBETAS DE ROCA SAL GEMA.

Es de gran importancia preparar probetas con la más mínima alteración y que cumpla con las normas establecidas por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) para lo cual se sigue una metodología de labrado y preparación que permita definir el porcentaje de alteración que sufre la probeta en cada fase del proceso; para lo cual se establece un programa de medición de velocidades de ondas longitudinales y transversales, y cuya variación entre cada medición sea el indicador del grado de alteración en cada fase. Para el desarrollo de esta etapa se requiere en principio calibrar y definir el rango de frecuencias que permita definir con mayor precisión la heterogeneidad y grado de alteración de la muestra, por lo tanto antes de iniciar la implementación de la metodología, se efectúa una serie de mediciones de velocidades de onda P y S en diferentes frecuencias para así definir el rango de frecuencias a utilizar.

El labrado se realiza por medio de cortes a las aristas de una masa de sal, hasta obtener una muestra cilíndrica, tal como se haría con una probeta de arcilla, haciéndola girar sobre su eje cuidando de dejar una superficie, tersa y sin fisuras.

CAPITULO 5

MODELOS APLICADOS AL ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO MECANICO

La construcción de una cavidad en el interior de un domo salino altera de manera significativa la estabilidad del macizo rocoso, por lo que es necesario conocer el comportamiento mecánico de la roca sal gema que constituye su formación, para poder optimizar su planeación, diseño, construcción y operación.

La roca sal gema es un material pétreo muy complejo en cuanto a su respuesta a esfuerzos desviadores; estudios y pruebas de fluencia realizados por diferentes investigadores determinaron que el comportamiento de este material corresponde al de un elastoviscoplastico.

Con el fin de obtener las propiedades mecánicas de la roca sal gema, diversos investigadores han desarrollado modelos matemáticos empíricos como el adaptado del modelo propuesto por Lemaitre para analizar la fluencia de los metales.

5.1 CUERPO ELASTICO.

Se dice que un cuerpo se comporta elásticamente, cuando sus deformaciones son proporcionales a los esfuerzos que las originan, a esta relación se le conoce comúnmente como ley de Hooke, y se refiere a un material ideal de comportamiento perfectamente elástico. Se indica como una σ al esfuerzo y con una ϵ la deformación, las ecuaciones características del cuerpo de Hooke son las siguientes:

$$\sigma_v = 3(k)(\epsilon_v)$$

$$\sigma_o = 2(G)(\epsilon_o)$$

Como se puede observar en las figuras 3 y 4, si σ permanece constante, también la deformación ϵ permanece constante. Como por ejemplo, cuando al cuerpo de Hooke se le aplica súbitamente un esfuerzo σ_a , que se mantiene constante durante un tiempo t , se alcanza una deformación que alcanza bruscamente la magnitud ϵ_a , esta definición se conserva mientras el esfuerzo sea constante.

Analizando el cuerpo de Hooke con respecto al tiempo, en las siguientes figuras se puede observar que al aplicar un esfuerzo que permanece constante, se presenta una deformación constante.

Como se puede observar , si σ permanece constante, también la deformación ϵ permanece constante. Como en el ejemplo, cuando al cuerpo de Hooke se le aplica súbitamente un esfuerzo σ_0 , que se mantiene constante durante un tiempo t se alcanza una deformación que alcanza bruscamente la magnitud ϵ_0 , esta deformación se conserva mientras el esfuerzo sea constante.

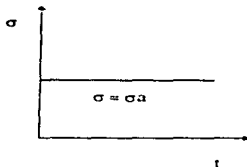


Figura 3. Gráfica esfuerzo-tiempo

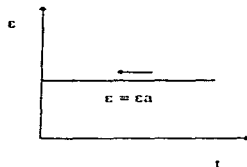


Figura 4. Gráfica deformación-tiempo

5.1.1 Ley de Hooke.

Una propiedad de los diagramas esfuerzo-deformación de los cuerpos elásticos, es que son aplicables con suficiente exactitud a todos los materiales, pues en tales diagramas, a partir del origen y hasta cierta distancia, la relación de los valores experimental de esfuerzo-deformación son esencialmente una línea recta, ejemplos de tales diagramas son los correspondientes al vidrio, el acero dulce hasta cierto

punto, los aceros aleados de alta calidad en los cuales el diagrama si cumple casi hasta el punto de falla, no obstante para fines prácticos se puede decir que para todos los materiales elásticos la relación entre esfuerzo y deformación es lineal. Esta idealización aplicable y generalizada se conoce como ley de Hooke y puede expresarse mediante la siguiente ecuación :

$$\sigma = E(\epsilon) \quad \text{o} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Lo que significa que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación siendo la constante de proporcionalidad E denominada módulo de elasticidad, módulo de elasticidad, módulo elástico o módulo de Young, σ es el esfuerzo y ϵ la deformación.

5.2 CUERPO VISCOSO

Un medio viscoso o cuerpo de Newton sometido a un esfuerzo distorsional por pequeño que este sea, empieza fluyendo y no deja de fluir mientras el esfuerzo se mantenga, la ecuación $\dot{\sigma} = 2(m)(E_0)$ expresa que la velocidad de escurrimiento es tanto más grande cuando mayor es el esfuerzo; al desaparecer el esfuerzo el medio

no retrocede, como lo haría un cuerpo elástico sino que permanece en la posición alcanzada durante el movimiento.

El modelo analógico que representa al cuerpo viscoso suele ser el amortiguador, representado esquemáticamente por un amortiguador móvil dentro de un cilindro lleno de aceite, sin inercia y sin que haya compresión en el fluido. Para poder presentar este caso se supone que el pistón se encuentra perforado.

La curva esfuerzos deformaciones para los cuerpos viscosos está representada en la figura 5.

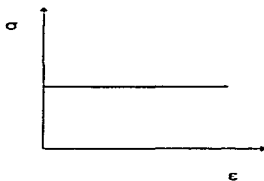


Figura 5. Curva esfuerzo deformación para cuerpos viscosos.

5.3 CUERPOS VISCOELASTICOS

El deseo de comprender mejor el comportamiento de los materiales reales por medio de modelos idealizados sencillos de manejar, llevo a imaginar los cuerpos viscoelásticos, dotados de propiedades elásticas y de propiedades viscosas, que se manifiestan de diferentes maneras, según el modelo. De estos cuerpos analizaremos el de Kelvin y Maxwell

5.3.1 Cuerpo de Kelvin.

Este cuerpo de Kelvin, también llamado cuerpo de Kelvin Voigt, intenta representar materiales simultáneamente elásticos y viscosos como son, por ejemplo, ciertos tipos de vidrios. Su modelo analógico consiste en un resorte y un amortiguador dispuestos en paralelo, lo cual queda especificado en una ecuación diferencial muy simple que integrada con respecto a la variable independiente que es el tiempo t se tiene:

$$E = \left(\frac{\sigma a}{2G} \right) + ce^{-\lambda t}$$

$$E = \left(\frac{\sigma a}{2G} \right) (1 - e^{-\lambda})$$

de donde λ es el parámetro.

$$\lambda = \frac{G}{\mu}$$

substituyendo se obtiene:

$$E = \left(\frac{\sigma a}{2G} \right) + \left(\frac{\sigma a}{2G} (e^{-\lambda}) \right)$$

La figura 6 muestra el cuerpo análogo del modelo de Kelvin.

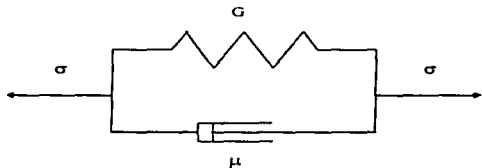


Figura 6. Cuerpo análogo del modelo de Kelvin.

En este modelo se puede observar que la carga constante σ_a ó esfuerzo se distribuye entre el resorte G y el amortiguador μ , en una proporción que depende de las características mecánicas del elemento en cuestión, cuando se aplica la carga el amortiguador toma el total de esta y conforme transcurre el tiempo ambos elementos se deforman en la misma proporción, por lo anterior la carga aplicada al cuerpo se transfiere al resorte conforme ambos elementos se deforman por lo que al final el resorte tomará el total de la carga.

