

88

2.56



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**ESTUDIOS GEOTECNICOS PARA LA INSTALACION  
DE TUBERIAS SUBMARINAS**

**TRABAJO ESCRITO**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO CIVIL**

**P r e s e n t a :**

**BENJAMIN LARA NAJERA**

**México, D. F.**

**1985**



## **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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

# I N D I C E

CAPITULO I	PAGINA.
I. INTRODUCCION -----	1
CAPITULO II	
II. ESTUDIOS GEOFISICOS -----	3
II.1. Generalidades	
II.2. Objetivo de los estudios geofísicos	
II.3. Trabajos de campo	
II.3.1. Información sobre batimetría y morfología	
II.3.2. Información del subsuelo marino	
II.4. Descripción del equipo	
II.4.1. Sistema de posicionamiento	
II.4.2. Ecosonda	
II.4.3. Sonar de barrido lateral	
II.4.4. Perfilador somero	
II.4.5. Perfilador profundo	
II.5. Trabajos de gabinete	
II.5.1. Planos y perfiles	
II.5.2. Determinación de espesores	
CAPITULO III	
III. ESTUDIOS GEOTECNICOS DE CAMPO -----	28
III.1. Estudios someros	
III.2. Muestreo por vibración	
III.2.1. Características de los vibromuestreadores	
III.3. Muestreo por gravedad y pistón estacionario	
III.3.1. Muestreo por gravedad	

III.3.2. Muestreo con pistón estacionario

III.3.3. Características de los muestreadores de  
gravedad y pistón estacionario

III.4. Trabajos de campo

CAPITULO IV

IV. PRUEBAS DE LABORATORIO ----- 39

IV.1. Objetivo de las pruebas

IV.2. Mediciones usuales en el laboratorio

CAPITULO V

V. ANALISIS Y RECOMENDACIONES ----- 44

V.1. Fuerzas hidrodinámicas

V.2. Interacción suelo - tubería

V.3. Recomendaciones

CAPITULO VI

VI. CONCLUSIONES ----- 77

BIBLIOGRAFIA ----- 84

## I. INTRODUCCION

La importancia de las construcciones fuera de costa dedicadas a la explotación petrolera ha ido en aumento en los últimos años y lo más probable es que continúe este aumento por lo menos en la presente década.

Dentro de tales construcciones se encuentran las tuberías utilizadas para la recolección y transporte de crudo y gas a los centros de proceso o almacenamiento.

El funcionamiento correcto de las tuberías depende en gran medida de la estabilidad del suelo que las sustenta y del circundante. Por lo tanto se requiere de investigaciones geotécnicas que proporcionen los parámetros de diseño adecuados para garantizar dicha estabilidad.

En este trabajo se describe la metodología, el equipo empleado y el procesamiento de los datos provenientes de estudios geofísicos.

También se pretende dar a conocer las técnicas utilizadas ( para el caso de tuberías submarinas ) en el muestreo de los suelos marinos y las características de las mismas; así como las propiedades que se pretenden conocer mediante pruebas de laboratorio.

Por último se menciona lo que podría llamarse método para analizar tuberías instaladas en el fondo marino, esto como

resultado de estudios realizados por diversos autores, y algunas recomendaciones enfocadas a solucionar adecuadamente el cruce de tuberías sobre arrecifes de coral, fallas activas y zonas sujetas a licuación de arenas o a socavación.

## II. ESTUDIOS GEOFISICOS

### II.1. GENERALIDADES

La necesidad del conocimiento de las características geológico-estructurales del suelo y subsuelo marino como -- herramientas para el diseño y/o instalaciones de obras -- de Ingeniería ha permitido a la geofísica desempeñar un papel importante dentro de la construcción marina.

Las bases teóricas de la geofísica de exploración están-- relacionadas intrínsecamente con la propagación y reflexión del sonido en las diferentes capas de los medios -- geológicos. El sonido es una vibración longitudinal de -- materia, o sea, una serie de compresiones y descompresiones que se expanden en todas direcciones a partir de la fuente que lo genera. La velocidad de propagación de este movimiento dependerá directamente de la rapidez con -- la cual puede vibrar la materia en la que viaja el sonido, por lo que la velocidad de propagación está gobernada principalmente por el estado físico de la substancia-- ( sólido, líquido o gaseoso ), y en menor grado, por la temperatura y presión a la que se encuentre dicho material.

Cuando el material de una determinada substancia se ve -- afectada por uno de estos movimientos ondulantes compresionales y esta substancia se encuentra en contacto con otra diferente, y por ende, de distinta velocidad de propagación, las vibraciones de la primera substancia se -- comunicarán a la segunda, pero parte de estas vibracio--

nes rebotarán en el contacto de las dos sustancias para regresar al origen de las mismas, creándose de esta manera el fenómeno de reflexión.

Los fenómenos de reflexión siempre ocurren con cualquier cambio de velocidad de propagación, pero las reflexiones más fuertes ocurren cuando las diferencias entre velocidades son muy contrastantes. Los rangos de velocidades normales varían entre 1500 y 7000 metros/segundo, correspondiendo la primera al agua de mar y la segunda a rocas de altas densidades.

El subsuelo del mar está constituido, para efectos prácticos, por una secuencia de sedimentos que han sido depositados suavemente en capas ( en ocasiones estos se encuentran sobre estratos rocosos ), unas sobre otras. Estas capas constituyen interfases de velocidad, ya que de unas a otras la velocidad es diferente, siendo ésta la razón por la cual existe una reflexión en cada una de estas -- interfases.

Los fundamentos de la geofísica de reflexión consisten básicamente en la emisión y recepción de vibraciones -- sónicas o señales sísmicas, a través de los medios -- -- marino-geológicos.

## II.2. OBJETIVO DE LOS ESTUDIOS GEOFISICOS

El propósito fundamental de los estudios geofísicos es obtener la siguiente información:

-Determinar la batimetría, topografía marina, localización de obstáculos y restos de buques; o sea las características de la superficie del fondo marino.

Esto se logra a través de los métodos acústicos ( ecosonda, sonar de barrido lateral ). Y de ser necesario por el método magnetométrico.

-Información concerniente a la geometría, estructura y configuración del subsuelo.

Esto empleando métodos de reflexión sísmica.

Para el caso de tuberías interesará primordialmente la información de los primeros 100 metros.

Las diversas técnicas de investigación geofísica son generalmente llevadas a cabo simultáneamente y los resultados son globalmente complementarios.

## II.3. TRABAJOS DE CAMPO

El reconocimiento geofísico cubrirá una faja de alrededor - de 600 metros de ancho, centrada sobre el trazo teórico de la tubería.

Serán usados simultáneamente los siguientes equipos:

-Posicionamiento electrónico

-Ecosonda

-Sonar de barrido lateral

-Perfilador somero

-Perfilador profundo

En las figuras II.1. y II.2. podemos observar la disposición del equipo en la embarcación.

### II.3.1. INFORMACION SOBRE BATIMETRIA Y MORFOLOGIA

Mediante la utilización del ecosonda se obtendrá:

-1 perfil batimétrico central a lo largo del trazo teórico. Y regularmente además del perfil central:

-2 Perfiles laterales de 100-150 metros a los lados del perfil central

-2 Perfiles laterales a 300 metros de ambos lados del perfil central

-1 Perfil transversal corto para residuar medidas y chequear la aproximación obtenida.

La batimetría tiene que ser complementada por un fino levantamiento morfológico, particularmente en zonas de considerable rugosidad.

Por medio de un sonar de barrido lateral ( Side - Scan ) serán grabados:

-2 Perfiles colocados a 120 metros a cada lado de la ruta teórica.

Estos perfiles deberán hacer posible:

- Identificar relieves en el rango de 0.5 - 1.0 metros.
- Distinguir cambios en la naturaleza litológica de la superficie del suelo.

Adicionalmente se tendrá el recurso de la observación -- visual por medio de una cámara de televisión movida a lo largo y cerca del fondo, con la finalidad de identificar la naturaleza de ciertas anomalías detectadas. Sin embargo este tipo de observación directa será confinada a zonas de considerable rugosidad, reñada por los métodos-- indirectos ( ecosonda y sonar de barrido lateral ).

La búsqueda de obstáculos ferromagnéticos ( ruinas, -- anclas, cables, tuberías, etc. ) enterrados una distan-- cia reducida (<3 metros ) será posible sólo por medio de un magnetómetro, con una fina resolución usado al mismo-- tiempo que el sonar de barrido lateral.

### II.3.2. INFORMACION DEL SUBSUELO MARINO

Los problemas de la estabilidad de la tubería involucran solamente los yacimientos más superiores del lecho marino ( unos pocos metros ). Sin embargo uno no deberá olvi-- dar que el conocimiento de las estructuras geológicas -- subyacentes mejora el entendimiento geológico de la su-- perficie y por ende se logra una mejor interpretación.

Generalmente se pretenderá lo siguiente:

- Una penetración de alrededor de 30 metros o más.
- Una definición de 1 a 2 metros.

Estos requerimientos pueden lograrse con varios instrumentos de uso común:

- El Sparker de energía relativamente baja que da una resolución de cerca de 2 metros y una penetración de unas pocas decenas de metros.
- El Boomer con una resolución de 1.5 a 2.0 metros y una penetración capaz de alcanzar varias decenas de metros.
- Sondeadores de sedimentos con resolución extremadamente buena alrededor de 1.0 metros; pero con penetración de unos pocos metros en arenas y hasta 20 a 30 metros en suelos suaves.

De tal manera que serán levantados tres perfiles:

- 1 perfil central
- 2 perfiles laterales a 300 metros a cada lado del perfil central

La tabla II.1. resume los levantamientos geofísicos y visuales del fondo y suelo antes del tendido de la tubería.

## II.4. DESCRIPCION DEL EQUIPO

### II.4.1. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

Este equipo electrónico es un dispositivo diseñado para la localización de una estación móvil, a partir de dos o más estaciones fijas. Esto se logra mediante la intersección de las respectivas distancias de la estación móvil a las fijas. Cuando las corrientes marinas, el oleaje y/o el viento producen desviaciones en las rutas programadas, se requiere determinar las diferencias de rumbo y de coordenadas entre puntos observados y programados; por lo cual es necesario conocer las desviaciones que se tuvieron.

Para ello, el equipo de posicionamiento cuenta con un sistema periférico que imprime las distancias, convierte a coordenadas las mismas e indica la distancia a que se encuentra la embarcación de la ruta programada.

El equipo de posicionamiento, esencialmente está constituido por tres unidades principales y sus respectivos accesorios.

Estas unidades son:

- Consola interrogadora
- Consola respondedora No. 1
- Consola respondedora No. 2

La consola interrogadora que tiene como función medir las distancias a las dos estaciones respondedoras, tiene como accesorios; una antena omnidirec

cional, cable de radiofrecuencia, cable de poder, -  
audífono y micrófono.

Las consolas respondedoras cuentan con antenas fi-  
jas, tripies, cables de radiofrecuencia y poder, -  
audífonos y micrófonos.

Las principales características son:

-Rango de operación	100 Km.
-Resolución	0.1 m.
-Frecuencia de operación	2900 - 31000 MHz

#### II.4.2. ECOSONDA

Este equipo está diseñado para efectuar mediciones de profundidad en levantamientos batimétricos, mediante el empleo de ondas sónicas. Este instrumento cuenta con un transductor que se dirige verticalmente hacia el fondo marino, el cual emite una serie de pulsos acústicos. Parte de la energía de dichos pulsos se reflejan en el piso marino y vuelve en forma de eco al mismo transductor, el que -- opera simultáneamente como receptor y transmisor.-- El tiempo que transcurre entre el momento de la -- emisión de los pulsos y el retorno hasta el transductor, es proporcional a la profundidad.

El registro de las profundidades se hace gráfica-- mente, por lo que las profundidades aparecen impre-- sas en papel, siguiendo la topografía del piso ma-- rino.

El transductor funciona como micrófono y bocina -- en una sola unidad, durante la transmisión convierte los pulsos de energía eléctrica en pulsos de -- energía supersónica, los cuales viajan a través -- del agua hacia el fondo. Durante la recepción recibe los ecos de la energía supersónica que se refleja en el fondo y la convierte en señales eléctri-- cas.

#### II.4.3. SONAR DE BARRIDO LATERAL

Es un equipo empleado para obtener una especie de fotografía cilíndrica del piso marino. Su propósito es el de detectar y mostrar los objetos presentes en el piso marino y el tirante de agua en un registro que los presenta en su posición relativa con respecto al barco que remolca al sensor, mismo que va sumergido, al pasar sobre el área en que se encuentran.

El sonar de barrido lateral emite una serie de pulsos cuyas señales al reflejarse son recibidas por la graficadora, la cual las amplifica y las registra en el papel, apareciendo un evento para cada - objeto. La posición en el registro corresponde al tiempo en que fué recibida la señal y por lo tanto está relacionada con la inclinación del objeto que representa. La intensidad luminosa que aparece en el registro es función del tamaño y reflectividad de los objetos.

El equipo consta de una graficadora con dos canales, dos transductores y una fuente de poder de baterías. Los transductores están colocados en un cilindro de forma hidrodinámica, equipado con aletas estabilizadoras y pesos de zinc en la nariz para el balance hidrodinámico.

#### II.4.4. PERFILADOR SOMERO

El sistema perfilador somero proporciona datos que nos permiten determinar la naturaleza de los sedimentos, así como los fenómenos que los afectan, hasta una profundidad de 80 metros bajo el piso marino.

Este perfilador consta de una fuente de energía, una fuente acústica, hidrófonos, filtros y una graficadora.

Su funcionamiento es el siguiente: La fuente de energía proporciona descargas eléctricas que son transmitidas a la fuente acústica, donde son convertidas en ondas. Las cuales viajan en el agua penetrando el piso marino, propagándose en todas direcciones y al tocar las diferentes capas que encuentran conforme avanzan, son reflejadas. La energía reflejada es captada mediante los hidrófonos, produciéndose la conversión de presiones ocasionadas por ondas acústicas en señales eléctricas.

Una vez filtrada, la señal es amplificada en la --  
graficadora y de esta forma, los pulsos eléctricos  
son convertidos a señales ópticas que quedan impre-  
sas en un registro donde se observan eventos sísmi-  
cos de reflexión referidas a una escala de tiempo.  
La figura II.3. muestra esquemáticamente el funcio-  
namiento de los perfiladores.

#### II.4.5. PERFILADOR PROFUNDO

Es un equipo que emplea una fuente de sonido de ba-  
ja frecuencia y alta energía, logrando obtenerse -  
registros hasta una profundidad de 1000 metros ba-  
jo el fondo marino. La fuente genera una onda acús-  
tica de gran amplitud, mediante la descarga de - -  
energía almacenada en los condensadores a través -  
de nueve electrodos submarinos especialmente dise-  
ñados para este propósito. Los nueve electrodos --  
están forrados de neopireno y están montados en --  
una estructura triangular de acero inoxidable. Al-  
recibir los electrodos una descarga de energía - -  
eléctrica se forma una burbuja explosiva, debido -  
al agua salada y a la estructura en que están mon-  
tados. La aceleración del crecimiento de la burbu-  
ja genera un pulso acústico positivo de alta inten-  
sidad, luego al efectuarse la desaceleración en el  
crecimiento, la presión se reduce y se presenta un-  
pulso negativo conforme comienza a hundirse la bu-  
buja.

El sistema está compuesto por un conjunto de elementos interconectados, con la finalidad de obtener una gráfica del subsuelo marino a diferentes profundidades. Las partes de que consta son las siguientes:

Fuentes de poder.....	2
Bancos de capacitores suplementarios.....	2
Banco de capacitores disparador.....	1
Transductor emisor de 9 electrodos.....	1
Arreglo de hidrófonos.....	1
Filtro.....	1
Graficadora.....	1

## II.5. TRABAJO DE GABINETE

El trabajo de gabinete consiste básicamente en la interpretación de lo obtenido con los diferentes equipos antes descritos.

Lo primero es la obtención de las coordenadas reales de los puntos de tipo o posicionados ( obtención del plano de posicionamiento ). Después se procede a efectuar la lectura de los registros del ecosonda para conocer las profundidades, efectuando corrección por mareas y por sumergencia del sensor.

Posteriormente se analizan los registros de los perfiladores como los mostrados en las figuras II.4., II.5. y II.6.; y del sonar de barrido lateral con objeto de marcar los --

eventos geológicos más significativos, plasmándolos en sus planos respectivos.

