

300615

13



UNIVERSIDAD LA SALLE, A. C.^{2y}

ESCUELA DE INGENIERIA
INCORPORADA A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

"PLATAFORMAS MARINAS: VARIACION EN LA
FUERZA DE OLEAJE DEBIDO AL
COEFICIENTE DE ARRASTRE"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
EMILIO MENDOZA DE LA FUENTE

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1990



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

INTRODUCCION

Descripción
Objetivos
Justificación

CAP. I.- ESTRUCTURAS COSTA AFUERA

1.1 Tipos de Estructuras Costa Afuera

1.1.1 Plataformas Móviles
1.1.2 Plataformas Rígidas

1.1.2.1 Plataformas Rígidas
1.1.2.2 Plataformas Flexibles

1.1.3 Otras Estructuras
1.1.4 Otros Conceptos en Investigación y
Desarrollo

1.2 Plataformas Marinas de Acero Fijas

1.2.1 Sistema de Cimentación
1.2.2 Subestructura
1.2.3 Superestructura
1.2.4 Accesorios
1.2.5 Tipos de Plataformas

CAP. II.- CONDICIONES DE CARGA EN UNA PLATAFORMA FIJA DE ACERO

2.1 Cargas Gravitacionales
2.2 Cargas de Viento
2.3 Cargas de Flotación
2.4 Cargas Accidentales
2.5 Cargas de Oleaje

CAP. III.- FUERZA DE OLEAJE

- 3.1 Propiedades de la ola
- 3.2 Teoría de Oleaje de Airy
- 3.3 Ecuación de Morison
- 3.4 Coeficiente de Arrastre
- 3.5 Coeficiente de Inercia
- 3.6 Fuerza de Oleaje en un elemento cilíndrico

CAP. IV.- DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA CALCULAR LOS COEFICIENTES DE ARRASTRE Y FUERZAS DE OLEAJE

4.1 Suposiciones

- 4.1.1. Generalización de la Ecuación de Morison
- 4.1.2. Suposiciones Varias

4.2 Limitaciones del Programa

4.3 Descripción del Programa

4.4 Manual de Usuario del Programa

4.4.1. Programas Auxiliares

4.4.2. Programa Principal

CAP. V.- ANALISIS DE LOS COEFICIENTES DE ARRASTRE Y LAS FUERZAS DE OLEAJE

5.1 Modelo Utilizado

5.2 Resultados

5.3 Comparación de los Resultados Obtenidos

CONCLUSIONES

REFERENCIAS

INTRODUCCION

Descripción .-

Para poder efectuar la explotación de los hidrocarburos en los campos ubicados en el mar, el hombre ha desarrollado diferentes tipos de estructuras que le permiten extraer este recurso . A estas estructuras se les ha dado el nombre de estructuras costa-afuera.

Una de las cargas de operación involucradas en el análisis y diseño de este tipo de estructuras son las fuerzas, debidas al oleaje. Entre los principales factores que determinan dichas fuerzas están el coeficiente de arrastre y el Coeficiente de Inercia.

El Coeficiente de Inercia depende de la forma del elemento estructural, que en estas estructuras generalmente es cilíndrico; el Coeficiente de Arrastre toma su valor con base en la velocidad del fluido, el diámetro del elemento y la viscosidad cinemática del fluido. Siendo la velocidad del agua y el diámetro diferentes según el elemento que se trate, se plantea la siguiente interrogante: ¿Cómo se ven afectadas las fuerzas de oleaje en una plataforma marina considerando el coeficiente de arrastre que corresponde a cada elemento de la estructura ? Esta interrogante se investiga en esta tesis con base en los principios de la teoría de oleaje de Airy, en la ecuación de Morison, así como en los conceptos fundamentales que involucra el análisis de la ola como son: Período, Frecuencia, Altura , Longitud de la Ola, etc.

Esta tesis involucra una descripción de los diferentes tipos de estructuras costa afuera que existen en el mundo, así como un análisis comparativo, para conocer cómo varía la fuerza de oleaje por cambios en el coeficiente de arrastre.

Objetivos

El objetivo general de esta tesis es comparar la fuerza de oleaje en una plataforma marina que se obtiene tomando el coeficiente de arrastre que corresponda a cada elemento de la misma, con las fuerzas de oleaje que se obtienen

considerando el coeficiente de arrastre constante para toda la estructura.

Los objetivos secundarios son :

- a) Exponer los tipos de estructura costa-afuera, dando una clasificación de las mismas.
- b) Exponer las condiciones de carga de operación de una plataforma marina y ubicar las fuerzas de oleaje dentro de la misma.
- c) Desarrollar los algoritmos para el cálculo de los coeficientes arrastre y las fuerzas de oleaje con base en la teoría de Airy.
- d) Desarrollar un programa en microcomputadora para determinar los coeficientes de arrastre en cada miembro de una plataforma marina.

Para el logro de estos objetivos se consideraron las siguientes limitaciones :

- a) El alcance del trabajo sólo abarca la obtención de las fuerzas de oleaje y no involucra el análisis estructural ni el diseño de la plataforma marina.
- b) Sólo se consideró la Teoría del Oleaje de Airy.
- c) No se involucró el caso de aguas someras.
- d) El análisis de la fuerza de oleaje es unidireccional, y con la posición de la ola fija, son conocidos los parámetros de la ola .

Justificación

En México, a pesar de los esfuerzos realizados a la fecha para no depender económicamente de la explotación de hidrocarburos, aún se tiene que las exportaciones en este renglón son una parte importante en la entrada de divisas para el desarrollo del país. Esta función primordial de los hidrocarburos en la economía mexicana ha creado la necesidad de desarrollar nuestra propia tecnología, lo que ha llevado a que se diseñen y construyan plataformas

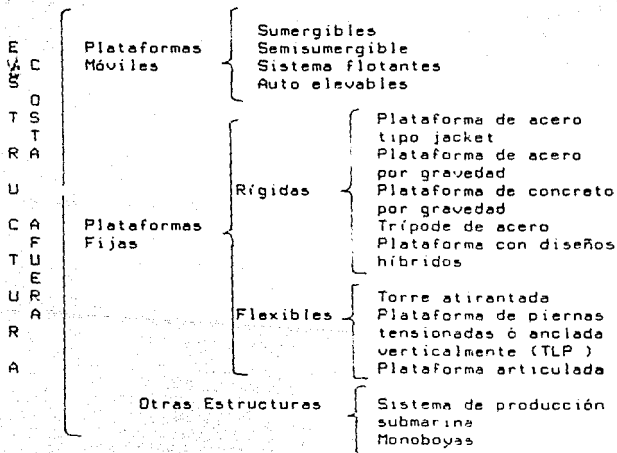
marines para la explotación de petróleo en la Sonda de Campeche. Actualmente en el diseño se considera que el Coeficiente de Arrastre es constante en toda la estructura y no se ha determinado cómo varían dichas fuerzas considerando el correspondiente a cada elemento de dicha estructura. Este trabajo demuestra que esta suposición, aceptada hasta ahora, no es del todo válida.

CAPITULO I
ESTRUCTURAS COSTA - AFUERA

La necesidad de explotar yacimientos de hidrocarburos en el mar ha llevado a la industria petrolera a desarrollar sistemas estructurales fuera de la costa. En este capítulo se describen los tipos de estructuras costa-afuera que se han desarrollado en el mundo y algunos que todavía se encuentran en la fase de estudio (Ref. 2,3,8,9,13 a 16). Por ser la plataforma convencional de acero más común en México, se hace una detallada descripción de este tipo de plataforma y los sistemas que la componen.

1.1. Tipos de Estructuras Costa-Afuera

Los diferentes tipos de estructuras Costa-Afuera se muestran en el siguiente cuadro :



1.1.1 Plataformas móviles

Son aquellas que se pueden transportar, sea por medios propios o con ayuda externa (remolcadores, barcos cargueros) hasta el lugar donde operarán, y una vez finalizada su operación, se pueden llevar a otro sitio para utilizarse de nuevo.

- a) Plataformas Sumergibles . Son estructuras construídas sobre grandes pontones, generalmente dos, que cuando están en la zona de operación se hunden hasta que toquen el fondo. Se utilizan para operaciones de perforación en aguas muy poco profundas (15 m).
- b) Plataformas Semisumergibles . Son estructuras muy semejantes a las anteriores, sólo que se hunden hasta cierto límite y posteriormente se anclan en el fondo marino cuando están en operación. Como tienen mucho menor movimiento con el oleaje que los barcos, se usan para hacer perforaciones, especialmente en ambientes muy severos como los que imperan en el Mar del Norte. Son capaces de operar en profundidades mayores de 300 m (Fig. 1.1).

Las semisumergibles generalmente se diseñan para una área de operación específica; el Mar del Norte, el Golfo de México, Lejano Oriente, entre otros, ya que las condiciones del medio ambiente (oleaje, corrientes, viento) deben establecerse al inicio de la fase de diseño. Su estructura es muy simple, consta de dos pontones longitudinales con cuatro, seis u ocho columnas que soportan la cubierta. Los arriostramientos suelen ser muy pocos, y en algunos casos se han eliminado. El sistema de anclado es el que determina la profundidad máxima a la que puede operar.

Existen tres tipos de líneas de anclado: cadenas, cables o una combinación de ambos. La mayoría de las semisumergibles utilizan líneas de anclado de cadenas porque son más resistentes y durables, sin embargo, un sistema de cadena y cable ayuda a aumentar la profundidad a la que se puede operar la semisumergible porque las líneas de anclado resultan más ligeras.

La carga que la semisumergible lleva sobre la cubierta

depende del calado. Es por ésto que se utiliza principalmente en operaciones de perforación, ya que los equipos de proceso del crudo son muy pesados y requieren de una estructura sumamente costosa.

- c) Sistemas flotantes Son muy utilizados para operaciones de exploración de campos petroleros, sin embargo, como son barcos adaptados a usos específicos (perforación, tanqueros fijos, conectados a una tubería submarina, etc.) se estudian en el campo de la Arquitectura Naval y no se consideran en este trabajo.

- d) Plataformas auto elevables (Jack-up) .- Son plataformas que tienen de 3 a 10 piernas (generalmente 3 ó 4) con movimiento vertical controlado, por lo que una vez terminado su tiempo de operación, estas piernas pueden ser levantadas, quedando flotando la estructura para ser remolcada o transportada con un barco especial a otro lugar de operación. Son utilizadas generalmente para perforación y en profundidades de 15 a 150 mts., aunque depende de la longitud de las piernas de cada estructura en particular.

En el análisis estructural de una plataforma de este tipo se debe considerar, además del análisis global de la estructura bajo condiciones de operación, el de la estructura bajo condiciones de transportación, ya que durante ésta, las piernas están elevadas completamente y son soportadas como vigas empotradas en la cubierta, por lo que los movimientos en combinación con el viento inducen grandes momentos flexionantes en las piernas, así como también reacciones muy grandes en la estructura de soporte de la cubierta. Otros análisis que se deben considerar son: el análisis de impacto de las piernas durante la instalación o recuperación de la estructura (las fuerzas generadas durante las operaciones de instalación o recuperación pueden ocasionar fuerzas de impacto sobre las piernas al nivel del fondo marino), y el análisis por fatiga.

1.1.2 Plataformas fijas

Son aquellas que operan toda su vida útil en un solo lugar. Existen plataformas fijas rígidas y flexibles.

Las plataformas rígidas se diseñan para resistir las cargas de oleaje y viento por su propia rigidez. En grandes profundidades se requiere de mucho peso para poder proporcionar esa rigidez, lo que se traduce en costos muy elevados. Así, el peso estructural de la plataforma se puede reducir haciendo la estructura flexible. Esta idea ha dado lugar a plataformas flexibles como son las torres atirantadas, plataformas de piernas tensionadas o plataformas articuladas. Como estas estructuras ceden ante el oleaje, no tienen que resistir la carga ambiental total; pero a cambio de esta flexibilidad se debe hacer un diseño más complicado de los conductores y la conexión con los cabezales de los pozos y pilotes.

