

3

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

**APLICACION DE LA GEOLOGIA A LA LOCALIZACION DE
SITIOS FAVORABLES PARA LA CONSTRUCCION DE
CAVIDADES SUBTERRANEAS DESTINADAS AL
ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS**

T E S I S

Que para obtener el titulo de
INGENIERO GEOLOGO
Presenta el pasante

RICARDO CASAR GONZALEZ



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA

FACULTAD DE INGENIERIA
EXAMENES PROFESIONALES
60-1-133

Al Pasante señor RICARDO CASAR GONZALEZ
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Prof. Ing. Mariano Ruiz Vázquez, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero GEOLOGO.

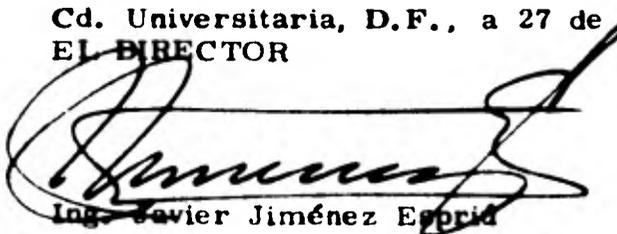
"APLICACION DE LA GEOLOGIA A LA LOCALIZACION DE SITIOS FAVORABLES PARA LA CONSTRUCCION DE CAVIDADES SUBTERRANEAS DESTINADAS AL ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS"

Resumen

1. - Introducción
2. - Cavidades subterráneas de almacenamiento.
3. - Selección de la localidad
4. - Discusión
5. - Referencias

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 27 de Julio de 1981
EL DIRECTOR



Ing. Xavier Jiménez Espriú

JJE'MRV'mdb.

A MIS PADRES: ISAIAS Y ESTELA

AGRADECIMIENTOS.

Mi agradecimiento al Ing. Mariano Ruiz Vázquez por la ayuda, consejos y observaciones proporcionados en la dirección de esta tesis.

Expreso mi reconocimiento y gratitud a la Dra. Carmen Pedrazzini Nessi por su inapreciable ayuda para la realización de este trabajo.

Quiero agradecer al M. en C. Baldomero Carrasco Velázquez las facilidades que me ha prestado y la revisión que hizo del texto.

Asimismo agradezco al M. en C. Rolando De La Llata Romero e Ing. Juan Araujo Mendieta la revisión, críticas y observaciones hechas al presente trabajo.

Mi reconocimiento al personal de la Subdirección de Tecnología de Exploración del Instituto Mexicano del Petróleo, que, de una u otra manera, contribuyó a la realización de esta tesis; en especial, a la Sra. Leonor González Alva y al Sr. Federico Tamayo Durán.

Ricardo Casar González

CONTENIDO

TEXTO

Resumen

	Pág.
1. - Introducción - - - - -	1
2. - Cavidades subterráneas de almacenamiento. - - - -	4
2.1. - Tipos de cavidades subterráneas de almacena - miento. - - - - -	4
2.2. - Ventajas que representa el almacenamiento en - roca. - - - - -	11
3. - Selección de la localidad. - - - - -	18
3.1. - Aspectos económicos. - - - - -	18
3.2. - Estudios geotécnicos. - - - - -	23
a. - Preselección del sitio. - - - - -	26
b. - Estudios de detalle. - - - - -	31
b.1. - Levantamiento geológico. - - - - -	31
b.2. - Geofísica. - - - - -	46
b.3. - Geohidrología y pozos de observación. - -	53
b.4. - Sondeos con broca de diamante. - - - - -	56
b.5. - Estudio de mecánica de rocas. - - - - -	61

	Pág.
3.3. - Evaluación del o de los sitios y selección definitiva de la localidad. - - - - -	69
4. - Discusión. - - - - -	71
5. - Referencias. - - - - -	73

entre páginas

ILUSTRACIONES

Fig. 1. - Cuidad subterránea para almacenamiento en domo salino, abierta mediante el método de disolución.	4-5
Fig. 2. - Sistemas de cavidades para almacenamiento de petróleo, construidas en roca, sin recubrimiento y bajo el nivel freático. - - - - -	8-9
Fig. 3. - Almacenamiento bajo el nivel freático: La presión que ejerce el agua contenida en la roca confinante sobre las paredes de la cavidad, no permite que escape el petróleo almacenado. - - - - -	8-9
Fig. 4. - Cuidad subterránea con nivel fijo de agua en el fondo. - - - - -	9-10
Fig. 5. - Cuidad subterránea con nivel de agua fluctuante. -	9-10
Fig. 6. - Planta de almacenamiento subterráneo de petróleo en Händelö, Suecia. - - - - -	9-10
Fig. 7. - Método de excavación de una cavidad en roca. Primero se excava la boveda con una altura de 7 m. después se profundiza un banco de 8 m. y finalmente uno de 15 m. - - - - -	11-12

entre páginas

Fig. 8. - Teoría de la refracción sísmica. - - - - -	48-49
Fig. 9. - Procedimiento de campo en el método sísmico de refracción. - - - - -	49-50
Fig. 10. - Registro sísmico o sismograma obtenido en el método sísmico de refracción. - - - - -	49-50
Fig. 11. - Curva tiempo-distancia en el método sísmico de refracción. - - - - -	50-51
Fig. 12. - Esquema de un piezometro estandar. - - - - -	55-56
Fig. 13. - Secuencia de estudios geohidrológicos. - - - - -	56-57
Fig. 14. - Diagrama esfuerzo-deformación de un espécimen de roca. - - - - -	pág. 64
Fig. 15. - Diagrama de esfuerzos de compresión, σ_x y de tensión σ_y . - - - - -	pág. 68

TABLAS

1. - Desarrollo de la exploración para una obra subterránea de almacenamiento de hidrocarburos. - - - - -	25-26
2. - Nomenclatura basada en el tamaño de grano. - - - - -	pág. 36
3. - Grado de intemperismo y tipo de alteración. - - - - -	pág. 37
4. - Resistencia de materiales y su estimación en el campo. - - - - -	pág. 38
5. - Terminología para el espaciamiento entre planos de discontinuidad. - - - - -	pág. 42
6. - Terminología para la separación entre bloques fracturados o fallados. - - - - -	pág. 43

7. - Clasificación del grado de aspereza de una superficie de fractura o falla. - - - - - pág. 45

8. - Calidad de la roca y R. Q. D. - - - - - pág. 59

9. - Tipo de rocas y resistencia a la compresión simple. - - - - - pág. 67

RESUMEN

El almacenamiento subterráneo de hidrocarburos en cavidades en roca se está llevando a cabo con éxito en diferentes partes del mundo. Estos depósitos subterráneos ofrecen grandes -- ventajas en comparación con el sistema convencional de tanques metálicos superficiales, en cuanto a economía, seguridad, mantenimiento, etc.

Existen 3 tipos de almacenamiento subterráneo: 1) en depósitos de sal, minados por el método de disolución 2) minas agotadas o abandonadas que se reacondicionan para este propósito y 3) cavidades en roca bajo el nivel freático. El principio de operación de este último está basado en que la presión -- que ejerce el agua contenida en la roca confinante sobre las paredes de la cavidad no permite que el producto almacenado escape.

Para la selección de localidades idóneas para este tipo -- de obras, hay que considerar aspectos económicos y geotécnicos, con los que se llega a una preselección del sitio, en el cual -- se realizarán estudios de detalle que comprenden: levantamiento geológico, geofísica, geohidrología, pozos de observación, -- sondeos con broca de diamante y estudios de mecánica de rocas.

Mediante los estudios de detalle se llega a la selección definitiva de la localidad más favorable, que es la que permite la realización de la obra en la forma más segura y económica.

Los estudios de detalle son también indispensables para el diseño y planeación de la planta almacenadora.

1.- Introducción.

En la actualidad el espacio subterráneo se emplea en diferentes campos de la actividad productiva: urbana, hidroeléctrica, nuclear, petrolera, etc. En las próximas décadas el petróleo y el gas seguirán siendo el recurso energético más importante en el mundo. El desarrollo de los diversos países dependerá de los hidrocarburos; la distribución y el almacenamiento de los mismos es por consiguiente un factor de gran importancia.

En años recientes ha aumentado la demanda de almacenes -- o depósitos de gran capacidad, bajo costo, seguros y sin riesgo de contaminación; los países no productores de hidrocarburos se ven en la necesidad de instalar depósitos de estas características, para contar con productos petroleros en caso de suspensiones imprevistas en las importaciones, los países productores -- las requieren para regular el ritmo de producción, o para hacer frente a problemas en los pozos o fallas en los ductos. De esta manera el almacenar productos petroleros en cavidades subterráneas sin recubrimiento ha sido llevado a cabo con éxito en algunas partes del mundo.

Los países escandinavos, Suecia, Noruega y Finlandia son los pioneros en este tipo de obras; también, se han realizado

y se están realizando en distintos países europeos, así como en Estados Unidos, Canadá y Japón.

En 1937 el gobierno sueco comenzó a investigar la posibilidad de almacenar petróleo en cavidades subterráneas recubiertas con concreto; sin embargo, estas investigaciones mostraron que el concreto como recubrimiento es inapropiado, ya que solamente se puede usar cuando sus poros están saturados de agua, - impidiendo así fugas de los productos almacenados. De estas investigaciones nació la idea de construir cavidades subterráneas sin recubrimiento en rocas, en las cuales los poros o fisuras - estén llenos de agua, o sea bajo el nivel freático. Esta idea se basa fundamentalmente en el principio de que el agua no se mezcla con el aceite y que la presión del agua sobre las paredes de la cavidad no permite dejar escapar el petróleo.

El primer almacén subterráneo de hidrocarburos fue una mina de feldespatos abandonada, en Suecia; esta instalación se puso en funcionamiento en 1948 y estuvo bajo continua inspección, al fin de la cual se encontró que era funcional.

En 1950, también en Suecia se puso en operación la primera planta piloto de almacenamiento de gasolina; ésta fue sellada durante 5 años y cuando fue reabierta se encontró que no se

había registrado pérdida alguna y que las características del --
producto no habían cambiado.

En 1965, señala Wettlegren (1978), la Shell-Koppartraus --
inauguró la primera planta de almacenamiento subterráneo en el -
mundo para petróleo crudo, ubicada cerca de la refinería del - -
puerto Gothenburg, exactamente en la isla Hjärtholmen.

En 1967 la Shell construyó otra planta en Noruega; en 1968
la planta de Gothenburg fue ampliada.

Según Wettlegren (1978) existen cerca de 200 instalaciones
de este tipo en Escandinavia; además se han construido estas - -
plantas de almacenamiento en otros países.

En México se ha comenzado a estudiar la factibilidad de es
te tipo de almacenes, con el objeto de regular el creciente rit-
mo de producción de crudo y contar con reservas cerca de los cen
tros de refinación. Con base en este proyecto se desarrolló la
presente tesis, que pretende, como objetivo principal, exponer -
las aplicaciones de la geología a este tipo de obras, y los as--
pectos geotécnicos que hay que considerar.

2.- Cavernas Subterráneas de Almacenamiento.

2.1.- Tipos de cavernas subterráneas de almacenamiento.

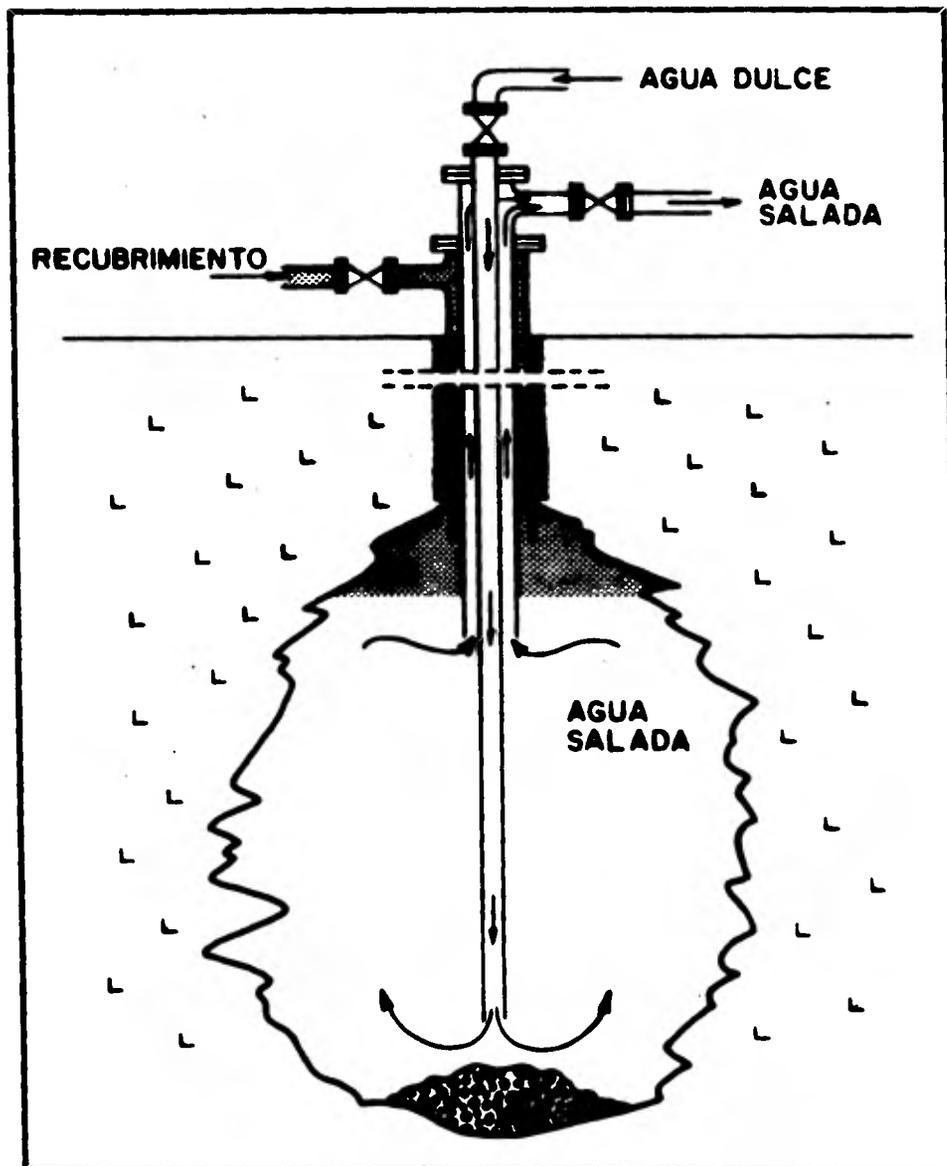
Existen 3 tipos básicos de almacenamiento subterráneo para hidrocarburos:

- a) Cavernas en sal;
- b) Minas agotadas o abandonadas;
- c) Cavernas en roca.

a) Cavernas en sal.

El almacenamiento en sal se realiza comúnmente en domos salinos, aunque también se hace en yacimientos de sal estratificados o en minas de sal agotadas.

El almacenamiento en domos salinos se utiliza, por lo general, para almacenar gas, aunque también se ha empleado para productos líquidos. Las cavernas se obtienen mediante las técnicas de minado por disolución: se perfora un pozo a través del cual se inyecta agua dulce, ésta disuelve la sal y es recuperada: el agua salobre que se obtiene ~~causa~~, en ocasiones, problemas de contaminación, en otros casos es aprovechada económicamente -- (fig. 1).



**Fig. 1 Cavity subterránea para almacenamiento en domo salino, abierta mediante el método de disolución.
(Weeks y Smith, 1975)**

Este método para almacenar hidrocarburos (en cavidades di sueltas en sal) fue patentado en Alemania hace aproximadamente 65 años y se emplea sobre todo en ese país y en Estados Unidos, donde se almacena gas natural, hidrocarburos líquidos y aire -- comprimido.