## II.5.1. PLANOS Y PERFILES

Serán elaborados los siguientes planos:

- Plano de posicionamiento. En él se muestran los -- diferentes recorridos, y puntos de marca de even-- to, que se realizaron en la inspección geofísica.
- Plano batimétrico. En este plano se vacían los da-- tos del tirante de agua obtenidos ( con los regis-- tros del ecosonda ), en cada punto de marca del -- evento; Dibujandose diferentes curvas batimétricas.
- Plano de isopacas. Con los datos del perfilador -- somero se obtiene este plano que representa los -- diferentes espesores de los sedimentos no consoli-- dados, que se encuentran entre el fondo del mar y-- la primera capa consolidada.
- Plano estructural. Con los datos proporcionados -- por el perfilador profundo se elabora este plano -- que proporciona información sobre la geología - -- estructural del lugar con todos sus accidentes, ta-- les como fallas, paleocanales, zonas de erosión y-- otros.
- Plano de condiciones del fondo marino. Por medio -- de los datos del sonar de barrido lateral se elabo-- ra éste a manera de plano general o resumen, el -- cual proporciona información de todos aquellos - -- eventos geológicos o artificiales que pudieran - -

complicar el desempeño de actividades ingenieriles como, afloramiento coralinos, flujos de lodos, tuberías, rocas voluminosas, etc.

-Perfiles. Estos se elaboran conjugando todos los planos, ya que presentan el fondo marino, la primera capa consolidada y los horizontes y geología -- estructural representados en los planos.

## II.5.2. DETERMINACION DE ESPESORES

-En el fondo del mar

•afloramientos. Con este nombre se denota a todo tipo de eventos naturales que emergen del fondo marino y que no están cubiertos por sedimentos. -

Entre ellos tenemos:

•Gas. Uno de los afloramientos comunes es el escape de gas hacia la superficie del mar, el cual puede ser de origen reciente, como en el caso -- del gas biogénético; o bien, proveniente de depósitos de hidrocarburos.

La importancia de los afloramientos de gas dentro de la Ingeniería radica en que, en las zonas en que aflora, altera las propiedades mecánicas de los suelos; esto se debe a que, al mezclarse con los sedimentos, ocupa los vacíos del suelo, desplaza el agua intersticial y en ocasiones la presión del afloramiento hace fallar al suelo, - el cual se conserva así sobre el fondo del mar.-

Es decir reduce la resistencia del suelo al esfuerzo cortante dada por la ecuación general:

$$\bar{\sigma} = C + (\bar{\sigma} - U) \tan \phi$$

En la cual, si  $U$  aumenta por la presencia de gas en el suelo, el valor de  $(\bar{\sigma} - U)$  disminuye, y por lo tanto, el valor de  $\bar{\sigma}$  disminuye también.

La identificación de este evento se efectúa con la ayuda del sonar de barrido lateral, el ecosonda y el perfilador somero, siendo frecuente en estos registros la aparición de montes o volcanes de lodos y cráteres causados por la salida de gas hacia la columna de agua.

- Corales. Un obstáculo frecuente para las obras marítimas es la presencia de corales sobre el fondo marino, especialmente en tendido de ductos e instalación de plataformas petroleras.

El origen del coral se debe a la presencia de colonias orgánicas de pólipos que se desarrollan generalmente en zonas rocosas y cuya acumulación da origen a diversas formas arrecifales que en ocasiones afloran sobre el fondo y sobre la superficie del mar. El problema más importante de los corales es que, aún cuando tuviese una buena capacidad de soporte, no son bien conocidas sus propiedades mecánicas y son un elemento frágil para construcción.

La identificación de estas estructuras orgánicas

es posible gracias a la ecosonda, sonar de barrido lateral y perfilador somero, los cuales permiten dimensionarlas y detectar su forma geométrica.

•Roca. Dentro de la Ingeniería de cimentaciones es importante el conocimiento de la profundidad del basamento rocoso para el anclaje o cimentación de estructuras. Si la roca aflora, puede ser descubierta con la ayuda del sonar de barrido lateral, el cual permite determinar las características -- geométricas de los afloramientos rocosos y su localización en un plano de proyección ortogonal.

•Eventos Artificiales. En algunas ocasiones la geofísica puede prestar servicios a la localización - de objetos o construcciones existentes en el fondo del mar; para ello, tanto el magnetómetro ( instrumento que mide la intensidad del campo magnético y sus anomalías ) como el sonar de barrido lateral, resultan valiosas herramientas para estos propósitos.

-En el subsuelo marino

•Isopacas. Los espesores de sedimentos representados en el plano de isopacas son los correspondientes a los materiales sin consolidarse, los cuales se determinan restando a la profundidad de la primera capa consolidada ( la cual aparece claramente como reflector en los registros del perfilador - -

somero ) la profundidad del fondo del mar y en caso de que no se conozcan las profundidades y se conozcan únicamente los tiempos de reflexión de -- ambos eventos, se aplica la ecuación:

$$e = v \frac{t_1 - t_2}{2} - K$$

Donde:

$e$  = Espesor en metros

$v$  = Velocidad de propagación en el fondo en metros por segundo

$t_1$  = Tiempo de reflexión del fondo marino en segundos

$t_2$  = Tiempo de reflexión de la primera capa consolidada en segundos

$K$  = Factor geométrico de corrección adimensional.

•Arrecifes. En ocasiones los arrecifes se encuentran sepultados por sedimentos marinos más recientes y es necesario conocer sus dimensiones y profundidades para considerarlos en el diseño de una cimentación. Para tal efecto se debe iniciar por localizarlos en los registros de los perfiladores y marcar su piso y su techo, con lo cual se logrará medir el tiempo que requirieron las señales sísmicas en recorrer ese espacio y, si se conoce la velocidad de transmisión de las ondas, puede aplicarse la ecuación anterior modificada de la siguiente manera:

$$e = v \frac{t_e - t_a}{2} - K$$

Donde:

$e$  = Espesor en metros

$V$  = Velocidad de propagación en el fondo en metros por segundo

$t_s$  = Tiempo de reflexión del piso del arrecife.

$t_o$  = Tiempo de reflexión del techo del arrecife.

$K$  = Factor geométrico de corrección adimensional.

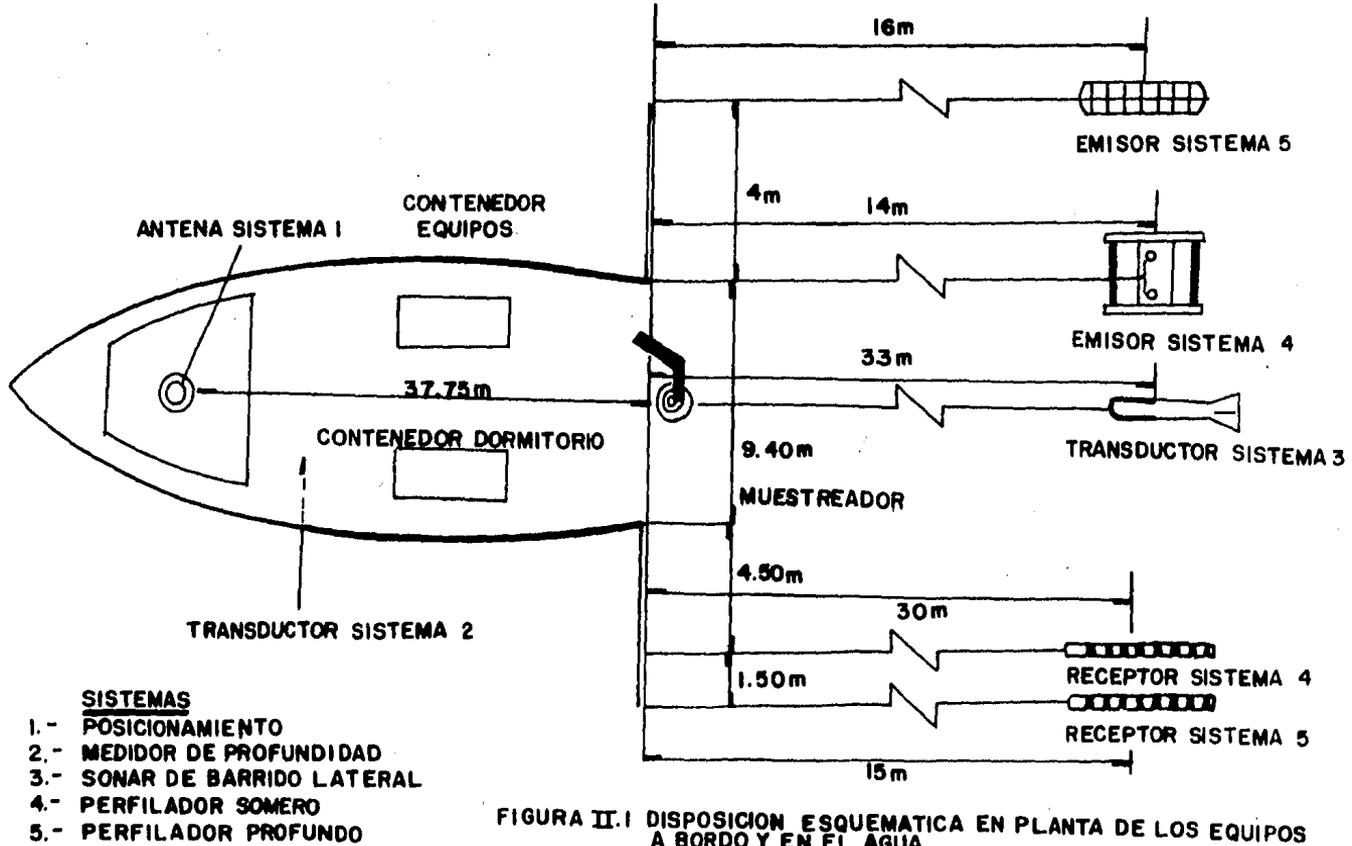


FIGURA II.1 DISPOSICION ESQUEMATICA EN PLANTA DE LOS EQUIPOS A BORDO Y EN EL AGUA.

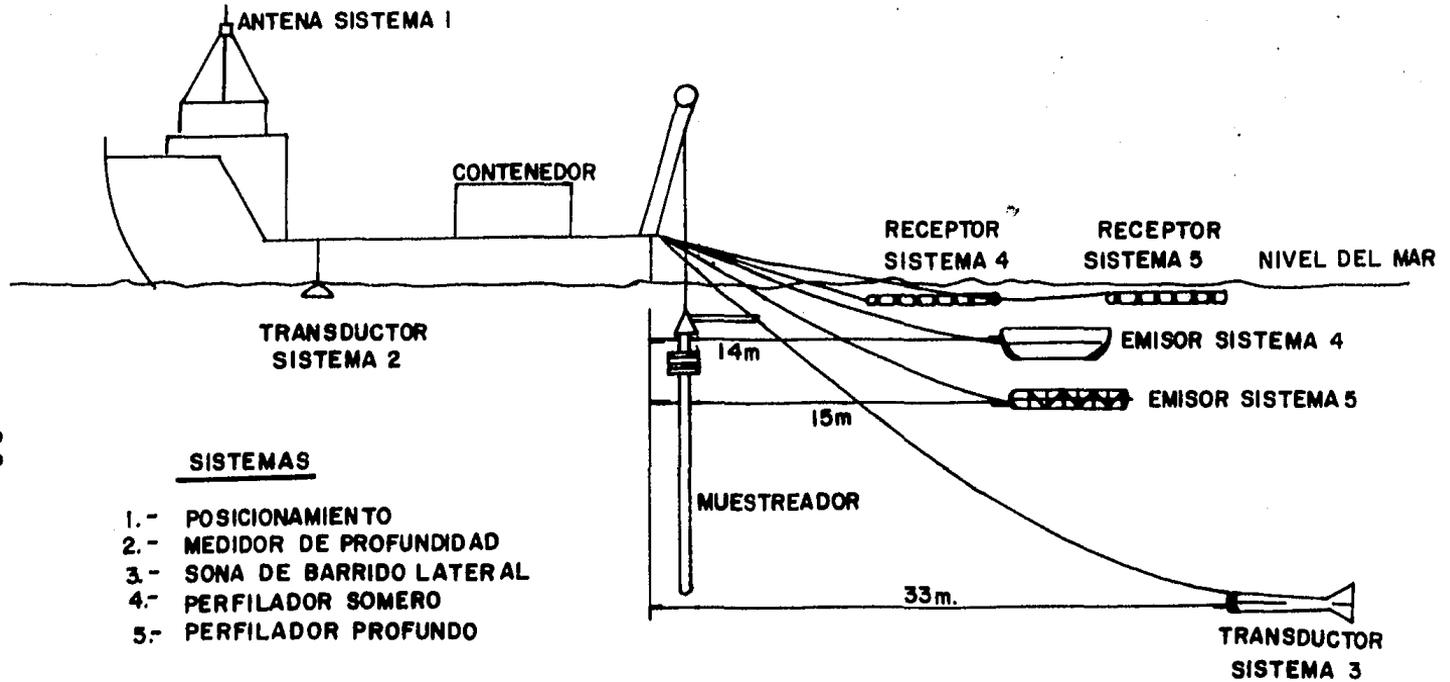


FIGURA II.2. DISPOSICION ESQUEMATICA. PERFIL DE LOS EQUIPOS EN EL AGUA.