1.1.2.1. Plataformas rígidas

- a) Plataforma convencional de acero . Es el tipo de plataforma marina más común. Su estructuración se basa en un sistema de marcos contraventeados que tienen como finalidad principal la de proporcionar soportes laterales a los pilotes, que se encuentran dentro de las piernas (Fig. 1.2).

Las primeras plataformas de acero se instalaron a finales de los años cuarentas y principios de los cincuenta en la parte norte del Golfo de México, y en el Lago Maracaibo en Venezuela.

La tecnología fue evolucionando gradualmente, lo que permitió construir estructuras cada vez mayores y más lejos de la costa. A partir de 1970, con el desarrollo de los campos petroleros del Mar del Norte, la tecnología de estructuras fuera de la costa ha progresado rápidamente. La mayoría de las plataformas que se construyen actualmente están a varios kilómetros de la costa, y se han instalado estructuras en tirantes de agua hasta de 300 m (fig.1.3).

Existe actualmente la tecnología para instalar plataformas en profundidades mayores a 300 m, sin embargo, son estructuras muy caras. La razón del incremento de costos es que se tiene que emplear mayor cantidad de acero para tener una estructura con la rigidez adecuada, que pueda resistir los efectos dinámicos mayores consecuencia de la profundidad. Además, por el aumento en la respuesta dinámica de la estructura pueden aparecer grietas por fatiga del acero en sus juntas.

Prueba de la rapidez con que avanza la tecnología de este tipo de estructuras es que, en 1970, el límite práctico de una plataforma fija de acero se consideraba de 100 m. En 1975 este límite se convirtió en 200 m. y tres años más tarde se instaló una plataforma de acero a 300 m de profundidad. Esta estructura está localizada en la parte norte del Golfo de México, en el Campo Cognac, a 312 m. de profundidad. En 1986 varias compañías petroleras, Shell y Texaco entre ellas estaban considerando instalar plataformas fijas de acero en profundidades entre los 350 m y los 500 m en el Golfo de México.

La industria petrolera sigue prefiriendo las plataformas de acero porque presentan ventajas que otros sistemas no tienen. Estas son:

1. La tecnología empleada es conocida y ha sido probada muchas veces.
2. Las plataformas de acero presentan movimientos insignificantes en la cubierta, lo que permite condiciones de operación más cómodas y pocas interrupciones en la producción.
3. Prácticamente no hay límite de carga útil en la cubierta. A diferencia de los sistemas flotantes, no tiene restricciones en cuanto al equipo que deben soportar.

Este es el tipo de plataforma que se diseña y construye en México para la explotación de hidrocarburos en la Sonda de Campeche.

- b) Plataforma de Acero por Gravedad.- Este tipo de

plataforma se parece a las de convencionales de acero con la diferencia de que tienen unos recipientes (ó "tanques") en la parte inferior. Estos, al ser llenados de agua o crudo proporcionan, estabilidad a la estructura. (Fig. 1.4)

Este tipo de plataformas se construye en un dique seco y se remolca al sitio de operación. Debido al procedimiento de instalación, la plataforma puede llevar la mayor parte de su equipo al ser remolcada, reduciendo considerablemente las operaciones en el mar, y por tanto, su costo de instalación.

Hay una plataforma de este tipo instalada en el campo Maureen, del Mar del Norte. Es una estructura de acero de base triangular y un cilindro de acero en cada vértice del triángulo, para el almacenamiento de hasta 650,000 barriles de crudo. Sin embargo, es probable que no se construyan muchas plataformas de este tipo porque la mayoría tienen de las desventajas de las plataformas convencionales de acero con respecto a la respuesta dinámica y al daño por fatiga, siendo su construcción mucho más complicada.

- c) Plataforma de Concreto por Gravedad . Estas estructuras tienen el mismo principio que las de acero por gravedad, sólo que son de concreto. Hay varias plataformas de concreto funcionando con éxito en el Mar del Norte en profundidades hasta de 150 m. Estas plataformas tienen grandes tanques en su parte inferior y un columna central de concreto que sostiene las cubiertas. Sin embargo, para aguas más profundas se han desarrollado nuevas ideas. (Fig. 1.5)

Una evolución de esta tecnología es el diseño hecho por "Contratistas Noruegos" llamados Condeep-T300 (Fig.1.6). Es una estructura de tres columnas inclinadas de concreto que convergen en un nodo de donde parte una columna central que soporta la cubierta. Esta plataforma se diseñó para profundidades hasta de 400 m. Su principal limitación es el problema que se presenta entre su estabilidad a la flotación y su calado. Se requiere de un área de gran profundidad para su construcción, como los fiordos noruegos. Los problemas técnicos que presenta una estructura de este tipo son los siguientes :

1. Se desconoce el comportamiento del concreto bajo altas presiones, sobre todo en lo que respecta a la penetración del agua.
2. El colado continuo de las columnas inclinadas presenta serias dificultades, ya que nunca se ha construido una estructura semejante. Para investigar este problema, "Contratistas Noruegos" hizo una prueba de colado a gran escala. Los resultados mostraron que aunque difícil, es posible efectuar el colado continuo de las columnas inclinadas.
3. Para que el concreto trabaje siempre a compresión aún bajo las condiciones más severas, se requiere de la utilización de gran cantidad de cables de pre-esfuerzo.

A pesar de todo esto, es probable que la primera plataforma de este tipo se vaya a instalar en los próximos cinco años, en el campo Troll en el Mar del Norte. C.G. Doris ha desarrollado una plataforma de concreto que no requiere de un área con gran profundidad para su construcción, ya que la estructura se construye en secciones dentro de un dique seco. Las secciones se transportan flotando al sitio de instalación y aquí se unen.

- d) Trípode de Acero. Este corresponde a una evolución del concepto de plataformas convencionales, que busca optimizar la cantidad de acero que se emplea en las plataformas fijas. La torre tiene piernas, una columna central y dos inclinadas que convergen bajo el agua. Hay algunos elementos diagonales entre las tres columnas que sirven para disminuir el período fundamental de la estructura (Fig. 1.7). Este diseño presenta un buen comportamiento en el sitio y representa un ahorro considerable en la cantidad de acero requerida para una plataforma fija. Sin embargo, presenta los siguientes problemas:

1. Fatiga en el nudo de los altos esfuerzos a los que está sujeto y el gran número de ciclos a que se somete .
2. La estructura tiene muy poca redundancia, lo que podría traer consecuencias catastróficas en caso de falla de algún miembro.

3. El problema de la conexión entre los pilotes y la estructura no ha sido resuelto totalmente.

Aún con estos problemas, este es otro tipo de estructura que se está considerando para el campo Troll en Noruega.

- e) Plataforma Híbrida. Este concepto de estructuración fué propuesto por la compañía Sava Petroleum en 1984 para los campos noruegos. La estructura tiene dos partes; una de concreto, que se encuentra en la parte baja de la misma y tiene siete tanques para llenarse y dar estabilidad a la plataforma, y la parte superior que es de tipo convencional de acero. Sin embargo, esta idea es muy nueva y todavía no se ha definido completamente.

1.1.2.2 Plataformas Flexibles

- a) Torre Atirantada . Estas plataformas están formadas por una estructura de acero de piernas rectas y un sistema de cables o tirantes en la parte superior de la torre, que se anclan en el fondo marino. La estructura de acero soporta las cargas verticales, y las horizontales son resistidas por los tirantes y la inercia de la estructura (Fig. 1.8).

Esta idea no es nueva. En 1894 se otorgó una patente a A. W. Palmer por el concepto. Sin embargo, no es sino hasta recientemente, al iniciarse la explotación de hidrocarburos en aguas profundas, que esta se ha aplicado. En 1974 ya se habían realizado muchos estudios, tanto del comportamiento de la estructura como de su fabricación e instalación, y en 1975, doce compañías petroleras financiaron la construcción de un modelo a escala de una torre atirantada en el Golfo de México. El modelo se estudió durante tres años y medio y la experiencia adquirida sirvió a Exxon para el diseño de la primera torre atirantada en el mundo. Fué instalada en julio de 1983 en el campo Lena localizado en la parte norte del Golfo de México, a una profundidad de 305 m.

La mayor ventaja de las torres atirantadas es que

pueden soportar tanto equipo para perforación y producción como una plataforma convencional de acero con mucho menor peso estructural. Sin embargo, los tirantes presentan tres problemas serios:

1. Su instalación es difícil; se requieren muchas operaciones marinas y submarinas para su colocación.
2. Los tirantes imponen restricciones a la navegación en un área muy grande. Por ejemplo, alrededor de la torre de Exxon se tuvo que restringir la navegación y anclado de barcos en un kilómetro de extensión.
3. El sistema de tirantes debe estar diseñado de tal manera que proporcione máxima rigidez para movimientos pequeños y el comportamiento adecuado en condiciones de tormenta.

Este último problema se resolvió en la torre instalada en el campo Lena con un sistema de pesos flexibles en los tirantes, instalados de tal forma que se vayan levantando gradualmente, haciendo rígido el sistema cuando éstos pesos no se han levantado totalmente. Cuando las cargas son mayores, el peso queda suspendido totalmente, incrementando la longitud de la catenaria y haciendo flexible el sistema estructural.

- c) Plataforma de Piernas Tensionadas. También llamadas plataformas ancladas verticalmente (conocidas como TLP por las siglas en inglés) son estructuras flotantes fijadas al fondo marino por medio de cables a tensión (Fig. 1.9 y Fig. 1.10). La plataforma flotante es semejante a un semisumergible con gran capacidad de carga útil. Las líneas de anclado están a tensión bajo cualquier condición de carga y oleaje, debido a que la flotación propia de la plataforma siempre excede a su masa. Las TLP tienen grandes ventajas que las hacen atractivas para aguas profundas:
1. Su costo es prácticamente independiente de la profundidad.
 2. Pocos trabajos fuera de la costa, ya que toda la construcción se hace en un dique o en patios de fabricación.

3. La sensibilidad ante cargas de sismo es mínima.

La empresa petrolera Conoco diseñó la primera plataforma de piernas tensionadas que se instaló en el verano de 1984 en el campo Hutton, del sector británico del Mar del Norte. Se encuentra a una profundidad de 150 m. Esta misma compañía está considerado una TLP de una profundidad de 450 m en el Golfo de México. Las compañías Fluor y Bethel desarrollaron el diseño preliminar de una TLP para el Golfo de México, en una profundidad de 600 m. A pesar de todos estos diseños probables y de la exitosa instalación e inicio de operación de la TLP Hutton, estos sistemas presentan varios problemas:

1. El costo de inspección, mantenimiento y reparación de los tensores de anclado se desconoce totalmente.
2. Para la perforación de pozos se requiere de plantillas submarinas. La instalación de estas plantillas y de la cimentación es un problema que no se ha resuelto todavía.
3. No se deben usar para la explotación de yacimientos donde existan grandes cantidades de gas. Si se presentara una fuga importante, la densidad del agua disminuiría, la estructura flotante perdería estabilidad y se voltearía.

Cabe mencionar que este tipo de plataforma no necesariamente debe estar anclada verticalmente. Los tensores pueden tener un ligero ángulo de inclinación; aunque la tecnología que se ha desarrollado hasta ahora es principalmente para plataformas con los tensores verticales.