Reid (1976) comenta que este tipo de almacenes es muy usa do para almacenar gas LP (gas licuado a presión). En Estados - Unidos el área más grande de almacenamiento se encuentra en - - Mont Belvieu, al este de Houston; allí se almacenan 2.5 millo-- nes de toneladas de gas LP en domos salinos. Este autor puntua liza que para almacenar gas LP en domos salinos deben existir - 3 condiciones básicas:

- Espesor suficiente y estructura salina competente a la profun didad apropiada.
- Disponibilidad suficiente de agua para disolver la sal.
- Medio ambiente adecuado para desecharla.

Para el caso de almacenar productos líquidos este método resulta conveniente por su bajo costo, pero según señalan Weeks y Smith (1975) es recomendable cuando las necesidades de almace namiento no son muy grandes.

Por otro lado, de las cavidades minadas en depósitos de sal por el método de disolución, resulta difícil calcular su capacidad de almacenamiento previamente.

b) Minas agotadas o abandonadas.

Otro tipo de almacenamiento subterráneo para productos petroleros es el que consiste en acondicionar minas agotadas o -- abandonadas, convirtiéndolas en grandes almacenes.

Para poder usar una mina con el fin de almacenar hidrocarburos, se deben observar ciertas condiciones, entre ellas, por ejemplo, la localización debe ser económicamente favorable, lo que puede resolverse con ductos (pero esto en ocasiones resulta incosteable).

A veces una mina se cierra cuando el rendimiento del mineral no resulta rentable, pero después de un tiempo, al subir el precio del mineral en el mercado, o al encontrar maneras más eficientes de explotación, o mejores métodos metalúrgicos, la mina puede ser abierta nuevamente; esto hay que tomarlo muy en cuenta, pues una mina luego de ser empleada para almacenar hidrocarburos es prácticamente inutilizable desde el punto de vista de la extracción del mineral. Una ventaja que ofrecen las minas es que la excavación ya está hecha y sólo hay que acondi-

cionarla. Según el estado de la mina se llevan a cabo estudios geológicos y geotécnicos para evaluar la estabilidad que presenta la mina y con base en esto se rediseña y reconstruye. Wettlegren (1978) dice que el costo total del proyecto depende de las condiciones en las que se encuentre la mina y del costo de reacondicionarla. Cuando las condiciones son favorables el costo de almacenamiento se reduce hasta un 15% del costo del almacenamiento en tanques superficiales.

Las minas que se quieran convertir en depósitos no deben ser muy profundas, pues esto aumenta el costo de bombeo del producto, y de acuerdo con Wettlegren (1978) la capacidad debe ser considerable, usualmente del orden de 100,000 a 4,000,000 de m³ (700,000 a 30,000,000 de barriles) de hidrocarburos para que el proyecto resulte económico.

El principio sobre el cual se basa el funcionamiento de estos receptáculos (mediante el cual el fluido no escapa fuera de la cavidad) es el mismo que exige el almacenamiento subterráneo en roca, el cual se explicará en el siguiente inciso.

c) Cavidades en roca.

Las cavidades en roca son túneles, galerías o salones subterráneos sin recubrimiento, excavadas por el hombre especial--

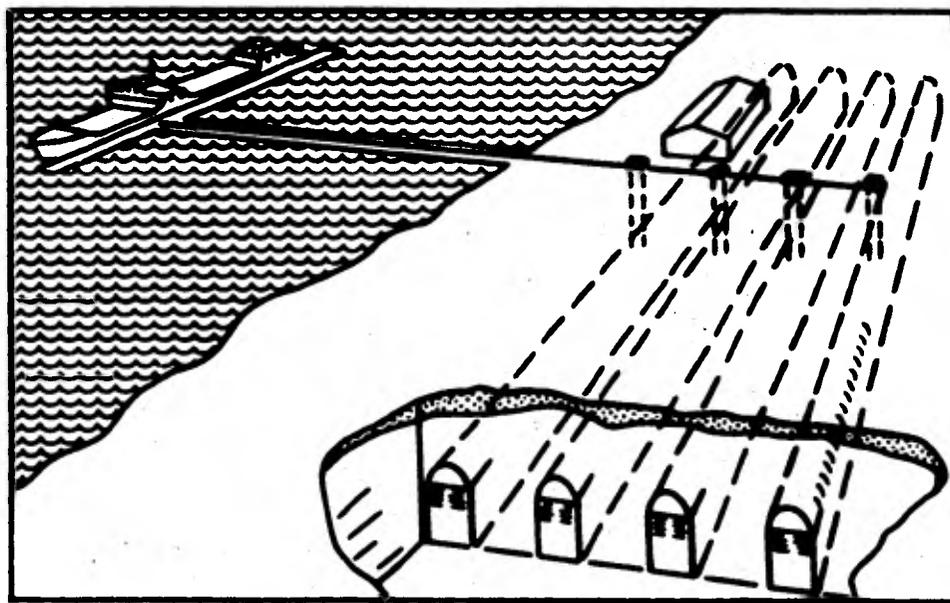
mente para almacenar productos petroleros.

Se calcula su volumen de acuerdo con el volumen que se -- piensa almacenar y con la geometría y extensión que se requiere, en principio las cavidades pueden tener cualquier forma, sola-- mente el lugar donde se sitúan debe reunir condiciones geológi-- cas y geotécnicas apropiadas, o sea debe ubicarse geográficamen-- te en un sitio adecuado y económicamente favorable; todo esto -- con el fin de realizar la obra al mínimo costo (fig. 2).

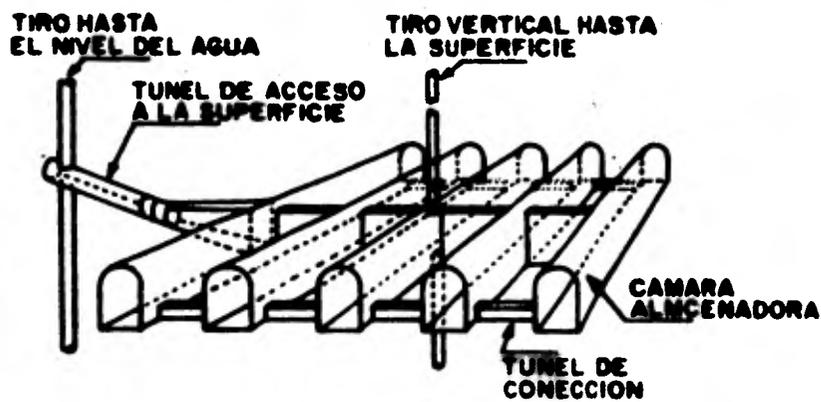
El principio de operación del sistema de almacenamiento -- subterráneo es simple, se basa en el hecho de que el aceite es más ligero que el agua y que estos líquidos no se mezclan. Es-- te producto es almacenado en una cavidad excavada en la roca, -- sin recubrimiento, y bajo el nivel freático.

El producto almacenado flota sobre una capa de agua y no escapa porque el agua contenida en la roca ejerce una presión -- sobre las paredes, en todos los puntos, mayor que la presión -- hidrostática de dicho producto (fig. 3).

El gradiente de presión hacia el interior de la cavidad -- provoca un pequeño pero continuo flujo de agua hacia ella; dada la diferencia de densidades, el agua se acumula en el fondo del depósito y debe ser bombeada hacia afuera para mantener un ni



(Weeks y Smith, 1975)



(Witherspoon et al, 1975)

Fig. 2 Sistemas de cavidades para almacenamiento de petróleo, construidas en roca, sin recubrimiento y bajo el nivel freático.

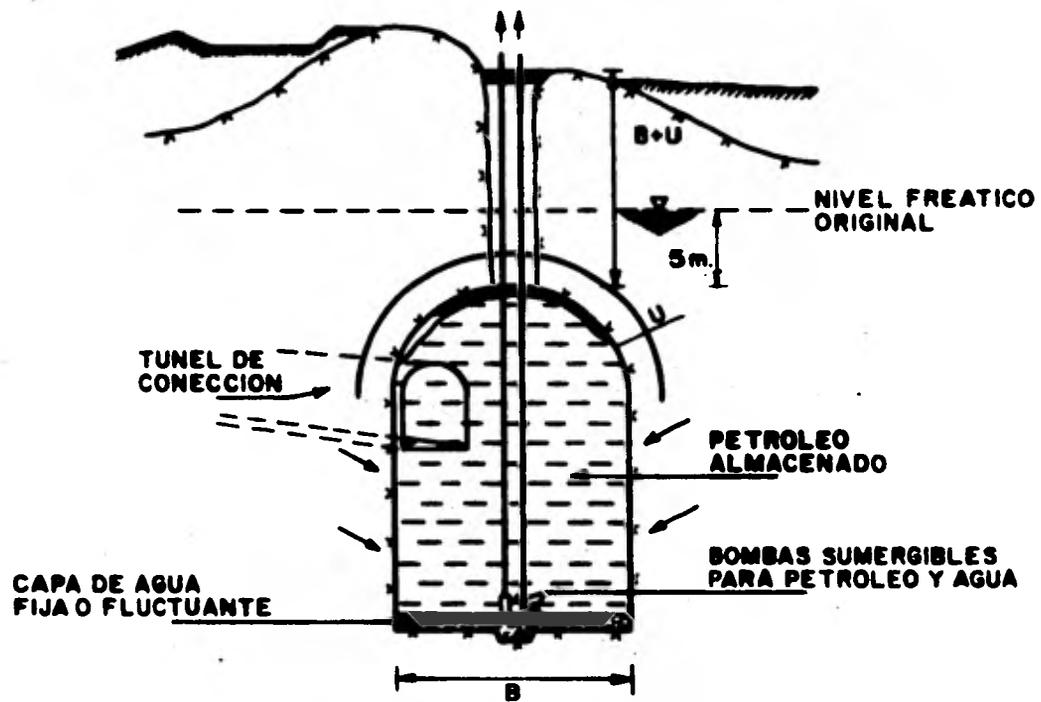
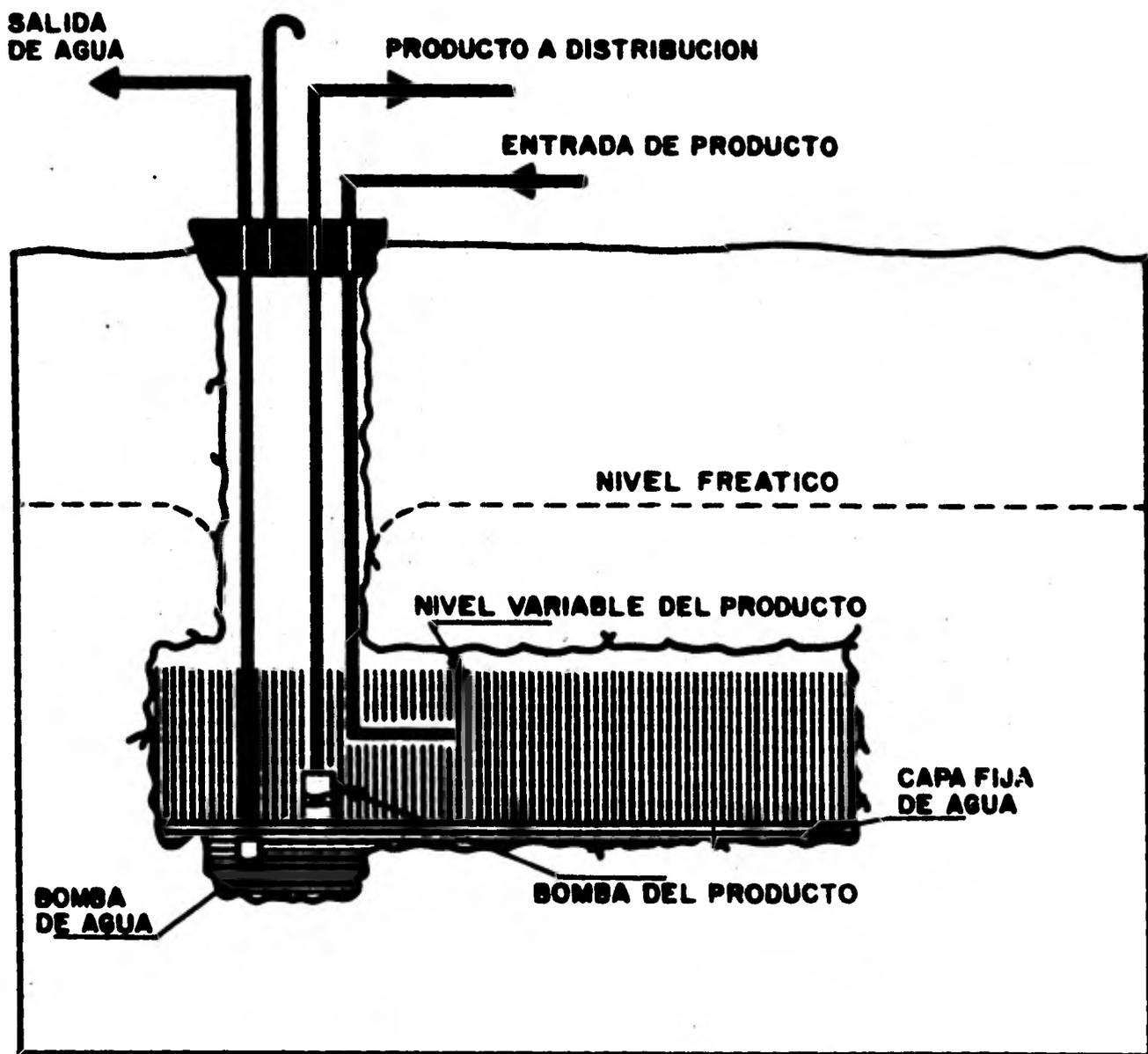


Fig. 3 Almacenamiento bajo el nivel freático: La presión que ejerce el agua contenida en la roca confinante sobre las paredes de la cavidad, no permite que escape el petróleo almacenado. (Wettlegren, 1978)

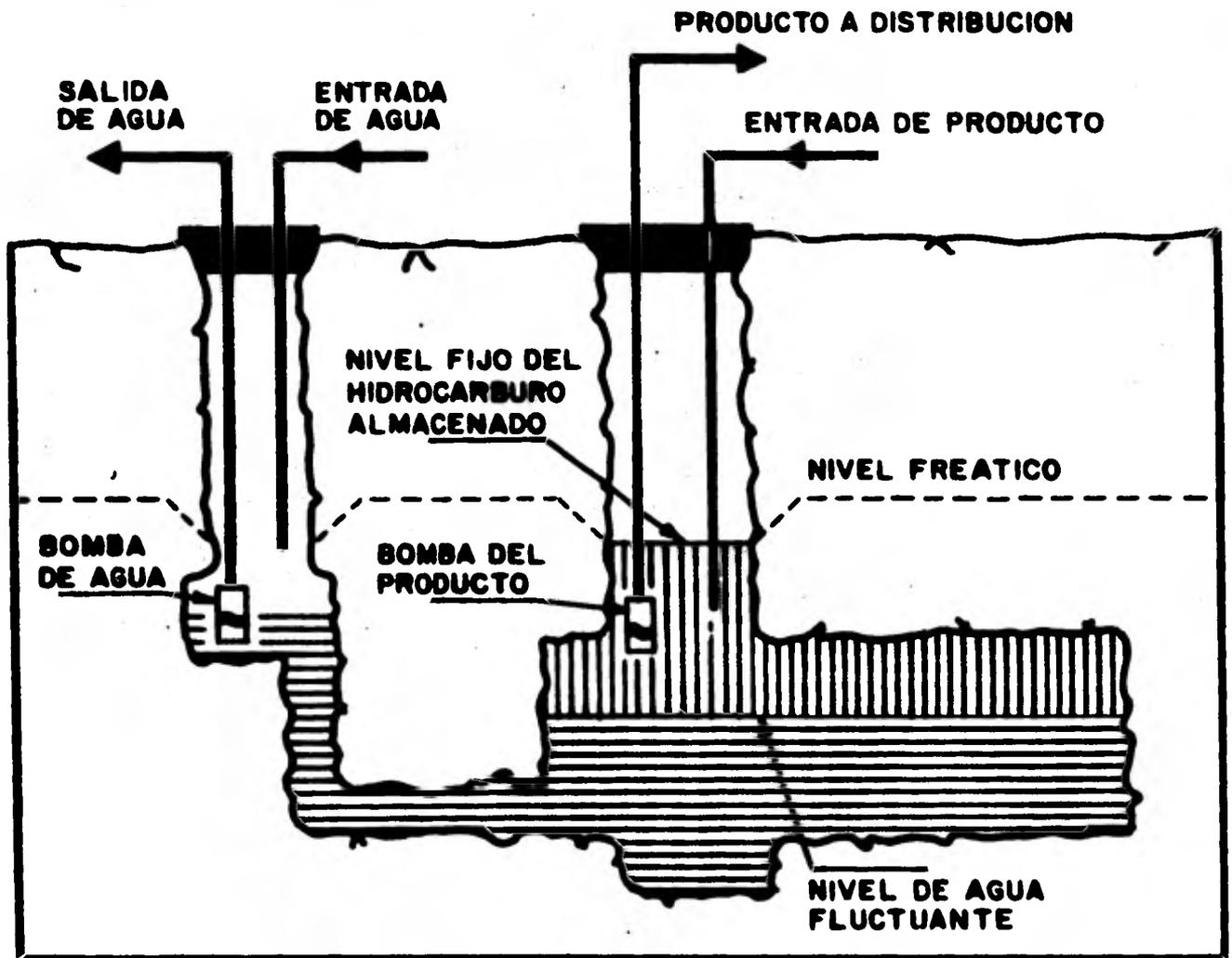
vel fijo de agua. Según Wettlegren (1978) en general esta capa de agua debe mantener un tirante fijo entre 0.2 y 0.5 m para petróleo crudo o productos pesados (fig. 4).