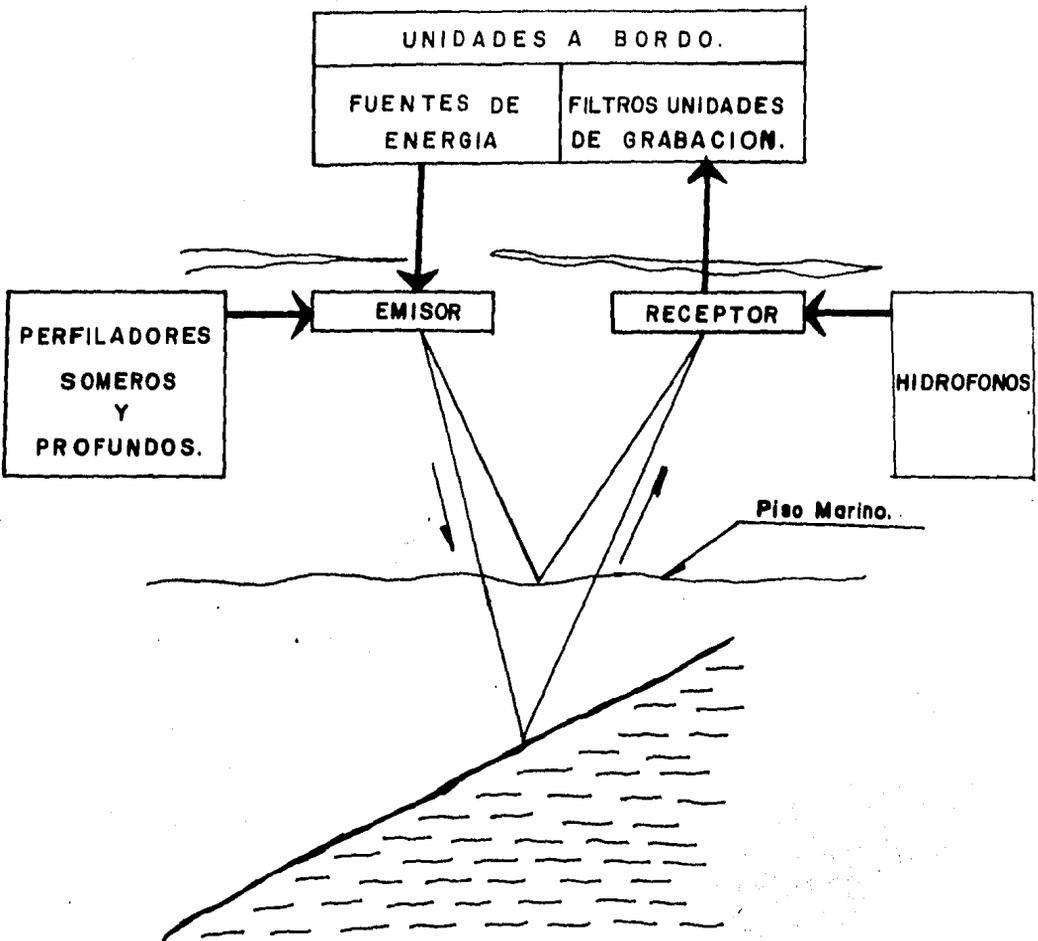
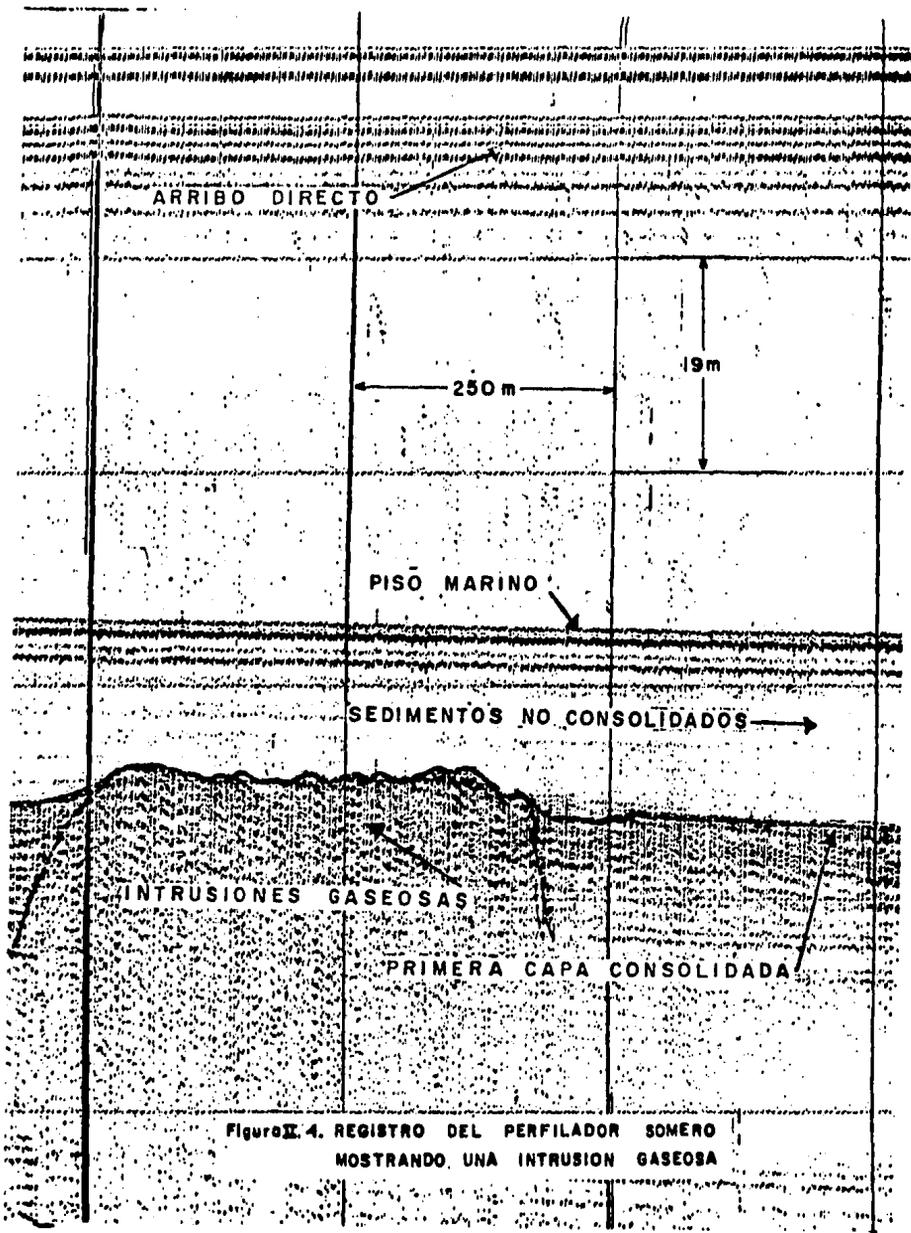
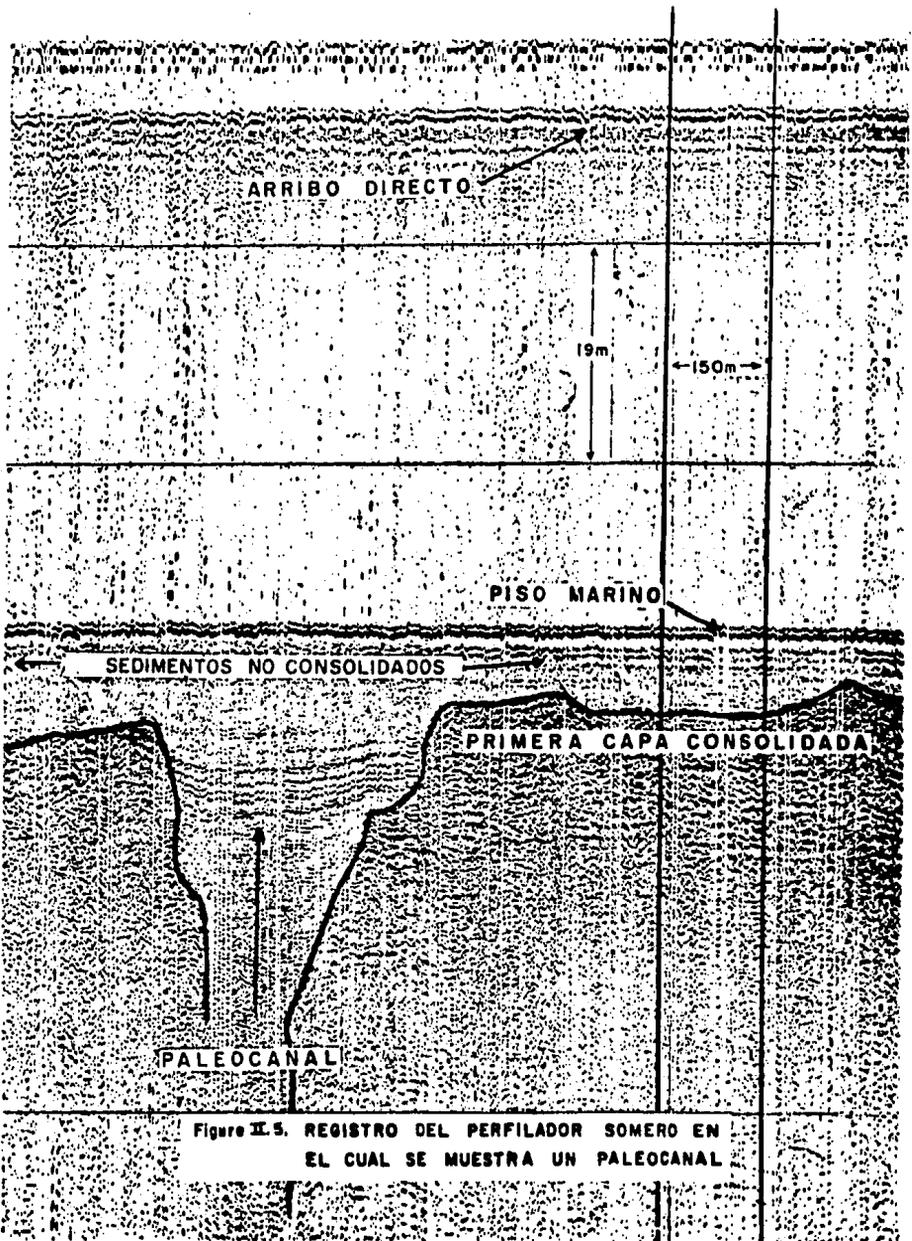


FIGURA II.3.- DIAGRAMA ILUSTRATIVO DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS PERFILADORES.





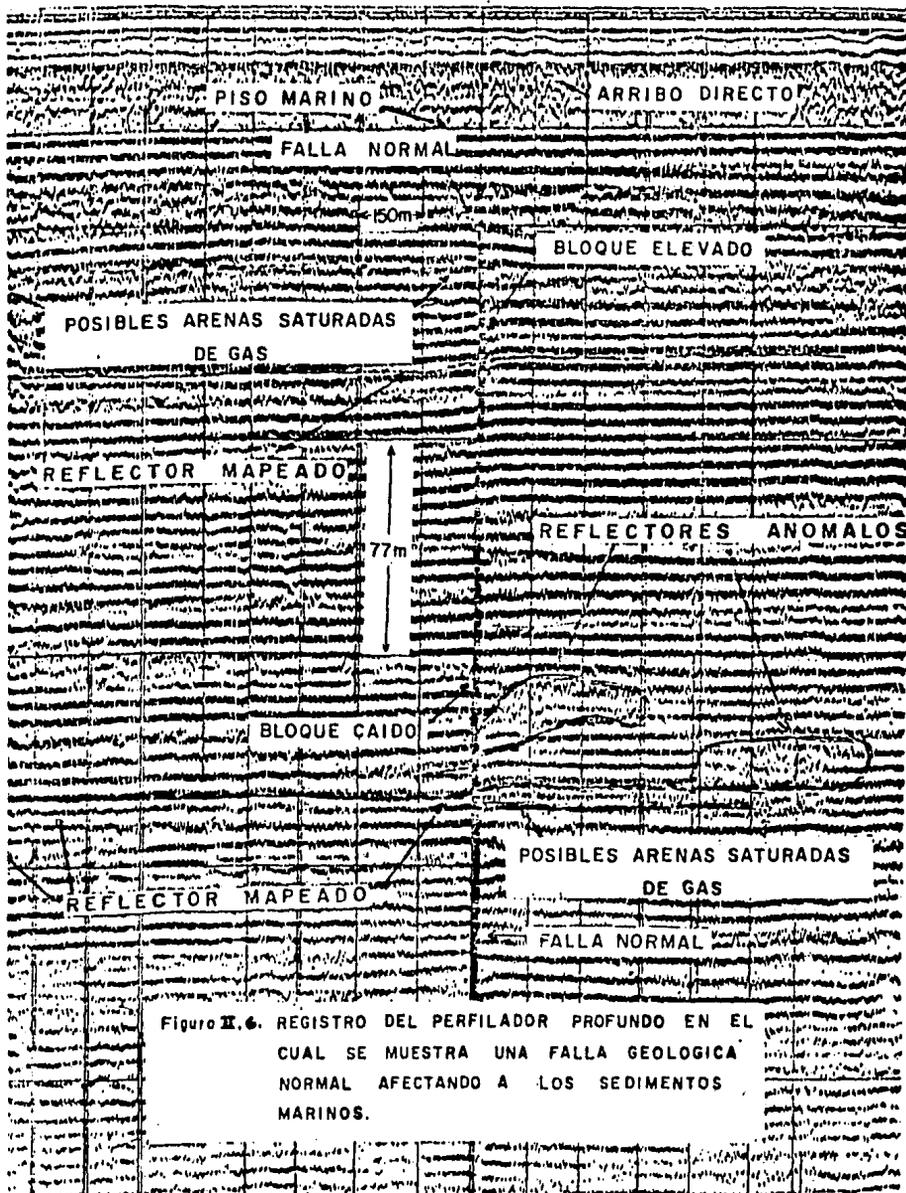


Figura II.6. REGISTRO DEL PERFILADOR PROFUNDO EN EL CUAL SE MUESTRA UNA FALLA GEOLOGICA NORMAL AFECTANDO A LOS SEDIMENTOS MARINOS.

LEVANTAMIENTO REQUERIDO	TECNICA APLICABLE	EXTENSION DEL LEVANTAMIENTO	ESPACIAMIENTO Y NUMERO DE PERFILES	CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	PRECISION O RESOLUCION
BATIMETRIA	ECOSONDA	FRANJA DE 600 m. DE ANCHO CENTRADA EN LA RUTA TEORICA DE LA TUBERIA.	1 PERFIL CENTRAL 2 PERFILES LATERALES A $\pm$ 120 m. 2 PERFILES LATERALES A $\pm$ 300 m.	FRECUENCIA DE 30 a 50 KHz.	$\pm$ 1 m.
MORFOLOGIA	SONAR DE BARRIDO LATERAL		2 PERFILES A $\pm$ 120 m. DE LA RUTA TEORICA	FRECUENCIA APROXIMADAMENTE 100 KHz. RANGO ALCANCE 150 m.	IDENTIFICACION DE RELIEVES DE APROXIMADAMENTE 1m.
	TELEVISION SUBMARINA		EN ZONAS DONDE SE REQUIERE GRAN DETALLE		IDENTIFICACION DE RELIEVES DE APROXIMADAMENTE 10 cm.
	MAGNETOMETRO		1 PERFIL CENTRAL O 2 PERFILES LATERALES A $\pm$ 120 m.		IDENTIFICACION DE CUALQUIER OBJETO DE METAL (ANCLAS, RUINAS, CABLES)
PROSPECCION SISMICA	SPARKER • BOMMER • SONDEADOR DE SEDIMENTOS		1 PERFIL CENTRAL	FRECUENCIA 100 A 1000 Hz	2 m.
			2 PERFILES LATERALES $\pm$ 300 m.	FRECUENCIA 500 A 4000 Hz.	1.5 a 2 m.
			FRECUENCIA DE 3 a 9 KHz.	$\pm$ 1 m.	

TABLA II.1.

LEVANTAMIENTOS GEOFISICOS Y VISUALES DEL FONDO Y SUELO ANTES DEL TENDIDO DE TUBERIAS

### III. ESTUDIOS GEOTECNICOS DE CAMPO

#### III.1. ESTUDIOS SOMEROS

Las técnicas o métodos usados en los estudios geotécnicos para la instalación de tuberías en el lecho marino son los llamados estudios someros del suelo. Los estudios someros son métodos sencillos para la obtención de muestras de suelo que alcanzan profundidades de - - 10 a 12 metros. Generalmente, como se dijo antes, estos muestreos se realizan durante la exploración geofísica.

Estos son:

- Muestreo por vibración.
- Muestreo por gravedad y pistón estacionario.

#### III.2. MUESTREO POR VIBRACION

En lo que se refiere a muestreo somero, los vibromuestreadores son los equipos más sofisticados.

Figura III.1.

Pueden ser operados por medio de vibración o por vibración percusión, y los hay:

- Hidráulicos
- Neumáticos
- Eléctricos

La operación de los vibromuestreadores consiste en - -

tres partes importantes ( refiriéndonos básicamente a los hidráulicos ):

- Un generador de vibración de 2 o 4 pesos excéntricos, girando en dirección opuesta, manejados por un motor-hidráulico.
- Un dispositivo para convertir las vibraciones a percusiones ( sistema de martillo y yunque ) por medio de cilindros y resortes.
- Un sistema de empalme en los resortes del taladro por medio de gatos hidráulicos.

### III.2.1. CARACTERISTICAS DE LOS VIBROMUESTREADORES

-Tipo de embarcación:

Cualquiera con una eslora mínima de 50 metros.

-Dimensión de los muestreadores:

Longitud - 3 a 9 metros

Diámetro - 4 1/2 hasta 13 3/8 pulgadas

-Dimensiones de penetración en el muestreo:

10 metros - arenas

20 a 30 metros - suelos blandos y consolidados

-Profundidad máxima de agua:

100 a 200 metros

-Amplitud de ola:

1 a 1.5 metros ( debido al considerable movimiento pendular inducido )

-Velocidad de penetración:

10 metros en 2 a 3 horas ( en promedio ) -

-El grado de alteración de la muestra obtenida depende de:

- Dureza del suelo.
- Si se usa o no percusión.
- Diámetro del muestreo.

En arcillas de baja y mediana consistencia- ( se utiliza el muestreo por vibración ) se obtienen muestras con una alteración relativamente pequeña.

En arenas sueltas y densas, o suelos heterogeneos ( se utiliza el muestreo por percusión ) se obtienen muestras con una gran -- alteración que pueden usarse solo para fi-- nes geológicos ( en el caso de diámetro pe-- queño ).

En general la calidad de las muestras puede mejorar, aumentando el diámetro de los muestreadores.

### III.3. MUESTREO POR GRAVEDAD Y PISTON ESTACIONARIO

#### III.3.1. MUESTREO POR GRAVEDAD

El método de gravedad para obtener muestras -- de suelo consiste, en soltar el muestreador y dejarlo caer libremente desde una altura determinada, lograndose la penetración por el peso-

propio del aparato. Ver figura III.2.

Este muestreador consta básicamente de:

- Una sección donde se encuentra el barril muestreador.
- Una sección formada por un cabezal pesado con aletas estabilizadoras.
- Un cable de mando principal.
- Un sistema de liberación.
- Un peso o lastre.

El barril muestreador lleva en su interior un tubo de plástico PVC en el cual queda la muestra y facilita la extracción de esta sin alteración adicional.

En el extremo inferior del barril muestreador se encuentran colocadas una zapata con reducción de la pared del barril y una canastilla de lengüetas, para reducir al máximo la alteración de la muestra durante su obtención en el terreno y para evitar que ésta se salga del tubo de plástico durante su recuperación.

El peso utilizado para llevar a cabo el muestreo puede variarse cambiando el número de pesas en el cabezal. Normalmente la variación va de 200 a 400 kilogramos. La selección del peso

es función de las condiciones del suelo y regularmente se escoge aquel que permite una óptima penetración de la muestra.

Para la operación de muestreo el equipo se coloca sobre un lado de la embarcación por medio de un sistema de marco y malacate. Una vez recuperado el muestreador por medio del malacate, se lleva a la cubierta del barco donde se quita la zapata y la canastilla, y se saca del barril el tubo de plástico conteniendo la muestra. Dicho tubo se corta al tamaño requerido - por la muestra, se tapan ambos extremos y se sellan para evitar los cambios de humedad, finalmente se identifica con el número de muestra y localización.

El muestreador de gravedad es el más usado en la obtención de muestras de suelo hasta tres metros por debajo del suelo marino.

### III.3.2. MUESTREO CON PISTÓN ESTACIONARIO

El principio de operación de este equipo es similar al anterior, y de hecho la diferencia estriba en la utilización de un pistón como dispositivo para mejorar la calidad del muestreo. Ver figura III.3.

El pistón se coloca en el interior del tubo de

plástico ( que sirve para recibir la muestra ) inmediatamente arriba de la zapata, o sea en la parte inferior del barril, quedando sujeto con un cable. Al entrar en contacto el muestreador con el suelo marino, se activa un mecanismo que hace que el cable jale al pistón - - hacia la parte superior del tubo a una distancia predeterminada.