- c) Plataforma Articulada. La articulación que tiene en la base es lo que le da el nombre a este tipo de plataformas. La estructura se mantiene en posición vertical gracias a que poseen tanques de flotación en la parte superior (Fig.1.11). En el Mar del Norte se han instalado, en profundidades hasta de 160 m., varias plataformas articuladas que sirven como estructuras auxiliares. Extrapolar la tecnología que se ha usado a

estructuras principales y aguas más profundas presenta problemas. Debido al incremento de carga en la cubierta y a la mayor altura de la torre, la respuesta dinámica de la plataforma aumenta considerablemente.

El problema más serio de este tipo de plataformas es la falta de redundancia; si falla la articulación, la integridad de la estructura entera se pone en peligro. Otro problema importante que presentan estas plataformas es la gran cantidad de líneas de flujo que pasa cerca de la articulación y, por tanto, deben ser flexibles.

Varias compañías han propuesto diseños de plataformas de este tipo. C.G. Doris ha desarrollado una torre de acero con flotadores de concreto y una junta universal a base de material elastomérico. El grupo Conat de Alemania diseñó una torre de concreto con una articulación a base de cascarones. Existe un diseño inglés que propone la junta universal a base de fibra de carbono (Kevlar). Actualmente C. G. Doris está desarrollando un diseño para el Golfo de México denominado Torre Gamma, la cual tiene una estructura de acero y en vez de una junta universal en la base, está articulada con pilotes flexibles.

Por quedar estabilizadas a base de flotación, las plataformas articuladas son sensibles al peso que pueden llevar sobre la cubierta, aunque en mucho menor medida que las plataformas flotantes (semi-sumergibles ó TLP-s); es decir, pueden llevar mayor carga que una plataforma flotante pero no tanto como una fija.

1.1.3 Otras Estructuras

- a) **Sistemas de Producción.** Estos sistemas constan de un equipo de perforación, otro para proceso y producción, y otro para almacenamiento y transporte del crudo o gas. Estos sistemas se caracterizan porque la terminación del pozo (el cabezal y el árbol de navidad) se encuentra en el fondo marino. El equipo para perforación usado en estos sistemas es un barco y una plataforma semisumergible. El equipo de producción puede ser flotante o fijo (Fig. 1.12, 1.13, 1.14).

Estos sistemas se han instalado en el Mar del Norte, en los campos Cormorant, Frigg, Duncan y Tartan entre otros.

Con estos sistemas, la producción en el campo puede iniciarse antes de usar una plataforma fija. Esto se debe a que no es necesario esperar a la construcción de la plataforma para iniciar la perforación. En ocasiones, como en el campo Garoupa, en Brasil, la producción se inicia a través de los pozos exploratorios, y la utilización de este método de producción temprana tiene la gran ventaja de que la inversión para desarrollar el campo se recupera más rápidamente.

El interés de la industria petrolera por perfeccionar estos sistemas es muy grande porque son los que posiblemente se usarán en grandes profundidades (600 m en adelante). Es por esto que su tecnología ha avanzado a grandes pasos. En 1971, se instalaron los primeros pozos de este tipo en el campo Ekofisk en Noruega, y en el mes de agosto de 1984 se habían instalado 294 pozos con terminación submarina en todo el mundo. Se considera que el número de sistemas submarinos que se instalarán en los próximos 10 años será de 800 a 1000.

- b) Monoboyas . Son estructuras flotantes que se encuentran ancladas al fondo marino. Sirven para abastecer de petróleo a los buques tanque. Tiene un pequeño tanque de almacenamiento y una válvula especial que puede girar 360 grados, a la que se conecta la tubería del buque tanque para llenarlo. El petróleo llega por un oleoducto a la monoboya y pasa directamente al barco.

1.1.4 Otros Conceptos en Investigación y Desarrollo

Existen muchas otras ideas sobre sistemas estructurales en grandes profundidades, entre las que se pueden mencionar plataformas flotantes de concreto, boyas gigantes y torres flotantes.

El sistema de la torre flotante es el más interesante

de los conceptos anteriores. Es una columna larga y flexible, anclada en el fondo del mar, que se mantiene en posición vertical por flotación propia. La parte inferior de la torre se encuentra alrededor de los 100 m de profundidad. El proceso y almacenamiento del crudo se hace en un barco anclado sobre la torre flotante. Se espera que este sistema tenga aplicaciones entre los 500 y 3000 m de profundidad.

1.2 PLATAFORMAS MARINAS DE ACERO FIJAS

Como se mencionó anteriormente, éste es el tipo de plataforma que se diseña y construye en México. La estructura consta de 3 partes principalmente, que son:

- a) Sistema de Cimentación.
- b) Sub-estructura (Jacket).
- c) Superestructura (Deck).

1.2.1 Sistema de Cimentación

La cimentación de una estructura fija de acero es a base de pilotes tubulares, que se unen a la superestructura en el llamado Punto de Trabajo, y se alojan dentro de las piernas de la subestructura, continuando en el subsuelo marino hasta llegar a la profundidad de hincado. La función principal de los pilotes es de estabilizar la plataforma sujetándola al suelo. Los criterios de diseño de estos pilotes se centran en garantizar la resistencia de los pilotes tanto por la carga axial como por la carga lateral debidas al peso propio, cargas muerta y vivas efectos de oleaje, viento y sismo. Un pilote para una plataforma tipo en la Sonda de Campeche tiene 121.92 cm. (48") de diámetro y espesor variable, aunque puede variar el diámetro según el tipo de plataforma.

1.2.2 Subestructura (Jacket)

Consiste en varias piernas o columnas principales (3 a 12), elementos secundarios horizontales y diagonales constituyendo una estructura tridimensional. La

subestructura de una plataforma tiene como función principal la de proporcionar a los pilotes soporte lateral en varios puntos a lo largo de su longitud, desde la superficie del agua hasta el lecho marino, haciendo que aumente la capacidad de carga de los pilotes. Paradójicamente, este enorme y complicado contraventeo es el que proporciona al conjunto estructural las mayores sollicitaciones debidas al oleaje, sismo y corrientes marinas.

En la subestructura se encuentran las placas base, el sistema de defensas, atracaderos, conductores, ánodos, abrazaderas para elevadores y escaleras de comunicación a la superestructura (Fig.1.15).

1.2.3 Superestructura

Es la parte superior de la plataforma marina y tiene la finalidad de soportar directamente las diversas instalaciones y equipos que se necesitan para la extracción y procesamiento de los hidrocarburos. Debido a ésto la superestructura está configurada generalmente por dos cubiertas, formadas por un conjunto de trabes que sostienen un sistema de piso a base de rejilla de acero y polines (en caso de plataforma de perforación). Dichas trabes se apoyan en piernas tubulares cuyo número coincide con el de la subestructura. Estas piernas se conectan a la subestructura y a los pilotes en el punto de trabajo (PT) (Fig.1.16).

1.2.4 Accesorios

Los accesorios de una plataforma marina son :

- Atracaderos
- Puentes
- Helipuerto
- Defensas
- Anodos
- Conductores

Atracaderos . Son estructuras tubulares, generalmente dos, una a cada lado de la subestructura, que sirven para permitir la llegada de barcos de aprovisionamiento a la plataforma; sin embargo, el movimiento de personal y provisiones se hace en su mayor parte por helicóptero.

Puentes . Son estructuras que comunican de una plataforma a otra las tuberías, conductos de agua de mar (para combatir incendios) y de agua dulce, líneas de comunicación o personas. Estas estructuras son armaduras tridimensionales con piso de rejilla cuyos apoyos permiten el movimiento longitudinal causado por la dilatación y contracción del acero y por los movimientos de las plataformas por el oleaje e impacto de barcos.

Helipuerto . Es el área usada para el aterrizaje y despegue de helicópteros, que incluye todas las instalaciones necesarias para su operación: área de estacionamiento, área de aterrizaje y despegue, abastecimiento de combustible y mantenimiento, entre otras. El área del helipuerto debe cubrir cuando menos un círculo de diámetro igual al de un rotor principal del helicóptero de diseño cuando opera a su máxima capacidad de carga. El piso del helipuerto es de placas de acero con una malla especial (para que no resbale el helicóptero al aterrizar o despegar), y posee una red de seguridad alrededor del mismo y su señalización se hace de acuerdo a normas internacionales. Existen helipuertos para operaciones con uno o varios helicópteros, que generalmente se utilizan como medio de transporte en las actividades costa-afuera, debido a que las maniobras de embarque y desembarque de aprovisionamientos y personal son difíciles cuando se hacen por medio de barcos. También es conveniente cuando la distancia de viaje a la plataforma es mayor de 80 km debido a la rapidez de transporte.

Defensas. Sirven para proteger a las plataformas de los impactos comunmente debidos a los barcos. Se encuentran una en cada pierna central y dos en las piernas de las esquinas. Consisten en amortiguadores sostenidos por una estructura tubular.

Anodos. La protección contra la corrosión en la superestructura de una plataforma marina se hace por medio de pintura de espesor controlado. En la subestructura esta protección es de tipo catódico, mediante la colocación de un número determinado de ánodos de aluminio-zinc más activos a la corrosión y protegen al acero. Sin embargo, se deben cambiar los ánodos cuando dejan de ser activos, lo que requiere de un programa de mantenimiento de los mismos. Además, es importante observar que los ánodos presentan una contribución al peso propio de la estructura que hay que considerar su efecto en el análisis estructural de la misma.

Conductores. Estas estructuras sólo se encuentran en las plataformas de perforación. Se utilizan para guiar a las tuberías de perforación desde la cubierta, donde se encuentra la torre de perforación, hasta el nivel de lodos.

1.2.5 Tipos de Plataformas

Plataforma de perforación. Como su nombre lo indica, los equipos que se instalan en esta plataforma tienen como principal función la perforación del pozo hasta el yacimiento para la extracción del crudo. Cada plataforma de este tipo tiene doce conductores de 76.2 cm (72") de diámetro, hincados a 67 m por debajo del lecho marino. El equipo de perforación está compuesto por varios paquetes: Máquinas, químicos, bombas, tanques, habitacional y de perforación.

Plataformas de producción temporal. Estas plataformas se caracterizan por tener equipo que separa el gas del crudo y bombea éste último a tierra a través de oleoductos submarinos. El gas producto de la separación actualmente se quema. En algunas de estas plataformas existen equipos que limpian el gas de ácido sulfúrico (endulzamiento) y el gas dulce puede ser bombeado a tierra por medio de turbobombas para su aprovechamiento.

Plataforma de enlace. Son aquellas donde se localizan la llegada de las líneas que recolectan el crudo y el gas de las plataformas de perforación y lo distribuyen a las plataformas de producción para su procesamiento o a los oleoductos submarinos que los transportan a tierra. Existen en estas plataformas instalaciones para lanzar y recibir tapones (diablos) que viajan a través de las tuberías para limpiarlas.

Plataforma habitacional. Están diseñadas para dar alojamiento a los trabajadores que se encuentran laborando en los complejos costa-afuera. Los módulos habitacionales que poseen tienen una capacidad para 127 personas en 45 habitaciones y cuentan con todas las facilidades como: helipuerto, sistema de radiocomunicación, sistema contra incendio, potabilizadora de agua, planta de tratamiento de aguas negras, cocina, comedores, salas de recreación, biblioteca, dos generadores de 450 KVA para producir energía eléctrica, clínica y gimnasio.

Plataforma de compresión de gas. Tienen equipo con la finalidad de endulzar el gas amargo, que consiste en cuatro plantas endulzadoras y cuatro módulos de compresión de gas. Estos cuatro módulos tienen, cada uno, una capacidad de 90 millones de pies cúbicos por turno de 24 horas. El gas endulzado y comprimido se manda a través de tuberías a las plataformas de enlace para su distribución.