Cuando se almacenan productos volátiles el nivel del agua se mantiene fluctuante; cuando el producto se bombea fuera de la cavidad, se inyecta al mismo tiempo agua hacia adentro, en la misma proporción y viceversa, de esta manera se evita la formación de una inflamable mezcla de gas y aire cuando la cavidad está parcialmente llena (fig. 5).

Por lo regular los túneles se construyen en forma rectangular, con el techo en forma cóncava, preferiblemente en rocas duras tales como el granito y el gneis. El túnel se diseña, -- por lo común, con un ancho de 20 m y una altura de 30 m. Cuando las condiciones de la roca no son muy buenas, el ancho y el alto de la cavidad se reducen y el diseño puede hacerse mediante un sistema de pequeños túneles (fig. 6). Schabas (1977) al referirse a las medidas de un depósito en calizas en Wesley---ville (al este de Toronto, Canadá), reporta que éste consiste de 3 cavidades con capacidad de 1.6 millones de barriles cada uno, con un total de aproximadamente 4.8 millones de barriles; la cavidad tiene 16.15 m de alto y 10.05 m de ancho y se locali



**Fig. 4 Cavity subterránea con nivel fijo de agua en el fondo.
(Modificado de varios autores)**



**Fig. 5 Cavity subterránea con nivel de agua fluctuante.
(Modificado de varios autores)**

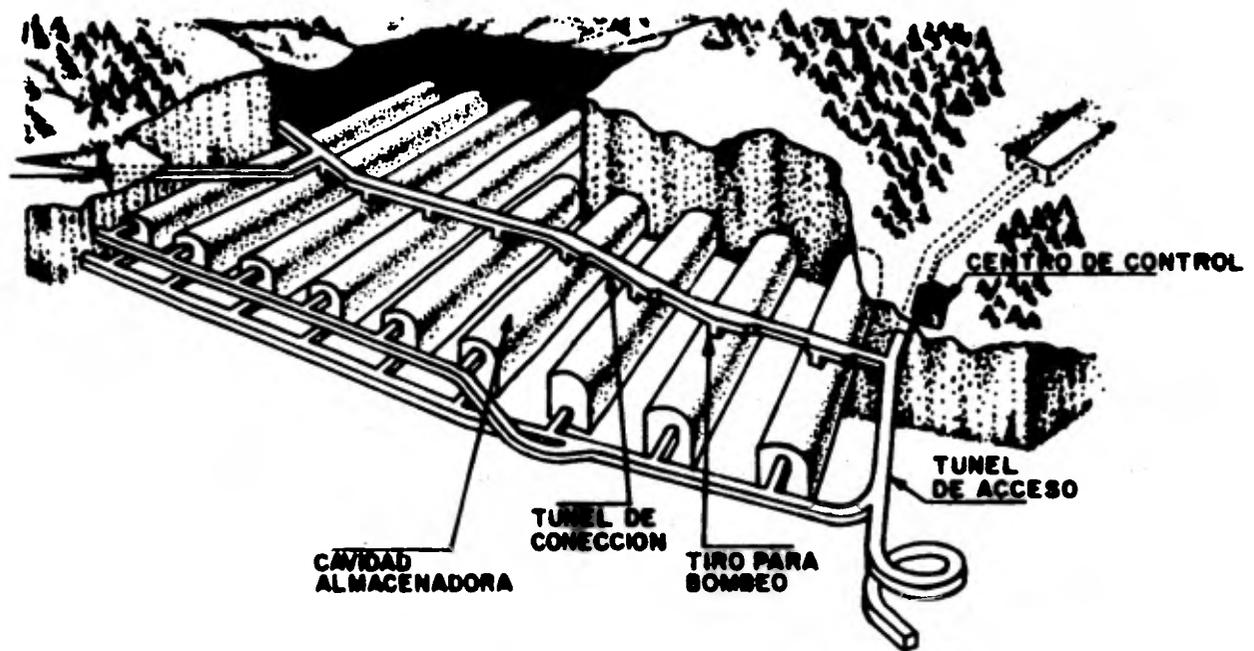


Fig. 6 Planta de almacenamiento subterráneo de petróleo en Händelö, Suecia.
(Moberg, 1977)

za 30.48 m bajo el lecho rocoso, o de 45.72 a 60.95 m bajo la superficie. Cada cavidad tiene una galería conectando 6 segmentos o brazos con una longitud total de 1577.64 m.

Las cavidades de almacenamiento pueden ser construidas de dos maneras: mediante pozos o tiros verticales (como se hace en las minas) o mediante un túnel de acceso o rampa; este último modo ofrece más ventajas, pues permite el uso de equipo pesado para excavación y se reduce, así, el tiempo de construcción y el costo.

Wettlegren (1978) describe el procedimiento de construcción con rampa de acceso; señala que dicha rampa o túnel de acceso se construye con una inclinación de 1:7 para permitir la circulación de vehículos, en una área de unos 30 m². La excavación del túnel se lleva a cabo en 2 ó 3 etapas: primero se excava la parte alta de la cavidad, usualmente con una altura de 7 m, usando maquinaria y explosivos; después, dependiendo del alto total de la cavidad, el piso se extiende hacia abajo progresivamente en 1, 2 ó 3 bancos, usando explosivos y maquinaria.

Los pozos para tubería por lo regular se excavan hacia arriba a partir del techo y algunas veces son recubiertos con concreto; los refuerzos que se requieran se colocan inmediata-

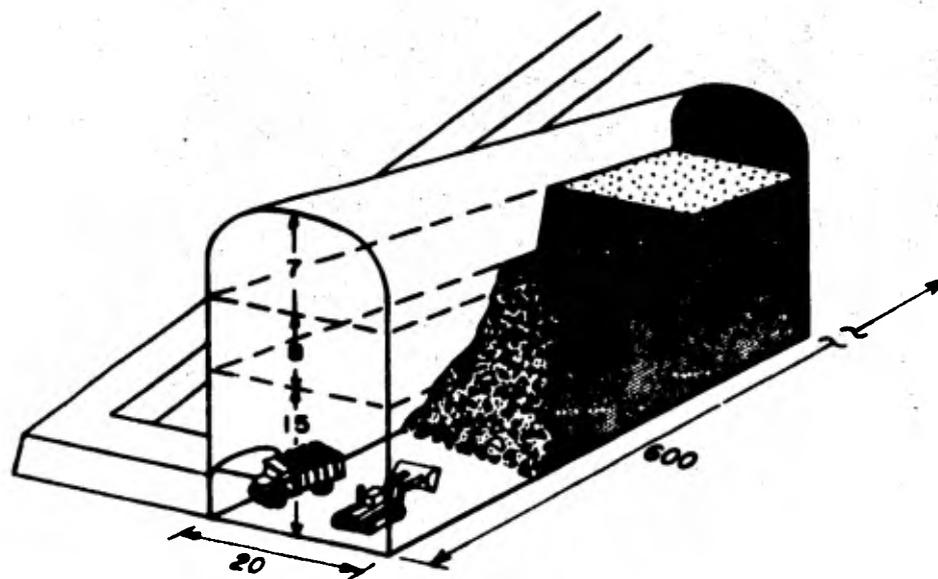
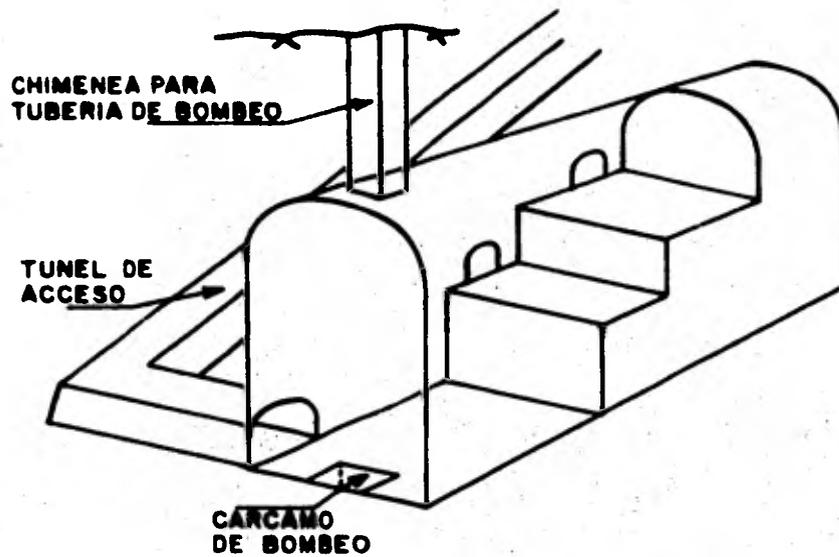
mente después de construir el techo.

La roca que se extrae puede ser vendida como material de construcción o como material de relleno, lo cual reduce el costo del proyecto (Fig. 7).

Una planta completa de almacenamiento incluye bombas, tubería, planta purificadora de agua y una central de control, -- con instrumentos para controlar las bombas, checar el nivel del agua en la cavidad, el volumen y la temperatura del producto almacenado, etc.

2.2.- Ventajas que representa el almacenamiento en roca.

Contar con depósitos adecuados para productos petroleros es vital para el desarrollo de la industria petrolera; los -- puertos destinados a importar o exportar crudo deben contar -- con zonas de almacenamiento idóneas y de gran capacidad. En -- las refinerías también es apropiado contar con depósitos de -- gran magnitud, para asegurar, de esta manera, que las refinerías continúen operando cuando se presenten problemas en la -- explotación de los pozos o fallas en los ductos o cuando -- haya crisis o interrupciones en las importaciones de crudo, o -- bien para regular la operación en caso de problemas en las mismas refinerías o de bajas considerables en el consumo. Otra ra



Esquema del método de excavación (Schabas, 1977)

**Fig. 7 Método de excavación de una cavidad en roca.
Primero se excava la boveda con una altura de 7m.
despues se profundiza un banco de 8m. y finalmente uno de 15 m.**

zón por la cual conviene contar con depósitos adecuados en las refinerías, es la de asegurar el almacenamiento de productos refinados en el caso de crisis en el sistema de transportación -- o con fines estratégicos y militares.

En la actualidad existen dos tipos principales de almacenamiento de hidrocarburos:

- a) Almacenamiento en la superficie;
- b) Almacenamiento subterráneo.

a) Almacenamiento en superficie.

Este tipo de almacenamiento es el más común, los hidrocarburos se almacenan en grandes tanques metálicos, colocados sobre la superficie de un terreno, donde están conectados a un sistema de ductos y bombas.

Para almacenar grandes cantidades de productos petroleros se usan normalmente tanques metálicos de 85 m. de diámetro por 22 m. de alto, con una capacidad de 120 000 m³ aproximadamente. Estos tanques deben colocarse sobre una superficie especialmente diseñada para sustentarlos.

En función del producto que se piense almacenar se requieren de materiales especiales para la construcción de los tan--

ques; se deben tomar en cuenta lo corrosivo y tóxico que puede ser el producto: esto generalmente causa muchos problemas. Hay que tomar en cuenta, asimismo, la vaporización de los líquidos almacenados (la cual causa notables pérdidas) y la contaminación que se puede presentar por fugas. Con respecto a ésta hay que destacar el hecho de que el petróleo tiende a percolarse en los suelos permeables y migra grandes distancias causando graves daños.

Este tipo de almacenamiento es el más adecuado cuando el volumen por almacenar es pequeño.

b) Almacenamiento subterráneo.

El almacenamiento de productos petroleros en cavidades -- subterráneas sin recubrimiento está tomando importancia debido a que ofrece grandes ventajas en comparación con los convencionales, en particular con el almacenamiento en tanques metálicos - superficiales. Entre dichas ventajas está la de que no ocupa grandes extensiones de terreno, y éste puede, así, ser destinado para otras instalaciones, u otros fines. En Suecia existen plantas de almacenamiento subterráneo bajo zonas urbanas, industriales, carreteras, y bajo zonas de almacenamiento superficial, inclusive.

El almacenamiento subterráneo ofrece mayor seguridad en cuanto a accidentes, sabotajes, y en caso de guerra. No se conocen casos de contaminación debido a fugas en este tipo de receptáculos. La vida útil de una instalación subterránea en una roca adecuada es ilimitada. Las cavidades no sufren deterioro por desgaste o fatiga y no requieren de mantenimiento, éste se reduce sólo al equipo auxiliar (bombas, ductos, controles e instalaciones superficiales).

En lo que respecta a pérdidas, éstas no se han observado y la recuperación del producto es total. Weeks y Smith (1975) citan el experimento llevado a cabo en Suecia, en el cual, como ya se comentó antes, se almacenó gasolina en una cavidad subterránea construida para tal fin; sellada durante 5 años, cuando se volvió a abrir la recuperación del producto fue total y sin alteración alguna de sus características y calidad.

Generalmente el estudio previo que se lleva a cabo para la construcción de este tipo de cavidades resulta mucho más costoso que el que se realiza para instalación superficial, pero esto se compensa en la construcción, resultando menor el costo de un m^3 almacenado en una cavidad subterránea que el de un m^3 almacenado en tanques metálicos en superficie.

Wettlegren (1978) señala que el almacenamiento subterráneo resulta económico cuando la capacidad de éste excede de - - 20,000 a 30,000 m³. Por otro lado Moberg (1977) dice que los - costos del almacenamiento superficial y del subterráneo son los mismos para un volumen de aproximadamente 50,000 m³, pero para almacenar volúmenes de cientos de miles de m³ el costo de una - cavidad en roca sería el 55 ó 65% del costo del tipo de almace- namiento convencional en tanques metálicos.

Con respecto a este tema, Bergman (1980) dice que el cog to de un depósito subterráneo depende de los siguientes facto-- res:

- La calidad de la roca.
- El volumen de la cavidad.
- El número de cavidades.
- La profundidad a la que se encuentre la cavidad.