El desplazamiento del pistón se arregla de tal forma que coincida con la penetración del barril dentro del suelo, de esta manera se forma una succión haciendo que la porción del suelo entre al muestreador, al mismo tiempo que este penetra en el suelo por su peso propio. Lo que sigue en cuanto a la recuperación y demás es, como ya se dijo, similar al muestreador -- por gravedad.

### III.3.3. CARACTERISTICAS DE LOS MUESTREADORES DE - - - GRAVEDAD Y PISTON ESTACIONARIO

-Tipo de embarcación:

Cualquiera con una eslora mínima de 30 metros

-Dimensiones de los muestreadores:

Longitud - 3 hasta 20 metros

Diámetro - 4 a 12 centímetros

-Peso del muestreador:

300 a 1500 kilogramos

- Dimensiones de penetración en el muestreo:
    - 3 metros - arenas
    - 10 a 20 metros - en lodos o arcillas - blandas
  - Profundidad de agua:
    - Cualquiera
  - Velocidad de penetración:
    - 20 a 25 muestras por día
  - El tipo de muestras es alterado, más sin embargo hay que aclarar que la calidad geotécnica mejora con el aumento del diámetro del muestreador y la utilización de pistones.
- Por último habrá que decir, que el método de muestreo por gravedad y pistón estacionario es el de mayor uso en el estudio geotécnico de líneas de tuberías, y que se tiene la facilidad o ventaja de realizarlos al mismo tiempo que se efectúa el estudio geofísico.

#### III.4. TRABAJOS DE CAMPO

Para el tendido de tuberías fuera de costa, es necesario conocer las propiedades mecánicas del suelo marino. Estas propiedades se pueden obtener realizando pruebas de laboratorio en muestras de suelo, obtenidas con la exploración geotécnica.

El tamaño de la zona a estudiarse es idéntico a aquel definido para el estudio geofísico y la profundidad

requerida será de unos cuantos metros, generalmente 6 -- metros.

La frecuencia del muestreado de núcleos a lo largo de -- la ruta dependerá del criterio geológico, basado en los resultados del levantamiento geofísico. Por lo que puede decirse que para efectuar un estudio o exploración -- geotécnica, es necesario contar con información previa de la zona, obtenida mediante el reconocimiento geofísico. Más sin embargo en la práctica para el caso de líneas de tuberías el estudio geotécnico se realiza durante la exploración geofísica.

En general se aceptan las siguientes recomendaciones:

- Un núcleo por kilómetro de ruta.
- O un núcleo cada 2 a 3 kilómetros en zonas donde el -- perfil sísmico revele no irregularidad.

La tabla III.1. resume los levantamientos geotécnicos -- necesarios antes del tendido de línea de tuberías.

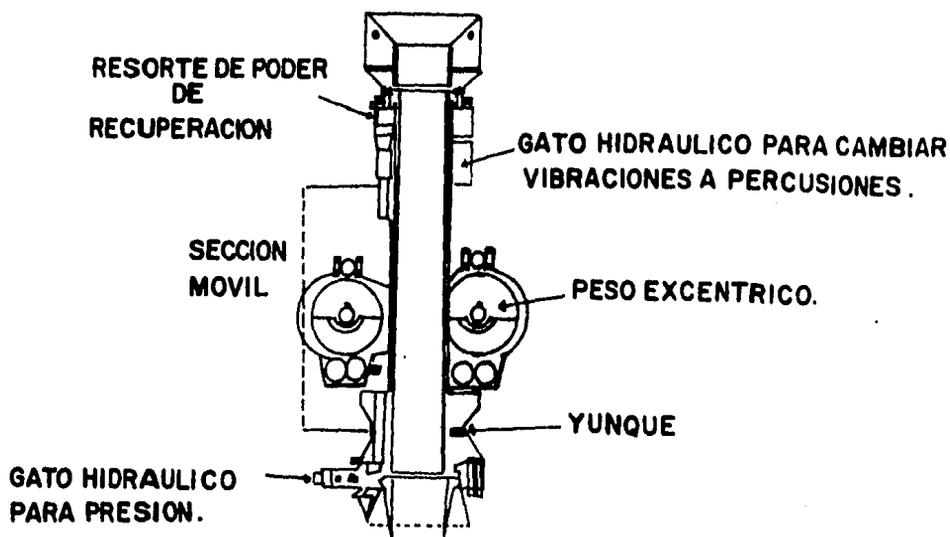
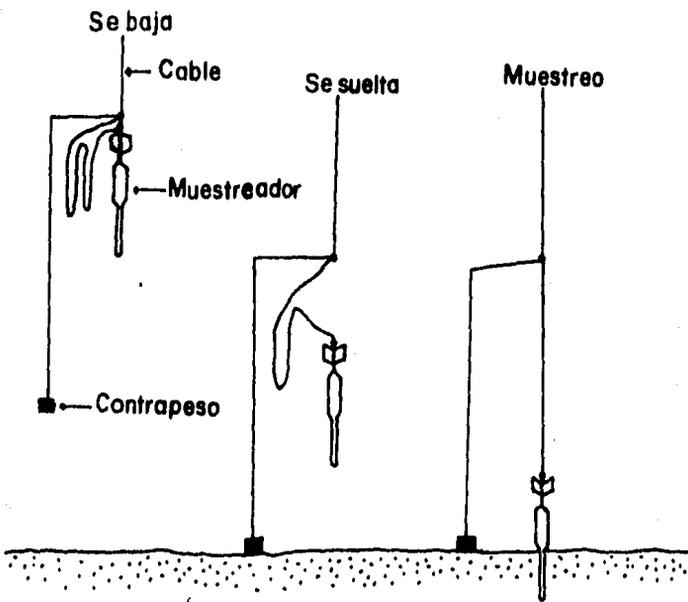


FIGURA III.-I.- DIAGRAMA DEL PRINCIPIO DE OPERACION DEL VIBROMUESTREADOR.



**FIGURA III - 2.- PRINCIPIO DE OPERACION DEL MUESTREADOR DE GRAVEDAD.**

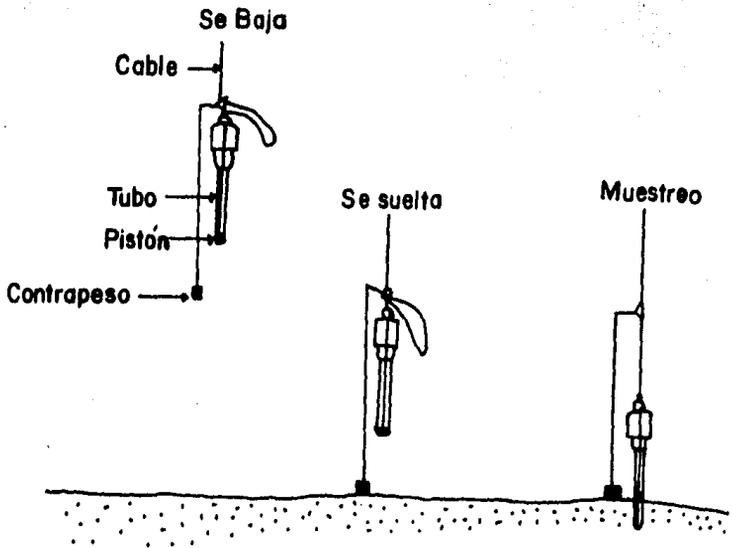


FIGURA III-3: PRINCIPIO DE OPERACION DEL MUESTREADOR DE PISTÓN ESTACIONARIO.

## IV. PRUEBAS DE LABORATORIO

### IV.1. OBJETIVO DE LAS PRUEBAS

Los suelos marinos no son significativamente diferentes de los suelos terrestres, por consiguiente, la mecánica de ambos suelos, no difiere esencialmente.

El objetivo de las pruebas de laboratorio es la evaluación de las propiedades de los suelos encontrados en -- las rutas planeadas para las tuberías.

### IV.2. MEDICIONES USUALES EN EL LABORATORIO

-•En suelos cohesivos

- Identificación del suelo
- Contenido de agua  $U$  % ( en el barco )
- Peso específico volumétrico ( en el barco )
- Determinación de límites de Atterberg ( límite líquido, límite plástico ).
- Determinación de la resistencia al cortante
  - +Mediante pruebas realizadas antes de extraer las -- muestras del muestreador por medio de la veleta miniatura y/o el torcómetro y/o el penetrómetro de -- bolsillo.
  - +Y mediante pruebas triaxiales no drenadas no consolidadas (  $U$   $U$  ), en probetas de suelo seleccionadas en base a su consistencia, lo cual permite su labrado, montaje en el equipo y la realización de esta -- clase de pruebas en el laboratorio.

Debe tenerse presente que la resistencia al cortante se obtendría de muestras alteradas.

- En suelos no cohesivos
- Identificación del suelo
- Contenido de agua  $U_1$  % ( en el barco )
- Peso específico volumétrico ( en el barco )
- Análisis granulométrico
- Determinación del contenido de carbonatos de calcio.

Habrà que hacer notar que inmediatamente después de -- que se ha recuperado la muestra en el campo se lleva -- a cabo una clasificación preliminar con suficiente -- precisión, según el material que se trate ( arcilla, -- limo arcilloso, etc. ), se aprecia el color ( mediante una tabla de colores ), olor, presencia de otro mate-- rial ( como fragmentos de conchas ).

#### -Posibilidades de licuación del suelo

- En el caso de arcillas y limos, el contenido de agua de licuación, para la condición de resistencia al cor-- tante nula, se puede obtener extrapolando la curva -- que se obtiene en la prueba de límites de consisten-- cia ( límite líquido ).

Se supone que este contenido de agua corresponde a -- 0.01 golpes de la copa de casagrande. Figura IV.1.

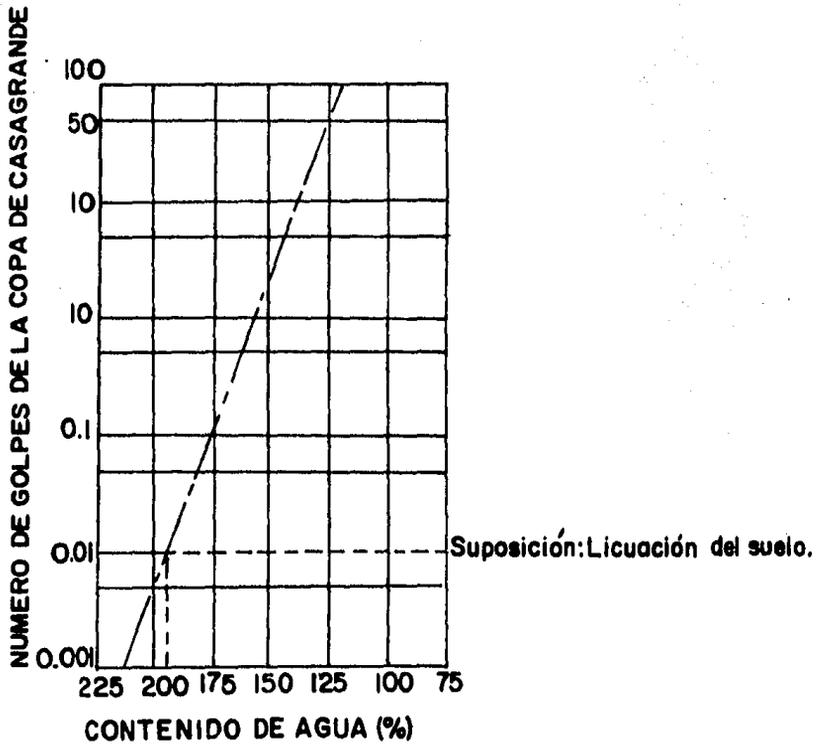
El peso específico del suelo licuado es entonces --

determinado y el riesgo de que la tubería quede suspendida es verificado.

•En arenas, el incremento de la presión intersticial y la ausencia de drenado rápido ocasiona una reducción gradual del esfuerzo efectivo o intergranular. En el límite, la arena se comporta como un líquido y pierde toda su resistencia al cortante. Este fenómeno puede suceder bajo el efecto de vibraciones de la tubería o de cargas cíclicas ( bajo la acción del oleaje ). Puede sin embargo suponerse que el riesgo existe únicamente en casos de arena muy sueltas con granulometría menor de 0.3 a 0.4 milímetro y de relativamente baja permeabilidad.

-Coeficiente de fricción entre el suelo y la tubería. La determinación del coeficiente de fricción ya sea lateral o longitudinalmente y dinámico o máximo estático, se lleva a cabo en modelos en el laboratorio, ya que éste depende de un gran número de factores -- como son: Material de la tubería, naturaleza de los sedimentos, diámetro de la tubería, granulometría, etc.

La tabla IV.1. resume las pruebas ha hacerse antes del tendido de tuberías.



**FIGURA IV.1: DETERMINACION DE LA LICUACION DEL SUELO EN BASE AL CONTENIDO DE AGUA.**

	CARACTERISTICAS MEDIDAS EN LOS SUELOS	OBSERVACIONES
<b>PRUEBA Y ANALISIS DE MUESTRAS</b>	IDENTIFICACION DE LOS SUELOS	· CLASIFICACION · LIMITES DE ATTERBERG (LL, LP)
	CONTENIDO DE AGUA	INMEDIATAMENTE A BORDO DE LA EMBARCACION
	DENSIDAD	
	GRANULOMETRIA	
CONTENIDO DE CARBONATOS		
	RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE NO DRENADA.	COMPRESION NO CONFINADA PENETROMETRO DE BOLSILLO TERMOMETRO VELETA MINIATURA
	LICUACION (EN BASE A PRUEBAS INDICE)	INMEDIATAMENTE A BORDO DE LA EMBARCACION
	COEFICIENTES DE FRICCION ENTRE TUBERIA Y SUELO (TRANSVERSAL Y LONGITUDINALMENTE)	EN LABORATORIO
		EN LABORATORIO

TABLA IV. 1. PRUEBAS DE LABORATORIO

## V. ANALISIS Y RECOMENDACIONES

### V.1. FUERZAS HIDRODINAMICAS

Las olas y corrientes inducen velocidades en el agua del fondo y ejercen fuerzas en la tubería que pueden ser significativas dependiendo de lo profundo del agua.

En el diseño de tuberías, las fuerzas hidrodinámicas se consideran con tres componentes: Inercia, arrastre y elevación o ascensional.

La ecuación comunmente usada en Ingeniería para el cálculo de fuerzas debidas a oleaje, es la ecuación de Morison que se basa en la suposición de que la fuerza total sobre un objeto puede obtenerse sumando los componentes de -- arrastre é inercia definidos en términos del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ) y el coeficiente de inercia ( $C_M$ ) respectivamente como sigue:

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho D U^2 + \frac{\pi}{4} C_M \rho D \dot{U}$$

Donde:

$F$  = Fuerza de oleaje por unidad de longitud en un elemento cilíndrico vertical

$\rho$  = Densidad del agua

$D$  = Diámetro del cilindro

$U$  = Velocidad del fluido

$\dot{U}$  = Aceleración del fluido

La ecuación de Morison inicialmente fué desarrollada para una pila cilíndrica vertical que penetra en la superficie. Sin embargo es igualmente válida para estructuras inclinadas u horizontales como en este caso para tuberías. Las fuerzas de arrastre se generan básicamente de la desminución de presión en una cara del conducto producto de la bifurcación del flujo.

Las fuerzas de inercia pueden interpretarse como debidas a la aceleración del agua a medida que esta fluye en el contorno de la tubería.

La sumatoria de ambas fuerzas es para obtener valores -- máximos que van más de acuerdo con la realidad, ya que -- cada una de ellas, varía periódicamente y por lo tanto no están en fase; como podemos observar en la figura V.1.a.

La componente normal a la fuerza de arrastre es conocida como ascensional o elevación, y puede generarse mediante corrientes horizontales y por ondas inducidas por el movimiento de las partículas del agua. La magnitud de la fuerza depende de la distancia relativa entre la tubería y -- la superficie del agua. Los vórtices que se generan alrededor del conducto crean cargas oscilatorias, estos vórtices producen regiones de bajas presiones periódicas que imponen fuerzas de levantamiento al conducto. La componente ascensional varía con el tiempo figura V.1.b.

Para calcular la fuerza ascensional actuando en la tubería, se usa la siguiente relación:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho D U^2$$

Con:

$F$  = Fuerza ascensional

$C_L$  = Coeficiente empírico de ascensión

$\rho$  = Densidad del agua

$D$  = Diámetro del cilindro

$U$  = Velocidad del fluido

Las fuerzas ascensionales vienen a ser significativas -- cuando hay una correspondencia entre la frecuencia del -- oleaje y la frecuencia de los vórtices, produciendo un fe-- nόμενο de resonancia, con las frecuencias naturales de -- respuesta estructural. Si el amortiguamiento de la estruc-- tura es suficientemente bajo, entonces pueden ocurrir -- vibraciones que frecuentemente son causa de costosas fa-- llas en tuberías.