El comportamiento del cuerpo de Kelvin empieza con características prevalentemente viscosas y termina con características elásticas, razón por la cual en el cuerpo de Kelvin no hay plastificación. En efecto si después de cargado el material se descarga, el resorte del modelo analógico siempre obligará al amortiguador a volver a su posición inicial.

5.3.2 CUERPO DE MAXWELL.

Este cuerpo representa un material que contrariamente al cuerpo de Kelvin, responde inmediatamente de manera elástica pero, posteriormente, si la carga se mantiene constante, el material tiende a comportarse de manera viscosa.

Entre las sustancias reales con estas características se puede encontrar el asfalto. El modelo analógico de Maxwell lo constituye un resorte y un amortiguador

dispuestos en serie, donde G representa el módulo de rigidez al corte y μ el coeficiente de viscosidad.

En el cuerpo de Maxwell el resorte trabaja independiente del amortiguador, por lo que tiende a deformarse en cuanto se aplica un esfuerzo.

Por lo general se concluye que después de la deformación elástica inicial, en la cual el resorte da una respuesta total, el amortiguador sigue trabajando por lo que el material entra en un estado de flujo viscoso.

Si se descarga de golpe un cuerpo de Maxwell el resorte regresa a su posición inicial pero el amortiguador conserva la deformación alcanzada hasta ese instante. Por lo tanto existe una deformación elástica y una deformación permanente, que permite concluir que existe un efecto de fluencia.

El cuerpo analógico del modelo de Maxwell se representa en la fig. 7.



Figura 7. Cuerpo analógico del modelo de Maxwell.

Donde el resorte G representa el módulo elástico y el amortiguador μ al coeficiente de viscosidad. La ecuación que representa el comportamiento del modelo de Maxwell bajo carga constante es la siguiente:

$$E = \left(\frac{\sigma a}{2}\right) \left(\left(\frac{t}{\mu}\right) + \left(\frac{1}{G}\right) \right) = \left(\frac{\sigma a \lambda(t)}{2\mu}\right) + \left(\frac{\sigma a}{2G}\right)$$

5.4 CUERPO ELASTOVISCOPLÁSTICO.

La ley reológica de Lemaitre es una ecuación de tipo empírico derivada para el comportamiento de los metales y adaptada al análisis de la roca sal gema mediante pruebas de fluencia, llevadas a cabo en el Centro de Mecánica de Rocas de la Escuela Nacional de Minas de París, la finalidad de tal investigación fue el de definir en forma precisa y completa, el comportamiento mecánico de la roca sal gema, a fin de obtener una ecuación que permita el cálculo y dimensionamiento de las excavaciones realizadas en los domos salinos.

La primera aplicación concreta de resultados de los estudios realizados a la roca sal gema fueron obtenidos en el año de 1970 cuando se llevo a cabo el cálculo de

estabilidad de las cavidades hechas por disolución en los domos salinos de la localidad de Tersane, Francia. Los resultados de las pruebas de fluencia dieron como fruto el enunciado de la ley del comportamiento del material de Lemaitre para la roca sal gema, en la cual postula la elongación de un resorte ϵ^e en la parte elástica, y en la parte viscoplástica ϵ^{vp} . Un amortiguador que se deforma conforme actúa el esfuerzo. las cinco características del material E, α , β , ν y K se suponen constantes a los cambios de la temperatura, con base en estas hipótesis estableció el siguiente modelo matemático:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^{vp}$$

que en términos de las características del material es la siguiente:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \left(\frac{\sigma}{k} \right)^p t^n .$$

5.5 LEY DE LEMAITRE.

La formulación de esta ley es:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp}$$

$$\varepsilon^e = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = A\varepsilon^{\frac{1}{m}} \times \varepsilon^{\frac{1}{n}}$$

donde:

ε = deformación.

ε^e = deformación elástica.

ε^{vp} = deformación viscoplástica.

A, m, n = parámetros de ajuste de la ley.

La integración de la ecuación diferencial parcial da:

$$\varepsilon^{vp}(t) = \left(\frac{\sigma}{k}\right)^B t^n$$

donde:

α, β, k = parámetros de Lemaitre

con la condición inicial

$$\epsilon^{vp}(0) = 0$$

Adaptación de la ley de Lemaitre a la mecánica de suelos.

Para tomar en cuenta un eventual dominio de elasticidad hacemos:

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

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 σ por el desviador S

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

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

La ley completa se vuelve entonces:

$$\epsilon = \frac{S}{E} + \left(\frac{S - 2C}{k} \right)^n t^n$$

La sal se comporta como un líquido de alta viscosidad. Esta viscosidad explica que el análisis de resultados de corta duración hayan conducido a atribuir a la sal una viscosidad que es más que aparente. Además, varios ensayos de relajación muestran una cohesión más débil cuando la velocidad es más lenta, lo cual es 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:

$$\varepsilon = \frac{S}{E} + \left(\frac{S}{k}\right)^p t^\alpha$$

α = 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 α variando de 0 a 1.

CAPITULO 6

APLICACIÓN DEL MODELO DE LEMAITRE.

6.1 HIPOTESIS DEL MODELO.

Las hipótesis que se plantean para el desarrollo de la ecuación constitutiva se derivan a partir de los resultados presentados en la *Ref. 4*, y son las siguientes:

- a) La deformación de la roca sal gema, en cualquier dirección, es posible definirla en función de su deformación distorsional.

Esto a partir de los resultados obtenidos en la tesis mencionada anteriormente, ya que la deformación volumétrica se genera principalmente durante la aplicación de la presión, y la deformación distorsional se genera únicamente durante la aplicación del esfuerzo desviador constante.

De lo anterior se deduce que tanto el volumen como la forma del material son variables durante el desarrollo de la prueba.

Así se concluye que la deformación del material se define en toda dirección por la suma de una deformación volumétrica más una deformación distorsional, en esta dirección.

$$\epsilon_i = \epsilon_v + \epsilon_m$$

b) La deformación distorsional del material es posible definirla a través de los modelos de Lemaitre y Kelvin, los cuales son sometidos a un esfuerzo desviador constante. Derivado de esta hipótesis es posible deducir que la deformación total del modelo está dada por la suma de las deformaciones de los cuerpos que lo constituyen o sea.

$$\epsilon_T = \epsilon_E + \epsilon_{vp} + \epsilon_v$$

Definiendo las características mecánicas de los diferentes elementos del modelo a partir de los resultados de las pruebas de laboratorio y considerando la aplicación de un esfuerzo desviador constante (σ), el

modelo será capaz de representar el comportamiento distorsional de la roca sal gema sometida a compresión uniaxial isotérmica.

c) 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 depende 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.**

6.2 PRUEBAS DE FLUENCIA.

Las pruebas de fluencia tienen por objeto conocer el comportamiento de la sal con el tiempo y con un desviador constante, cuando la carga aumenta, la sal presenta una deformación (elástica, instantánea y reversible), manteniendo la carga constante con una deformación rápida, esta es pues una fase de fluencia secundaria que caracteriza la totalidad de los desplazamiento medidos a largo plazo dentro de una cavidad. Cuando el desviador es

demasiado importante, aparece la fluencia terciaria con deformaciones más pequeñas, pero una velocidad de deformación más alta que lleve hasta la ruptura.

6.2.1 Metodología de selección de muestras para desarrollo de pruebas de fluencia.

Para obtener resultados convenientes de las pruebas en núcleos de roca de sal se debe seguir una metodología para seleccionar las muestras capaces de proporcionar parámetros de fluencia muy desfavorables.

El método que se desarrolló, se apoya en un análisis de los coeficientes de viscosidad que se definen con la ecuación constitutiva desarrollada en el departamento de Civil Concreto del IMP para el análisis del comportamiento de la roca sal gema, sometida a pruebas triaxiales de compresión con esfuerzos desviadores variables y temperatura constante, y así seleccionar las muestras con más posibilidades de presentar comportamientos extremos de fluencia (máximo y mínimo) y estas se someterán a pruebas de fluencia con cargas incrementales, para así obtener las curvas esfuerzo-deformación, las cuales definirán la deformación en la cual el material inicia su trabajo íntegro, y a partir del cual se debe considerar a la curva

deformación-tiempo para definir los parámetros de fluencia que rigen su comportamiento.