Este autor también justifica el almacenamiento subterráneo cuando el volumen es por lo menos de 40,000 a 45,000 m³ - - (250,000 a 300,000 barriles) para petróleo. Menciona también - que para el caso de gas LP, una cavidad subterránea con capaci-

dad para 9 000 a 10 500 m³ (60 000 - 70 000 barriles) puede resultar económico; una cavidad subterránea para almacenar gas LP puede ser 7 veces más económica que los tanques metálicos superficiales. También cita un reporte del Departamento de Energía de Estados Unidos, publicado por G.E. Weismantel en Chemical -- Engineering de enero de 1978, en el cual se estiman los costos de almacenamiento en roca y en tanques superficiales, siendo, - para cavidades subterráneas, de 6 a 9 dólares por barril (40-60 dólares por m³) y, para tanques superficiales, de 6 a 12 dólares por barril (40-80 dólares por m³), dependiendo del tamaño de la planta de almacenamiento; aplicándose las cifras para aceite y gas LP.

Bergman cita además que, en 1978, algunas compañías constructoras de ductos para gas y aceite en Estados Unidos estimaron los siguientes costos:

- Tanques superficiales para aceite crudo: 4-6 doll. por barril (27-40 doll. por m³).
- Tanques superficiales para gas LP: 21 doll. por barril - (140 doll. por m³), dependiendo esto del volumen por almacenar y de la presión del gas.
- Cavidad subterránea para gas LP de suficiente tamaño: --

5-8 doll. por barril (33.5-53.5 doll. por m³).

En lo que respecta al costo del mantenimiento de una cavidad en rocas, éste se limita sólo al equipo auxiliar, por lo -- cual puede ser menor de 1/3 de lo que sería para tanques superficiales.

Por otro lado algunos autores hacen una comparación del -- costo de almacenamiento para petróleo crudo, tomando en cuenta el mantenimiento; el cual es de: 1.8 doll. por m³ por año, para tanques superficiales y 0.3 doll. por m³ por año para roca.

De lo anterior se observa que tratándose de volúmenes -- grandes el costo del almacenamiento es menor en cavidades subterráneas; también el costo de mantenimiento y de operación de -- éstas es menor en comparación al almacenamiento convencional.

Otra ventaja del almacenamiento subterráneo es que no modifica el paisaje, sus instalaciones superficiales son mínimas comparadas con las del almacenamiento en tanques, no se ven -- a grandes distancias.

En conclusión: almacenar productos petroleros en cavidades subterráneas ofrece destacadas ventajas, las cuales se resu

men a continuación:

- Menor costo de almacenamiento por volumen, tratándose sobre todo de grandes volúmenes.
- Menor costo de mantenimiento y operación.
- Vida útil ilimitada (no hay deterioro).
- Reducción del riesgo de contaminación causado por fugas.
- Total recuperación del producto almacenado (no hay pérdidas).
- Mayor seguridad en cuanto a accidentes, sabotaje y guerra.
- Ahorro de superficie, la cual se puede utilizar para otros fines.
- Se reduce la alteración visual del paisaje

3.- Selección de la localidad

3.1.- Aspectos económicos.

La planeación, diseño y construcción de las cavidades subterráneas de almacenamiento deben ser precedidas por un cuidadoso estudio de las condiciones geológicas, geohidrológicas y geo

técnicas de la localidad donde se pretenda llevar a cabo la obra. Esto forma parte del estudio de carácter técnico mediante el cual se selecciona la localidad para la construcción de una planta de almacenamiento. Junto con el estudio técnico se deben tener en cuenta algunos aspectos económicos, los cuales, en ocasiones, pueden llegar a tener igual o aun más valor al evaluar finalmente el sitio donde se pretenda construir la cavidad de almacenamiento.

Dentro de estos factores hay que tomar en cuenta la distancia del lugar de almacenamiento con respecto a las zonas de refinación y distribución de los productos. En el caso de que la planta de almacenamiento se construya lejos de estos centros, el problema se resuelve construyendo ductos, pero es evidente que al aumentar la longitud de estos más allá de cierta distancia, la obra resulte antieconómica. Schabas (1977) cita una investigación hecha en Estados Unidos de 5 minas abandonadas y tomadas en consideración para almacenar hidrocarburos, este estudio demostró que el costo de la transportación de los productos era mayor que el costo de conversión de las minas en plantas de almacenamiento.

Es indispensable que la situación geográfica del sitio de be ser adecuada, de preferencia lo más cercano que sea posible

de los centros de refinación y/o distribución; a este respecto - podemos citar un ejemplo: el almacenamiento subterráneo de la - isla Hjärtholmen, en el puerto Gothenburg, en Suecia, el cual -- dista 8 km de la refinería, Ullgren (1977).

Otro ejemplo es el de una mina convertida en planta de almacenamiento en May-Sur-Orne, Francia, con una capacidad de 32 - millones de barriles de petróleo crudo y un costo de 1 dólar por barril almacenado. Debido a que esta mina está situada a 85 km del centro de distribución, se construyó un oleoducto, lo que incrementó el costo en 0.8 dólares por barril, resultando un costo total de 1.8 dólares por barril almacenado, Bergman (1980).

Beissner (1975) señala que las plantas de almacenamiento - se deben construir a una determinada distancia de las áreas urba nas y de tráfico; en la República Federal Alemana las cavidades deben distar por lo menos 100 m de un edificio para almacenamien to de petróleo, y 200 m, para almacenamiento de gas. Este autor aclara que estas distancias no son rígidas; se pueden establecer de acuerdo a la situación, buscando siempre prevenir accidentes.

En Suecia, como ya se mencionó, existen plantas de almace namiento bajo zonas urbanas y zonas de almacenamiento superficial.

Al decir que la localización geográfica debe ser la más --

adecuada hay que tomar en cuenta también la accesibilidad del -- área, ya que la construcción de caminos y una topografía abrupta aumentan el costo de la obra.

Es importante también tomar en cuenta la sismicidad de la región, evaluando cartas sísmicas, registros sísmicos y estadísticas de frecuencia y magnitud de los sismos. La sismicidad puede ser regional o local, esta última por la presencia de fallas activas.

Estos datos se deben tener presentes en el diseño de las - cavidades pues pueden afectar la estabilidad de la obra o incrementar el costo de ésta al requerirse refuerzos.

Cuando se lleva a cabo el reconocimiento de los sitios posibles para la ubicación de la obra, hay que tener presente el - tipo de producto y volumen que se pretende almacenar, para estimar la superficie de terreno necesario para la obra.

Aparte de la información geológica que se debe recabar en una visita de reconocimiento, se debe anotar cierta información adicional de interés tanto para la evaluación del sitio como para el diseño de la obra; esta comprende:

- Población y cultura.
- Vegetación, precipitación pluvial y clima.

- Topografía, elevación y situación con respecto al nivel del mar, lagos y ríos.
- Tenencia y uso de la tierra, así como restricciones en este aspecto.
- Actividad y tipo de construcciones en la región.
- Materiales de construcción disponibles en el área.
- Actividad minera, tipo y magnitud de las obras.
- Distancia respecto de las líneas de energía eléctrica.
- Accesibilidad del área, cantidad y tipo de caminos.
- Comunicaciones: teléfono, telégrafo, correo, etc.
- Posibilidad de afectar zonas arqueológicas.
- Posibles aplicaciones en la región del material excavado.

En toda obra está implícito el aspecto social que representa. Generalmente la obra trae consigo beneficios y desarrollo social y económico para los lugares donde se realiza; además este tipo de obras representa un beneficio social y económico, pues pretende y asegura de una manera indirecta el suministro y distribución de los hidrocarburos, tan necesarios hoy para el desarrollo de la sociedad.

Un último aspecto ligado a estas obras y fuera del alcance técnico, es el carácter político que se le dé; pues puede --

realizarse tanto para beneficio de la sociedad, como con fines militares-estratégicos.

3.2.- Estudios geotécnicos.

Un proyecto de almacenamiento subterráneo de productos petroleros en roca se puede dividir en distintas etapas:

- Elección del área de interés (consideraciones no geotécnicas.
- Preselección del o de los sitios.
- Estudio de factibilidad y selección definitiva del sitio.
- Planeación y diseño de la obra.
- Construcción y pruebas durante la construcción.

El propósito de los estudios geotécnicos en este tipo de obras es el de proporcionar al ingeniero civil información acerca del macizo rocoso, de la cubierta de suelo, del agua subterránea y de las condiciones geológicas generales del sitio donde pretende realizar la obra, lo cual es necesario para estimar el costo de ésta, e igualmente es indispensable para la planeación y el diseño de la planta de almacenamiento.

La labor del ingeniero geólogo en estas obras no termina

en la etapa de investigación del sitio; debe continuar, proporcionando recomendaciones en las fases de planeación y diseño, - así como supervisando los problemas geotécnicos que puedan surgir durante la construcción de la obra.

De acuerdo con Söderberg (1977), el estudio geotécnico para este tipo de obras debe dar respuesta a los siguientes enunciados:

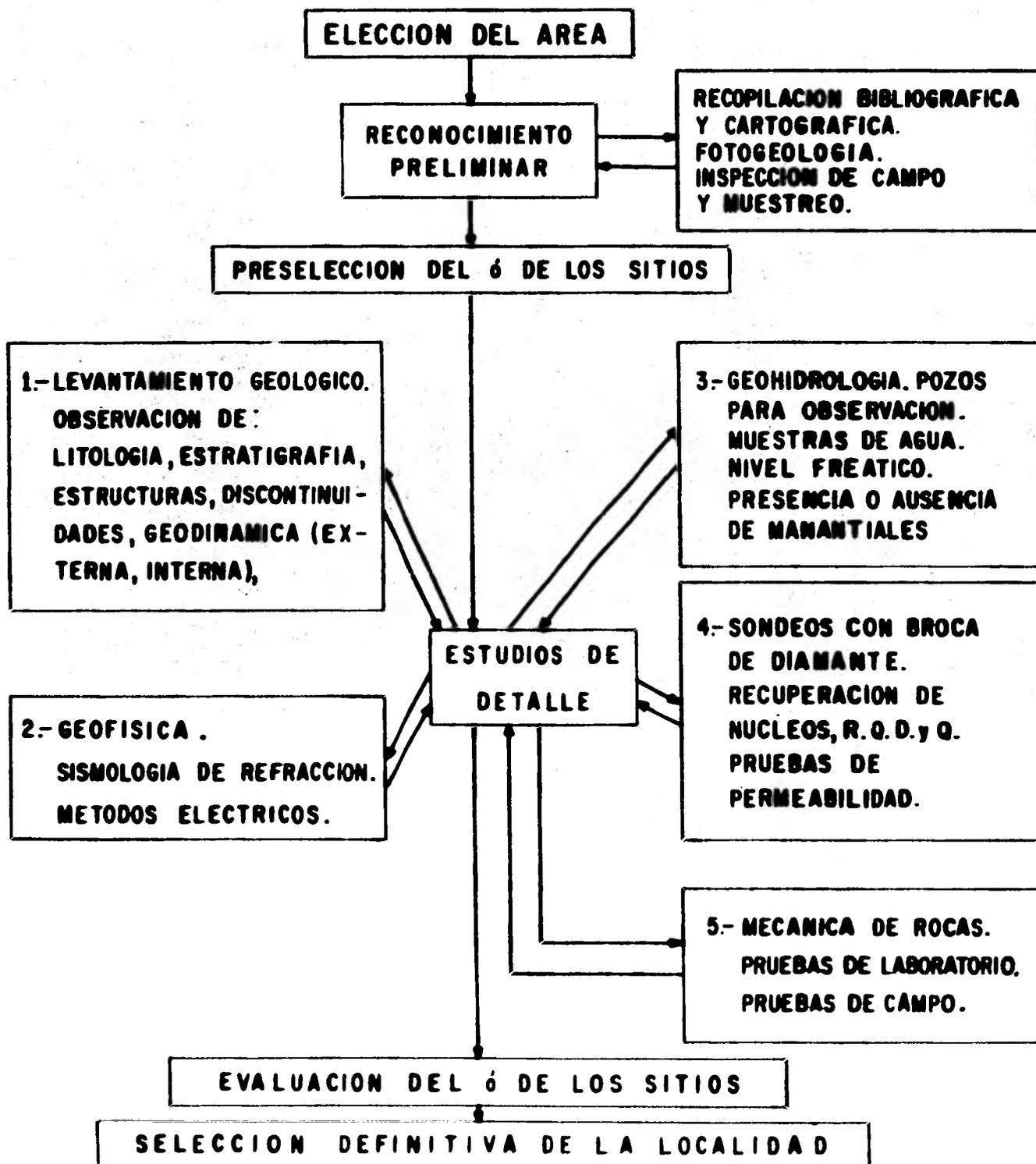
- Sitio geográfico favorable.
- Orientación adecuada de las cavidades (con respecto a - las discontinuidades presentes en la roca).
- Profundidad de la cavidad en el macizo rocoso.
- Diseño de las cavidades (altura, ancho, largo, tipo de sección).
- Eventual necesidad de refuerzos.
- Pronóstico de escurrimiento de agua y de las necesida-- des de trabajo de sellado.
- Información para seleccionar materiales de sellado de - acuerdo a las propiedades del agua subterránea.
- Información adicional para estimar el costo de la obra.

El programa de exploración a seguir en este tipo de obras, no es rígido sino que se adapta a cada proyecto; en general es el mismo que se sigue en toda obra civil: comienza con un reco

nocimiento geológico preliminar para preseleccionar sitios; siguen estudios de detalle por métodos directos e indirectos, la investigación de las condiciones hidrogeológicas y el estudio de las propiedades mecánicas de las roca.

La tabla 1 muestra el desarrollo de las distintas etapas de exploración.

TABLA 1.- DESARROLLO DE LA EXPLORACION PARA UNA OBRA SUB-TERRANEA DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS.



a.- Preselección del sitio

Una vez determinada la región donde se requiere al almacenamiento, de acuerdo a las necesidades de la industria petrolera, se procede a recopilar la información geológica existente; esto incluye la obtención de cartas topográficas, geológicas, edafológicas, de climas, mosaicos y/o fotografías aéreas, y toda la información recabada de trabajos geológicos llevados a cabo anteriormente.

Todos estos datos deben ser analizados y sintetizados para obtener un panorama de la geología general del área en lo que se refiere a topografía, morfología, hidrografía, litología, estratigrafía y tectónica. Por otro lado también se necesita información sobre la accesibilidad del área, clima, vegetación, comunicaciones y asentamientos humanos.

A partir del análisis de esta información se pueden seleccionar áreas y planear el reconocimiento preliminar de localidades que presenten interés. Para esto hay que tomar en cuenta algunas de las características geotécnicas que estas localidades deben tener para la realización de este tipo de obras. Las rocas más convenientes son las más competentes, Farquhar (1975) --

evaluó las propiedades mecánicas de 1180 formaciones de Estados Unidos con el fin de determinar su potencialidad para la construcción de cavidades subterráneas, encontró que 6 tipos de rocas son favorables: granito, gabro, gneiss, esquisto masivo, -dorita y anfibolita. En los países escandinavos donde se desarrolló esta técnica de almacenamiento, afloran en la mayor parte de sus territorios rocas cristalinas de edad precámbrica, -- las cuales poseen características mecánicas excelentes para la ejecución de estas obras; sin embargo, de acuerdo con Weeks y -Smith (1975), se han construido plantas de almacenamiento también en lutitas, cretas, anhidrita y lavas.

Para estos autores las condiciones ideales que deben reunir las rocas son:

- Ser mecánicamente competentes y resistentes para ser excavadas sin requerir soportes, las zonas de debilidad que necesiten refuerzo deben ser mínimas pues esto hace que el costo unitario se incremente, al mismo tiempo que disminuye el ancho de la cavidad.
- Ser homogéneas; la excavación se debe realizar dentro de rocas de propiedades y comportamientos similares.
- Ser libres de fallas, fracturas y planos de debilidad, los cuales requieren de tratamiento especial que au--

menta el costo de la obra.

- De baja porosidad para que no se eleve el costo de -- bombeo durante la operación, pero suficiente para que la presión hidroestática impida que el fluido almacenado escape.
- Lo más cerca que sea posible de la superficie; en general no hay problemas para la excavación a profundidades razonables pero el costo se incrementa con la -- profundidad.