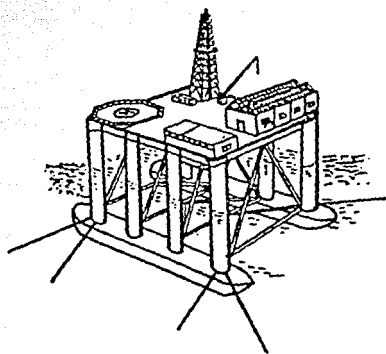


FIG. 1.1 PLATAFORMA SEMISUMERGIBLE

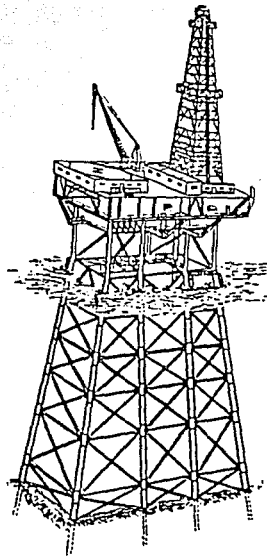


FIG. 1.2 PLATAFORMA CONVENCIONAL DE ACERO

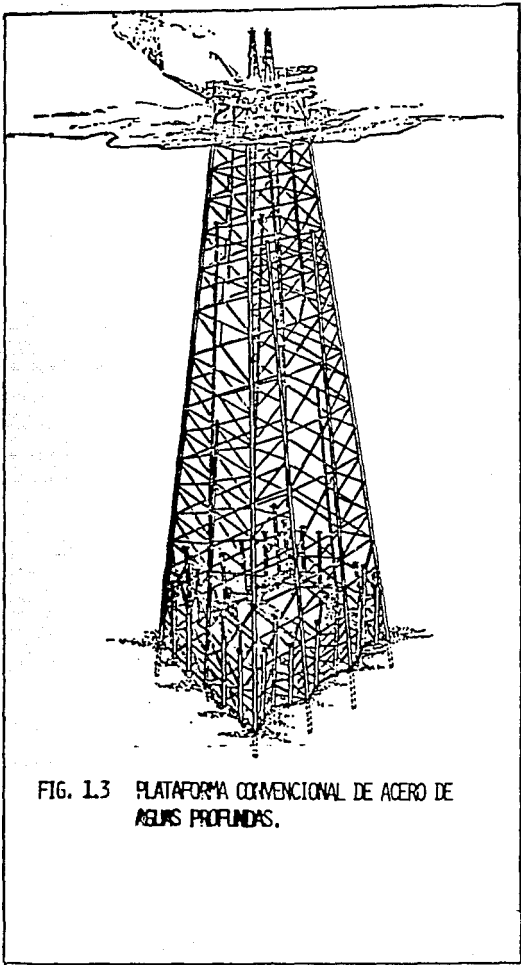


FIG. 1.3 PLATAFORMA CONVENCIONAL DE ACERO DE AGUAS PROFUNDAS.

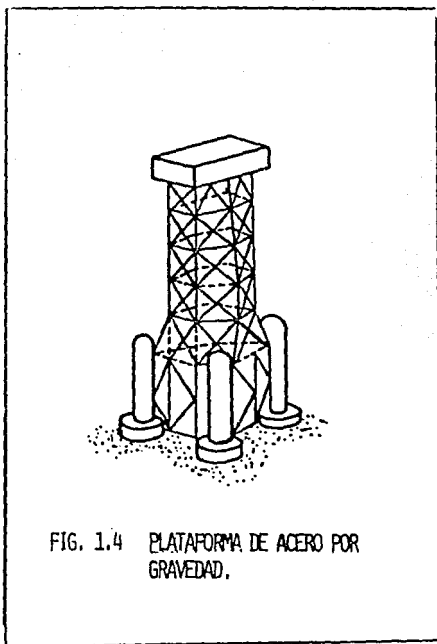


FIG. 1.4 PLATAFORMA DE ACERO POR GRAVEDAD.

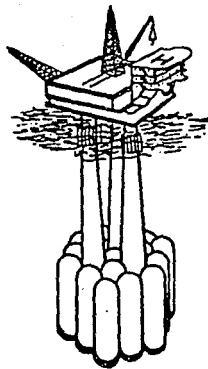


FIG. 1.5 PLATAFORMA DE CONCRETO POR GRAVEDAD

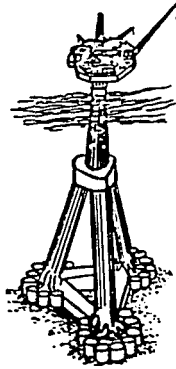


FIG. 1.6 PLATAFORMA CONDEEP T-3000

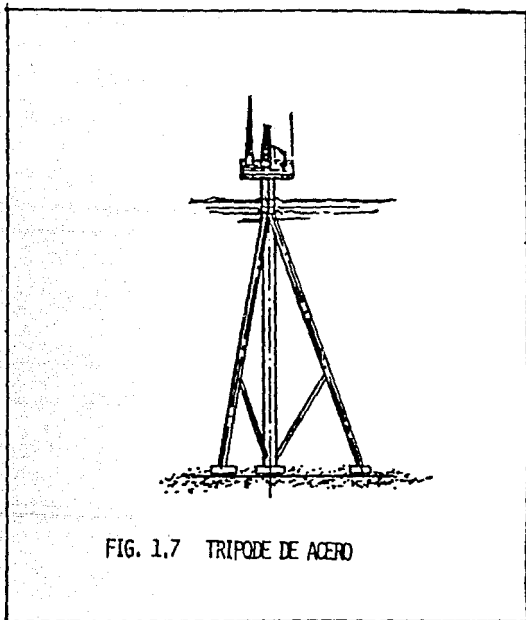


FIG. 1.7 TRIPODE DE ACEIRO

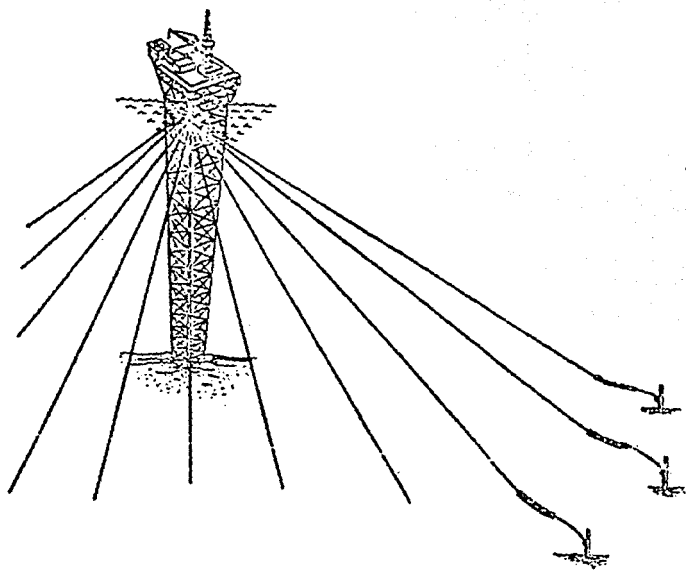
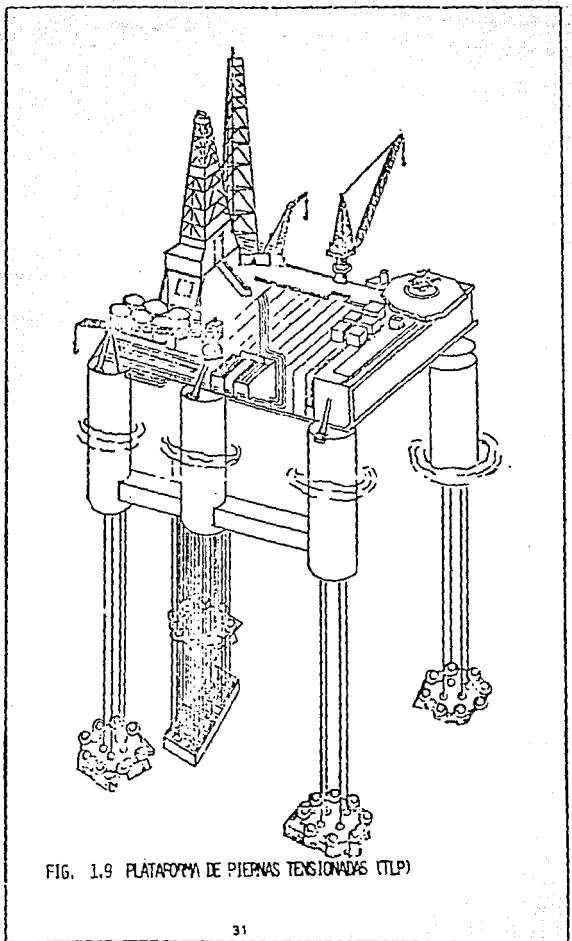