En el diseño de tuberías se tiene que confiar en formula-- ciones semiempíricas como la ecuación de Morison para es-- timar las fuerzas hidrodinámicas, dado que no existen -- todavía soluciones análíticas que describan completamente la compleja interacción fluido - tubería. La confiabili-- dad de la ecuación de Morison depende en gran parte de la validez de los coeficientes y de las teorías de oleaje -- que predicen la cinemática de las partículas del agua.

Diversos estudios se han realizado para obtener los valo-- res prototipo de los coeficientes ( Yamamoto y colaborado-- res, 1973; Grace, 1973; Grace y colaboradores, 1976; -- Sarpkaya, 1976; Jones, 1971, 1976, 1978 ), mostrando con--

regularidad una considerable dispersión en los resultados. El estudio más representativo es el trabajo de Sarpkaya - ( 1976 ), que encontró que los coeficientes  $C_D$ ,  $C_M$  y  $C_L$  - depende del número de Reynolds, si los datos se grafican para isolíneas del número de Keulegan - Carpenter, o bien de este último, si se grafican para isolíneas del número de Reynolds y un parámetro de frecuencia:

$$\beta = \frac{D^2}{VT}$$

Donde:

- $\beta$  = Parámetro de frecuencia
- D = Diámetro del cilindro
- V = Viscosidad cinemática del agua
- T = Período de movimientos oscilatorios

Los resultados de Sarpkaya de  $C_D$ ,  $C_M$  y  $C_L$  con relación a  $N_{KC}$  y  $N_{Re}$ , se muestran en las figuras V.2. a V.7.

Grace y sus colaboradores ( 1976 ) hicieron estudios en un modelo a una profundidad de 37 pies bajo la acción de oleaje y obtuvieron gráficas de  $C_D$  y  $C_L$  contra el cociente del ancho de la órbita entre el diámetro de la tubería ( $W/D$ ), mostrando tendencias perceptibles de dispersión en la distribución de los datos; y la relación de  $C_M$  contra el cociente del claro entre el fondo de la tubería y la superficie marina entre el diámetro de la tubería -- ( $h/D$ ) para casos donde los efectos de inercia son predominantes.

Para aplicaciones en diseño, Grace y sus colaboradores --

recomendaron usar el límite superior de los datos como -- curvas de diseño, como se observa en las figuras V.8. a - V.10.

Es frecuente encontrar condiciones especiales en el diseño de tuberías, tales como el efecto de la proximidad de tuberías cercanas, la superficie libre del agua y el fondo marino; el efecto de la aspereza de la superficie de la tubería y la inclinación de la línea con respecto a la dirección del oleaje. Todas estas condiciones alteran la estructura de flujo en torno a la tubería influyendo -- además en los valores de los coeficientes de las fuerzas.

## V.2. INTERACCION SUELO - TUBERIA

La interacción suelo - tubería puede ser descompuesta en tres componentes: axial ( o longitudinal ), vertical y -- horizontal ( transversales ), como se muestra en las figuras V.11. y V.12.

En el diseño de una línea de tubería, ya sea superficial- ( apoyada en el fondo marino ) o enterrada deben considerarse las acciones de flujo, expansiones o hundimientos -- de suelos donde éstas pueden darse a lo largo de la ruta. Cuando la tubería cruza la línea de acción de un flujo -- de lodo potencial, un segmento quedará cargado por el -- flujo, mientras que las partes adyacentes estarán restrin- gidas por el suelo por el cual yacen. Similarmente cuando atraviesa una zona de expansión, una parte será levantada

mientras que las adyacentes estarán restringidas. Estas condiciones están esquemáticamente representadas en la figura V.13., tanto la línea enterrada en el fondo marino como depositada en el mismo.

La figura V.14. representa el modelo estructural propuesto para analizar la línea sujeta a las condiciones anteriores. Las restricciones de movimiento que impone el suelo están representadas por series de tres resortes --perpendiculares entre sí: axial, horizontal y vertical.

-Componente axial. Esta representa la fricción lateral -- a lo largo de la tubería y puede considerarse similar -- a la fricción unitaria para pilotes. Por lo que se supone aplicable la relación esfuerzo deformación desarrollada para la transferencia de carga a lo largo del fuste del pilote, representada por la curva T-X.

•Para arenas:

$$t = T_n \tan \delta$$

Donde:

$t$  = Capacidad de carga axial

$T_n$  = Esfuerzo efectivo normal en la periferia de la tubería

$\delta$  = Angulo de fricción entre suelo y tubería

Los esfuerzos principales en una masa de suelo en reposo están dados por:

$$T_n = \frac{\gamma' Z}{2} [1 + \cos 2\theta + K_o (1 - \cos 2\theta)]$$

Donde:

$\theta$  = Coordenada angular que indica la posición --

del punto en consideración a lo largo de la periferia de la tubería ( figura V.11. )

La carga axial por unidad de longitud de la tubería se obtiene integrando  $\dagger$  a lo largo del área de contacto entre el suelo y la tubería. Para una línea enterrada totalmente,  $\Theta$  es integrada de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , es decir:

$$\tau = \dagger ds$$

$$\tau = 2 \int_{\pi/2}^{\pi/2} \rho' z \tan \delta [1 + \cos 2\Theta + K_a (1 - \cos 2\Theta)] ds$$

Con:  $z = H - \frac{D}{2} \sin \Theta$  y  $ds = \frac{D}{2} d\Theta$

Quedando:  $\tau = \frac{\pi}{2} \rho' H D (1 + K_a) \tan \delta$

Que representa la máxima transferencia de carga posible. Denotada por  $T_u$  en la figura V.12.b.

•Para Arcillas:

$$\dagger = C_a$$

$$\dagger = \alpha S_u$$

Donde:

$\dagger$  = Capacidad de carga axial

$C_a$  = Adhesión

$S_u$  = Resistencia al corte en prueba no drenada

$\alpha$  = Coeficiente empírico que varia con como se muestra en la figura V.15.

La carga axial máxima por unidad de longitud se obtiene integrando  $S_u$  en torno al área de contacto entre el

suelo y la tubería. Para el caso de una tubería enterrada totalmente:

$$T = \pi D \alpha S_u$$

Tanto en arenas como en arcillas se acepta generalmente que la máxima carga ocurre con desplazamiento de  $X_u$  -- del orden de 0.1 a 0.2 pulgadas.

-Componente Horizontal. Cuando la línea está expuesta, -- debe ser revisada la estabilidad lateral bajo cargas de arrastre y ascensionales.

La resistencia lateral del suelo ante el movimiento horizontal de una tubería submarina se ha tratado como un -- simple problema de fricción de COULOMB ( Lyon, 1973 ); -- la resistencia está dada por:

$$P = f ( W_b - F_L )$$

Donde:

$P$  = Resistencia al deslizamiento

$f$  = Coeficiente de fricción

$W_b$  = Peso de flotación de la tubería

$F_L$  = Componente vertical de la fuerza hidrodinámica ( ascensional ).

Tal enfoque se basa en las suposiciones de que el medio de soporte es rígido, la tubería desliza paralelamente -- a la superficie del suelo y la resistencia al desliza--- miento,  $P$ , es independiente del movimiento lateral.

•Para arenas: Audibert y Nymán ( 1975, 1977 ) mediante -- resultados experimentales, desarrollaron un método --

basado en la capacidad de carga horizontal de zapatas-corridas verticales y la relación P - Y no lineal está dada por la relación hiperbólica:

$$P = \frac{y}{A' + B' y}$$

Donde:

$$A' = 0.145 \frac{y_u}{q_u}$$

$$B' = 0.855 \frac{y_u}{q_u}$$

Con:

$$q_u = \gamma' H N_q$$

$$y_u = \begin{cases} 0.02(H + \frac{D}{2}) \text{ Arena suelta} \\ 0.015(H + \frac{D}{2}) \text{ Arena densa} \end{cases}$$

P = Resistencia al deslizamiento

$\gamma'$  = Peso volúmetrico sumergido del suelo

H = Profundidad al eje central de la tubería

$N_q$  = Factor de capacidad de carga para zapatas corridas verticales, cargadas horizontalmente según Brinch Hansen ( 1961 ), mostrado en la figura -- V.16.a.

•Para Arcillas:

$$P = C_u N_c$$

Donde:

P = Resistencia al deslizamiento

$C_u$  = Cohesión o resistencia al corte en prueba no-drenada

$N_c$  = Factor de capacidad de carga para zapatas corridas cargadas horizontalmente según Brinch-Hansen ( 1961 ). Figura V.16.b.

En este caso  $\gamma_u$  del 3 a 5% de H (Mayor que en arenas).

-Componente vertical. Mientras que las dos componentes anteriores tienen efectos simétricos, la componente vertical es asimétrica.

•Para movimientos descendentes: La tubería se considera como una zapata corrida cilíndrica y la relación esfuerzo deformación  $Q$ - $\delta$  está dada por la teoría convencional de capacidad de carga.

$$Q = \frac{1}{2} \gamma' B N_\gamma + C_u N_c + \gamma' d N_q$$

Donde:

$Q$  = Capacidad de carga máxima

$\gamma'$  = Peso volumétrico sumergido del suelo - - - -  
(  $\gamma' = \gamma - 1$  )

$B$  = Ancho de cimentación

$d$  = Profundidad a la cual se entierra la tubería

$C_u$  = Cohesión del suelo

$N_\gamma, N_c, N_q$  = Coeficientes adimensionales que dependen del ángulo de fricción interna  $\phi$ .

$$B = 2 \sqrt{d(D-d)}$$

El ancho  $B$  de la tubería que queda en contacto con el suelo, puede quedar definido de la siguiente manera:

Donde:

$D$  = Diámetro de la tubería

$d$  = Profundidad a la que se entierra la tubería

$B$  = Ancho de cimentación, donde  $B \leq D$

Terzaghi recomienda que para calcular la capacidad de carga, se adopten valores de la cohesión ( $C_u'$ ) y el ángulo de fricción ( $\phi'$ ) tal que:

$$C_u' = \frac{2}{3} C_u$$

$$\tan \phi' = \frac{2}{3} \tan \phi$$

La relación de capacidad de carga puede entonces escribirse:

$$q' = \frac{1}{2} \gamma' B N_{\gamma}' + \frac{2}{3} C_u N_c' + \gamma' d N_q'$$

Donde:

$N_{\gamma}'$ ,  $N_c'$ ,  $N_q'$  = Coeficientes adimensionales que dependen del ángulo de fricción interna  $\phi$ . Figura V. 17.

$$q = \frac{1}{2} \gamma' B N_{\gamma}' + \gamma' d N_q'$$

En el caso de arenas donde la cohesión  $C_u = 0$ :

En el caso de suelos arcillosos donde  $\phi = 0$ ,  $N_c' \approx 5$ ,  $N_{\gamma}' = 0$  y  $N_q' = 1$ :

$$q = 3.3 C_u + \gamma' d$$

• Para movimientos ascendentes: Reese y Casbarian - - - ( 1968 ) reportaron resultados en pruebas de extracción de modelos de tuberías embebidos en arcillas blandas y arena suelta. Tal que la máxima resistencia a la extracción de un modelo de longitud L y diámetro D, -- está dada por las siguientes relaciones.

En arcilla blanda:  $F = K_c C_u L D$

En arena suelta:  $F = K_s \gamma' H L D$

Con:

$K_c, K_s$  = Factores empíricos para arcilla blanda y arena

suelta, como se muestra en las figuras V.18.a-  
y V.18.b. Respectivamente.

En cuanto a los desplazamientos, existe muy poca infor-  
mación disponible. En la práctica ha sido usada como -  
deformación última  $Z_u = 0.04 H$

### V.3. RECOMENDACIONES

-En suelos cohesivos muy blandos puede ocurrir que al --  
depositar la tubería, ésta se entierre a una profundi--  
dad excesiva debido a la baja capacidad de soporte del--  
suelo. Esto puede solucionarse modificando el alinea---  
miento de la tubería o haciendo una trinchera previa a--  
la colación de la misma y colocar sacos de arena para -  
que sobre ellos sea colocada.

También se incluyen en este caso, el de asentamientos -  
diferenciales excesivos presentados por la existencia -  
de paleocanales, o las zonas de contacto entre dos ti--  
pos distintos de suelos.

-En suelos granulares pueden existir arenas con finos no  
plásticos cuyas características morfológicas y granulo-  
métricas las hace susceptibles de licuarse en caso de --  
presentarse sollicitaciones dinámicas por sismo u oleaje.  
Si ocurre la licuación, la tubería podría ser expulsada  
de la trinchera donde se colocó previamente quedando --  
sujeta a movimientos laterales debido a fuerzas de oleg  
je y corrientes. Cuando la probabilidad de que el fenó-

meno ocurra es alta, se recomienda modificar el alineamiento de la tubería.

-En suelos frente a deltas de ríos pueden ocurrir deslizamientos de grandes masas de suelo; este fenómeno se origina debido a la mezcla de varios tipos de suelo, al perfil del fondo y a la acumulación progresiva de materiales. Las consecuencias que tendría una falla de este tipo en tuberías submarinas sería catastrófica por lo que generalmente se recomienda, hasta donde es posible, evitar la instalación de tuberías en este tipo de áreas o cambiar su alineamiento de manera que se impida al máximo el efecto del movimiento del terreno.

-En zonas sísmicas activas puede ocurrir que la tubería cruce una falla geológica que pueda experimentar movimientos durante la vida útil de la misma; en tal caso, es recomendable una de las siguientes soluciones:

Desvío del alineamiento

Refuerzo de la tubería

Instalación de plataformas con válvulas de control en ambos lados de la falla.

En estas zonas es preferible muchas veces dejar la tubería sobre el fondo en la zona de cruce ya que las fuerzas inducidas a la tubería dependen de las restricciones que el suelo le proporciona.

-En suelos arcillosos y con tirantes relativamente altos, se puede decir que los problemas de socavación son mínimos.

Sin embargo, en lugares con poca profundidad de agua -- donde por condiciones oceanográficas se preve cierta -- socavación, se recomienda anclar la tubería.

-Existen lugares donde hay arrecifes coralinos en el lecho marino, tanto expuestos como enterrados. En el caso de presentarse estas formaciones lo más recomendable es relocalizar la tubería, ya que de lo contrario tendrán que efectuarse operaciones especiales para el zanjado.

-En zonas petroleras con sedimentos arcillo-arenosos pueden ocurrir escapes de gas que salen por algún conducto o falla. Si los estudios geofísicos muestran mucha alteración en estos estratos debido al peso o a la acumulación de gas, se recomienda relocalizar la línea.

Existen varios procedimientos para lograr la estabilidad de las tuberías; estos van desde darle al conducto un -- peso propio, hasta aislar completamente a la tubería -- enterrándola. La tabla V.1. muestra los métodos más usados para lograr que una tubería permanezca estable.

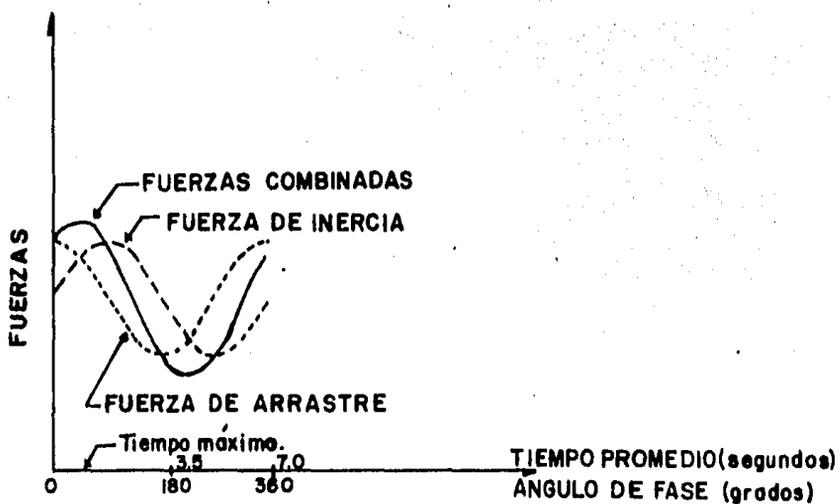


FIGURA V. 10.- ESQUEMA DE FUERZAS COMBINADAS DE INERCIA Y ARRASTRE.

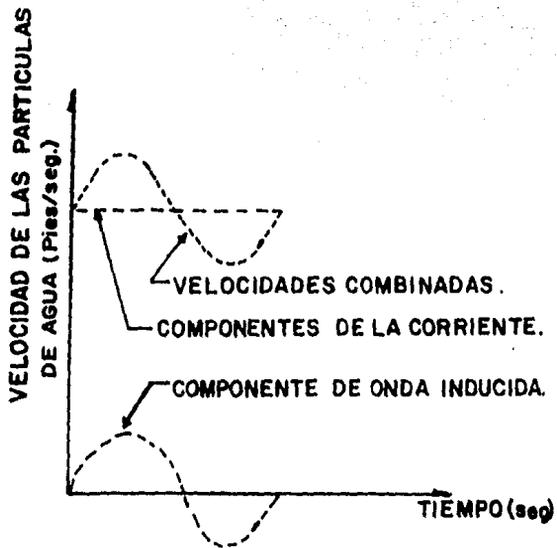


FIGURA V. 1b.-ESQUEMA DE LA VELOCIDAD HORIZONTAL DE LAS PARTICULAS DEL AGUA.