En general al elegir los lugares en los cuales se efectuará el reconocimiento geológico, estos deben de presentar las siguientes características:

- Situación geográfica adecuada y buena accesibilidad.
- Rocas mecánicamente competentes y homogéneas, poco afectadas por el tectonismo.
- Nivel freático alto (lo más cercano posible a la superficie).

El reconocimiento preliminar tiene el objeto de corroborar la información recopilada anteriormente y observar las características geológicas del área; con ello se preselecciona o

preseleccionan los sitios que ameriten ulteriores estudios.

En el reconocimiento preliminar se deben de analizar los siguientes aspectos geológicos: (C. F. E., 1979).

- LITOLOGIA:

Componentes minerales, textura, estructuras primarias, -- clasificación, origen, porosidad y permeabilidad; recolección - de muestras para estudios petrográficos.

- ESTRUCTURAS:

Pliegues: intensidad, tipo, magnitud.

- DISCONTINUIDADES:

Fallas, fracturas, juntas, diaclasas: tipo, orientación, forma, frecuencia, amplitud, relleno.

- ESTRATIGRAFIA:

Formaciones o unidades litológicas, secuencia estratigráfica.

- GEOMORFOLOGIA:

Formas de relieve, génesis, evolución, topografía, carsti

cidad.

- GECHIDROLOGIA:

Flujo de agua superficial, artesianismo y manantiales, es
timación del nivel freático.

- SUELOS:

Espesor de la cubierta de suelo, extensión, composición,
clasificación.

- GEODINAMICA EXTERNA:

Erosión, intemperismo: Tipo y grado de intemperismo, espa
sor de la roca intemperizada, movimiento en masa del terreno.

- GEODINAMICA INTERNA:

Vulcanismo, magnitud de la deformación.

El reconocimiento preliminar concluye con un informe en -
el cual se detallan los datos obtenidos y se seleccionan localidi
dades para futuros estudios, indicando los criterios en los cu
les se basan dichas sugerencias; además se recomiendan estudios
que deben realizarse en las localidades preseleccionadas.

b.- Estudios de detalle

Después del reconocimiento preliminar se programan estudios de detalle de las localidades preseleccionadas, esenciales para la decisión final, o sea la selección definitiva del sitio, así como para la planeación y diseño de la obra.

Los estudios de detalle tienen como finalidad conocer las condiciones y comportamiento de las rocas en el subsuelo. Comienzan por un levantamiento geológico superficial más detallado, que se complementa con estudios geofísicos, sondeos, estudio hidrogeológico, estudio de mecánica de rocas y pruebas de laboratorio.

Cabe señalar que en esta fase, cada etapa proporciona información con la cual se modifica y dirige el programa de la siguiente etapa.

De acuerdo con Ohya y Takeuchi (1977) es necesario llegar a conclusiones en cada etapa; si la investigación no fue suficiente o si se llega a conclusiones inciertas o negativas, se debe cambiar el plan de trabajo o, en caso extremo desechar el sitio para la obra.

bl.- Levantamiento geológico

El levantamiento geológico se realiza como base fundamen-

tal de esta fase de estudios; con él se busca obtener información detallada de las condiciones geológicas locales, detectar los problemas geotécnicos existentes que requieran esclarecerse mediante otros métodos y planear adecuadamente las siguientes etapas del estudio.

Según la opinión de expertos finlandeses en este tipo de obras, el levantamiento geológico debe abarcar una área de 25 - km² aproximadamente, y debe estar apoyado en un plano topográfico base del área a escala máxima de 1:10 000. Faltando éste -- tendrá que realizarse por medio de fotografías aéreas verticales, en blanco y negro o color.

El levantamiento geológico se inicia con la interpretación de las fotografías aéreas, con lo que se obtiene en forma preliminar el tipo de roca, distribución y espesor, características estructurales (rumbo y echados aproximados, pliegues, fallas, patrones de fracturamiento y juntas) características del drenaje, etc.

Con base en las fotografías aéreas interpretadas se planean los recorridos de campo, estudiándose el mayor número posible de afloramientos y cortes. En casos en los que se requiera levantar algún accidente geológico de importancia, se recurre a

levantamientos con plancheta. En un primer tiempo se recorre - el área, comprobando y modificando la fotointerpretación previa. En un segundo tiempo se recorre el área levantando y detallando los accidentes geológicos de importancia.

Durante la primera etapa se puede comenzar a planear el - programa de trabajo de la siguiente fase de investigación detallada, en este caso el estudio geofísico, que puede comenzar a ejecutarse.

En este levantamiento geológico se deben analizar los sig mos aspectos geológicos que se analizaron en el reconocimiento preliminar, examinándose estos ahora con mayor detalle; haciendo hincapié especialmente en:

- Tipo de roca.
- Características estructurales.
- Intemperismo.
- Suelos.

Se deben tomar muestras representativas de los distintos tipos de suelo, de las cuales se analiza su distribución de tamaño de grano en el laboratorio y su composición. De igual manera se deben tomar muestras representativas de los distintos - tipos de rocas, tanto intemperizadas como no intemperizadas; eg

tas deben ser estudiadas megascópicamente y algunas microscópicamente en sección delgada. El material rocoso debe ser descrito de dos maneras:

- Desde el punto de vista geológico y petrográfico.
- Desde el punto de vista de sus propiedades ingenieriles.

En el aspecto geológico y petrográfico, se debe poner especial atención a la litología, y a las características estructurales (evitando profundizar en aspectos como son la historia geológica del área, origen, medios ambientes de depósito, etc.).

En el aspecto de propiedades ingenieriles de las rocas, - se considera que éstas son materiales no homogéneos, anisotrópicos y discontinuos, por lo cual se necesita estudiar muestras - de distintas localidades del área.

Para el diseño de la obra se debe tomar en cuenta, por un lado el comportamiento mecánico del material rocoso y, por otro lado, el comportamiento mecánico del material rocoso considerado como un macizo rocoso, o sea el material rocoso en conjunto modificado por la presencia de fallas, diaclasas, planos de estratificación, zonas de debilidad y otras discontinuidades.

Para describir las rocas con base en sus características ingenieriles es conveniente utilizar un sistema que toma en - - cuenta sus propiedades mecánicas.

Para describir un material rocoso, Working Party Report -
de la United Kingdom Geological Society Engineering Group - - -
(1970), aplica los índices descriptivos siguientes:

- Tipo de roca.
- Color.
- Tamaño de grano.
- Textura.
- Intemperismo.
- Alteración.
- Resistencia del material.

Tipo de roca

Se refiere a la clasificación petrográfica de la roca.

Color

Se refiere al color que presenta la roca en su estado natural.

Tamaño de grano

Para el tamaño de grano de las rocas sedimentarias conviene usar la clasificación utilizada para el tamaño de grano de los suelos. Se recomienda utilizar la tabla 2.

Tabla 2.- Nomenclatura basada en el tamaño de grano

Término	Tamaño de grano (diámetro)	Equivalencia en partículas de suelo
grano muy grueso	60 mm.	pedruscos y guijarros
grano grueso	2 - 60 mm.	grava
grano medio	60 micras - 2 mm	arena
grano fino	2 - 60 micras	limo
grano muy fino	2 micras	arcilla

Nota: Los granos \geq 60 micras de diámetro son visibles a simple vista.

Textura

Se refiere a la textura que presenta la roca; porfirítica, fanerítica, afanítica, etc.

Intemperismo y alteración

Intemperismo se refiere al proceso destructivo causado -- por agentes atmosféricos sobre o cerca de la superficie. Alteración comprende los cambios en la composición química y mineralógica de la roca causados por las aguas meteóricas, y por con-

diciones de oxidación o reducción; las más comunes son: Caolinización, silicificación, piritización, oxidación, etc.

Para clasificar el intemperismo conviene seguir la siguiente tabla:

Tabla 3.- Grado de intemperismo y tipo de alteración

Grado	Nomenclatura	Descripción
IA	- Roca inalterada	- Ausencia visible de material intemperizado.
IB	- Intemperismo incipiente	- Decoloración por intemperismo sobre las superficies de discontinuidad importantes.
II	- Roca débilmente intemperizada	- Decoloración por intemperismo en el material rocoso y en las superficies de discontinuidad, todo el material rocoso puede ser decolorado por intemperismo y un poco menos resistente que el material inalterado.
III	- Roca moderadamente intemperizada	- Menos de la mitad del material rocoso está descompuesto y/o desintegrado a suelo, el material inalterado o decolorado se presenta en forma discontinua.
IV	- Roca altamente intemperizada	- Más de la mitad del material rocoso está descompuesto y/o desintegrado a suelo; el material inalterado o decolorado se presenta en forma continua.

Grado	Nomenclatura	Descripción
V	- Roca completamente intemperizada	- Todo el material rocoso está descompuesto y/o desintegrado a suelo, la estructura original del material se conserva.
VI	- Suelos Residuales	- Todo el material rocoso está convertido en suelo; la estructura y textura del material se han destruido; -- hay aumento en el volumen del material; el suelo no ha sufrido transporte significativo.

Resistencia del material

La resistencia del material rocoso está afectada por la presencia de discontinuidades, por lo cual es importante conocer la resistencia de materiales masivos libres de discontinuidades. En el campo se puede determinar aproximadamente este valor siguiendo el criterio que rige la tabla 4, basada en la prueba de compresión simple:

Tabla 4.- Resistencia de materiales y su estimación en el campo.

Término descriptivo	Resistencia MN/m ² *	Estimación de campo basado en dureza
Muy resistente	100	Roca muy dura se requiere más de un golpe de martillo para romperla

Término descriptivo	Resistencia MN/m ² *	Estimación de campo basado en dureza
resistente	50 - 100	Roca dura; se obtiene - una muestra de mano con un solo golpe de martillo.
moderadamente resistente	12.5 - 50	Roca blanda; se obtiene una raya de 5 mm con el pico del martillo.
moderadamente débil	5.0 - 12.5	Roca demasiado dura para que se pueda cortar una muestra con las manos.
débil	1.25 - 5.0	Roca muy blanda; material que se demorona bajo un golpe firme con la punta del martillo.
muy débil o suelo duro	0.60 - 1.25	Quebradizo o resistente; puede ser roto con las manos pero con dificultad.
muy duro	0.30 - 0.60	Suelo que puede ser rayado con la uña del dedo.
duro	0.15 - 0.30	Suelo que no puede ser moldeado con los dedos.
firme	0.08 - 0.15	Suelo que puede ser moldeado por una fuerte presión de los dedos.
débil	0.04 - 0.08	Suelo fácilmente moldeado con los dedos.
muy débil	≤ 0.04	Suelo que escurre entre los dedos cuando se comprime.

* 1 MN/m² = 146 lb./pulg.² = 10.197 kg/cm².

N o t a : Cualquier roca con una resistencia menos de 1.25 MN/m^2 se considera como suelo.

De igual manera que para el material rocoso, el macizo rocoso en conjunto debe ser caracterizado mediante índices descriptivos; en esta descripción está involucrado también el tipo de roca, el grado de intemperismo y alteración, etc.; pero lo más importante que debe analizarse en un macizo rocoso, son sus características estructurales. De esta manera las rocas deben ser analizadas tanto por sí mismas como formando parte de un macizo rocoso. Los índices descriptivos que se aplican para describir el macizo rocoso son:

- Discontinuidades:
- Tipo
- Sistemas de discontinuidades
- Localización y orientación
- Espaciamiento y frecuencia
- Separación de las superficies
- Relleno
- Extensión en el subsuelo
- Naturaleza de las superficies en el caso de fracturas y fallas

Discontinuidades

Una discontinuidad es considerada como un plano dentro de la roca a lo largo del cual el material rocoso es estructuralmente discontinuo, una discontinuidad no es necesariamente un plano de separación. Representa siempre un zona de debilidad.

Tipos

Las discontinuidades pueden tener diferentes dimensiones, forma y orígenes y se pueden clasificar en 2 tipos básicos: -- Las que se presentan en sistemas; como planos de estratificación, fracturamiento, crucero, esquistosidad, foliación, etc., y los que se presentan individualmente como fallas, discordancias etc.

Sistemas de discontinuidades

La presencia de discontinuidades dentro del macizo rocoso altera las propiedades de éste, reduce la resistencia, favorece la deformación e incrementa la permeabilidad del macizo. En el caso de fallas y fracturas, el grado en que se alteran sus propiedades mecánicas depende no sólo de la dirección de las discontinuidades sino también de los sistemas presentes, de su frecuencia y de su espaciamento.

La orientación de los sistemas de fracturas debe ser medida en el campo para después vaciar los datos en un estereograma y de esta forma obtener un diagrama de puntos, con la finalidad de determinar las direcciones prevaletientes de los esfuerzos.

Localización y orientación

Se debe localizar cada discontinuidad en el espacio, para esto hay que situar la discontinuidad en el plano mediante sus coordenadas y elevación; la orientación de cada plano de discontinuidad se debe representar en términos de rumbo y echado.

Espaciamiento y frecuencia

En el caso de fracturas y fallas su frecuencia y espaciamiento deben ser medidos en el campo a lo largo de un plano perpendicular.

Los términos propuestos en la siguiente tabla son recomendados para describir el espaciamiento entre planos de discontinuidad:

Tabla 5.- Terminología para el espaciamiento entre planos de discontinuidad

<u>Término</u>	<u>Espaciamiento</u>
Extremadamente ancho	2 m
muy ancho	600 mm - 2 m

Término	Espaciamiento
ancho	200 - 600 mm
moderadamente ancho	60 - 200 mm
moderadamente estrecho	20 - 60 mm
estrecho	6 - 20 mm
muy estrecho	6 mm

Separación de las superficies

El grado en que las superficies de los bloques fracturados o fallados están separados o abiertos o rellenados por algún material, debe ser medido y descrito de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 6.- Terminología para la separación entre bloques fracturados o fallados

Término	Separación (mm)
Ancha	200
Moderadamente ancha	60 - 200
Moderadamente estrecha	20 - 60
Estrecha	6 - 20
Muy estrecha	2 - 6
Extremadamente estrecha	0 - 2
Cerrada	0

Relleno

El relleno es el material que se encuentra entre las dos superficies de separación de una discontinuidad, puede ser material molido o brechado en el caso de fallas o material introducido posteriormente en el espacio abierto, tal como arcilla o suelo; el hueco puede estar también sellado, por calcita u otro material. El material de relleno debe ser descrito e identificado y se debe de estimar su resistencia tal como se hace para el material rocoso. La resistencia a lo largo de una discontinuidad depende del grado de separación de las superficies, de la naturaleza del relleno y de las características de las superficies de la discontinuidad.

Extensión en el subsuelo

La extensión en el subsuelo es uno de los factores más importantes en la descripción de discontinuidades y también es uno de los más difíciles de cuantificar; frecuentemente, el plano de discontinuidad va más allá de la roca expuesta y puede resultar prácticamente imposible estimar su extensión en el subsuelo; se recomienda en estos casos medir la longitud máxima expuesta.

Naturaleza de la superficie en el caso de fracturas y fallas

La naturaleza de las superficies se refiere al grado de pulimento o de aspereza que éstas presentan, como resultado de la fricción de los planos de falla o fractura. Para clasificar el grado de aspereza se sugiere el uso de la siguiente tabla:

Tabla 7.- Clasificación del grado de aspereza de una superficie de fractura o falla

Categoría	Grado de aspereza
1	Pulido
2	Con relieves planchados
3	Liso
4	Aspero
5	Con crestas marcadas
6	Con pequeños escalones
7	Muy áspero

Los datos obtenidos con el levantamiento geológico deben ser vaciados sobre un plano topográfico a escala máxima de - - 1:10 000; éste incluirá en particular, la localización de los sitios de muestreo, las observaciones estructurales y los límites que dividen áreas con características litológicas diferentes.