FIG. 1.8 TORRE ATIRANTADA



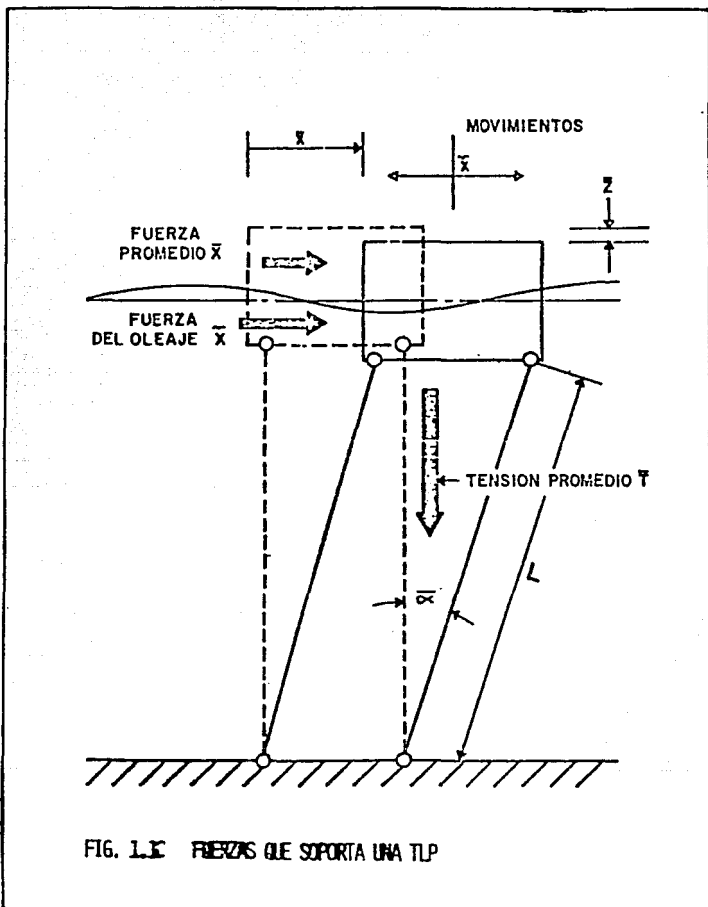


FIG. 1.1 FUERZAS QUE SOPORTA UNA TLP

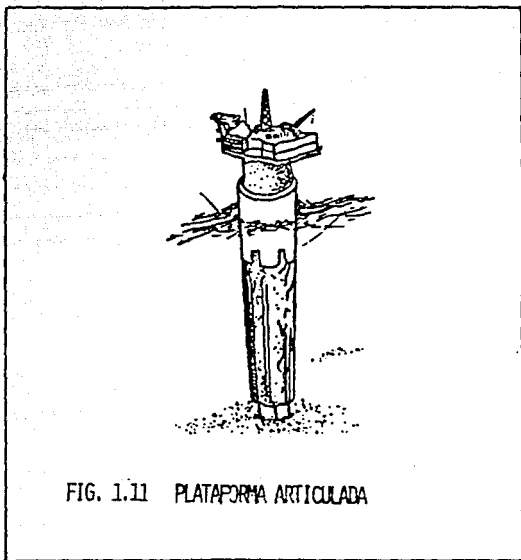


FIG. 1.11 PLATAFORMA ARTICULADA

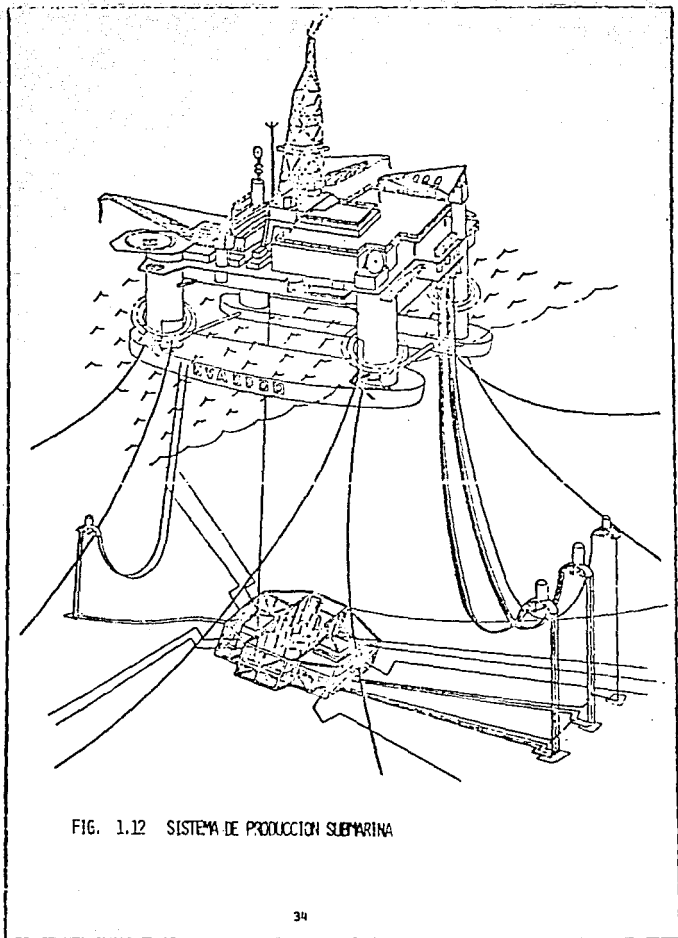


FIG. 1.12 SISTEMA DE PRODUCCION SUBMARINA

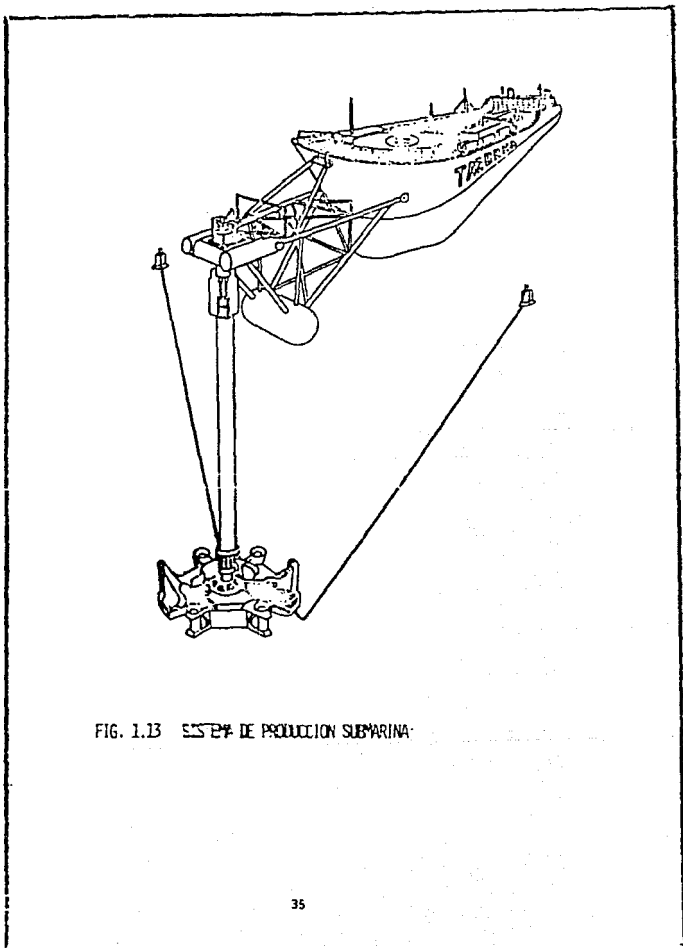
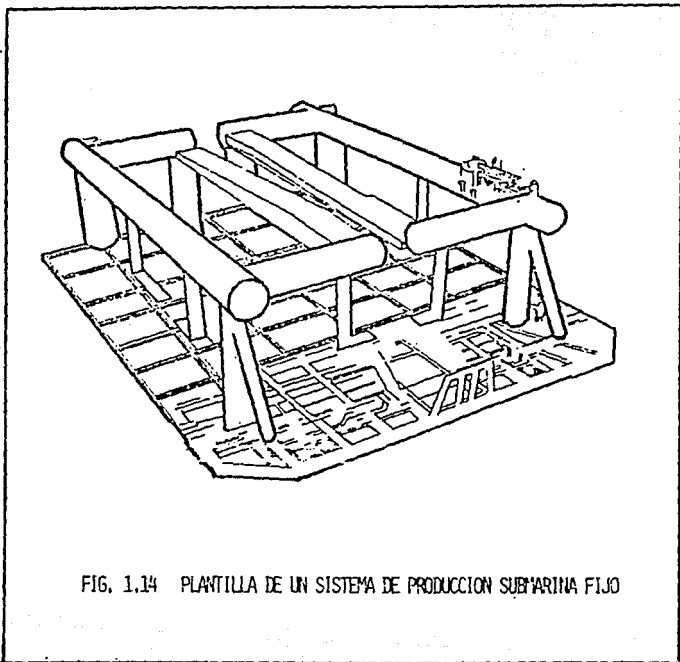


FIG. 1.13 ESTER DE PRODUCCION SUBMARINA



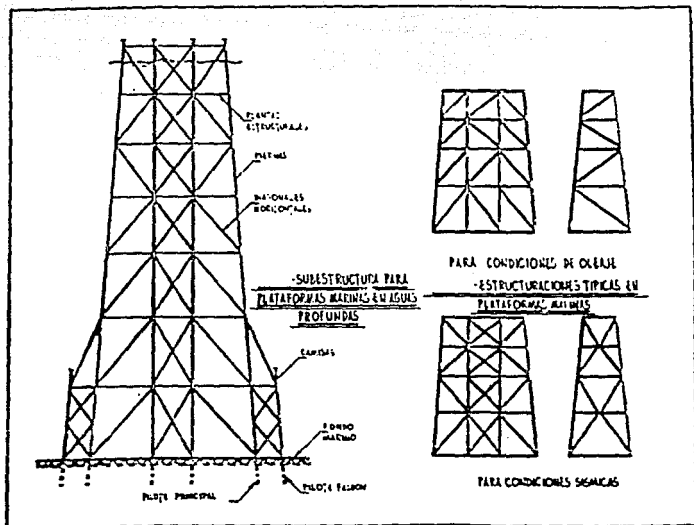
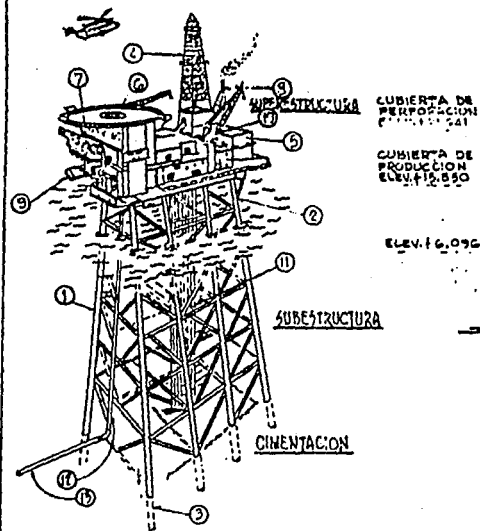


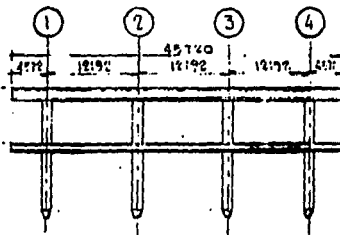
FIG. 1.15 SUBESTRUCTURA (JACKET) DE UNA PLATAFORMA MARINA



CUBIERTA DE PERFORACION
ELEV. +12.541

CUBIERTA DE PRODUCCION
ELEV. +12.850

ELEV. +6.096



FORMA Y DIMENSIONES GENERALES DE LA SUPERESTRUCTURA

- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| 1.-PIERNAS DE SUBESTRUCTURA | 11.-CANAL DE CONDUCTORES |
| 2.-PIERNAS DE SUBESTRUCTURA | 12.-DUCTO ASCENDENTE |
| 3.-PILOTES | 13.-DUCTO SUBMARINO |
| 4.-TORRES DE PERFORACION | |
| 5.-MODULO DE Lodos | |
| 6.-MODULO HABITACIONAL | |
| 7.-HELIPUERTO | |
| 8.-QUEMADOR | |
| 9.-CAPSULA DE SALVAMENTO | |
| 10.-SILLA MOVIL | |

FIG. 1.26 COMPONENTES ESTRUCTURALES DE UNA PLATAFORMA MARINA

CAPITULO II

CONDICIONES DE CARGA EN UNA PLATAFORMA FIJA DE ACERO

Este capítulo hace una descripción de las cargas que actúan sobre una plataforma marina instalada y que deben considerarse en el análisis estructural de la misma (Fig. 2.1). No se incluyen las cargas que actúan sobre la estructura durante su construcción y colocación, como son: las de izaje, y las que actúan durante el lanzamiento, transporte en barcaza y arrastre (de los patios de fabricación a la barcaza), por quedar fuera del alcance de esta tesis.

2.1 Cargas Gravitacionales .-

Las cargas gravitacionales incluyen las cargas muertas, cargas de equipo y cargas vivas en la estructura. Siempre son el sentido del eje vertical de la plataforma.

La carga muerta es el peso en el aire de toda la estructura de la plataforma, incluyendo: Pilotes, superestructura, subestructura, conductores, ánodos, placas base, atracaderos, defensas, etc.

Las cargas de equipo son :

- a) Peso del equipo de perforación. Incluye la torre de perforación, plantillas de perforación, bombas de lodos y los tanques de lodos.
- b) Peso del equipo de producción. Es el peso del equipo de tratamiento del crudo localizado en la plataforma, consistente en: separadores, compresores, tanques de almacenamiento, tuberías de hidrocarburos, etc.
- c) Peso de los accesorios de perforación. Son las cargas variables de los productos empleados en la perforación como: El lodo usado durante la perforación, agua, diesel.
- d) Peso de los accesorios de tratamiento. Son los pesos variables de productos empleados en el proceso de producción: Peso de fluidos en los separadores, peso

de los elementos contenidos en los tanques.

- e) Peso de los diversos módulos que tenga la plataforma : módulo habitacional, módulo de generación, cápsulas de salvamento, etc.

Las cargas vivas son las que actúan sobre la plataforma y que pueden cambiar durante un modo de operación a otro. Las cargas vivas incluyen:

- a) El peso del equipo de perforación o producción que puede ser removido o cambiado de sitio en la plataforma.
- b) El peso de las personas, mobiliario, herramientas, helicópteros, alimentos, etc ; que varía arbitrariamente en la plataforma.
- c) Las fuerzas ejercidas en la estructura por operaciones como: perforación, manejo de materiales, vibraciones de motores, impactos de helicópteros, etc.
- d) Las fuerzas ejercidas en la plataforma por el uso de las grúas.