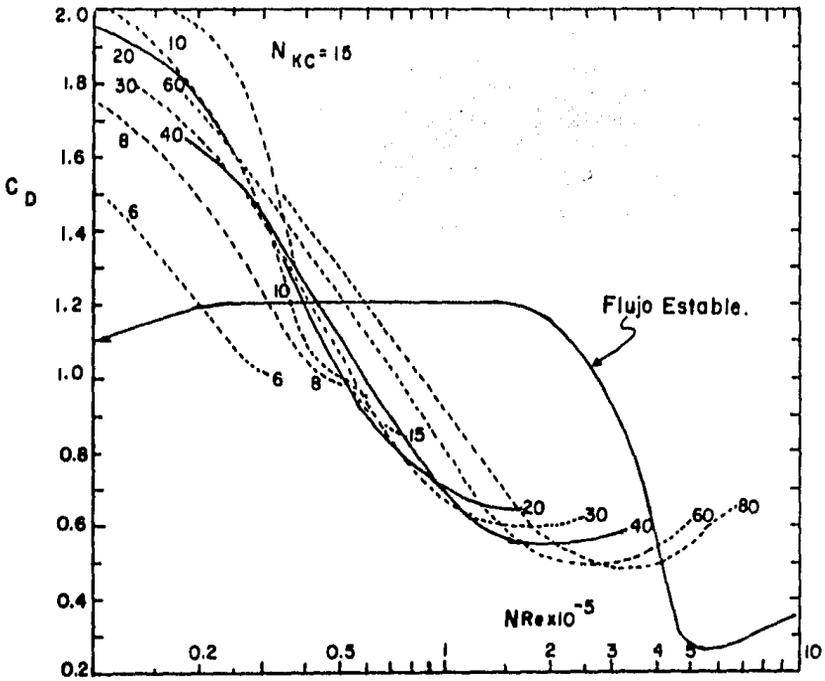


FIGURA V.2.- COEFICIENTE DE ARRASTRE - NUMERO DE REYNOLDS, PARA LOS VALORES CONSTANTES DE  $N_{Kc}$  (SEGUN SARPKEYA, 1976)

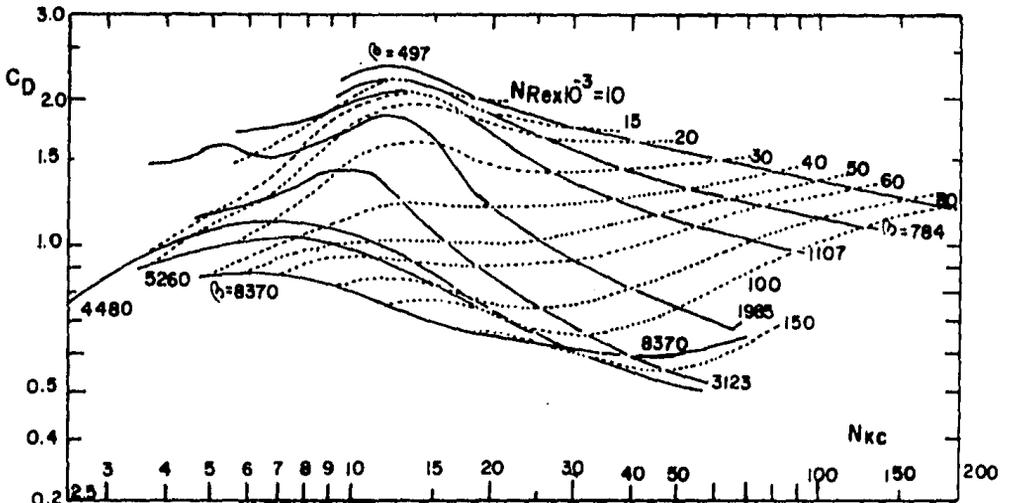


FIGURA V.3.- COEFICIENTE DE ARRASTRE - NUMERO DE KEULEGAN-CARPENTER, PARA VALORES CONSTANTES DEL PARAMETRO DE FRECUENCIA Y EL NUMERO DE REYNOLDS, (SEGUN SARPKEYA 1976)

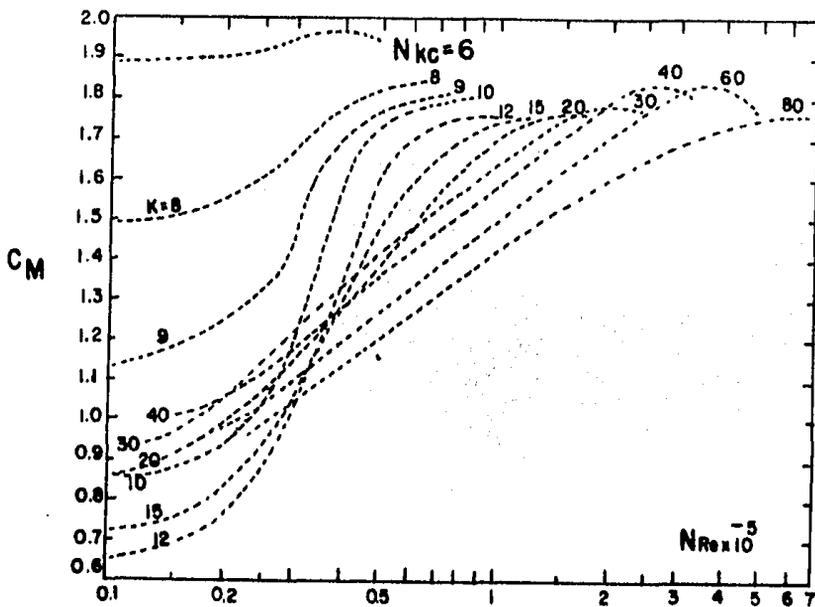


FIGURA V.4. - COEFICIENTE DE INERCIA-NUMERO DE REYNOLDS, PARA VALORES CONSTANTES DE  $N_{kc}$  (SEGUN SARPKEYA 1976)

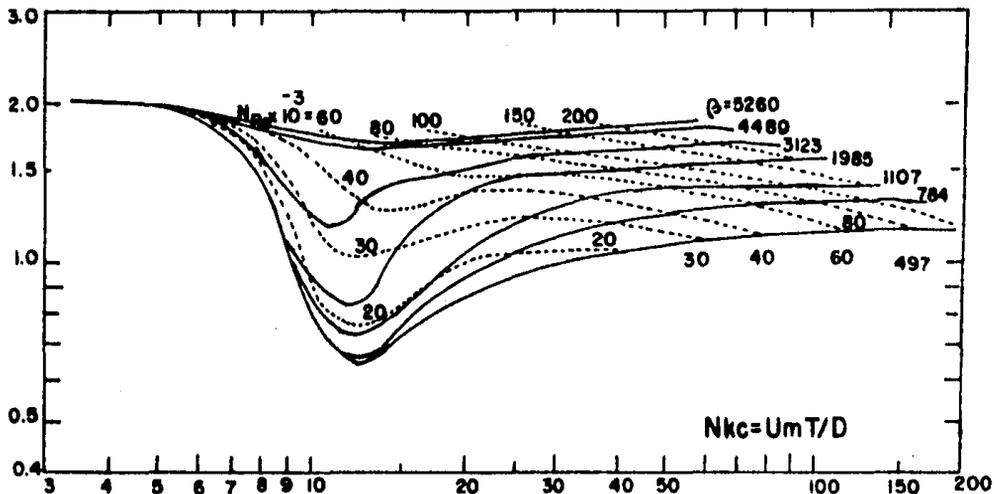


FIGURA V.5. - COEFICIENTE DE INERCIA-NUMERO KEULEGAN-CARPENTER PARA VALORES CONSTANTES DEL PARAMETRO DE FRECUENCIA Y EL NUMERO DE REYNOLDS, (SEGUN SARPKEYA 1976)

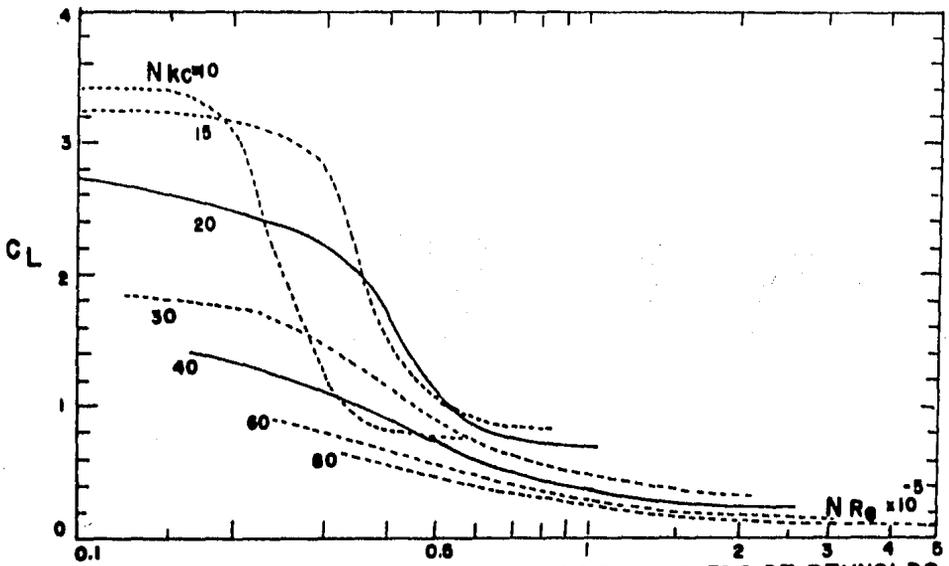


FIGURA V.6.- COEFICIENTE DE ELEVACION-NUMERO DE REYNOLDS, PARA VALORES CONSTANTES DE  $N_{Kc}$  (SEGUN SARPKEYA 1976)

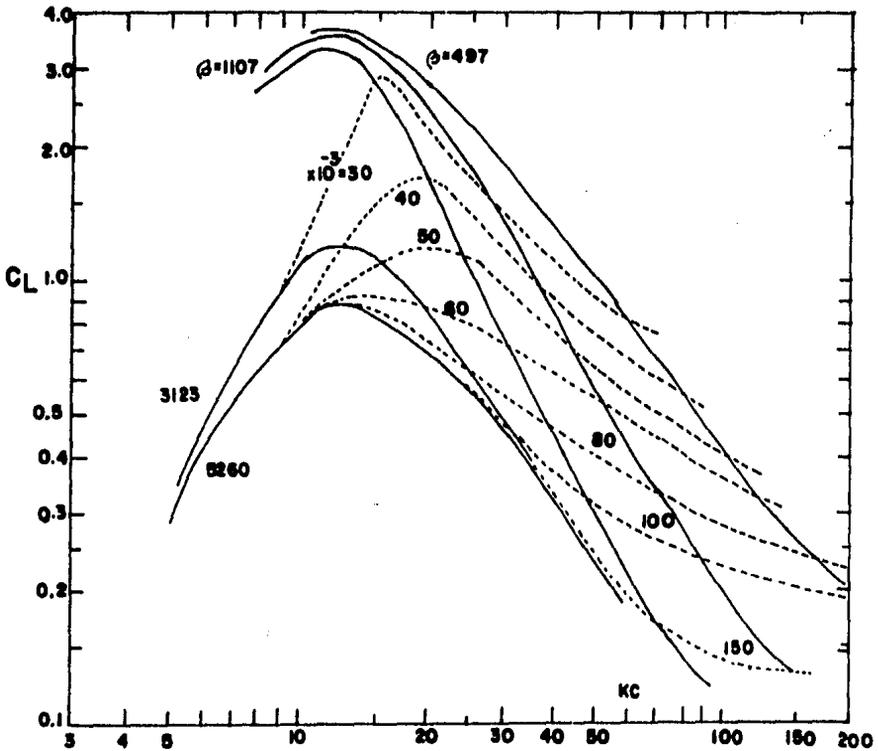


FIGURA V.7.- COEFICIENTE DE ELEVACION-NUMERO DE KEULEGAN PARA VALORES CONSTANTES DEL PARAMETRO DE FRECUENCIA Y NUMERO DE REYNOLDS, (SEGUN SARPKEYA, 1976)

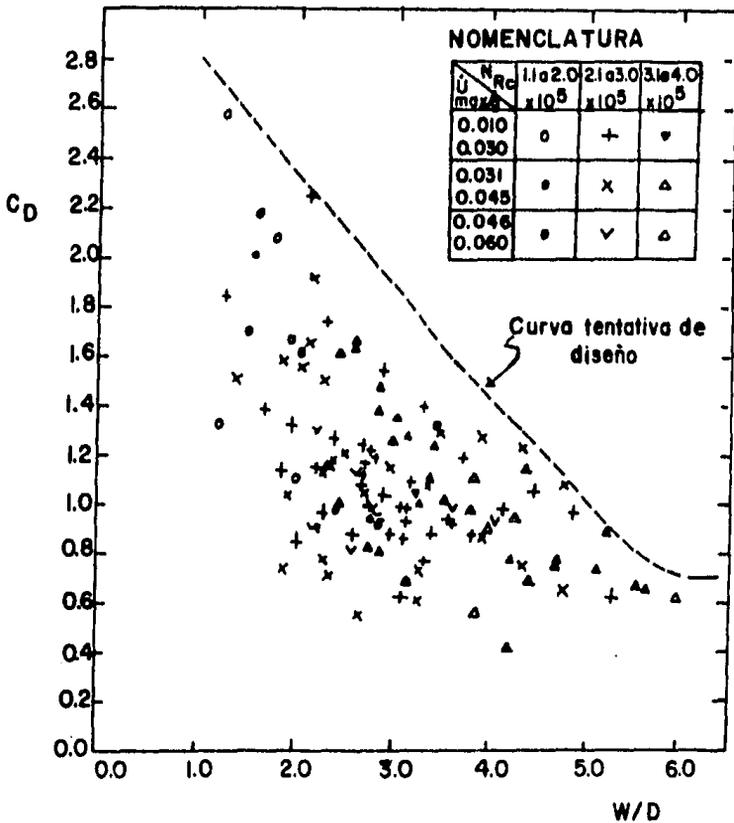


FIGURA V. 8.- COEFICIENTE DE ARRASTRE-RECORRIDO DE PARTICULAS DE AGUA/DIAMETRO DEL TUBO,(SEGUN GRACE, Y - COLABORADORES, 1976)

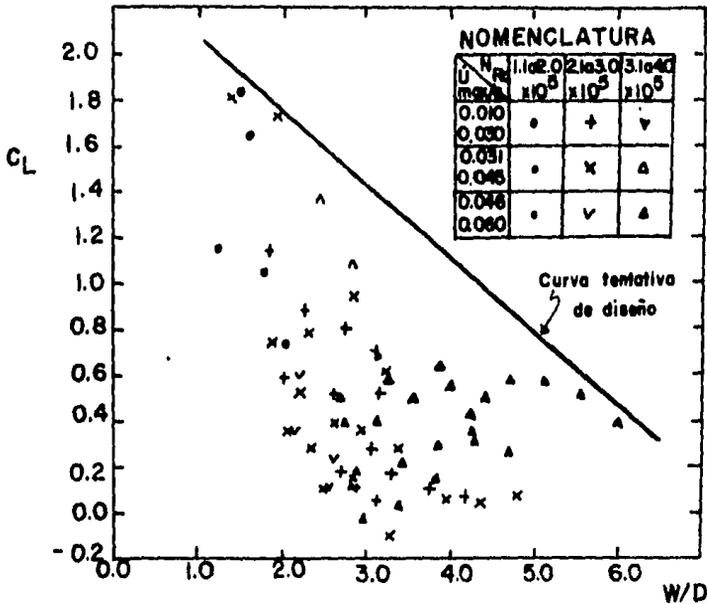


FIGURA V. 9. - VARIACION DEL COEFICIENTE DE ELEVACION-  
RECORRIDO DE LAS PARTICULAS DEL AGUA/  
DIAMETRO DEL TUBO, (ADAPTADO POR GRACE,  
COLABORADORES, 1976)

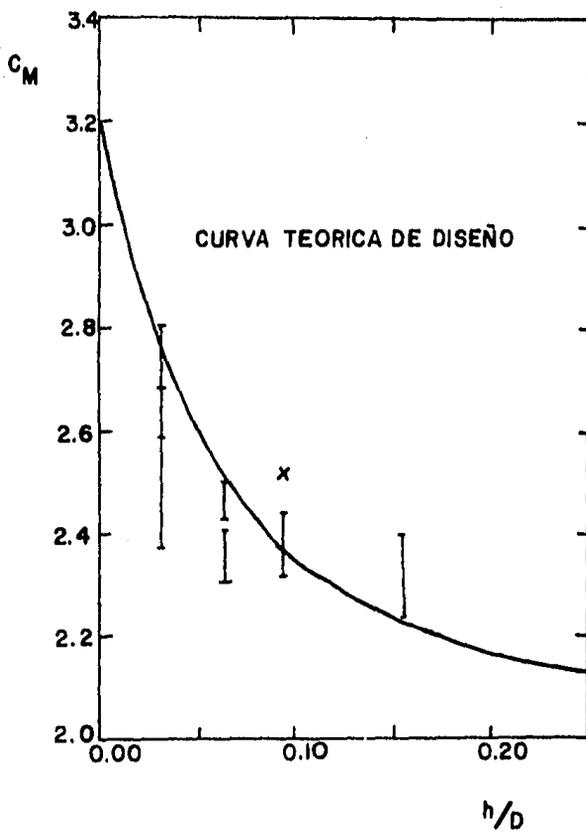


FIGURA V.10.- COEFICIENTE DE INERCIA-ALTIMA DEL FONDO DEL MAR AL FONDO DEL TUBO/DIAMETRO DEL TUBO, (SEGUN GRACE Y COLABORADORES, 1976)

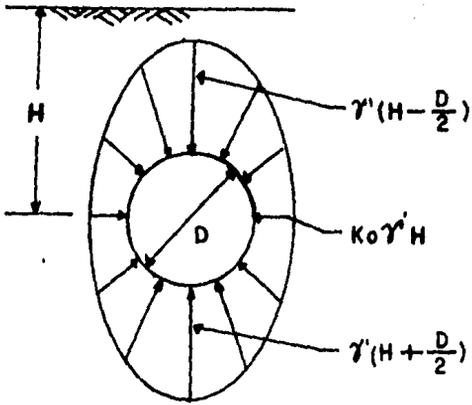


FIGURA V.11 - PRESIONES DEL SUELO IDEALIZADAS.