Como parte complementaria de la metodología de selección de las muestras se requirió efectuar una serie de mediciones de velocidad de ondas P y S de las probetas a someter a pruebas de fluencia, para compararlas con las mediciones realizadas antes de someterlas a las pruebas que se efectuaron en el IIE y así inferir el grado de alteración actual y correlacionarlo posteriormente con los coeficientes de viscosidad calculados y una última medición de velocidades de ondas P y S, la cual comparada con las dos anteriores dan indicio del grado de alteración que sufre la muestra al someterla a la prueba de fluencia en compresión uniaxial a temperatura constante.

Después de aplicar la ecuación constitutiva que analiza las características de deformabilidad de la roca sal gema en pruebas de compresión triaxial con esfuerzo desviador variable y temperatura constante, se puede desarrollar una metodología para la selección de muestras que proporcionen parámetros de fluencia.

Las muestras seleccionadas por el procedimiento anterior fueron las utilizadas en pruebas de fluencia para definir las características de

deformabilidad de las mismas, y en la evaluación de los parámetros de fluencia del modelo de Lemaitre.

Las probetas que se utilizaron fueron labradas cilíndricamente (fig. 8) y extraídas de núcleos tomados de la cavidad TUZ-306 y dividida en partes que a su vez se subdividieron, esta manera de fragmentar los núcleos es la que ha dado nombre a las muestras, tomándose primero el número de núcleo extraído (N), después el número correspondiente a la parte que se tomó del núcleo (P), y entre paréntesis el número de división de esta parte, siendo las siguientes probetas las utilizadas y sus dimensiones (tabla 1):

MUESTRA	ALTURA h (cm.)	DIAMETRO ϕ (cm.)
N1 - P26(1)	9.23	5.016
N1 - P30(1)	9.225	5.011
N1 - P30(2)	9.226	5.006
N3 - P1(2)	9.208	4.988
N3 - P2(1)	9.218	4.994
N3 - P2(2)	9.182	5.019

Tabla 1. Dimensiones de las muestras ensayadas.



Figura 8. Probetas de roca sal goma ensayadas

6.2.2 Equipo de laboratorio

El desarrollo de las pruebas se realizó en equipos de medición llamados "flujómetros", los cuales miden la deformación de las probetas provocado por el calentamiento y la aplicación de carga sobre las mismas.

La estructura principal del dispositivo y que resguarda la muestra que se ensaya, se apoya sobre una mesa metálica fija y esta hecha de madera, por ser este un material cuya conductividad térmica es muy baja (fig. 9), y el interior se forro con lana mineral por ser un aislante térmico bastante

eficiente; la instalación utilizada para el incremento de la temperatura consta de tres focos de 21 watts por 12 volts conectado a un termostato que controla el tiempo de encendido y apagado del sistema para no exceder la temperatura especificada; la temperatura generada en el dispositivo es verificada por un termómetro colocado en el interior para verificar en forma sencilla el funcionamiento del aislante por los tiempos de apagado y encendido del sistema, asimismo hacer el ajuste del sensor térmico del termostato. (fig. 10).

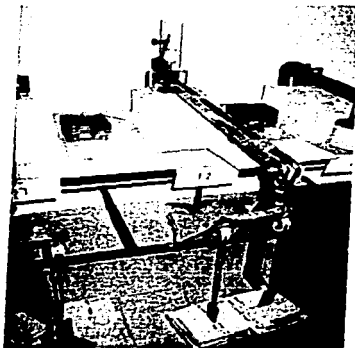


Figura 9. Flujómetro uniaxial

Con este equipo solo es posible medir desplazamientos verticales a través de un micrómetro.

La probeta ha ensayar se coloca en el interior, confinada por dos placas metálicas, las cuales se comprimen, aplicando una carga a través de pesas de acero, está carga se transmite colocando las pesas en el extremos de un brazo metálico y a través de un juego de poleas. (fig. 11).

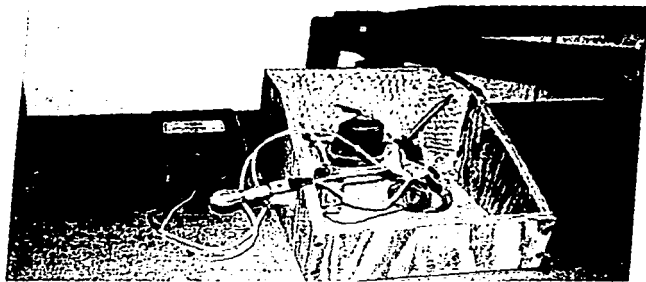


Figura 10. Arreglo interior del flujómetro uniaxial

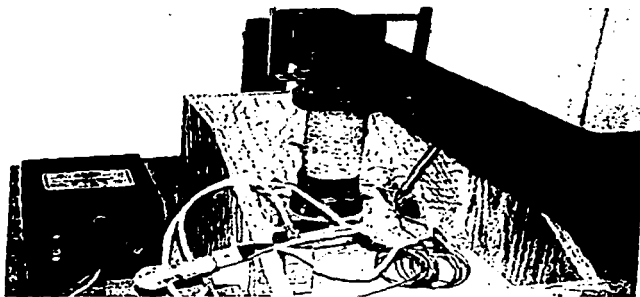


Figura 11. Colocación de muestra de sal en el flujometro uniaxial

Para obtener los resultados esperados, se consideraron tres aspectos principales en el diseño del equipo que son: el mecánico, el térmico y la calibración.

En el diseño mecánico se consideraron los siguientes requisitos:

- a) Aplicación de una carga constante por tiempo prolongado.
- b) Incremento y decremento de la carga en forma súbita.
- c) Incremento y decremento de la carga por etapas.

Para la carga máxima de diseño, se tomó como límite la recomendada por los asesores originales del proyecto de cavidades lixiviadas en domos salinos, la cual se restringía al 10% de la carga máxima de ruptura en pruebas de compresión uniaxial incremental que, del estudio de factibilidad de dicho proyecto, se consideró de 7 toneladas, para entonces limitar la carga de diseño a 700 Kg.

En el aspecto térmico el dispositivo se diseño considerando los siguientes requisitos:

- a) Temperatura constante con variaciones de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante el tiempo de realización de la prueba.**
- b) Operación de un rango de temperatura de 30 a 100°C**

La calibración del equipo se basó en el aspecto mecánico y su objetivo fue el de verificar la magnitud de las cargas aplicadas comparadas con las calculadas, permitiendo así, definir la carga real aplicada a la muestra, de acuerdo a la carga real aplicada al equipo, ya que por experiencia se sabe que ningún equipo es capaz de reproducir íntegramente los efectos calculados en el diseño. Así para medir con precisión la carga real se utilizó un anillo de carga, cuya deformación permitió definir con certeza dicho efecto.

6.2.3 Descripción del ensayo de fluencia uniaxial isotérmica.

La pruebas inician con el calentamiento de las muestras a una temperatura constante de 50°C con variaciones de 2°C durante un lapso relativamente corto de tiempo que dura aproximadamente siete días, en este periodo se registran continuamente los desplazamientos axiales, temperatura y tiempo, con los cuales se ajusta la temperatura y se determina el momento de aplicación del primer incremento de carga cuando se alcanza la máxima expansión del material por calentamiento, actuando solo el peso propio del brazo de aplicación de carga. Se aplican dos incrementos de carga y uno de descarga, durante este periodo el registro de deformaciones y temperatura se lleva a cabo durante lapsos de 1, 2 y 5 minutos durante la primera hora, posteriormente se continua a intervalos mayores.

Los incrementos de carga, los tiempos de aplicación, los esfuerzos y las variaciones de longitud se presentan a continuación para cada muestra.(tabla 2).