Se presentará un corte transversal a través de los sitios que se juzguen más convenientes para la obra. Junto con el plano geológico debe presentarse un informe sobre el trabajo realizado, acompañado de fotografías que muestren las características más sobresalientes del área e incluyendo conclusiones sobre los aspectos observados, y recomendaciones para futuros estudios.

b2.- GEOFISICA

Con base en la información recabada en el levantamiento geológico o durante la realización del mismo, se programa la investigación del sitio por medio de métodos geofísicos. Estas técnicas son basadas en la medición de propiedades físicas de los materiales que constituyen el subsuelo, las mediciones se realizan en la superficie del terreno mediante instrumentos especiales, las mediciones se interpretan posteriormente de acuerdo con las condiciones geológicas del área.

De acuerdo con el manual de diseño de obras civiles (CFE, 1979) los métodos geofísicos en la exploración de un sitio son recomendables en múltiples casos; en especial en el caso de - - grandes estructuras, canales, proyectos hidroeléctricos, túneles, etc. y siempre será necesario comparar los resultados de - estos métodos con los datos obtenidos de los sondeos convencionales con obtención de muestras, para comprobación.

En geotecnia los métodos geofísicos más utilizados son el sísmico y el eléctrico. En los estudios previos a la construcción de almacenes subterráneos para hidrocarburos, el método comúnmente empleado es el método sísmico de refracción, aunque, - si las condiciones geológicas lo requieran, se emplean también los eléctricos.

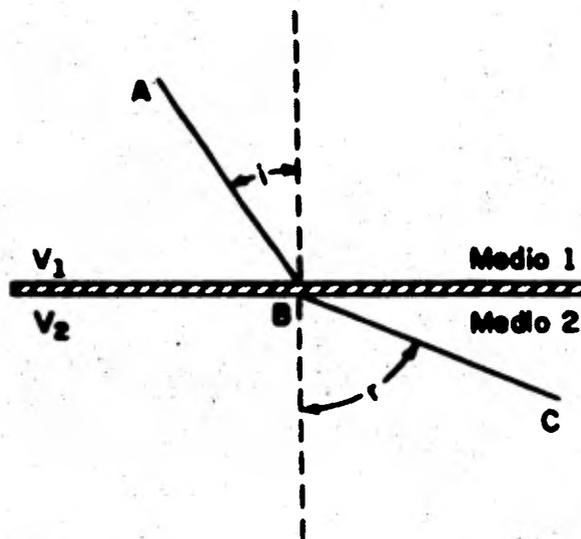
Con el método sísmico de refracción se determina el espesor de la cubierta de suelo y la profundidad de la roca sana. También se puede obtener información sobre la composición y características de la cubierta y de la roca, en base a los valores de la velocidad con que viaja la onda sísmica a través de - los distintos materiales; es posible además, con este método, - detectar el fracturamiento profundo que puede presentar la roca y las posibles zonas de fallas. Con este método también se logra determinar el nivel freático.

El método sísmico de refracción aprovecha el fenómeno de las discontinuidades de carácter físico de las rocas y suelos, provocadas por la detonación de un explosivo en un pozo somero o en la superficie del terreno, el método en sí consiste en medir el tiempo requerido para que las ondas viajen del punto en que se generan a los detectores colocados sobre el terreno, esta señal es amplificada y registrada en un aparato llamado oscilógrafo.

Este método se basa en la teoría de la refracción, la -- cual consiste en lo siguiente (Fig. 8): cuando una onda elástica AB llega a una discontinuidad en el medio, correspondiendo a un cambio notable en las propiedades elásticas, la onda -- es refractada, conservándose según la dirección BC, la magni-- tud de la desviación sigue la ley de Snell, la cual dice que -- una onda al atravesar de un medio a otro, ambos con veloci-- des de propagación diferentes (V_1 y V_2) es refractada de tal -- manera que se verifica la siguiente relación:

$$\frac{\text{Sen } i}{\text{Sen } r} = \frac{V_1}{V_2} \quad (\text{Ver Fig. 8})$$

El problema más simple a resolver en el método sismológico de refracción es el de determinar el espesor d (Fig. 9), de



$$\frac{\text{Sen } i}{\text{Sen } r} = \frac{V_1}{V_2}$$

LEY DE SNELL

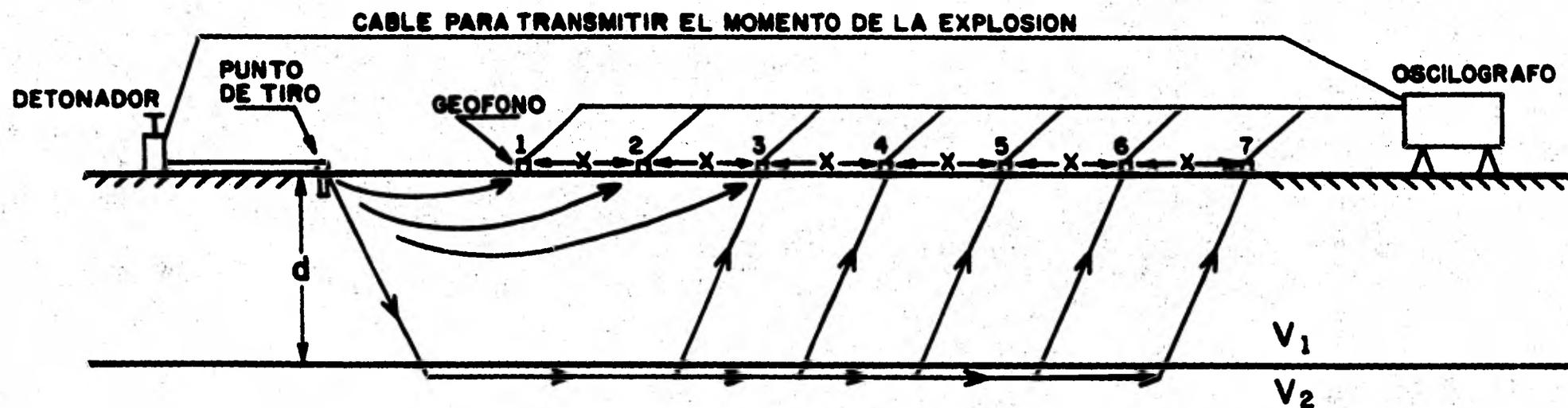
- i** = Angulo de incidencia de la onda (respecto a la normal) sobre el contacto.
- r** = Angulo de refracción de la onda emergente del contacto (respecto a la normal).
- V1** = Velocidad de transmisión de la onda elástica en el medio 1 ó estrato superior.
- V2** = Velocidad de transmisión de la onda elástica en el medio 2 ó estrato inferior.

Fig. 8 TEORIA DE LA REFRACCION SISMICA.

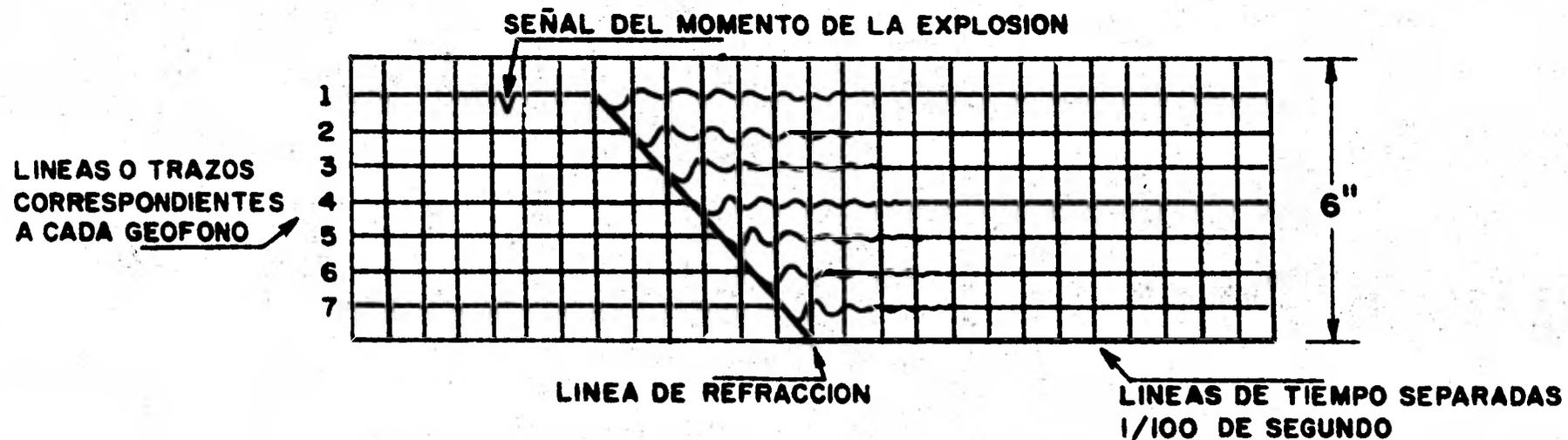
cierta capa de material, en el cual las ondas sísmicas viajan a una velocidad V_1 , esta velocidad es menor que la velocidad con que viajan las ondas en la capa inmediata inferior, la cual es V_2 . Para resolver el problema hay que conocer las velocidades V_1 y V_2 para que de esta manera se conozca el espesor d .

Los detectores o geófonos se colocan en línea recta sobre el terreno, a partir del punto de tiro, separados entre sí por una longitud constante X . En el punto de tiro se provoca la -- explosión de una carga de dinamita, colocada en una perforación somera, de menos de 1 m, y hasta 5 m, o bien se provoca una vibración por impacto. Las ondas sísmicas enviadas por la explosión al terreno o por el impacto llegan a los geófonos, que las recogen, amplifican y transmiten al aparato registrador llamado oscilógrafo (Fig. 9).

El registro sísmico o sismograma es el que se obtiene del aparato registrador, o sea la representación gráfica del paso - de las ondas. Consiste en varias líneas, una por cada geófono; el momento de la explosión se registra con una marca especial; la llegada de la onda a los geófonos queda señalada por un brusco descenso en la curva, con lo que se determina la línea de refracción (Fig. 10).



**Fig. 9 Procedimiento de campo en el método sísmico de refracción.
(Modificado de Krynine y Judd, 1975)**



**Fig. 10 Registro sísmico o sismograma obtenido en el método sísmico de refracción.
(Krynine y Judd, 1975)**

La curva tiempo-distancia se contruye graficando en el -- eje de las abcisas las distancias entre los geófonos y como or-- denadas, los tiempos comprendidos entre la explosión y la llega-- da de la primera onda; uniendo los puntos graficados se obtie-- nen dos líneas rectas que se cortan en un punto, que señala el geófono que recibe al mismo tiempo la onda directa y la refrac-- tada; la distancia c a este punto de intersección se calcula directamente en la gráfica (Fig. 11).

Por medio de la gráfica tiempo-distancia se determinan -- las velocidades V_1 y V_2 y es posible calcular el espesor d de la capa o formación superior, utilizando la siguiente ecuación:

$$d = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

En la investigación por el método sísmico, la distancia -- entre cada línea dentro del área y la longitud de las líneas, -- es variable; la distancia entre los geófonos es de 5 a 10 m -- aproximadamente y la distancia al punto de tiro está condiciona-- da por la profundidad a la que se quiere explorar; a mayor dis-- tancia, mayor es la profundidad que se investiga. Los paráme-- tros citados dependen de las condiciones de cada área en parti-- cular; de la topografía, características geológicas, dimensio-- nes de la obra proyectada, etc.

(TIEMPO TOMADO DEL REGISTRO SISMICO)

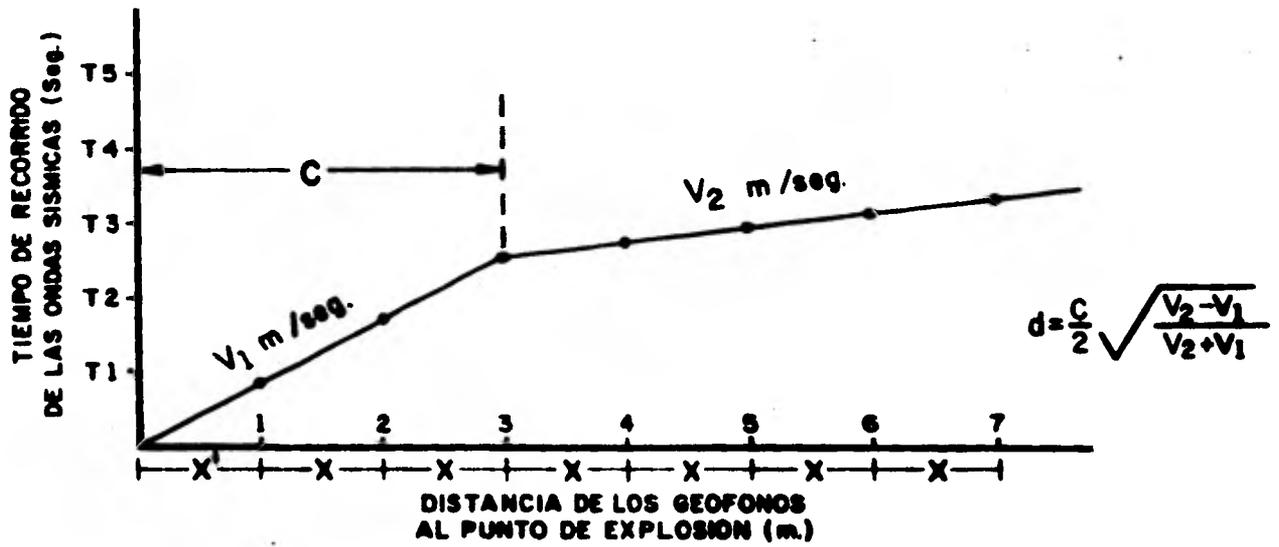


Fig. 11 Curva tiempo-distancia en el método sísmico de refracción.
(modificado de Kryline y Judd, 1975)

Entre los métodos eléctricos existen varias técnicas encaminadas a detectar anomalías en las propiedades eléctricas de las rocas, en base a estas anomalías es posible localizar depósitos de minerales, acuíferos, y estructuras geológicas, principalmente.

En geotecnia uno de los métodos eléctricos más utilizados es el de resistividad, este método se usa para determinar la -- profundidad a que se encuentra la roca firme, dado que por lo -- regular existe gran contraste entre la conductividad de la roca firme y la de los materiales no consolidados que la cubren; -- de esta manera es conveniente utilizar algunas veces este procedimiento como parte de los estudios geotécnicos previos a la -- construcción de la obra en cuestión.

Según el manual de diseño de obras civiles de la C.F.E. - (1979) el método de resistividad proporciona información debajo del nivel freático, permitiendo localizar cavernas o estratos -- blandos que no se identifican fácilmente con el método sísmico. Este método consiste en la determinación de las resistividades aparentes de cada estrato, generando un campo eléctrico median--te el uso de un dispositivo cuadripolar que mide tanto la intensidad de corriente creadora del campo como la caída de poten---cial en dos puntos del campo, para visualizar de esta manera, -

en forma independiente o global, la imagen de la estructura geológica del subsuelo.

El método de resistividad permite también localizar el nivel freático o circulación del agua subterránea; dada la presencia y conductividad eléctrica del agua intersticial en un subsuelo homogéneo.

El manual de diseño de obras civiles de la C.F.E. (1979) señala la conveniencia del método de relación de caídas de potencial para el reconocimiento de formaciones verticales y de espesor reducido, tales como fallas, diques, vetas, etc., haciendo notar que en el caso de heterogeneidad local de los mantos superficiales no es adecuado su empleo.

El método de caídas de potenciales consiste en determinar la relación de caídas de potencial entre 3 electrodos de potencial colocados a distancias iguales y perpendiculares a otros 2 de corriente, los cuales generan un campo eléctrico en el terreno; este método permite en el caso de cuerpos verticales obtener un mayor detalle que con el método de resistividades, además de que su aplicación es más simple pues no se requiere medir la intensidad de la corriente.