Es responsabilidad del usuario ésto es, la compañía o división de la compañía para la cual la estructura se diseña , dar los datos de las cargas vivas que actuarán sobre la estructura y que se respeten los valores de diseño en la vida útil de la plataforma (Det Norske Veritas, 1981; API 1984).

Debe tenerse cuidado en los criterios de carga viva analizados en condición de tormenta, ya que cambian notablemente. Así se reducen las cargas en cubiertas, helipuertos, grúas, operación de equipo; sin embargo hay que analizar el modo de operar de la plataforma para conocer perfectamente el valor de esa reducción.

2.2 Cargas de viento

Se debe a la interposición de las superficies de la plataforma al paso del viento y se debe calcular sobre toda la porción de la estructura que se encuentre sobre el nivel

medio del mar, así como sobre: módulos, torres de perforación y equipos, localizados sobre la plataforma.

El factor más importante en esta carga es la velocidad del viento, determinada con base en datos obtenidos por observaciones en la zona.

Para determinar la velocidad de diseño en la condición de operación, se deben considerar los siguientes factores:

1. La frecuencia de ocurrencia y la duración de una velocidad promedio en varias direcciones para cada mes o temporada.
2. El porcentaje total de viento que tenga velocidades y direcciones dentro de un rango específico para intervalos de tiempo similares.
3. La duración y velocidad promedio de las ráfagas de viento asociadas con la velocidad promedio del mismo.

La velocidad de viento obtenida, así como las direcciones en que será considerada, debe ser consistente con el riesgo supuesto sobre la estructura.

En estructuras altas, donde la carga dominante sea el viento, el diseñador debe considerar la variación de su velocidad con la altura. Un método para considerar dicha variación es la aplicación de la siguiente ecuación:

$$\frac{U_y}{U_h} = \left(\frac{z}{H_r} \right)^{1/n}$$

donde

U_y velocidad del viento a una altura z
 U_h velocidad del viento a una altura de referencia H_r , usualmente 10 m por encima del nivel medio del mar.
 $1/n$ exponente, entre $1/13$ y $1/7$, dependiendo del estado del mar, distancia a tierra y duración de la velocidad de diseño. Este exponente es aproximadamente $1/13$ para ráfagas y $1/8$ para viento sostenido en mar abierto.

La relación entre la velocidad de viento y la fuerza puede ser obtenida mediante la relación:

$$F = 0.0048 CV^2$$

donde

F fuerza del empuje del viento en Kg/m
c coeficiente de forma, sin dimensiones
v velocidad del viento, en km/m

La fuerza del viento en los diferentes tipos de secciones estructurales debe ser obtenida y aplicada en el análisis. Para obtener esta fuerza se aplica la ecuación anterior con los siguientes coeficientes de forma:

Vigas I o C	c = 1.5
Secciones tubulares	c = 0.5

Se puede reducir la fuerza del viento sobre un elemento a criterio del diseñador, cuando quede protegido por otro elemento que se encuentre muy cercano a éste.

Para el equipo y objetos en la plataforma expuestos al viento y cuya altura exceda 5 veces su dimensión horizontal más larga, o aquellos cuyas propiedades dinámicas lo hagan especialmente sensible a la acción del viento, se requiere de un análisis detallado en el que las cargas varíen sobre la estructura.

2.3 Cargas de Flotación

La plataforma al quedar sumergida se encuentra sometida a un empuje de flotación.

Este empuje se obtiene por medio del principio de Arquímedes:

$$F = \gamma U$$

donde

F fuerza de flotación
γ peso específico del agua
U volumen del líquido desalojado por el elemento estructural.

Deben tomarse en cuenta aquellas secciones que se inundan en las maniobras de instalación de la plataforma (piernas principales) y considerar sólo el material del tubo y del pilote. En cambio, en todas las secciones que se encuentren selladas, el volumen a utilizar en la ecuación anterior es el del material del tubo más el del aire contenido dentro del mismo.

En ningún caso se puede despreciar esta fuerza, siendo más importante entre más grande sea la subestructura.

2.4 Cargas accidentales

Las cargas accidentales son debidas a : oleaje y viento en tormenta, sismos, colisiones de barcos, incendios y explosiones.

La velocidad del viento en tormenta se deberá definir para cada dirección, incluyendo su duración en función del período de recurrencia (100 años generalmente). Los datos de viento deben contener los siguientes puntos:

1. El sitio de medición, la fecha de ocurrencia, la magnitud de las ráfagas medidas, velocidad de viento y las direcciones de los vientos para los registros de viento en tormenta usados en el cálculo de la velocidad y dirección de diseño del viento en tormenta.
2. El número esperado de ocasiones en que las velocidades promedio del viento en direcciones específicas exceden el límite inferior específico de la velocidad del viento durante la vida útil de la plataforma.

Se utilizan las mismas ecuaciones y consideraciones que para el caso de viento en operación, variando entre 240 km/h y 270 km/h las velocidades de viento para diseño en condiciones de tormenta en la Sonda de Campeche.

Las cargas causadas por colisiones de barcos, incendios y

explosiones se toman en cuenta en el análisis estructural como factores de incremento en la carga viva, los cuales son muy variables dependiendo de la zona de la estructura, riesgo potencial y tipo de carga. Debido al costo y las condiciones bajo las cuales las estructuras costa-afuera se encuentran operando, se lleva a cabo un programa de inspección y mantenimiento a fin de asegurar un funcionamiento y una integridad adecuada durante toda su vida útil. En estos programas se hace necesario efectuar el análisis estructural de plataformas dañadas por los impactos de bercos, incendios, explosiones, etc, para evaluar la carga accidental recibida por la estructura y de esta manera dar soluciones cuando la estabilidad estructural no sea adecuada.

Las cargas debidas a sismo son importantes dentro de las cargas accidentales, sobre todo en la Sonda de Campeche, ya que es una zona potencialmente sísmica. Además, las plataformas marinas tienen características dinámicas que difieren sensiblemente de las que tienen los edificios; ésto se debe a que la plataforma tiene en la parte superior de la estructura una gran concentración de masa, es más flexible y presenta mayor amortiguamiento. Se debe buscar que la estructura sea suficientemente resistente ante sacudidas moderadas y suficientemente dúctil para permanecer estable ante un sismo de intensidad no usual.

Ricardo Guzmán (Ref.11) ha obtenido espectros sísmicos de diseño de riesgo uniforme para la Bahía de Campeche, que corresponden al 5 % del amortiguamiento crítico, con una probabilidad de falla de 0.22 para un período de retorno de 100 años en una estructura con 25 años de vida útil. El espectro encontrado presenta dos jorobas, la primera para períodos menores de 0.8 segundos, debida a la ocurrencia de sismos de magnitudes moderadas a distancias relativamente cortas; la segunda se presenta para un período de 2 segundos y se debe a sismos grandes que ocurran a distancias considerablemente mayores (Fig. 2.2).

Para efectuar un análisis sísmico de una plataforma marina se deben considerar los siguientes factores: La masa adherida del agua, la debida al agua atrapada dentro de los miembros de la estructura, bajo la línea de lodos se deben incluir reportes para simular la interacción suelo-estructura. Además, el análisis debe ser realizado con un modelo tridimensional (Fig.2.3).

Estudios realizados en el Instituto Mexicano del Petroleo, por Enrique Granell y Jorge Silva, han demostrado que para

plataformas marinas fijas de acero con profundidades de 50 metros aproximadamente los efectos debidos al oleaje y viento predominan en el diseño sobre las fuerzas sísmicas pero para plataformas marinas localizadas alrededor de los 150 m de profundidad los efectos sísmicos son muy severos ya que el período de estas estructuras es de aproximadamente 2 segundos y coincide con la segunda joroba del espectro propuesto por Ricardo Guzmán (Ref.11)

2.5 Cargas de Oleaje

El cálculo de las fuerzas de oleaje se puede hacer de dos maneras diferentes. Para plataformas pequeñas o en aguas de un tirante de agua que no sea muy grande (hasta 90 m para una plataforma de 8 piernas), las fuerzas de oleaje son calculadas como una fuerza estática aplicada a la estructura. En estructuras más altas es necesario un análisis dinámico con un histrograma (loading history) de olas o de un espectro de oleaje.

En el primer caso las fuerzas de oleaje deberán estar basadas en la ola que cause las máximas cargas de diseño a la estructura durante su vida útil. Para encontrar las características de dicha ola la probabilidad de ocurrencia debe ser calculada de manera que se encuentre un balance de riesgo aceptable entre el costo de incrementar la resistencia de la estructura o el costo de reparación de algún daño y el que las cargas de diseño sean excedidas. La ola definida con este estudio se llama Ola de Diseño y usualmente queda definida al determinar su altura, dirección y período. El Departamento encargado de elaborar las normas sobre el uso de la energía en el Reino Unido (Department of Energy Guidance Notes) recomienda el uso de una Ola de Diseño con un período de retorno de 50 años, pero muchas compañías petroleras utilizan un período de retorno de 100 años. En México, este último criterio es el que se utiliza. Así, para una plataforma de producción, que tiene una vida de diseño de treinta años, tomando una ola de diseño con período de retorno de 100 años, existe un 26 % de probabilidad de que las cargas de diseño sean excedidas en su vida útil (Borgman, 1963).

La fuerza ejercida por las olas en un elemento cilíndrico se considera compuesta por una fuerza de arrastre debida a la energía cinética del agua y a una fuerza de inercia causada por la aceleración de las partículas de agua. Esta

fuerza total es obtenida usando la Ecuación de Morison (ver Capítulo III) que determina la fuerza en un elemento cilíndrico en dos términos: Inercia y Arrastre.

La aceleración y velocidad de la partícula de agua son funciones de la altura y período de la ola, de la profundidad de la partícula, el tirante y del tiempo.

Se han desarrollado diversas teorías con las cuales se puede calcular la velocidad y aceleración de la partícula de agua. Una de ellas es la Teoría de Airy, que es una solución lineal a la ecuación diferencial de continuidad para una partícula de agua, basada en que la altura de la ola es pequeña comparada con su longitud.

Stokes desarrolló una teoría no lineal que da una representación más exacta del movimiento de la ola. Este, en teoría, puede ser de cualquier orden, dependiendo del número de términos usados, siendo la Teoría de Stokes de 5° orden la más utilizada; sin embargo, requiere de un método numérico para resolverla y de un complicado programa de computadora.

Otra teoría es la de la Ola Sinoidal que considera términos de 2 orden. Fue desarrollada por primera ocasión por Korteweg y de Vries en 1895. Esta teoría sólo se usa en el caso de aguas someras.

Los rangos de aplicación de estas teorías se muestran en la Figura 2.4.

En el capítulo III se explica con detalle la teoría de oleaje de Airy y la ecuación de Morison.

Para el análisis dinámico es necesario describir de otra manera la superficie del océano. Se utiliza un espectro de oleaje, define el océano en términos de una distribución de energía en rango de frecuencia. Existen varios espectros de oleaje: Neumann, Pierson-Neumann, Bretschneider, Pierson-Moskowitz, siendo éste último el más utilizado si bien el de Bretschneider representa mejor las condiciones de oleaje en la Sonda de Campeche (J. Valle García, IMP 1986).

Cuando el viento empieza a soplar, la energía en la superficie de movimiento alcanza un cierto punto en el cual existe una cantidad constante de energía en la superficie por la acción de la ola. Esta energía se distribuye en una frecuencia con un pico en un punto en particular.

Una ola de diseño se puede obtener a partir del espectro, si se supone que este espectro tiene una distribución de Rayleigh, así se puede aplicar la teoría de probabilidad y obtener una ola con una altura y período significativo.