En la etapa de calentamiento se observa que todas las muestras sufren un aumento de longitud por dilatación aproximadamente igual, en el transcurso del calentamiento las muestras recuperan su deformación por el empuje del peso propio del equipo; posteriormente en la etapa de aplicación del primer

MUESTRA	CARGA (Kg.)	ESFUERZO (Kg./cm)	TIEMPO DE CARGA. (días)	VARIACION DE LONGITUD (mm)
N1 - P26(1)	359.2	19.52	48	0.413
	658.31	35.8	23	0.028
	0.0	0.0	13	0.184
N1 - P30(1)	359.2	19.52	40	1.147
	658.31	35.8	45	0.068
	0.0	0.0	18	0.177
N1 - P30(2)	420.77	21.38	47	2.111
	762.92	38.77	43	0.1
	0.0	0.0	13	1.09
N3 - P1(2)	359.2	19.52	41	0.103
	658.31	35.8	139	0.044
	0.0	0.0	0.04	0.05
N3 - P2(1)	359.2	19.52	50	1.168
	658.31	35.8	38	0.07
	0.0	0.0	37	0.012
N3 - P2(2)	359.2	19.52	47	0.734
	658.31	35.8	63	0.058
	0.0	0.0	0.16	0.065

Tabla 2. Incrementos de carga

incremento se observa en un primer momento una disminución mayor de longitud por el cierre de fisuras entre partículas y se hace paulatinamente menor la velocidad de deformación en los primeros veinte días aproximadamente, hasta que se uniformiza dicha velocidad; entonces se

aplica el segundo incremento de carga donde se observa que la magnitud de la deformación es menor y la velocidad de deformación se hace uniforme en un lapso de tiempo también menor; finalmente se descargan las muestras totalmente, en esta etapa se observa que las muestras se recuperan aumentando su longitud abruptamente para posteriormente reducir su velocidad de recuperación paulatinamente; al disminuir la temperatura a la temperatura ambiente, se observa también que las muestras dejan de expandirse y disminuyen su longitud.

De todos los ensayos se obtienen las gráficas deformación-tiempo (figs. 12-17).

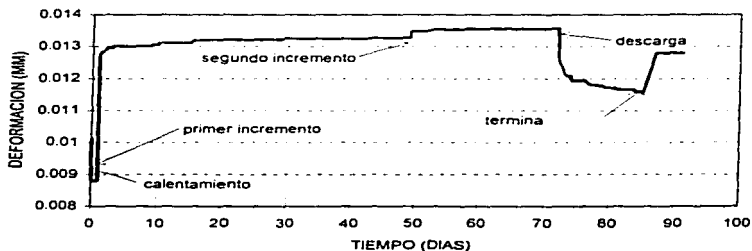


Figura 12. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N1-P26(1).

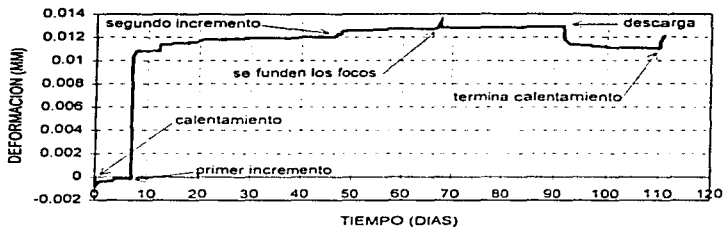


Figura 13. Gráfica deformación tiempo de la muestra N1-P30(1).

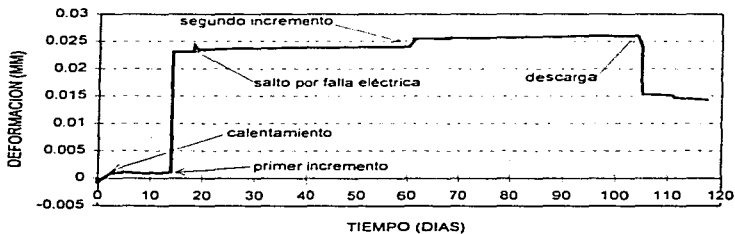


Figura 14. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N1-P30(2).

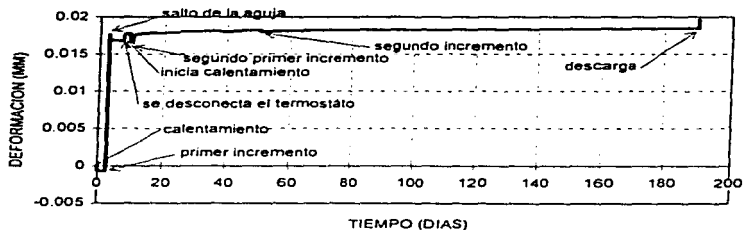


Figura 15. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N3-P1(2)

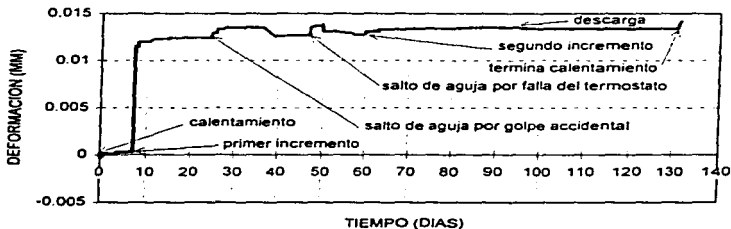


Figura 16. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N3-P2(1).

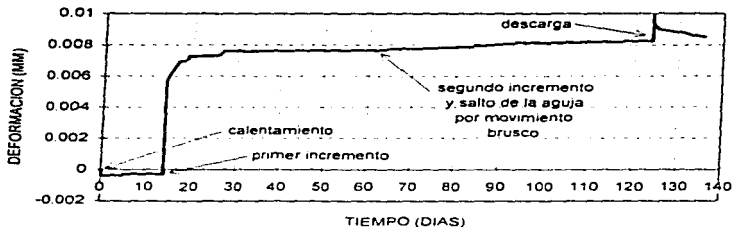


Figura 17. Gráfica deformación-tiempo de la muestra N3-P2(2).

Es importante hacer notar que la muestra N1-p26(1) (fig. 12) fue utilizada para los ensayos de calibración del equipo, aplicándole pequeños incrementos de esfuerzos, por lo cual la disminución de su longitud fue menor al de las otras muestras. También se puede observar que la recuperación de la muestra N3-p2(1) (fig. 16) al momento de la descarga es menor con respecto a las otras muestras ensayadas.

Cuatro de las gráficas presentan algunas alteraciones en los periodos de incremento de carga principalmente por fallas en el equipo; en la muestra N1-P30(2) (fig. 14) se tiene una falta de suministro eléctrico en el primer incremento, en la muestra N1-P30(1) (fig. 13) se funden los focos en el

segundo incremento, en la muestra N3-P2(1) (fig. 16) existe un salto de la aguja por un golpe accidental y una segunda discontinuidad se da por una falla en el termostato y en la muestra N3-P2(2) (fig. 17) se aplica de una manera brusca la carga por lo que no se puede apreciar la deformación al segundo incremento. En todos los casos se observa un incremento repentino de la deformación, pero es importante el hecho de que aún transcurrido en algunos casos hasta 15 días, la roca regresa a la trayectoria de fluencia original.

La muestra N3-P1(2) (fig. 15) muestra muchas irregularidades, ya que el micrómetro se descompuso, lo cual no se pudo detectar inmediatamente, pero finalmente se puede observar que las pendientes en ambos tramos del primer y segundo incremento coinciden con las de la curva obtenida con la ecuación de Lemaitre. (fig. 21).

6.3 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LEMAITRE.

De los resultados de las seis muestras ensayadas, se obtienen las curvas deformación-tiempo, estas curvas serán reproducidas mediante la aplicación

de la ecuación constitutiva de Lemaitre para analizar la estabilidad de cavidades en domos salinos.

Para poder obtener la representación de estas curvas, se toman las deformaciones registradas en diferentes lapsos de tiempo de los transcurridos durante el ensaye para cada incremento de carga; también para cada muestra se toma el esfuerzo aplicado y el módulo de elasticidad del cuerpo de Maxwell para sustituirlos en la ecuación constitutiva de Lemaitre, luego por medio de una serie de tanteos se obtienen los parámetros α , β y k que sean los que mejor ajusten la curva del modelo con la curva obtenida en el laboratorio. (figs. 18-23).

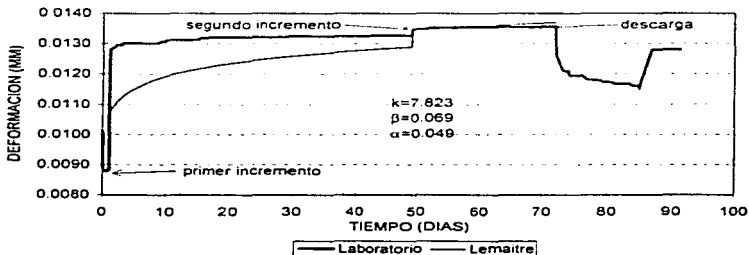


Figura 18. Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N1-P30(1).