Según Dobrin (1969) los métodos eléctricos se caracterizan en general por su escasa penetración y limitado poder de resolución, estando restringido su éxito en estudios de ingeniería y en la localización de depósitos minerales someros.

En la investigación de detalle de sitios para almacenes -- subterráneos de hidrocarburos, podrían utilizarse como una herramienta más combinada con otros métodos.

La interpretación de los resultados obtenidos por los métodos geofísicos debe realizarse en base al levantamiento y estudio geológico previo. De acuerdo a los resultados finales se modifica el programa de la siguiente etapa de investigación detallada, o sea la perforación de pozos para observación y los sondeos para recuperación de muestras.

b.3.- Geohidrología y pozos de observación.

El principio fundamental del almacenamiento subterráneo de hidrocarburos, como ya se señaló, es que estos se localizan bajo el nivel freático, esto hace que la presión hidrostática sea mayor que la existente en el interior de la cavidad, lo cual no permite que el aceite escape. De esta manera, el papel que juega el agua subterránea en este tipo de obras es sumamente importante.

El nivel de agua subterránea debe ser estable y cercano a la superficie. En consecuencia es importante el estudio y conocimiento de las condiciones geohidrológicas del lugar donde se planea realizar la obra.

Se debe contar con un número suficiente de pozos piezométricos de observación en el área que se estudia, lo cual es esencial para ubicar el sitio más favorable para la obra y también para el proceso de planeación y diseño de la misma.

Es importante también observar el nivel estático durante la etapa de construcción, cuando éste se abate alrededor de la obra. Después de la construcción, se sigue observando el nivel freático durante la operación de la planta.

Se recomienda la instalación de un pozo de observación -- por cada 2 km² del área en estudio. La localización exacta de los pozos y su profundidad se determinan en base a los resultados obtenidos en el levantamiento geológico y en los estudios geofísicos realizados.

Por cada pozo perforado se debe tomar una muestra de agua para análisis químico; la composición química del agua, y su -- grado de contaminación debe ser estudiada, pues puede llegar a

afectar los productos almacenados. También en base a las características del agua se selecciona el equipo de bombeo y tuberías, pues el agua puede resultar altamente corrosiva.

La perforación para los pozos de observación puede ser -- realizada por rotación o por percusión. En los pozos se instalan piezómetros para la observación continua del nivel del agua subterránea. Se recomienda la instalación de piezómetros tipo estándar, como el que se muestra en la Fig. 12. Las observaciones en cada pozo deberán realizarse y registrarse por lo menos durante 3 meses consecutivos.

De acuerdo con Krynine y Judd (1975) en toda la obra civil subterránea es conveniente determinar la procedencia del -- agua subterránea y estimar la cantidad probable que se ha de encontrar, también se considera importante establecer la dirección del flujo del agua subterránea y su velocidad.

Shimada y coautores (1980) realizaron un estudio geohidrológico en una pequeña isla granítica en el Japón, como parte de los trabajos previos a la construcción de un depósito subterráneo para petróleo, estos autores determinaron el flujo de las -- aguas subterráneas mediante la medición de la presión del agua en pozos piezométricos; se auxiliaron de los resultados obteni-

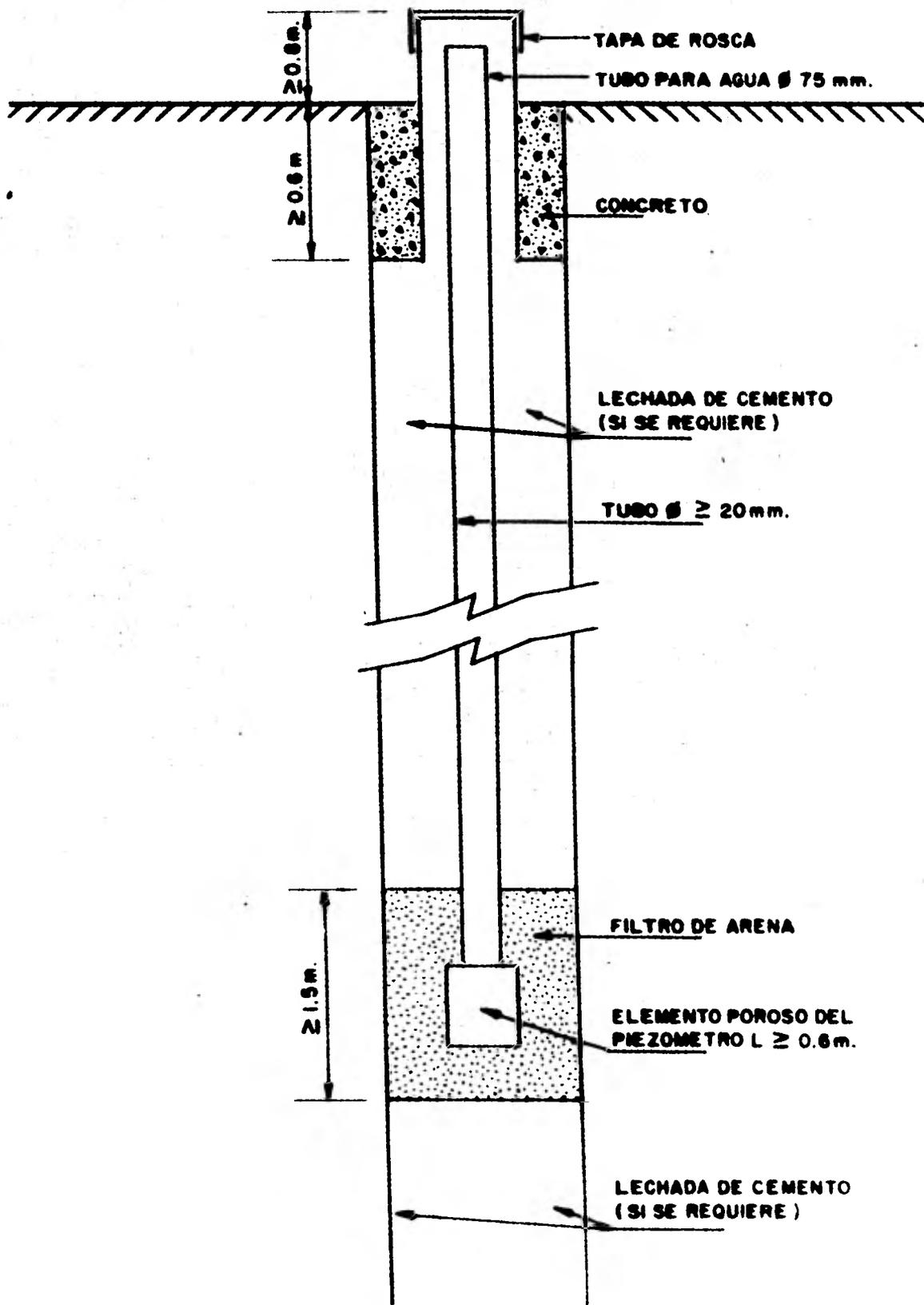


Fig. 12. Esquema de un Piezometro estandar

dos al medir las concentraciones de Tritio, un isótopo del hidrógeno utilizado como trazador en geohidrología. Estos autores recomiendan métodos estadísticos para calcular la distribución potencial del agua subterránea, usando la distribución de permeabilidad y los datos estimados de recarga, tomados de un cálculo de balance del agua.

El propósito de un estudio geohidrológico previo a la construcción de una planta almacenadora de petróleo, señalan Shimada y colaboradores, es el de entender el régimen del agua subterránea en la roca, y el de estimar la influencia de la excavación en el medio ambiente. Estos autores utilizan en su investigación una secuencia de estudios, la cual se muestra en la Fig. 13, usando modelos matemáticos.

b.4.- Sondeos con broca de diamante.

El objetivo del programa de perforación es el de afinar los datos obtenidos mediante el estudio geológico y geofísico, así como de proporcionar muestras para evaluar las condiciones geológicas profundas, y definir la mejor localización para la obra.

Estos sondeos se realizan por rotación con barrenos que tienen como herramienta de corte una broca de diamante y con re-

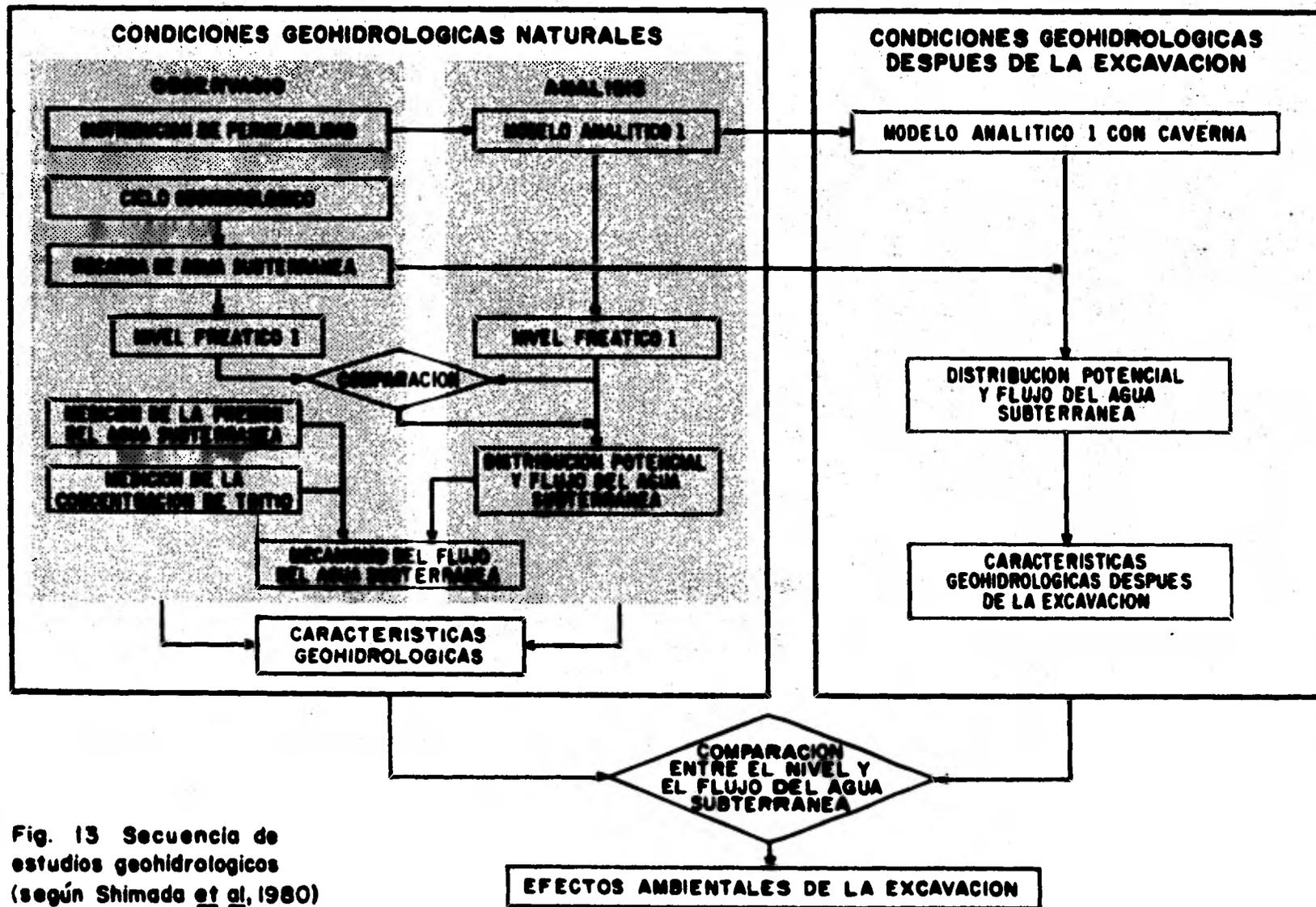


Fig. 13 Secuencia de estudios geohidrológicos (según Shimada et al, 1980)

recuperación de muestras o núcleos. De acuerdo con el manual de diseño de obras civiles de la C.F.E. (1979) las muestras deben ser inalteradas y verdaderamente representativas del material, con un alto porcentaje de recuperación y capaces de permitir identificar las características petrográficas de la roca así como el fracturamiento, tamaño y espaciamiento de fracturas, grado de alteración y presencia de materiales de relleno en ellas.

La localización de los sitios donde se llevan a cabo los sondeos se debe realizar, simultáneamente con el levantamiento geológico, inclusive desde el reconocimiento preliminar se establece un programa de barrenación y la investigación geofísica. Es conveniente localizar los sondeos donde se suponga que existe una zona de debilidad en la roca, o en sitios que presenten anomalías reveladas por la interpretación sísmica.

El número de sondeos depende de las condiciones geológicas del área, según Johansson (comunicación personal) para una planta de almacenamiento de capacidad de 200,000 a 300,000 m³ el mínimo que debe realizarse es cinco, uno o dos de ellos en forma vertical o poco inclinados, para obtener información de las discontinuidades horizontales, y los otros inclinados en ángulos de 30° a 60° para investigar las discontinuidades no

horizontales.

Los sondeos deben ser realizados por lo menos hasta el piso de la caverna, es conveniente inclusive que algunos, si no todos, se profundicen 5 ó 10 m más abajo.

En estos sondeos se pretende obtener la máxima recuperación posible de núcleos y toda la información adicional que se pueda recabar. Se recomienda el barril muestreador de doble tubo giratorio, el cual consiste de un tubo exterior y uno interior, que no gira en donde se recupera el núcleo. El diámetro del núcleo debe ser mayor o igual a 42 mm.

Las muestras obtenidas de los sondeos deben ser tratadas cuidadosamente, almacenadas en cajas de madera o de cartón y registradas con su profundidad, anotando cualquier dato que resulte de interés, de los núcleos recuperados.

Los núcleos contenidos en las cajas deben ser fotografados, de preferencia en color, para así tener una idea de la apariencia de la roca recién muestreada, tiempo después, cuando ésta ya se haya deteriorado.

Por otra parte es importante analizar el registro diario de perforación, o bitácora del perforista, el cual indicará el

avance del sondeo, la pérdida o aumento del fluido de perforación debido a horizontes permeables, el color del mismo al retornar, etc.

Con los núcleos obtenidos de los sondeos se determina la calidad de la masa rocosa, mediante la determinación del R.Q.D. (Rock Quality Designation). El R.Q.D. se define como la suma de las longitudes de todos los tramos de núcleo, de roca sana, que sean iguales o mayores de 10 cm. de largo, expresada como un porcentaje de la longitud total de la porción nucleada. La longitud de los tramos de núcleos individuales se mide a lo largo de la línea central del núcleo y no se toman en cuenta las irregularidades causadas por la barrenación o por el transporte de los núcleos. El R.Q.D. se expresará cuantitativamente de la siguiente forma:

Tabla 8.- Calidad de la roca y R.Q.D.

Calidad de la masa rocosa	R.Q.D. (%)
Muy mala	0-25
Mala	25-50
Regular	50-75
Buena	75-90
Excelente	90-100

Con estos resultados se debe hacer una gráfica a todo lo largo del barreno, para ver la variación de la calidad de la roca.

Durante la barrenación es conveniente realizar pruebas de permeabilidad y fracturamiento de la roca.

La unidad Lugeon corresponde a una absorción de 1 lt. de agua por minuto por metro de tramo probado, bajo una presión de inyección de 10 kg./cm²., aplicada ésta durante 10 minutos.

La prueba Lugeon consiste en lo siguiente (C.F.E., 1979): Se valora la permeabilidad de la masa rocosa localizada bajo el nivel freático, inyectando agua a presión en tramos sucesivos de perforación (la longitud de cada tramo de prueba se elige de acuerdo con el espesor de los diversos estratos atravesados o las características propias de la roca), limitados en sus extremos por empaques; la secuencia de presiones aplicadas debe ser 1, 2, 4, 6, 8, 10, 8, 6, 4, 2, 1, 1 kg./cm²., manteniendo cada incremento de presión durante un tiempo mínimo de 10 min. y verificando que, en ese intervalo, el gasto sea constante.