La fuerza de la corriente se calcula sumando vectorialmente la velocidad de la corriente a la de la partícula de la ola en la ecuación de Morison. Esta velocidad de la corriente para diversas profundidades se obtiene mediante mediciones directas en el sitio de ubicación de la plataforma.

En los siguientes capítulos se explica con más detalle la Teoría de Oleaje de Airy, la Ecuación de Morison y su aplicación práctica.

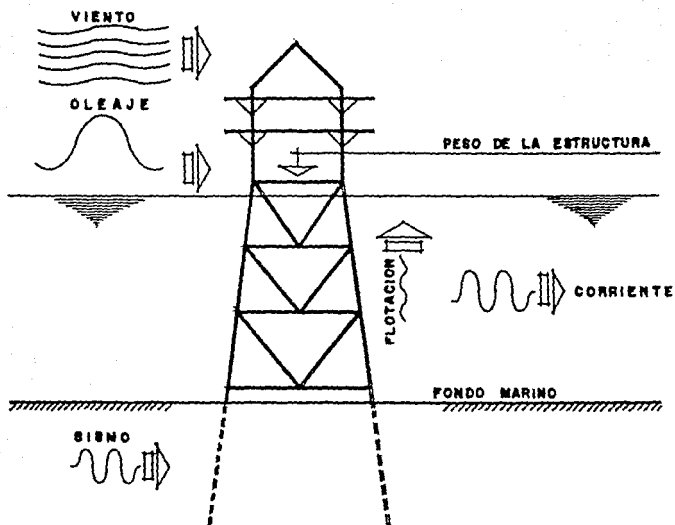
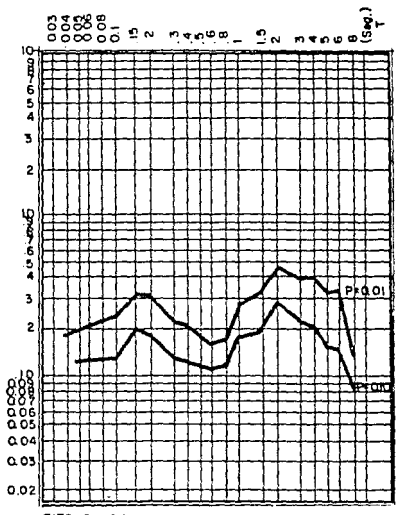
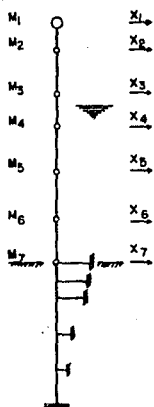


Fig. 2.1 CARGAS DE OPERACION DE UNA PLATAFORMA MARINA



RIESGO SISMICO EN LA BAHIA DE CAMPECHE
 ESPECTROS DE RIESGOS UNIFORME
 VIDA UTIL 20 AÑOS
 RICARDO GUZMAN (1982)

Fig. 2.2



MODELO DE ANALISIS PARA PLATAFORMAS MARINAS

Fig. 2.3

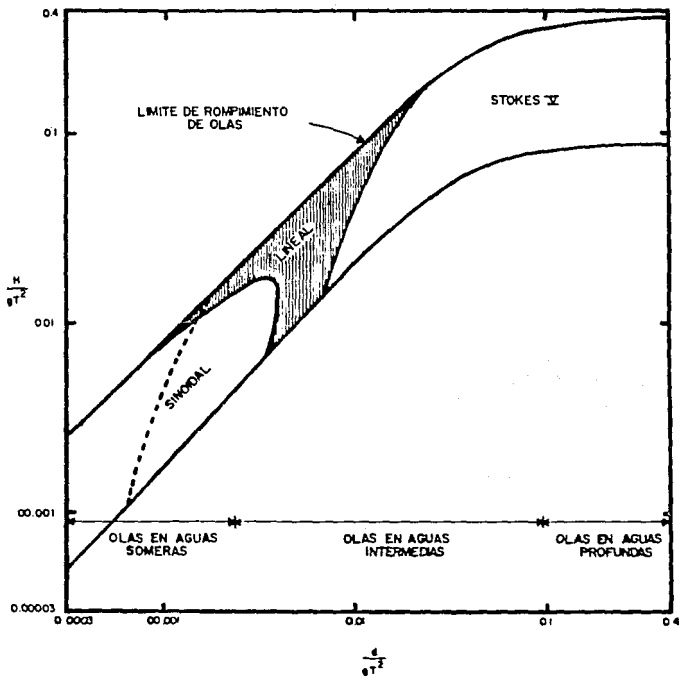


Fig. 2.4 Rango de Aplicación de Teorías de Oleaje
(Deve 1973)

CAPITULO III
FUERZA DE OLEAJE

En este capítulo se hace una descripción detallada de la Teoría de Oleaje de Airy y sus limitaciones. Se explica la forma de obtener la fuerza de oleaje en un elemento cilíndrico por medio de la ecuación de Morison, los rangos de aplicación de esta ecuación y se explican los coeficientes de arrastre e inercia que son parte de la ecuación de Morison.

3.1 Propiedades de la Ola

Las olas se forman cuando el viento sopla sobre una superficie de agua en calma porque se generan fuerzas tangenciales entre el viento y el agua. Las olas aumentan su tamaño como resultado de esa fuerza tangencial y del empuje del viento contra la parte trasera de la ola. Por tanto, el tamaño de las olas generadas por el viento depende de tres variables independiente entre sí, que son :

- La velocidad del viento.
- La duración del viento.
- El fetch, que es la longitud de la superficie del agua sobre que el viento sopla.

Sin embargo, un viento que sopla a gran velocidad no podrá generar olas grandes en un fetch pequeño. Para la generación de las olas este límite puede ser impuesto, sea por una situación meteorológica que determina la distancia en la que el viento sopla en determinada dirección y su velocidad, o por la configuración de la superficie de agua que determina el fetch disponible para la generación de las olas.

Para el estudio de las olas es necesario definir un sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z), el eje x es positivo en la dirección de la propagación de la ola, z es positivo hacia arriba del nivel del mar y y es ortogonal a x y z (Fig. 3.1.).

Se considera que las olas son de dos dimensiones en el plano xz : progresivas en la dirección positiva del eje x y que se propagan sobre una superficie horizontal de agua de profundidad constante y estable. También se supone que la ola mantiene una forma permanente y que la superficie está libre de obstáculos para evitar el fenómeno de difracción.

Los parámetros de la ola son (Fig. 3.1.)

- a) Forma . Las olas en agua profunda de pequeña amplitud presentan la forma idealizada " sinusoidal "; en aguas someras, la forma de la ola tiende a ser trocoidal.
- b) Altura (H). Distancia vertical medida de valle a cresta de la ola.
- c) Longitud (L). Distancia que existe entre 2 crestas sucesivas.
- d) Velocidad (c). Velocidad con que la ola viaja a través del fluido.
- e) Período (T). Intervalo de tiempo en el que dos crestas sucesivas pasan por determinado punto. El período depende de la longitud y de la velocidad de la ola. Esta relación está dada por la expresión.

$$L = cT$$

La frecuencia f , se define como el recíproco del período:

$$f = \frac{1}{T}$$

Este parámetro se usa algunas veces en lugar del período de la ola.

- f) Número (k). Es un parámetro auxiliar, constante para una ola determinada y se define con la expresión

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

- g) Profundidad del Lecho Marino (d) . Distancia vertical del nivel medio del mar al lecho marino.

En la práctica, una ola de diseño es define usualmente en términos de altura, período y profundidad del agua, debido a que estos parámetros son los más fáciles de obtener en observaciones directas. Con base en la profundidad d y el período T, es posible calcular (mediante un proceso iterativo) el número de ola k y de aquí su longitud L (Sarpkaya, 1981).

$$kd \tanh(kd) = 4\pi^2 \frac{d}{gT^2}$$

$$L = \frac{2\pi}{k}$$

Aunque la forma de la ola avanza con una velocidad que depende de la longitud de la misma, las partículas de agua se mueven normalmente a mucha menor velocidad. En la superficie, su velocidad depende del período y altura de la ola. Las partículas deben completar una órbita durante un período de la ola, la cual debe tener un diámetro igual a la altura de la misma; por lo tanto, las partículas de una ola alta y corta se deben mover más rápidamente que en las olas largas y bajas. El movimiento de una partícula en la superficie de una ola en aguas profundas es una órbita casi circular y en cada período la partícula tiene un pequeño avance en la dirección del tren de olas.

En aguas profundas la órbita de las partículas permanezca circular pero su diámetro decrece exponencialmente con la profundidad. En aguas someras, la órbita toma una forma elíptica con su eje mayor en la dirección de la propagación de la ola; en el fondo del mar, el movimiento es en un plano horizontal únicamente.

El intervalo completo de profundidades de olas se divide en tres intervalos (Sarpkaya, 1981).

- a. Aguas someras: $d/L < 0.02$
- b. Aguas intermedias: Si $0.02 < d/L < 0.5$
- c. Aguas profundas: $d/L > 0.5$

(Fig. 3.2)

3.2 Teoría de Oleaje de Airy

El objetivo de una teoría de oleaje es determinar la velocidad y aceleración del tren de olas y hacer una descripción de los movimientos de la partícula de agua a través del flujo a partir de los parámetros: altura, período, y profundidad del agua.

Existen dos serias dificultades al intentar obtener una solución exacta para un tren de olas bidimensional. La primera es que las condiciones de frontera en la superficie libre no son lineales, y la segunda es que estas condiciones se definen en la superficie libre, inicialmente desconocida.

La aproximación simple y fundamental es dar una solución lineal al problema, tomando la altura de la ola mucho menor que la longitud de ola y que la profundidad del agua como sigue.

$$H \ll L, d$$

La teoría que resuelve esta aproximación es conocida con los nombres de Teoría de Olas de Pequeña Amplitud, Teoría Lineal de Olas o Teoría de Olas de Airy, que fué descrita en 1845. Laplace, en 1776, ya había desarrollado el primer tratado para olas de pequeña amplitud en aguas de cualquier profundidad.

La Teoría de Airy considera las siguientes hipótesis:

- a) El fluido es incompresible .
- b) El flujo es irrotacional es decir, todos los componentes del vector de rotación son nulos:

$$\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

donde u , v , w representan los componentes de velocidad en las direcciones x , y , z respectivamente.

- c) Existe en el fluido un potencial de velocidad ϕ ; de modo que sea posible encontrar una función continua, escalar y diferencial $\phi = \phi(x, y, z)$ cuyo gradiente satisfaga que $\vec{v} = \text{grad } \phi$ y a la ecuación (1). De hecho, si el vector de velocidad \vec{v} es igual a cero, entonces

$$\vec{v} = \hat{i}u + \hat{j}v + \hat{k}w = 0$$

tenemos una condición suficiente para la existencia de dicha función. Entonces la diferencia de potencial ϕ a lo largo de una porción de la línea de flujo de longitud δs es:

$$\int \delta \phi = v_s \delta s$$

o bien,

$$v_s = \frac{\partial \phi}{\partial s} \quad (2)$$

- d) La presión atmosférica (inmediatamente encima del fluido) es constante.
- e) La superficie del líquido tiene una tensión superficial que puede ser tomada como cero.
- f) La profundidad del agua es constante.
- g) El tren de olas se analiza bidimensionalmente (plano x, z)

- h) Las olas son progresivas y de forma permanente y constante

La conservación de la masa para un fluido incompresible requiere que la dilatación volumétrica sea cero, ésto es:

$$\nabla \cdot \vec{q} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Esta ecuación es invariante e independiente de la elección de las coordenadas x, y, z .