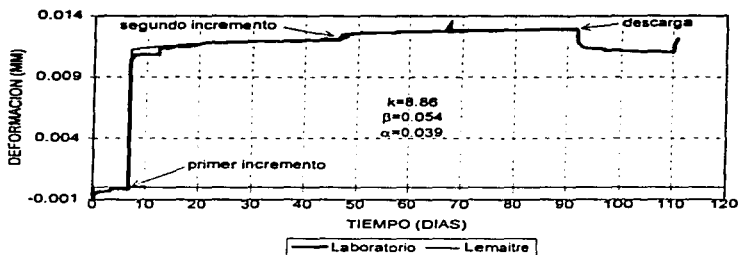


Figura 19. Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N1-P30(1).

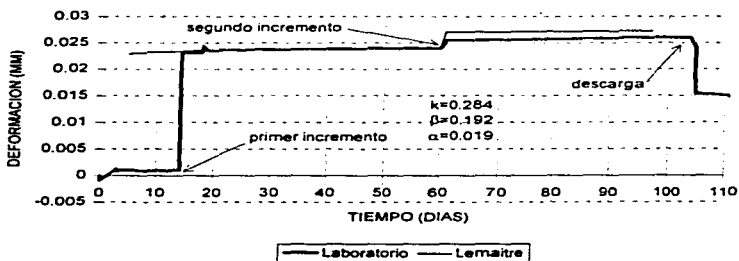


Figura 20. Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N1-P30(2).

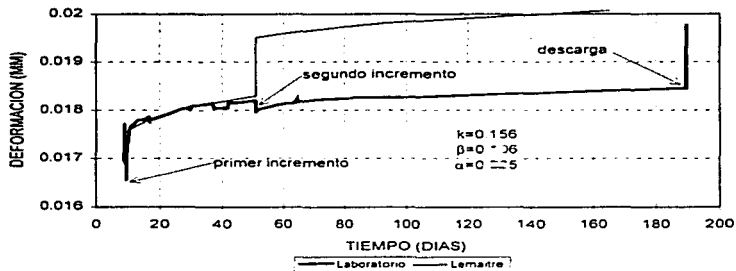


Figura 21. Gráfica comparativa entre curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N3-P1(2).

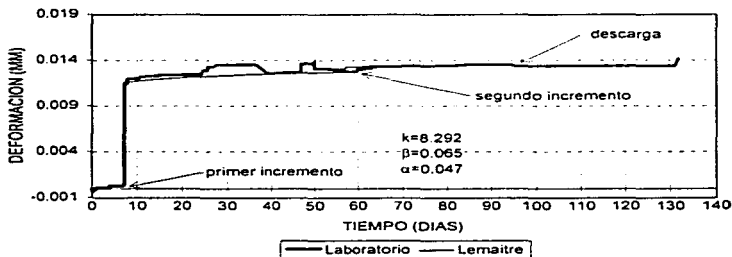


Figura 22. Gráfica comparativa entre la curva de laboratorio y de Lemaitre para la muestra N3-P2(1).

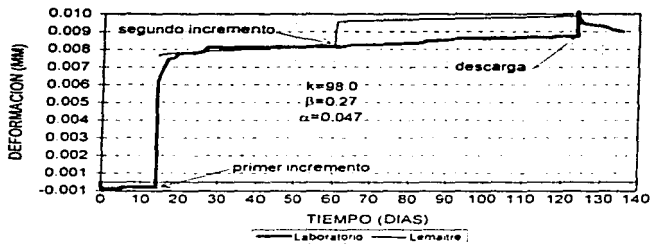


Figura 23. gráfica comparativa entre curva de Laboratorio y de Lemaitre para la muestra N3-P2(2).

Para la aplicación del modelo de Lemaitre es necesario definir el módulo de elasticidad para aplicar en el cálculo, considerando que la deformación inicial producida en la aplicación del esfuerzo desviador es de tipo elástica, como se observa en la etapa de descarga, por lo anterior se decidió utilizar el módulo de elasticidad definido por el cuerpo de Maxwell.

Los esfuerzos y módulos de elasticidad utilizados son los enlistados en la tabla 3.

MUESTRA	INCREMENTO	σ	E_M
N1 - P26(1)	1°	19.52	113753
	2°	35.78	
N1 - P30(1)	1°	19.52	51351
	2°	35.77	
N1 - P30(2)	1°	18.25	28316
	2°	33.45	
N3 - P1(2)	1°	18.38	52686
	2°	33.68	
N3 - P2(1)	1°	18.34	104758
	2°	33.61	
N3 - P2(2)	1°	18.16	67004
	2°	33.38	

Tabla 3. Esfuerzos y módulos de elasticidad.

Los parámetros α , β y K son de fundamental importancia en este estudio debido a que el comportamiento de fluencia está en función de los valores para cada uno de ellos en las respectivas muestras.

El coeficiente K queda definido para la fase de aplicación de esfuerzos cuya mayor influencia se ve en la aplicación de la primera carga y un poco menos al ser aplicada la segunda carga, a partir de lo observado podemos ver que su comportamiento e influencia en las curvas es lineal.

El coeficiente α se define en la curva a partir de su influencia en la velocidad de fluencia de la roca y puede observarse por su influencia directa en la pendiente de la curva deformación-tiempo.

El coeficiente β queda definido por la magnitud de las deformaciones axiales obtenidas durante la aplicación del esfuerzo desviador y se observa en las curvas cuando se presentan los incrementos de esfuerzo.

Con la aplicación de la ecuación que representa el modelo de Lemaitre se obtuvieron los parámetros para cada prueba y se muestran en la tabla 4.

MUESTRA	α	β	K
N1 - P26(1)	0.049	0.069	7.823
N1 - P30(1)	0.039	0.054	8.86
N1 - P30(2)	0.019	0.192	0.284
N3 - P1(2)	0.025	0.106	0.156
N3 - P2(1)	0.047	0.065	8.292
N3 - P2(2)	0.047	0.270	98.0

Tabla 4. Parámetro de Lemaitre obtenidos en los ensayos de fluencia.

Para efectuar el ajuste, inicialmente se fijaron como puntos de partida los obtenidos en las curvas de laboratorio y los valores iniciales de los parámetros fueron tomados del informe de Geostock para el pozo 306 con los

cuales se vio que la curva calculada no ajustaba con la real por lo que se hicieron variar hasta que se ajustaron los puntos de la curva y así definir los parámetros.

El procedimiento anterior fue aplicado en todos los ensayos, con lo que se obtuvieron los parámetros que describían con más exactitud las curvas obtenidas en laboratorio.

6.4 CÁLCULO DE VELOCIDADES DE DEFORMACION.

Es importante conocer la velocidad de deformación de las muestras para poder tener más elementos que nos permitan conocer el comportamiento a través del tiempo que puede tener una cavidad y de esta manera realizar un análisis de estabilidad lo más cercano a la realidad.

Se puede decir que la velocidad de deformación es diferente en cada muestra dependiendo de la composición de la sal, ya que por el hecho de encontrarse muchas veces asociada a minerales de potasio o magnesio son más fuentes, además depende de las condiciones de confinamiento en que se encuentre, como puede ser la presión geostática debido a el peso de los estratos sobreyacentes.

La velocidad de deformación se calculó analíticamente considerando que esta se hacía constante tanto para el primero, como para el segundo incremento de carga (figs. 24-29), en estos tramos se obtuvo la pendiente en mm/día es decir la velocidad de deformación, lo cual arrojó los siguientes resultados (tabla 5).

MUESTRA	VELOCIDAD 1 mm/día.	VELOCIDAD 2 mm/día.
N3 - P2(1)	8.0×10^6	6.9×10^6
N1 - P30(2)	6.8×10^6	12.0×10^6
N1 - P30(1)	5.8×10^6	6.9×10^6
N3 - P1(2)	5.0×10^6	2.0×10^6
N3 - P2(2)	2.0×10^6	3.6×10^6
N1 - P26(1)	1.9×10^6	1.3×10^6

Tabla 5. Velocidades de deformación

Tomando las velocidades del primer incremento en forma descendente (tabla 5) podemos observar que las velocidades de deformación del segundo incremento siguen el mismo orden descendente, a excepción de las muestras N1-P30(2) (fig. 25) y N3-P2(2), (fig. 28) siendo la primera más irregular y la segunda muy próxima a el orden que rige en las velocidades del primer incremento.