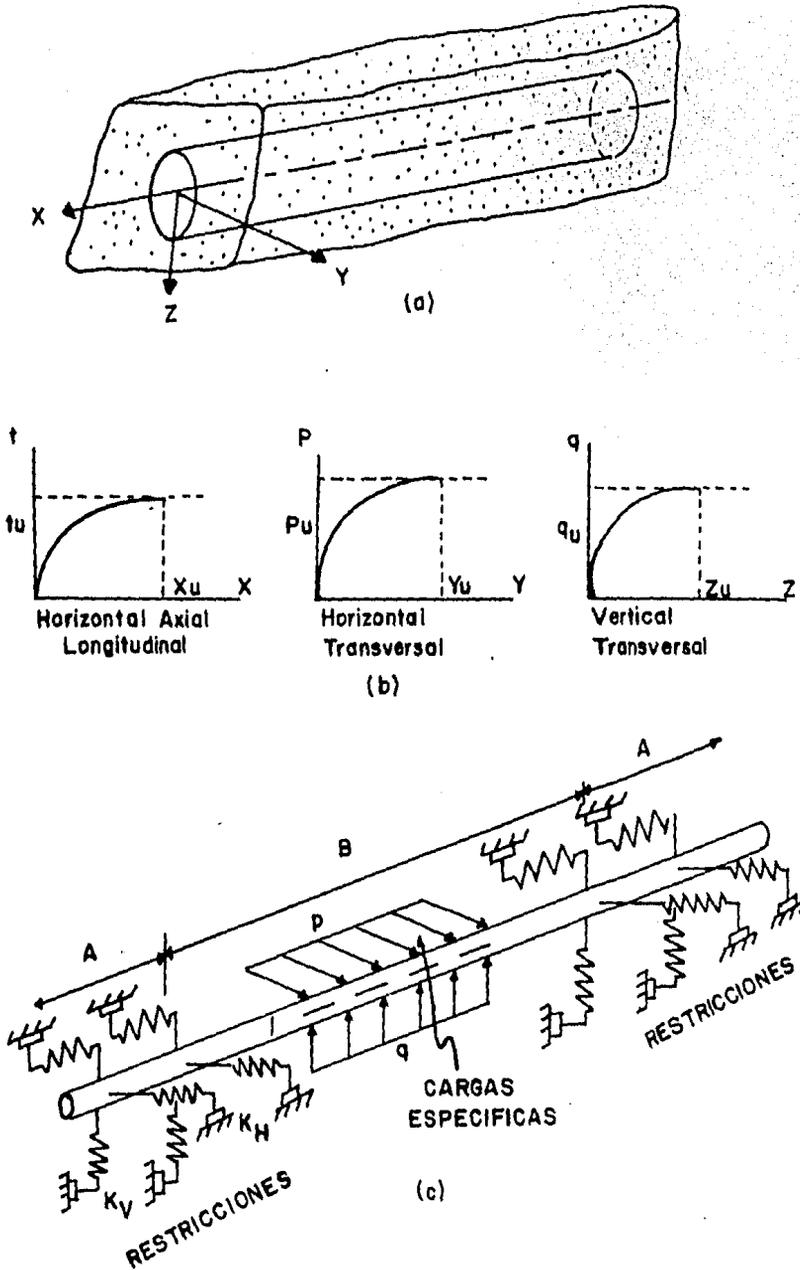
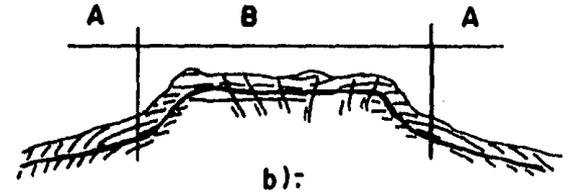
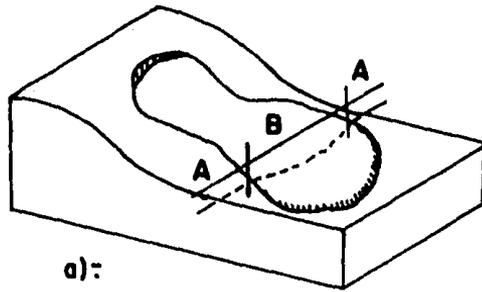


FIGURA 12.-CARGAS Y RESTRICCIONES DEL SUELO (a).-GEOMETRIA DEL SUELO,(b).-RELACIONES CARGA-DEFORMACION,(c).-MODELO-SUELO-TUBERIA IDEALIZADO.



### NOMENCLATURA.

A=SECCION DE LA TUBERIA RESTRINGIDA POR EL SUELO (ENTERRADA)  
 B=SECCION DE LA TUBERIA CARGADA POR FLUJO DE LODO O LEVANTADA  
 AMONTONAMIENTO DE LODO.

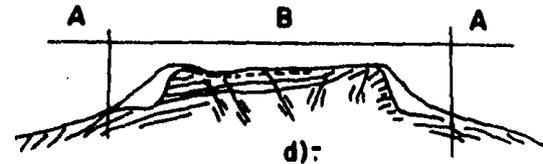
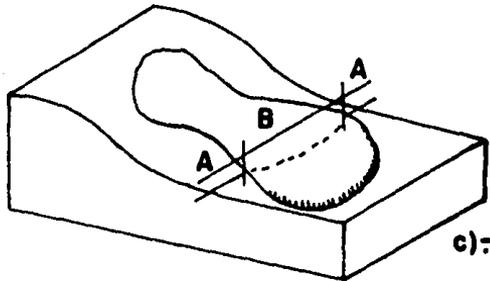
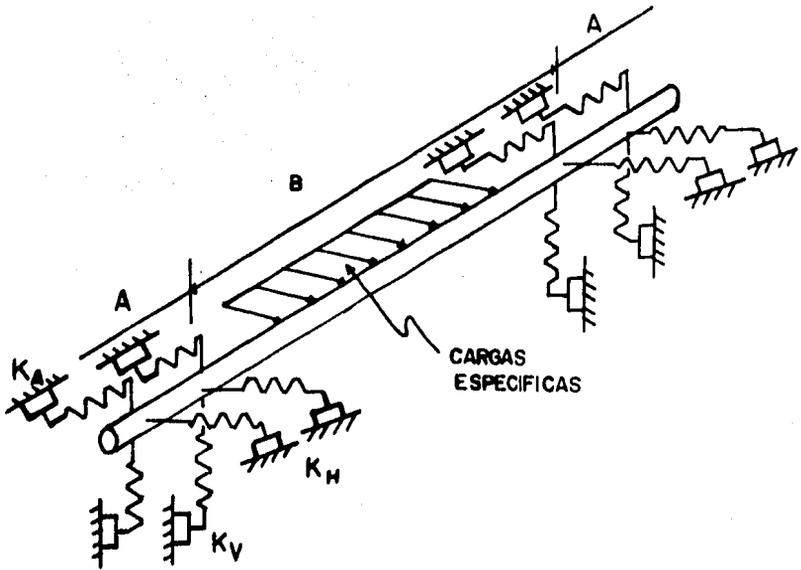


FIGURA V.13: TUBERIA QUE CRUZA FLUJOS DE AMONTONAMIENTO DE LODO.

a,b): LINEAS ENTERRADAS.

c,d): LINEAS SUPERFICIALES.

A).-



A= SECCION DE TUBERIA RESTRINGIDA POR SUELOS(ENTERRADA)

B= SECCION DE TUBERIA CARGADA POR FLUJO DE LODO O LEVANTADA POR AMONTONAMIENTO DE LODO.

B).-

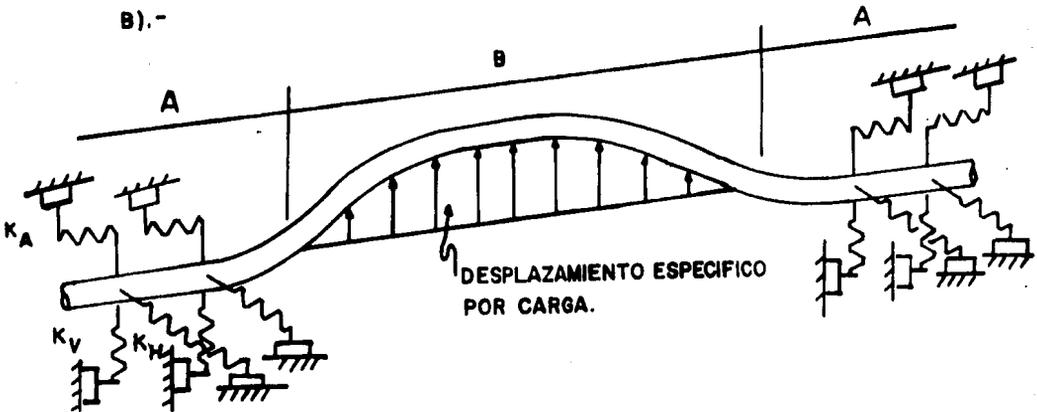
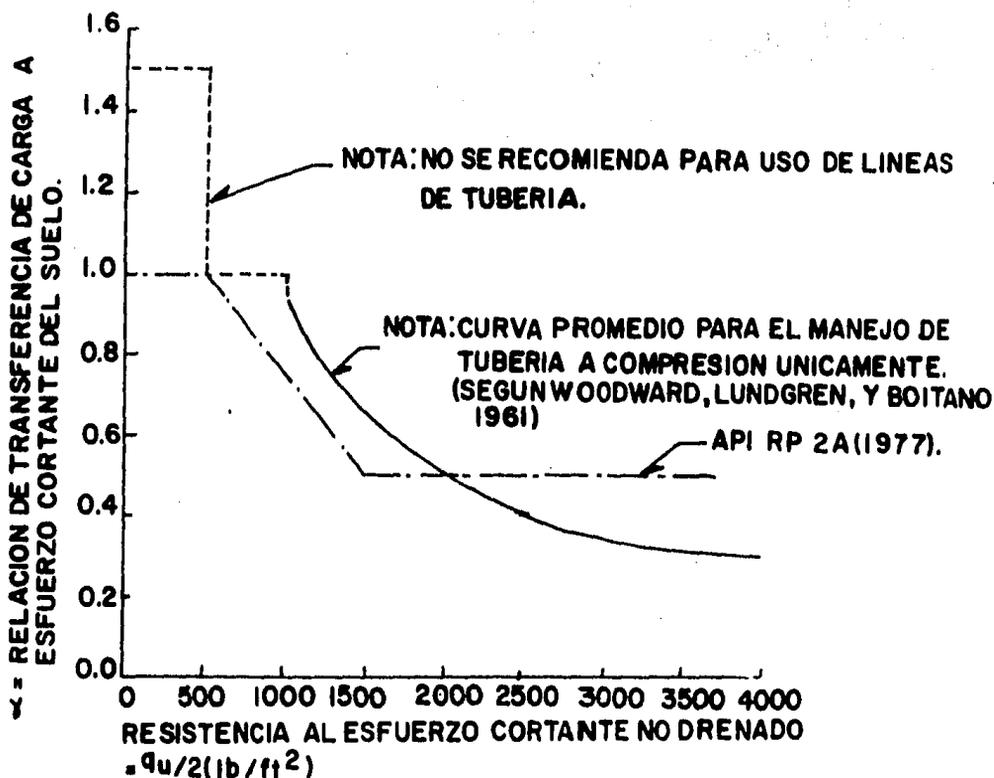
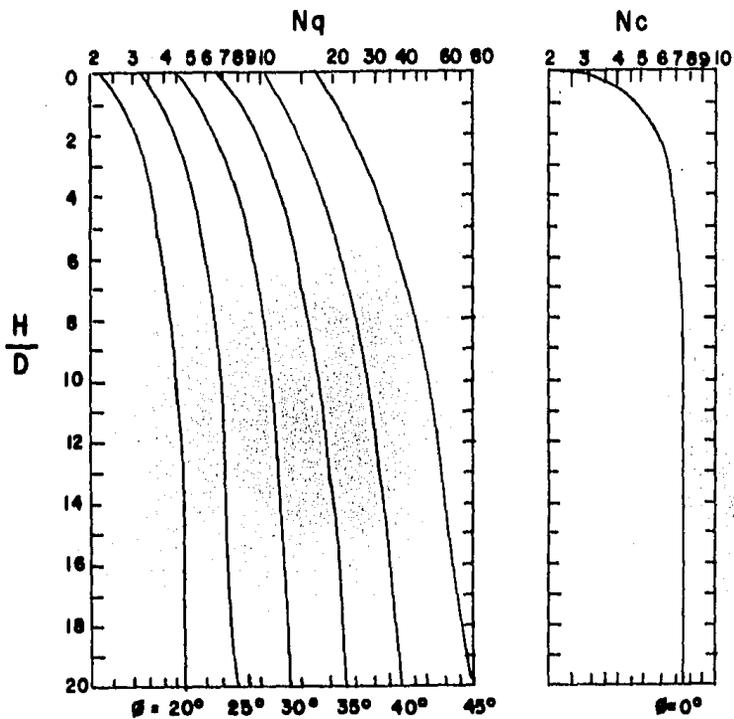


FIGURA V.14.- MODELO ESTRUCTURAL DE LA TUBERIA SUJETA A :  
A).- FLUJO DE LODO, B).- FUERZAS DE AMONTONAMIENTO DE LODO.



**FIGURA V.15: RELACION DE TRANSFERENCIA DE CARGA-RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE NO DRENADO. (ADAPTADO POR COYLE AND REESE, 1966)**



a).- Suelo Granular.

b).- Suelo Cohesivo.