Si así lo considera el geotecnista, los núcleos obtenidos van siendo estudiados en el laboratorio de mecánica de rocas.

b.5.- Estudio de mecánica de rocas

Este estudio tiene como finalidad conocer las propiedades mecánicas de la roca y proporcionar las bases para analizar las cargas y fuerzas que actuarán en la futura estructura; este análisis es indispensable para el diseño y planeación de la obra.

El comportamiento mecánico del material rocoso inalterado, se determina mediante pruebas de laboratorio aplicadas a los núcleos obtenidos en la perforación.

Se sugiere que se determinen en núcleos representativos, los siguientes parámetros:

- Peso específico o densidad.
- Absorción de agua.
- Porosidad.
- Módulo de elasticidad o módulo de Young.
- Coeficiente de Poisson.
- Velocidad de propagación de las ondas sísmicas.

Además se propone que se realicen las siguientes pruebas:

- Prueba de compresión simple.
- Prueba de tensión (Prueba brasileña).

Peso específico o densidad.

El peso específico o densidad (G) se define como:

$$G = \frac{P_1}{P_2 - P_3}$$

Donde:

P₁ = peso de la muestra en estado de desecación.

P₂ = peso de la muestra en estado de saturación.

P₃ = peso de la muestra en suspensión dentro del agua.

G se conoce como peso específico o densidad aparente, para calcular el peso específico o densidad verdadera, se debe restar - la cantidad de agua A que satura los poros de la muestra, de esta manera $A = P_2 - P_1$ y G verdadera G verd. es:

$$G \text{ verd.} = \frac{P_1}{P_2 - A - P_3}$$

Absorción de agua.

La absorción de agua i se define como:

$$i \% = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

donde:

P₁ - peso de la muestra en estado de desecación.

P₂ - peso de la muestra en estado de saturación.

La absorción de agua i se utiliza para determinar el grado de alteración o la alterabilidad j de la roca, en función de que al aumentar el grado de intemperismo, aumenta el volumen de vacíos.

$$j = \frac{i}{t}$$

Porosidad

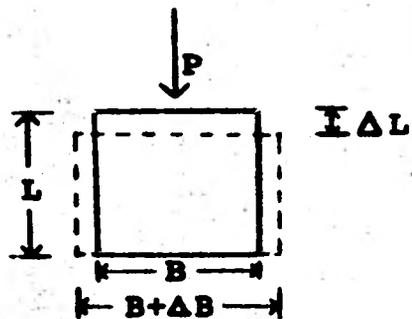
La porosidad de una roca es la relación que existe entre el volumen de poros huecos (volumen de vacíos) y el volumen total de la muestra.

$$n (\%) = \frac{P_2 - P_1}{V} \times 100$$

Módulo de elasticidad o módulo de Young

La elasticidad es la propiedad de los materiales, y en este caso de las rocas, de recuperar su forma original después de haber sido sometidos a una carga. Si a un espécimen se le aplica una carga P , experimenta una disminución ΔL en su longitud L , y un aumento en su anchura $B + \Delta B$ (Fig. 14), si después de suspender la carga P el espécimen recupera su forma y tamaño original, se dice que la roca posee propiedades elásticas; sin embargo, por lo general rara vez la roca recupera su forma y ta

maño original después de una operación de carga y descarga, sino que, por lo general queda una deformación, este tipo de deformación se nombra como plástica o irreversible.



$$E = \frac{\frac{P}{B \times B}}{\frac{L}{L}} = \frac{PL}{LB^2}$$

Fig. 14.- Diagrama esfuerzo-deformación de un espécimen de roca.

(Krynine y Judd, 1975)

E expresa el módulo de elasticidad para una roca cuando es sometida a compresión, se expresa en unidades de fuerza entre área (kg./cm².). La relación anterior se aplica a las rocas isótropas, en un material isótropo el coeficiente de elasticidad es constante, es decir, el mismo en todas direcciones; en las rocas, las propiedades elásticas son en realidad variables en distintas direcciones, y el valor del coeficiente de elasticidad depende de la dirección de la medida.

Coefficiente de Poisson

Es la relación que existe entre la deformación lateral -- $\Delta B/B$, y la deformación longitudinal $\Delta L/L$ (Fig. 14); se denota como μ , donde:

$$\mu = \frac{\frac{\Delta B}{B}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta B L}{\Delta L B}$$

El coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad se conocen como "constantes elásticas", sin embargo sus valores experimentales son variables y aproximados.

Determinación de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas.

A partir de la medición de la velocidad de las ondas sísmicas en el laboratorio se determinan los llamados "parámetros dinámicos", que de acuerdo al manual de diseño de obras civiles de la C.F.E. (1980, B.3.4) son: módulo de elasticidad E_D , módulo de rigidez al cortante G_D y coeficiente de Poisson μ_D .

Los valores de los módulos de elasticidad estáticos son siempre menores que los dinámicos, debido a que en el laboratorio se supone que las ondas sísmicas inducidas se propagan en -

un medio perfectamente elástico, hecho que en la realidad no sucede.

En el laboratorio también se emplean ondas ultrasónicas para la medición de los parámetros dinámicos. La prueba se lleva a cabo midiendo los tiempos de llegada de las ondas que se propagan al golpearse un espécimen de la roca, suspendido en el aire.

Prueba de compresión simple

Esta prueba determina la resistencia y deformabilidad de una roca. Para conocer la resistencia y deformabilidad de un macizo rocoso, la muestra debe ser representativa del fracturamiento que presenta el macizo.

La prueba se lleva a cabo aplicando cargas a un espécimen de roca, generalmente cilíndrico, no confinado lateralmente. La resistencia del material probado será el valor de la carga mínima bajo la cual el material falla, este esfuerzo se representa en Mega Pascales, MPa o Kilo Pascales, KPa, (1 MPa = 1000 KPa = 10 bares = 10.197 kg/cm²). El manual de diseño de obras civiles de la C.F.E. (1980, B.3.4) propone la siguiente tabla de clasificación de las rocas, de acuerdo a su resistencia a la compresión simple.

Tabla 9.- Tipo de rocas y resistencia a la compresión simple

Resistencia en MPa	Condición	Descripción
5 a 20	Muy débil	Sedimentarias alteradas y débilmente compactadas.
20 a 40	Débil	Sedimentarias y esquistos débilmente cementados.
40 a 80	Resistencia media	Sedimentarias competentes; y rocas ígneas cuarzosas de densidad un poco baja.
80 a 160	Resistencia alta	Ígneas competentes, metamórficas, y algunas areniscas de grano fino.
160 a 320	Resistencia muy alta	Cuarcitas; rocas ígneas densas de grano fino.

Prueba de tensión (prueba brasileña).

Esta prueba consiste en someter la muestra cilíndrica a compresión diametral y permite inferir el comportamiento de la roca en la zona en que el macizo rocoso está sujeto a esfuerzos de tensión σ_y , y de compresión σ_x ; el esfuerzo de tensión inducido es menor que el de compresión, sin embargo, el espécimen falla a lo largo del eje vertical debido a su menor

resistencia a la tensión (Fig. 15).

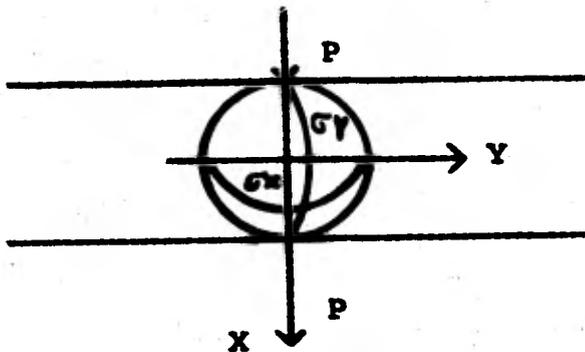


Fig. 15.- Diagrama de esfuerzos de compresión, σ_x y de tensión σ_y .

(C.F.E., 1980, B.3.4.)

Como pruebas de campo se recomienda se lleven a cabo pruebas de resistencia al esfuerzo cortante en diferentes tipos de superficies de fracturas y/o fallas, con la finalidad de obtener la resistencia al corte de dichas discontinuidades.

La prueba se realiza en el campo en bloques labrados in situ (C.F.E., 1980) a los que se les aplica un esfuerzo normal constante y un esfuerzo cortante que se incrementa; en seguida se miden los desplazamientos longitudinales y transversales producidos. El labrado del bloque debe realizarse con precaución para no alterar la roca. Es necesario describir las características geológicas del sitio en donde se realice la prueba, así también se recomienda muestrear la roca en las vecindades del bloque labrado para efectuar pruebas de laboratorio, que se correlacionarán con los resultados de la prueba de campo.

Los resultados de las pruebas de mecánica de rocas tanto

de laboratorio como de campo, aunados a los estudios mencionados anteriormente permiten seleccionar el área más apropiada para realizar la obra y reducir el costo total del proyecto.

3.3.- Evaluación del o de los sitios y selección definitiva de la localidad.

En esta etapa se procede a la selección definitiva del área donde se llevará a cabo la obra. Esta área debe ser la óptima, es decir, la que proporcione las mejores condiciones de estabilidad y seguridad al menor costo posible.

La evaluación final del sitio es un trabajo multidisciplinario, en ella deben intervenir ingenieros geólogos especialistas en geotecnia e ingenieros especialistas en diseño y planeación de estas obras subterráneas, analizando tanto los aspectos económicos como los técnicos.

El propósito de los trabajos realizados durante la investigación de la localidad preseleccionada fue el de proporcionar a los especialistas todos los datos necesarios para la evaluación definitiva del sitio donde se pretende llevar a cabo la obra.

Con base en criterios geotécnicos se divide el macizo rocoso en zonas de diferentes características, seleccionándose la sección transversal óptima para alojar la obra subterránea.

El siguiente paso, es el diseño, planeación y estimación del costo de la obra; se calculan las dimensiones óptimas para las cavidades, tipo de bóveda, y espesor de los pilares de separación entre cada cavidad.

Se seleccionan los métodos y procedimientos de construcción, tipo y cantidad de refuerzos y trabajos de sellado, ubicación y características del tunel de acceso.

Por otro lado se diseña y selecciona el equipo de bombeo, tuberías, ductos de conducción de los productos almacenados, y cuartos de máquinas. Además debe planearse y diseñarse los caminos de acceso, e infraestructura que requiera la obra, así como la utilización del material excavado.

Todo lo anterior, con sus costos respectivos, para que se haga una evaluación económica de la obra a realizar, la cual, como ya se mencionó, debe ser funcional y de mínimo costo.

4.- DISCUSION

Ante el gran avance de México en materia de producción de crudo, puede surgir la necesidad de contar con facilidades de almacenamiento adecuadas que permitan la regularización del ritmo de producción, de tal manera que se satisfaga adecuadamente la demanda interna y se cumpla con los planes y compromisos de exportación; por lo cual es indispensable contar con almacenamiento económico y a gran escala cerca de las refinerías, campos productores y puertos exportadores.

Como se mencionó, el almacenamiento de hidrocarburos en cavidades subterráneas ofrece importantes ventajas contra el almacenamiento en tanques metálicos superficiales; en grandes volúmenes, el costo es menor por unidad de volumen; las plantas subterráneas ofrecen un costo menor de mantenimiento y operación y no sufren deterioro. Por otra parte se reduce el riesgo de fugas, no hay pérdida por evaporación y se tiene mayor seguridad en cuanto a accidentes y sabotaje.

Con este método de almacenamiento se obtiene un importante ahorro de superficie, que puede aprovecharse para fines agrícolas, ganaderos, industriales, etc. Sus instalaciones en superficie son mínimas, no alteran el paisaje, lo que es importante so-

bre todo en zonas recreativas y turísticas.

Se enfatiza en el presente trabajo la importancia del estudio geotécnico en sus distintas fases: Preselección del o de -- los sitios y estudios de detalle, comprendiendo estas últimas -- a levantamiento geológico, geofísico, geohidrología, perforación de pozos de observación, sondeos con broca de diamante y pruebas de mecánica de rocas.

Estos estudios son indispensables a la evaluación y selección definitiva de la localidad de la obra.

Con este trabajo se espera haber expuesto la problemática del almacenamiento subterráneo, en roca, de hidrocarburos y productos derivados, y de haber ilustrado un nuevo campo de desarrollo para los geólogos interesados en la rama de la geotecnia.

5.- REFERENCIAS

- Beissner, K, R. Koch, H. Schleicher, W. Dreyer y G. Fürer, 1975. Underground storage of liquid and gaseous hydrocarbons with special consideration to public safety, regional planning and environment protection. Mem. 9th World Petrol. Congress. Tokyo, - V. 5, p.p. 97-107.
- Bergman, M., 1980. Economical ways of storing hydrocarbons - - underground. Erdöl und Kohle-Petrochemie vereinigt mit Brennstoff-chemie, V. 33, N. 3, p.p. - - 131-134.
- Comisión Federal de Electricidad, 1979. Manual de diseño de -- obras Civiles, Sección B Geotecnia, temas B.1.1., B.1.2., B.1.4., B.1.5., B.3.2. y B.3.4. Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- Dobrin, M. B., 1969. Introducción a la prospección geofísica. Ediciones Omega, S. A., 2a. edición Barcelona, España. p.p. 376-400.
- Farquhar, O. C., 1977. Favorable bedrock formation for deep, -- man-made caverns in New England (U.S.A.). In - - storage in excavated rock caverns (symposium), - Stockholm, Sweden, Pergamon Press, V. 1, p.p. 89-94.
- Geological Society Engineering Group, Working Party Report, - - 1970. On "the logging of rock cores for engineering purpose", Q. 51. Engng. Geol. Impreso en Inglaterra, V. 3, p.p. 1-24.
- Krynine, D. P. y W. R. Judd, 1975. Principios de geología y -- geotecnia para ingenieros. Ediciones Omega, S.A., 4a. edición. Barcelona, España. 829 p.
- Moberg, S. H., 1977. Storage of heavy fuel oil in rock caverns during three decades. In storage in excavated -- rock caverns (symposium), Stockholm, Sweden, Pergamon Press. V. 1, p.p. 149-155.

- Ohya, S. y T. Takeuchi, 1977. Problems and method of investigation for large-scale excavation in rocks. In - - storage in excavated rock caverns (symposium). - Stockholm, Sweden, Pergamon Press, V. 1., p.p. -- 111-116.
- Reid, R. A., 1976. Mass storage of liquefied petroleum gases - in the U.S.A. Memm. 13 th World Gas Conference, London '76 Mc Corquodale Printers Limited. Lon--- dres, p.p. 1-20.
- Schabas, E., 1977. Underground storage conference aimed at an energy-conscious world. Canadian Mining Journal, v. 98, n. 12, p.p. 20-26.
- Schimada, J., H. Momota y Y. Ono, 1980. Role of groundwater in the bedrock for underground oil storage. In sub-surface Space (symposium) Stockholm, Sweden, Pergamon, Press. V. 1, p.p. 393-400.
- Söderberg, L. 1977. Practical procedure for preinvestigation - concerning unlined rock storage caverns for petroleum products. In storage in excavated rock caverns (symposium), Stockholm, Sweden, Pergamon - - Press, V. 2, p.p. 227-230.
- Ullgren, S., 1977. Crude oil storage in rock caverns. In storage in excavated rock caverns (symposium), Stockholm, Sweden, Pergamon Press, V. 1, p.p. 145-147.
- Weeks, J. P. and R. Smith, 1975. Underground fuel storage. -- Petroleum Rev., V. 29, n. 347, p.p. 767-773.
- Wettlegren, G., 1978. Underground oil storage in disused - - - mines. Underground space, Pergamon Press, Lon-- dres. v. 3., n. 1. p.p. 9-17.
- Witherspoon, P. A., U. Lindblom, C. O. Morfeldt y I. Janelid, - 1975. Man-made caverns can add to U. S. natural gas storage. Pipeline industry, v. 43, n. 6, - - p.p. 25-28.