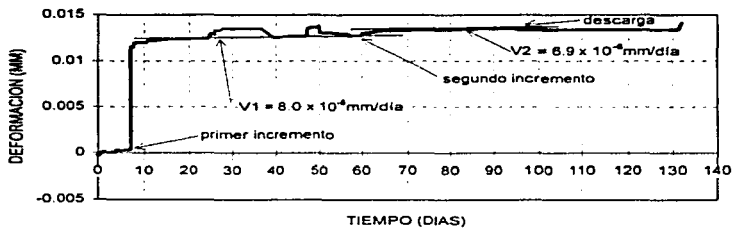


Figura 24. Velocidades de deformación de la muestra N3-P2(1).

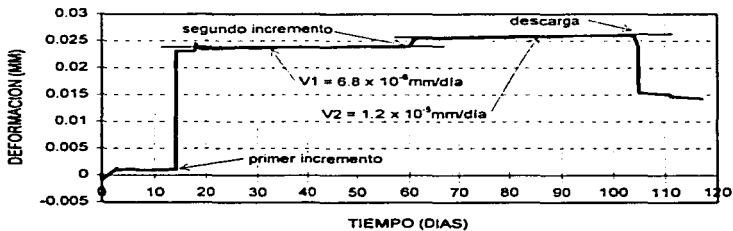


Figura 25. Velocidades de deformación de la muestra N1-P30(2).

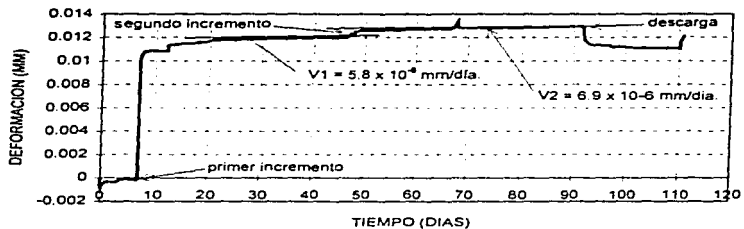


Figura 26. Velocidades de deformación de la muestra N1-P30(1).

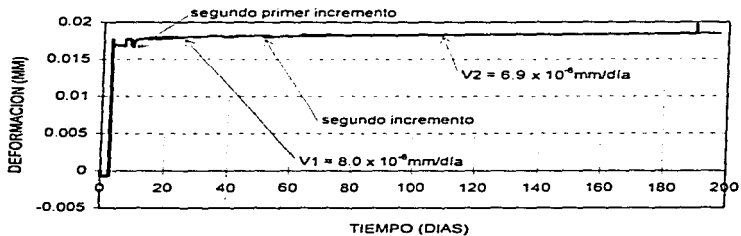


Figura 27. Velocidades de deformación de la muestra N3-P1(2)

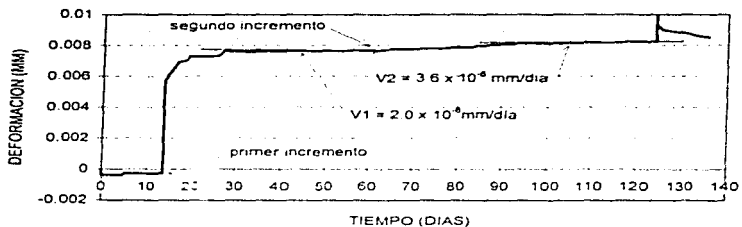


Figura 28. Velocidades de deformación de la muestra N3-P2(2).

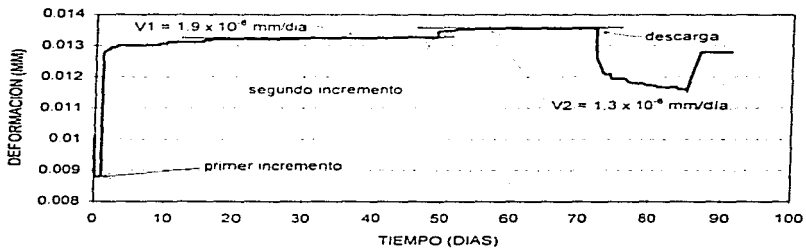


Figura 29. Velocidades de deformación de la muestra N1-P26(1).

De las muestras ensayadas de acuerdo a la tabla 5 se observa que la que presentó mayor velocidad de deformación fue la N3-P2(1) (fig. 24) y la de menor velocidad de deformación en términos generales fue la muestra N1-P26(1) (fig. 29).

De las muestras que no coinciden se justifica por haber sido las que tuvieron más problemas durante el desarrollo de la prueba, como fueron movimientos involuntarios del micrómetro, así como fallas en el equipo.

A continuación se correlacionarán las velocidades de deformación obtenidas en el presente trabajo con la deformabilidad inferida de los coeficientes de viscosidad determinados en la *Ref. 4*.

En la tabla 7 se puede observar que los menores coeficientes de viscosidad en dirección axial son los correspondientes a la muestra N1-P26(1), y que el coeficiente de viscosidad en la dirección axial de la muestra N1-P30(2) es el mayor, de tales observaciones, se infirió que la roca con mayor deformabilidad es la muestra N1-P26(1) y la de menor deformabilidad es la muestra N1-P30(2).

MUESTRA	v axial
N3 - P2(1)	4.75 X 10 ⁶
N1 - P30(2)	5.2 X10 ⁶
N1 - P30(1)	5.0 X10 ⁶
N3 - P1(2)	4.55 X 10 ⁶
N3 - P2(2)	4.27 X10 ⁶
N1 - P26(1)	3.75 X 10 ⁶

Tabla 6. Coeficientes de viscosidad del cuerpo de Maxwell.

De la tabla 5 podemos observar que la muestra N1-P26(1) fue la que mostró menor velocidad de fluencia y el menor coeficiente de viscosidad (tabla 6), en tanto que la N1-P30(2) que presentó el mayor coeficiente de viscosidad (tabla 6) en la tabla 5, aparece como una de las que presentó mayor velocidad de fluencia, además si correlacionamos todas las deformabilidades inferidas con las velocidades de fluencia, podemos observar que a mayor velocidad de fluencia se tiene un coeficiente de viscosidad mayor y viceversa.

CAPITULO 7

ANÁLISIS COMPARATIVO.

Para la obtención de los parámetros que permitan realizar el análisis de estabilidad de un cavidad lixiviada en un domo salino, se han desarrollado otros modelos utilizando como base el de Lemaitre con ciertas adaptaciones o modificaciones, buscando poder reproducir con mayor fidelidad el comportamiento de la roca sal gema, uno de estos modelos modificados se apoya en las ecuaciones de Lemaitre y Kelvin.

En el capítulo anterior se pudo constatar que las gráficas deformación-tiempo obtenidas con el modelo de Lemaitre ajustan satisfactoriamente con las gráficas obtenidas en laboratorio, pero para dar mayor validez a este ajuste se puede hacer la comparación entre este modelo y el modelo modificado de Lemaitre-Kelvin a través de las gráficas deformación-tiempo.