(Según Brinch Hansen, 1961)

FIGURA V.16.- FACTOR DE CAPACIDAD CARGA-PROFUNDIDAD (REPORTADA POR DAVISSON Y PRAKASH, 1963)

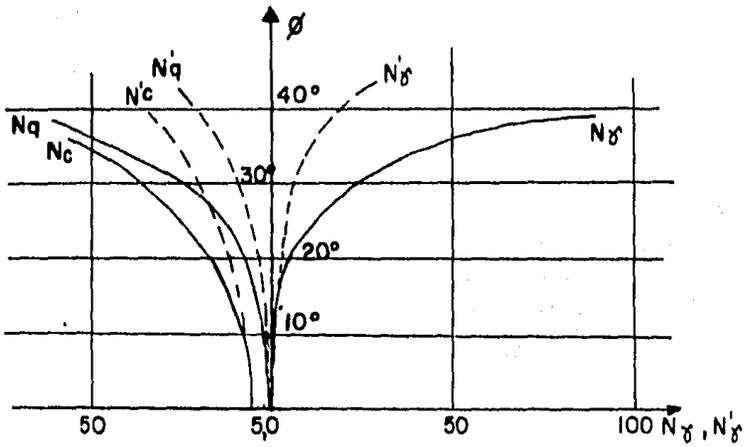
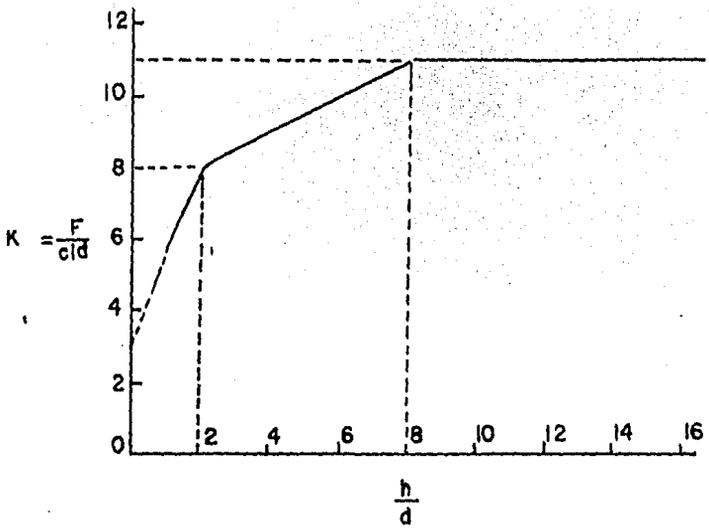
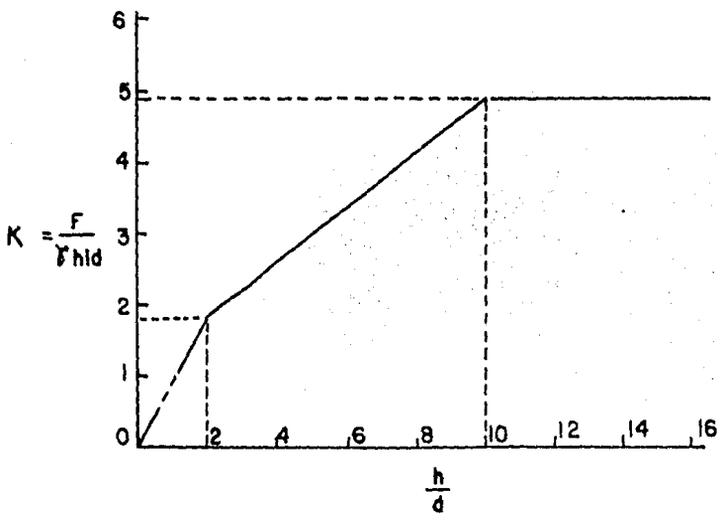


FIGURA V.17.-NOMOGRAMA QUE DA LOS COEFICIENTES DE CAPACIDAD DE CARGA EN FUNCION DEL ANGULO DE FRICCION  $\phi$  (SEGUN TERZAGHI)



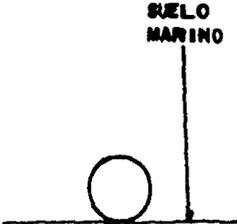
a). -ARCILLA BLANDA.

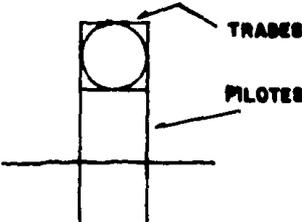


b). -ARENA SUELTA

FIGURA 18.- COEFICIENTE DE RESISTENCIA DE SALIDA  
(SEGUN REESE Y CASBARIAN, 1968.)

**TABLA V.1 ESTABILIZACION DE TUBERIAS SUBMARINAS**

DESCRIPCION DEL CASO	FIGURA	APLICACION TIPICA	OBSERVACIONES
<p>1. TUBERIA APOYADA EN EL SUELO MARINO.</p>		<p>USADA EN AREAS DE POCA CORRIENTE O DONDE LAS CONDICIONES DEL SUELO DIFICULTAN EL ZANJADO.</p>	<p>EXPUESTA A IMPACTOS. LA RESISTENCIA DE APOYO DEBE SER SUFICIENTE PARA PREVENIR SE HUNDA LA TUBERIA; EL PESO DE LA TUBERIA DEBE SER SUFICIENTE PARA SOPORTAR LAS FUERZAS DE IZAMIENTO Y DESLIZAMIENTO. LA TUBERIA ESTA EXPUESTA A MOVIMIENTOS CAUSADOS POR FLUJO DE Lodos.</p>
<p>2. TUBERIA CON PROTECCION DE ROCAS.</p>		<p>USADA EN ZONAS SUJETAS A FUERTES ACCIONES DE LA CORRIENTE Y MAREA.</p>	<p>LA ROCA DA PROTECCION CONTRA IMPACTOS DEL EXTERIOR. DEBE CUIDARSE QUE LAS ROCAS QUEDEN COLOCADAS DE MODO QUE SEAN ESTABLES A LA ACCION DE LA CORRIENTE MARINA.</p>

<p>3. TUBERIA SOSTENIDA POR PILOTES.</p>		<p>USADA DONDE EL SUELO TIENE CAPACIDAD DE APOYO INSUFICIENTE PARA SOPORTAR A LA TUBERIA.</p>	<p>CONSTRUCCION CARISIMA. TUBERIA EXPUESTA A VIBRACIONES Y A DAÑOS EXTERNOS.</p>
<p>4. TUBERIA ENCASILLADA.</p>		<p>USADA EN ZONAS SUJETAS A CORRIENTES MODERADAS.</p>	<p>LAS CASILLAS DEBERAN SOPORTAR LAS FUERZAS DE ARRASTRE.</p>
<p>5. TUBERIA ENTERRADA POR MEDIO DE PROPULSION.</p>		<p>USADA DONDE LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES SON RENOVADOS FACILMENTE CON CHORROS DE AGUA A PRESION.</p>	<p>LA ACCION DE PROPULSION PUEDE DAÑAR LA CUBIERTA DE LA TUBERIA DURANTE LA OPERACION DE ENTIERRO.</p>
<p>6. TUBERIA ANCLADA.</p>		<p>USADA EN SUELO ROCOSO O EN ZONAS DONDE PUEDE EXISTIR SOCAVACION.</p>	<p>LA TUBERIA ESTA EXPUESTA A DAÑO EXTERNO.</p>

7. TUBERIA ENTE-  
RRADA POR  
ZANJADO.



USADA EN SUELOS SUPER-  
FICIALES DE POCA CAPACI-  
DAD DE CARGA.

EL MATERIAL DE RELLENO  
PODRIA SER FACILMENTE  
EROSIONADO.

## VI. CONCLUSIONES

El auge que ha tenido la explotación de gas y petróleo mar adentro ha implicado para los países con estos recursos, la necesidad de contar con los elementos de transporte y movilización de hidrocarburos entre los centros de producción y los centros de proceso o almacenamiento. Esto se efectúa de dos formas: Por buquetanque y por tuberías.

El transporte mediante buquetanques es especialmente ventajoso cuando se requiere iniciar la producción a la mayor brevedad. Más como el barco tanque no puede atracar directamente en la plataforma de producción, se requiere por lo tanto, una instalación de transbordo como elemento intermedio de almacenamiento y la plataforma de producción. Hoy en día, la forma más usual de estos elementos intermedios son grandes boyas.

En la figura VI.1. se puede apreciar un barco tanque cargando a partir de una monoboya. El buquetanque, amarrado únicamente con el cable de proa, puede girar libremente de acuerdo con la dirección del viento y la corriente alrededor de la boya, mientras es alimentado por una manguera flotando sobre una mesa giratoria.

En general, la ventaja de la combinación de boya de carga y buquetanque consiste, en que para grandes distancias resultan apreciablemente más baratos que un sistema de ductos a tierra y que una vez agotado el yacimiento en cuestión la monoboya y el tanque pueden ser utilizados en otro sitio. Sin embargo, -

Las boyas representan un obstáculo para la navegación. En sí-  
su uso es evitar que los buques tanque entren en puerto toman-  
do su carga a través de ella.

Las líneas de tuberías han mostrado ser una solución ágil y -  
económica para movilizar dichos enérgicos, y son ya varias-  
zonas en el mundo en las cuales existen complicadas redes de-  
líneas submarinas destacando por la magnitud de los proyectos  
desarrollados los del mar del norte, el mediterraneo y los de  
nuestro país en el golfo de Mexico.

Por otro lado se requiere de investigaciones que proporcionen  
los parámetros de diseño adecuado para garantizar la estabili-  
dad de las líneas. Evidentemente la información directa de --  
campo es determinante en la definición de dichos parámetros.

La forma más rápida y económica de conocer las condiciones --  
del fondo y subsuelo marino, es la de efectuar un levantamien-  
to geofísico [ mediante el uso conjunto de tres tipos de ---  
equipos: Los destinados a investigar el tirante del agua ----  
( Ecosonda ), los del fondo marino ( Sonar de barrido late---  
ral ) y los que exploran el subsuelo del mismo ( Perfiladores  
somero y profundo ). Que son empleados simultáneamente a bor-  
do de una embarcación especialmente equipada que permite de -  
acuerdo a un recorrido programado, llevar a cabo el menciona-  
do levantamiento. Posteriormente mediante el auxilio de compu-  
tadores se lleva a cabo el procesamiento de la información --  
para que su interpretación pueda plasmarse en planos y perfí-  
les descriptivos del área que se estudia ] , el cual comple-

mentado con datos de sondeos geotécnicos, permite alcanzar un buen grado de conocimiento del subsuelo.

Los datos obtenidos a través de los estudios geofísicos son principalmente: La batimetría del fondo marino, la existencia de afloramiento rocosos, coralíferos o de gas, el espesor de sedimentos no consolidados, la profundidad de la primera capa resistente, la existencia de arenas gaseosas, la presencia de zonas inestables y la localización de estratos resistentes.

En la exploración geotécnica los muestreadores de gravedad y pistón estacionario tienen gran ventaja sobre los vibromuestreadores pues es posible realizar el estudio geofísico y geotécnico al mismo tiempo.

Dependiendo de las zonas que una línea atraviese, existirán diferentes intensidades: Para un diseño adecuado deberá decidirse con que método se pretende proteger la tubería. Enterrarla, por ejemplo, tiene efectos benéficos en cuanto a fuerzas hidrodinámicas, socavación, flotación y deslizamiento de laderas submarinas, cuando la línea está localizada abajo de la zona de flujo potencial, pero por otro lado, trae efectos contraproducentes ante expansiones de suelo, mismos y movimientos de fallas.

La mejor estrategia de diseño será siempre aquella que evite los riesgos, en vez de tratar de implementar a la línea para resistirlos. Sin embargo no siempre es posible elegir una ruta que los evite totalmente.

El diseño de las líneas submarinas está basado en forma muy importante en resultados empíricos y en la experiencia. Existen problemas de condiciones dinámicas y otros como cargas -- cíclicas, velocidad de aplicación de cargas, anisotropía, ten dido de la tubería, etc., que necesitan ser considerados. -- Todo ésto y el hecho de que la construcción de líneas enterradas es sumamente cara y de que eventuales fallas en la tubería requieren de costosas reparaciones además de que implican fuertes pérdidas de producción, justifican mayores esfuerzos de investigación en esta disciplina.

La tabla VI.1. Debida a Funge y Juran, muestra el daño potencial y su probabilidad de ocurrencia en forma cualitativa, -- como causa de perturbaciones de diferentes orígenes, a las -- líneas de tuberías. Según la cual, el Ingeniero en geotécnica marina ha desempeñado bien su papel, más esto no invalida la necesidad de desarrollar teorías más adecuadas y métodos más confiables.

# CARGA DESDE UNA MONOBOYA

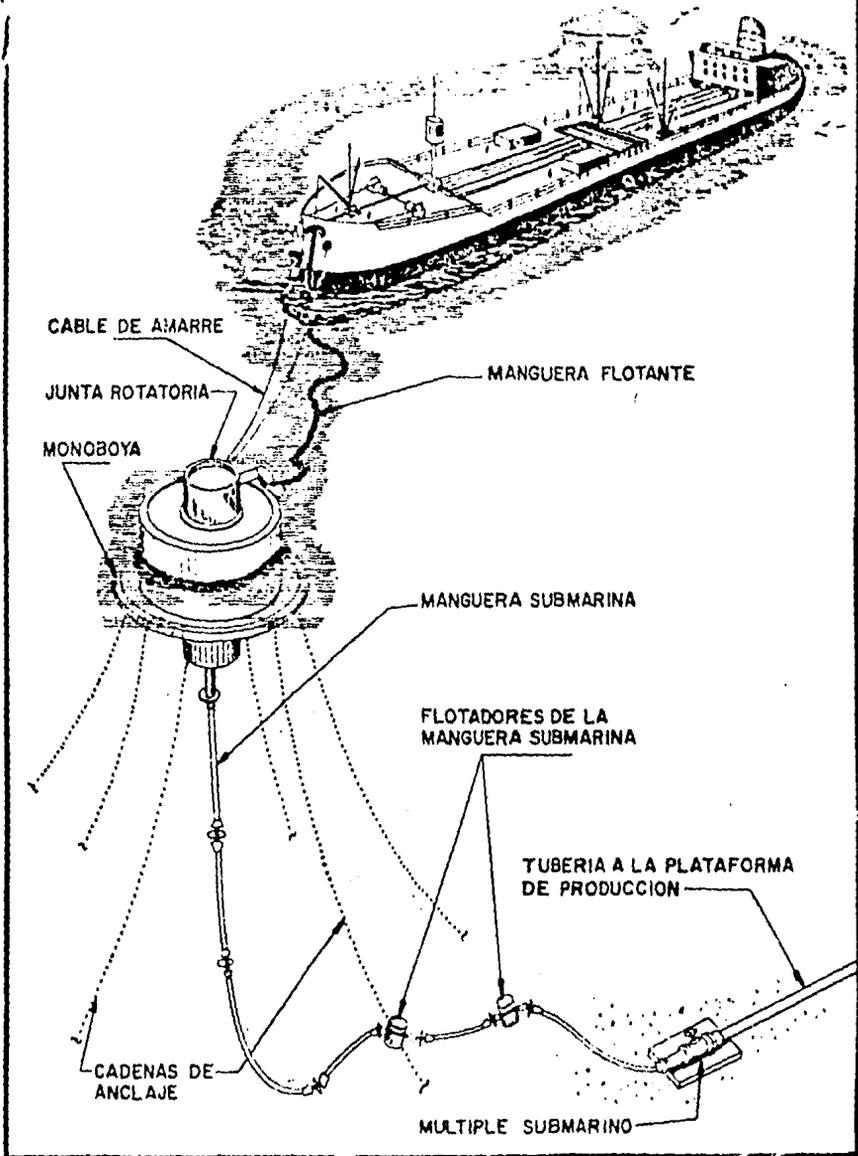


FIGURA VI.1. BUQUETANQUE CARGANDO A PARTIR DE UNA MONOBOYA.

DAÑOS POTENCIALES DEBIDO A:	DAÑO POTENCIAL			PROBABILIDAD DE OCURRENCIA		
	EXTENSO	MODERADO	MEJOR	MAXIMA PROBABILIDAD	OCURRENCIA ESPERADA	POCO PROBABLE
Corrosión externa *	+			+		
Tirante de agua						
Oleaje						
Corrientes } Δ		+				+
Mareas						
Viento						
Efectos termales y hielo			+			+
Abrasión y desgaste			+			+
Huracanes	+					+
Tormentas severas	+					+
Sismos	+					+
Transporte de suelos			+	-	+	
Erosión			+		+	
Fenómenos del suelo			+		+	
Accidentes navales *	+			+		
Arrastre de anclas *	+			+		
Pesca	+					+
Dragado		+				+
Descarga de desperdicios		+				+
Errores del Operador			+		+	
Equipo inadecuado	+				+	
Equipo en malas condiciones	+				+	
Vandalismo	+					+
Sabotaje	+					+
Corrosión interna	+				+	
Explosión	+					+
Fuego	+					+

Daño inadvertido					
Durante la construcción	+			+	
Deficiencias de materiales	+				+
Deficiente control de calidad	+				+
Coefficientes de diseño		+			+

\* Estadísticamente los más frecuentes

Δ Estados naturales excediendo los de diseño

Tabla IV.1. de Funge y Juran.

## B I B L I O G R A F I A

1. Diseño de tuberías para resistir inestabilidades en el --  
fondo marino y fuerzas hidrodinámicas. Por Jean M. E. --  
Audibert, Ngok W. Lai y Robert G. Bea.
2. Requisitos de estabilización para tuberías marinas suje--  
tas a fuerzas oceánicas. Por Jeffrey A. Leyton y J. L. --  
Scott.
3. Cargas y restricciones para el diseño de tuberías instala--  
das en el fondo marino. Por Jean M. E. Audibert, Ngok W.--  
Lai y Robert G. Bea.
4. Simposio Internacional de Mecánica de Suelos Marinos.  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.  
Volumén I y II, Febrero de 1980.
5. Reconocimiento del fondo marino y mecánica de suelos fue--  
ra de costa para la instalación de estructuras petroleras.  
Instituto Frances del Petroleo. Paris, Francia 1980.
6. Revista de la Facultad de Ingeniería.  
Universidad Nacional Autónoma de México.  
Números: 1 de 1978, 2 de 1979 y 1 de 1981.
7. Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica.  
Karl Terzaghi y Ralph B. Peck.

**8. Mecánica de Suelos.**

**Eulalio Juárez Badillo y Alfonso Rizo Rodríguez.**

**Tomos I y II.**