7.1 MODELO MODIFICADO DE LEMAITRE (LEMAITRE - KELVIN).

El modelo analógico del cuerpo de Kelvin está constituido por un amortiguador y un resorte conectados en paralelo donde es posible deducir las siguientes igualdades.

$$\epsilon_A = \epsilon_R = \epsilon_A \quad \text{y} \quad \sigma_R = \sigma_A = \sigma_A$$

$$\sigma_A = \sigma_R + \sigma_A$$

Analizando individualmente cada elemento del modelo se establece que el comportamiento del resorte y el amortiguador están definidos por las ecuaciones:

$$\epsilon_R = \frac{\sigma_R}{2G_R} \quad \text{o sea} \quad \sigma_R = \epsilon_R 2G_R$$

$$\epsilon = \frac{\sigma_A}{2\nu_K} \quad \text{o sea} \quad \sigma_A = \epsilon_A 2\nu_K$$

Sustituyendo ambas ecuaciones se obtiene la ecuación que rige el comportamiento del modelo.

$$\sigma_e = \epsilon_e 2G_e + \epsilon_e 2\nu_e$$

Lo cual se reduce a la siguiente ecuación diferencial:

$$2\nu_e \frac{d\epsilon_e}{dt} = \sigma - 2G_e \epsilon_e$$

donde
$$\frac{d\epsilon_e}{\epsilon_e} = \frac{\sigma dt}{2\nu_e} - \frac{2G_e}{2\nu_e} dt$$

La solución de esta ecuación considera un G_e constante el cual proporciona la ecuación que define el cuerpo de Kelvin, que es la que analiza el comportamiento de un material viscoelástico, pero si ahora se considera la aplicación de un esfuerzo desviador constante, y recordamos que $\lambda_e = \frac{G_e}{\nu_e}$ por lo tanto se obtiene la ecuación:

ESTA TAREA NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$\frac{dc_s}{dt} + \lambda c_s = \frac{\sigma}{2\nu_s}$$

donde $\lambda = \frac{G_s}{\nu_s} = \frac{E_s}{2\nu_s(1 + \mu_s)}$

Finalmente resolviendo esta ecuación, que es una ecuación diferencial lineal de primer orden, y considerando las condiciones iniciales para $t_0 = 0$, donde la deformación inicial del modelo es nula, o sea $c_0 = 0$, se obtiene la ecuación que define la deformación del modelo de Kelvin, en función del tiempo durante el incremento de carga controlada, llegando así a la ecuación siguiente:

$$c_s = \left(\frac{\sigma}{2G_s} \right) (1 - e^{-\lambda t})$$

Y que en términos de E_s y μ_s se obtiene:

$$c_s = \left(\frac{\sigma(1 + \mu_s)}{E_s} \right) (1 - e^{-\lambda t})$$

El modelo modificado de Lemaitre se conforma del modelo descrito en el capítulo 5.5. y se obtiene:

$$\epsilon_T = \left(\frac{\alpha}{E_s}\right) + \left(\frac{\alpha}{K}\right)^n t^n + \left(\frac{\alpha(1+\mu_s)}{E_s}\right)(1 - e^{-\lambda t})$$

Este modelo está conformado por la suma de las deformaciones principales que ocurren durante la fluencia del material, la deformación elástica y la deformación viscoplástica, la primera representada por el cuerpo de Hooke y la segunda por el modelo de Lemaitre.

7.2 COMPARACIÓN CON EL MODELO DE LEMAITRE-KELVIN.

Como se mencionó anteriormente se realizó la comparación entre el modelo de Lemaitre y el modelo de Lemaitre-Kelvin, para lo cual se obtuvieron las gráficas deformación-tiempo con el modelo de Lemaitre-Kelvin (figs. 30-35), utilizando los mismos parámetros con los que se obtuvo la curva para el modelo de Lemaitre y así se pudo observar como se modificaba la curva y determinar que modelo representaba con más exactitud la curva deformación-tiempo obtenida en laboratorio.

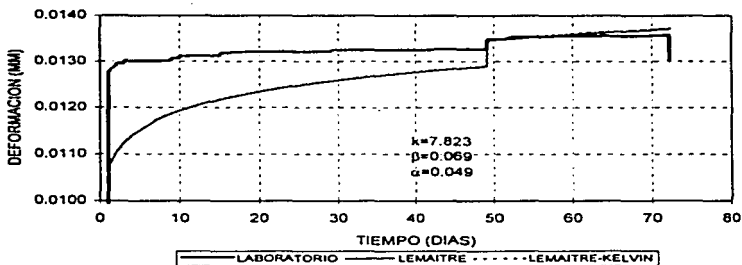


Figura 30. Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N1-P26(1).

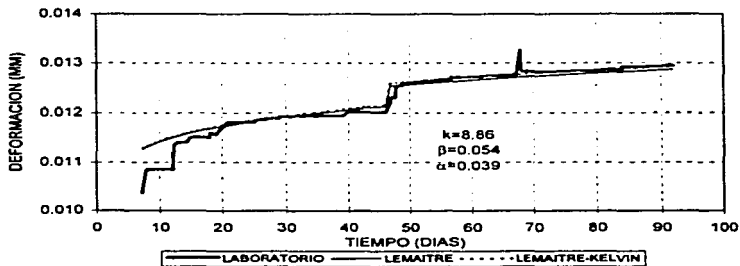


Figura 31. Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N1-P30(1).

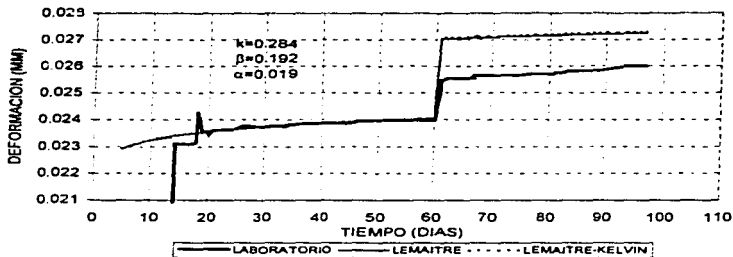


Figura 32. Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N1-P30(2)

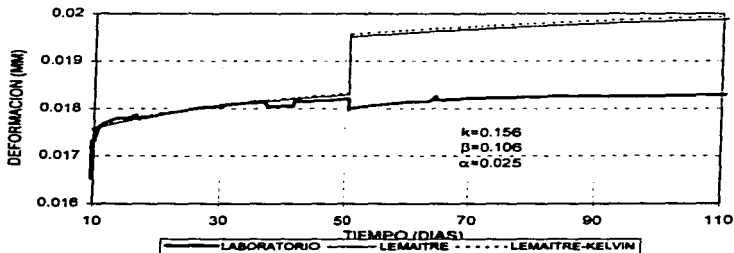


Figura 33. Gráfica comparativa entre curva de Lemaitre y Lemaitre-Kelvin de la muestra N3-P1(2).

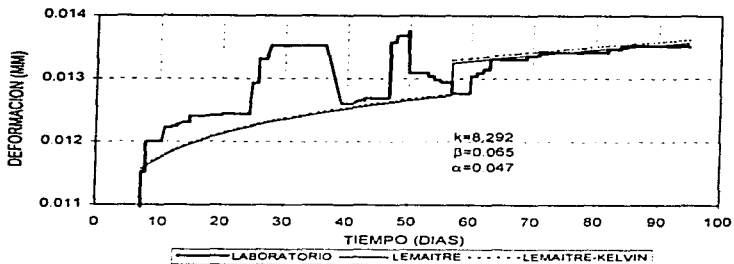


Figura 34. Gráfica comparativa entre curva de Lemaître y Lemaître-Kelvin de la muestra N3-P2(1).

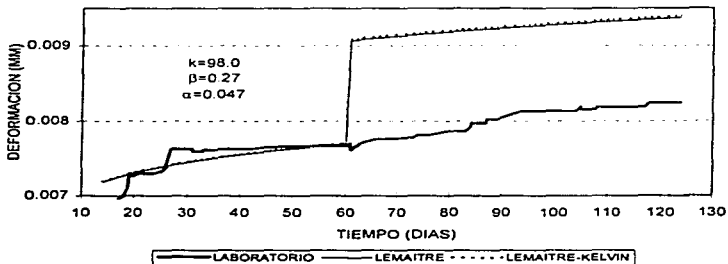


Figura 35. Gráfica comparativa entre curva de Lemaître y Lemaître-Kelvin de la muestra N3-P2(2).

Para la aplicación de la fórmula deducida del modelo de Kelvin intervienen las siguientes constantes para cada muestra (tabla 7):

MUESTRA	E_k	μ_k	G_k	ν_k	λ
N1 - P26(1)	3834	0.811	10580.89	115740.74	0.09142
N1 - P30(1)	15677	0.718	4562.57	115740.74	0.03942
N1 - P30(2)	13737	0.638	4193.22	115740.74	0.03623
N3 - P1(2)	13508	0.656	4078.5	115740.74	0.03524
N3 - P2(1)	17093	0.559	5482.04	115740.74	0.04736
N3 - P2(2)	30417	0.712	8883.47	115740.74	0.07675

Tabla 7.- Constantes utilizadas en el modelo modificado de Lemaitre.

Los valores de las constantes anteriores fueron obtenidos de la Ref. 4. y son: módulo de elasticidad de Kelvin, relación de poisson de Kelvin, módulo de rigidez al corte de kelvin, viscosidad dinámica de Kelvin.

Las gráficas obtenidas por el modelo modificado de Lemaitre (Lemaitre-Kelvin), como se puede observar en las figuras 30 a 35, son casi idénticas a las obtenidas por el modelo de lemaitre, observandose una insignificante diferencia en la deformación y una tendencia de la curva de Lemaitre-Kelvin a

quedar ligeramente arriba de la de Lemaitre, asimismo la diferencia entre una y otra curva es menor en el primer incremento de carga.

De las 6 gráficas anteriores, se ve que la que menor diferencia presenta entre las curvas obtenidas de los modelos es la N1-P26(1) (fig 30), y la que presentó la mayor diferencia fue la N3-P1(2), siendo la menor diferencia de 0 milímetros y la máxima de 0.00004 mm. por lo que se puede decir que no existe un ajuste significativo utilizando el modelo de Lemaitre-Kelvin.

CAPITULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

8.1. CONCLUSIONES.

Con base en los ensayos y análisis realizados se pueden exponer las siguientes conclusiones:

1. El modelo de Lemaitre, propuesto en el presente trabajo de tesis, reproduce con suficiente aproximación el comportamiento en fluencia de la roca sal gema sometida a esfuerzos desviadores constantes de compresión uniaxial isotérmica.
2. La eficiencia del equipo es buena, ya que en la curva deformación-tiempo se manifiesta claramente el comportamiento de fluencia de la muestra.

3. De los análisis gráficos y analíticos y de los ensayos de laboratorio podemos concluir que la muestra que mostró mayor magnitud de deformación fue la N1-P30(2), y la menor fue la muestra N1-P26(1).
4. Del cálculo analítico de la velocidad de fluencia se observa que la muestra N3-P2(1) presenta la mayor velocidad y la de menor velocidad fue la muestra N1-P26(1).
5. Aparentemente del análisis de las velocidades de fluencia con respecto a la deformabilidad inferida de los coeficientes de viscosidad se tiene que a un coeficiente de viscosidad mayor corresponde una velocidad de fluencia mayor, y a un menor coeficiente de viscosidad corresponde una velocidad menor de fluencia.
6. La muestra N1-P26(1) fue sometida a pequeños esfuerzos desviadores durante la calibración del equipo antes de ser ensayada, lo que posiblemente se reflejó en su menor magnitud de deformación.
7. El criterio utilizado para la definición de los parámetros es de vital importancia debido a que de estos dependen los resultados que se obtengan, un factor que afecta en gran manera es la precisión del equipo de laboratorio y la frecuencia con que se hagan los registros.

8. A pesar de los movimientos involuntarios del micrómetro, la roca regresa a su trayectoria de fluencia original.

9. Posiblemente en el primer incremento de carga la mayor deformación inicial de las muestras es producto del cierre de fisuras.

8.2. RECOMENDACIONES.

Con el fin de que se sigan desarrollando estudios relacionados con el comportamiento de la roca sal gema, se exponen las siguientes recomendaciones producto del desarrollo del presente trabajo:

- 1. Es conveniente implementar en los ensayos de compresión uniaxial la medición de deformaciones transversales durante todo el desarrollo de la prueba para efectuar una correlación completa con las deformaciones axiales.**
- 2. Para analizar el comportamiento de fluencia del material como se encuentra en su estado natural, es necesario efectuar ensayos de fluencia triaxiales y por tiempos más prolongados.**

3. Es conveniente que al hacer la pruebas de fluencia se hagan varios incrementos de carga, para así contar con un registro más explícito y lograr un mejor ajuste de las curvas deformación-tiempo.
4. Para poder realizar una comparación más precisa entre diferentes muestras, se deben programar los ensayos para que tengan el mismo número de incrementos de carga y descarga, y con periodos de tiempo iguales.
5. Para evitar en futuros ensayos las irregularidades ocurridas en la curva deformación-tiempo de las diferentes muestras ensayadas, se deberá evitar al máximo las reparaciones y maniobras, tanto en la muestra, como en el equipo de ensaye, así como las interrupciones en la temperatura, también es importante contar con un espacio exclusivamente destinado a este tipo de trabajos y no permitir la circulación de personas ajenas al laboratorio que pudieran interferir con los ensayos.
6. Se deberá revisar el sistema de incremento de carga, ya que el sistema actual en cada incremento, tiende a golpear y balancear la carga actunte, incluyendo movimiento y alteraciones en el sistema de medición de deformaciones axiales.
7. Se necesita reducir al máximo las alteraciones producto del ruido ambiental, haciendo uso de una mesa más rígida de apoyo.

8. Mejorar el sistema de control de temperatura para garantizar su funcionamiento durante las interrupciones de energía eléctrica.

GLOSARIO.

Reología.- Ciencia que estudia el comportamiento de deformación y fractura de los materiales.

Lixiviación.- Disolución de la roca de sal por medio del flujo de agua dulce.

Hidrocarburo.- Compuesto de hidrógeno y carbono. Energético.

Isotérmica.- Que tiene una temperatura constante, es decir es termicamente constante.

Salmuera.- Agua saturada al 100% con sal, producto de la lixiviación

Criogénica.- Roca formada por el enfriamiento del magma.

Acuíferos.- Depósitos naturales de agua como son lagunas o mantos de agua subterráneos.

Paleogeográfico.- Relativo a las formaciones geográficas originadas en periodos geológicos de la era paleozoica.

BIBLIOGRAFIA.

- 1. A. Arenas (1991), "Características de la roca sal gema para el diseño de almacenamientos en domos salinos", Reporte Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.**
- 2. Arenas D. A. (1985),), "Características de la roca sal gema para el diseño de almacenamientos en domos salinos", Reporte Instituto de Investigaciones Eléctricas, México.**
- 3. A. J. Alberro, R Neftali (1986), "Almacenamientos de Petróleo en Domos Salinos", Informe Instituto de Ingeniería, UNAM, México.**
- 4. Galván García E. (1993) "Estudio de las características de deformabilidad de la Roca Sal Gema sujeta a Esfuerzos Desviadores Variables y Temperatura Constante", Tesis de Grado, IPN.**
- 5. Galván García E. (1993) Desarrollo de Pruebas de Fluencia a la Roca Sal Gema en el IMP, SMMR Taxco Gro.**
- 6. Galván García E., A. Arenas (1987), "Determinación de las Propiedades Físicas y Mecánicas de la Roca Sal Gema Mediante Pruebas de Laboratorio", Segundo Congreso Nacional de Mecánica de Rocas, México.**

7. G. Voullie, S. M. Tijani, F. de Grenier (1984), "Experimental Determination of the Rheological Behavior of Tersane Rock Salt", First Conference on The Mechanical Behavior of Salt, Pennsylvania, USA.
8. I. W. Farmer and M. J. Gilbert (1984) "Time Dependent Strength Reduction of Rock Salt", First Conference on The Mechanical Behavior of Salt, Pennsylvania, USA.
9. Geostock, (1985), "Reporte de Ingeniería Básica de cavidades", IMP.
10. Gaz France (1986), "Los Almacenamientos Subterráneos de Gaz France", IMP.
11. J. Lemaitre (1983), "La Roca Sal Gema con Comportamiento Viscoplastico", Melbourne Australia E d. Nachdruck.
12. M. Langer, (1984) "The Rheological Behaviour of Rock Salt", First Conference on The Mechanical Behavior of Salt, Pennsylvania, USA.
13. López Aguirre M. (1993), "Almacenamientos de Hidrocarburos en Cavidades Salinas", Tesis IMP
14. Oviedo de L. A. Zavala B, "Análisis de muestras de sal del pozo Tuzandepetl No. 300", Reporte Instituto Mexicano del Petróleo.
15. Paredes Galeano F. (1996) , "Estudio del comportamiento en fluencia de la roca sal gema para diseño de cavidades almacenadoras de combustible". Tesis SEDENA
16. PEMEX-IMP (1984), Proyecto de Almacenamiento de Crudo en Cavidades Minadas en Domos Salinos", IMP

17. S.M. Tijani, G Voullie (1983), "Le sel gemme en tant que liquide visqueux".
International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Australia.
18. Trueba L.V. y Contreras L.E. (1991), "Estudio del comportamiento mecánico de la roca sal gema de Tuzandepetl, Ver", Reporte Instituto de Investigaciones Eléctricas. México.