De acuerdo con la ecuación (2), los componentes de velocidad en coordenadas cartesianas están dadas por:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{i.e. } \vec{q} = \text{grad } \phi$$

La introducción de ϕ en la ecuación de continuidad (3) da por resultado una ecuación diferencial de segundo orden:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

Esta ecuación es conocida como Ecuación de Laplace y sus soluciones como funciones armónicas.

La teoría de Airy se basa en determinar el potencial de velocidad ϕ en la región del fluido para la ecuación de Laplace, la cual, por ser un análisis bidimensional quedará de la forma

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

Para encontrar dicha solución, es necesario establecer las condiciones de frontera siguientes:

- 1.- Ninguna partícula de agua puede cruzar la superficie libre. En otras palabras, las partículas en la superficie libre deben siempre permanecer sobre la misma. Para satisfacer esta condición, la velocidad de la partícula en $z = \eta$ debe ser igual a la velocidad normal en la superficie libre; ésto es

$$\left. \begin{array}{l} q \\ z = \eta \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} q \\ \eta \end{array} \right\}$$

A esta condición se le llama Condición Cinemática de Superficie.

- 2.- En el fondo del mar, las partículas del fluido no pueden cruzar la frontera sólida. Matemáticamente:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ z = -d \end{array} \right\} = 0$$

- 3.- La presión en la superficie libre es cero para cualquier posición x en cualquier tiempo t . Por lo que si el fluido es irrotacional, la ecuación de Bernoulli aplicada en la superficie libre $z = \eta$ es

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} v^2 + g\eta = 0$$

donde g es la aceleración de la gravedad. Lo anterior se puede expresar como sigue

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = 0$$

Esta condición se llama Condición Dinámica de Superficie; y no es lineal debido al término cuadrado de velocidad. Para pequeños desplazamientos de la superficie libre, el término no lineal puede ser despreciado por ser de segundo orden en comparación con los otros dos. La condición dinámica de superficie quedará entonces

$$\left. \begin{array}{l} \eta = - \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ z = \eta \end{array} \right\}$$

Físicamente, la linealización realizada en la última condición de frontera se debe a que se supone que el flujo es lo suficientemente lento para que la energía cinética de las partículas del fluido sea mucho menor que las otras energías mecánicas. Esta es la causa de la definición de los intervalos en el rango de profundidades.

Aplicando estas condiciones frontera en la ecuación de Laplace, y siguiendo un laborioso proceso matemático (Ref. 2), se obtiene que el diferencial de potencial puede ser escrito como:

$$\phi = A \frac{\text{Cosh } (k(z+d))}{\text{Cosh } (kd)} \text{ Sen } K(x-ct) \quad (4)$$

donde

$$A = \frac{gH}{2w}$$

t tiempo, que es cero cuando la cresta de la ola cruza el plano $x = 0$.

w = kc frecuencia angular de la ola.

La ecuación (4) muestra que el potencial de velocidad es periódico en la dirección x.

La longitud de la ola es

$$L = \frac{2\pi}{k}$$

y el período de la ola

$$T = \frac{2\pi}{w}$$

De la definición anterior de w, se tiene que

$$c = \frac{L}{T} = \frac{w}{k}$$

La relación de dispersión lineal es

$$\omega^2 = gk \tanh(kd)$$

$$c^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd)$$

Esta última expresión describe el incremento de la velocidad de la ola con su longitud.

Si se define al ángulo de fase de la ola θ como

$$\theta = k(x - ct) = kx - \omega t = 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right)$$

se puede escribir la expresión de potencial de velocidad de la manera siguiente:

$$\phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \text{Sen } \theta$$

Los desplazamientos horizontal y vertical se obtienen integrando los componentes de velocidad U y W:

$$\xi = \int_0^t v dt = -\frac{H}{2} \frac{\cosh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \text{sen } \theta$$

$$\eta = \int_0^t w dt = \frac{H}{2} \frac{\sinh(k(z+d))}{\sinh(kd)} \text{cos } \theta$$

La superficie libre del agua en un tiempo t por encima del Nivel Medio del Mar está dada por

$$\eta(t) = \frac{H}{2} \text{cos } \theta$$

La velocidad horizontal y vertical de la partícula de agua v y w y sus aceleraciones \dot{v} y \dot{w} en un punto (x, z) y en el tiempo t son:

$$v = \frac{H}{T} \frac{\cosh(ks)}{\sinh(kd)} \cos \theta$$

$$w = \frac{H}{T} \frac{\sinh(ks)}{\sinh(kd)} \sin \theta$$

$$\dot{v} = \frac{a v}{a t} = \frac{2 \pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh(ks)}{\sinh(kd)} \sin \theta$$

$$\dot{w} = \frac{a w}{a t} = - \frac{2 \pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh(ks)}{\sinh(kd)} \cos \theta$$

donde

$s = z + d$ medido hacia arriba del lecho del mar.

La presión p bajo la superficie del agua, para una densidad de agua ρ , es:

$$p = - \rho g z + \frac{1}{2} \rho g H \frac{\cosh(ks)}{\cosh(kd)} \cos \theta$$

La energía total E por unidad ancho unitario de cresta está dada por

$$E = \frac{\rho g H^2 L}{8}$$

y el flujo de energía P por ancho unitario de cresta es

$$P = \left[\frac{1}{8} \rho g \frac{H^2 L}{T} \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\frac{2d}{L}}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \right] \right]$$

3.3. Ecuación de Morison

En 1950, J. R. Morison, J. W. Johnson, M. P. O'Brien y S. A. Schaaf, como resultado de sus experimentos, postularon un método empírico para calcular las fuerzas de oleaje en cilindros verticales (no necesariamente circulares). La formulación propuesta, llamada ecuación de Morison, es actualmente la base de los cálculos de las fuerzas de oleaje. Ellos supusieron que la fuerza tiene 2 componentes que pueden ser usados linealmente como sigue :

1. La fuerza de arrastre es proporcional al cuadrado de la velocidad de la partícula de agua, siendo la constante de proporcionalidad el coeficiente de arrastre.
2. La fuerza de inercia es proporcional a la componente horizontal de la aceleración de las partículas de agua.

La ecuación de Morison establece que la fuerza total F , en un miembro estructural de longitud ds es

$$F = \int_0^L dF$$
$$dF = \frac{1}{2} C_d \rho D u_n |u_n| ds + C_m \rho A \dot{U} ds$$

donde

F fuerza total en la dirección de la velocidad y aceleración de la partícula (N)

η nivel instantáneo de agua

U velocidad del agua normal al eje del miembro

\dot{U} aceleración del agua normal al eje del miembro

D diámetro de la sección del miembro estructural

$$A = 0.25 \pi D^2$$

A área de la sección del miembro tomada como la proyección del plano normal a la dirección de la fuerza

- Cd Coeficiente de arrastre
- Cm Coeficiente de inercia
- ρ Densidad de la masa del líquido.

Existen ciertas condiciones implícitas en el uso de la ecuación de Morison que deben ser satisfechas para que su uso sea válido y que son:

1. La velocidad y aceleración instantánea de la partícula de agua deben ser encontradas con alguna teoría de olas que suponga que las características de la ola no son afectadas por la presencia de la estructura. Esto involucra una limitación en el tamaño de la estructura para la cual la ecuación de Morison es aplicable. Este límite es generalmente aceptado como sigue:

$$\frac{D}{L} < 0.2$$

lo que se cumple en la mayoría de las plataformas marinas de acero fijas.

2. Los dos coeficientes Cd y Cm deben ser determinados ya sea por experiencia previa o por métodos experimentales. Si se tiene una estructura con una configuración no común, debe ser sometida a pruebas experimentales y analíticas para determinar estos coeficientes, ya que la extrapolación de datos existentes puede dar resultados falsos.
3. La ecuación de Morison supone que la estructura a la que se aplican las fuerzas es rígida.
4. La ecuación de Morison sólo da las fuerzas normales al eje longitudinal del miembro estructural, por tanto, sólo puede ser aplicada a miembros que tienen pequeños valores del coeficiente de fricción.

Aparte de las limitaciones de aplicación antes mencionadas, existen varios factores prácticos que deben ser considerados antes de que se usen los resultados de la ecuación en el diseño de una estructura. Entre ellos

están:

Interferencia.- Las fuerzas en un miembro estructural muy cercano a otro se pueden ver afectadas, ya que es posible que los vértices de la estela causada por el primer miembro incrementen las fuerzas de oleaje obtenidas en la ecuación de Morison. El caso contrario es que un miembro pequeño rodeado por un elemento estructural más grande se vea protegido de las fuerzas de oleaje y experimente fuerzas menores. Es probable que estos efectos sean despreciables si la separación entre los elementos es mayor que el diámetro del mayor de ellos.

Grupos de masa agregados. Cuando varios elementos se colocan muy próximos entre sí, como los conductores de una plataforma de perforación, existe una tendencia a que una porción de la masa de agua encerrada por ellos actúe como parte de la estructura. Esto incrementa el coeficiente de inercia C_m en los elementos.

Formas especiales de elementos. Cuando las fuerzas obtenidas en la ecuación de Morison no se calculan para elementos cilíndricos sino, por ejemplo, para una esfera, pueden existir problemas porque los componentes velocidad y aceleración de las partículas deben ser normales al eje del miembro. Sin embargo este caso es muy raro en el análisis de plataformas marinas.

Linealización del término de fuerzas de arrastre. Este término en la ecuación de Morison contiene una parte no lineal que es $U|U|$, la cual puede expresar problemas en algunos cálculos y hacer la solución muy difícil. Una linealización aproximada del mismo es: (Borgman, 1969)

$$U \left| \frac{U}{n} \right| = \frac{U}{pms} \cdot \sqrt{\frac{\theta}{U}} U_n$$

donde

pms valor de la raíz cuadrada de la velocidad promedio, cuando las propiedades estacionarias son supuestas

Sin embargo, no es común realizar esta simplificación, sobre todo en el caso de miembros muy largos donde se tendría que hacer lineal éste término para obtener la fuerza de oleaje.

3.4 Coeficiente de arrastre (Cd)

El coeficiente de arrastre (Cd) es la constante de proporcionalidad del término que define la fuerza de arrastre en la ecuación de Morison. Esta fuerza es causada por el paso de un flujo uniforme en un objeto y se debe a que el coeficiente de arrastre puede ser determinado midiendo las fuerzas inducidas por un flujo uniforme.

Se han realizado experimentos con modelos a escala y tamaño natural para determinar el coeficiente de arrastre, pero en ambos casos, han existido dificultades para establecer las características correctas del flujo.

El coeficiente de arrastre está en función del número de Reynolds, que es:

$$Re = \frac{U_c D}{\gamma}$$

donde

U velocidad característica del fluido

D diámetro del elemento

γ viscosidad cinemática del fluido, agua = 9×10^{-6} m²/s

Ha habido intentos de relacionar el coeficiente de arrastre con el radio orbital de las partículas de agua (Kaulagen y Carpenter, 1958; Iversen, 1951; y Sarpkaya, 1976), pero ésta aproximación no es usualmente incorporada a los procesos de diseño porque existe un número insuficiente de datos para probar estas aproximaciones en modelos estructurales.

En la práctica, se han obtenido tablas, donde conocido el número de Reynolds del elemento se puede obtener el coeficiente de arrastre. La velocidad característica del fluido para obtener el número de Reynolds se obtiene de la teoría de oleaje empleada según el caso.

Sin embargo, estudios posteriores (Sarpkaya, 1981) han

establecido que la rugosidad que presenta el miembro influye en el coeficiente de arrastre, siendo es preciso definir el número de rugosidad

$$K_r = \frac{k_r}{D}$$

donde

K_r altura efectiva de rugosidad.

El reglamento Det Norske Veritas (1982) contiene una tabla para obtener el coeficiente de arrastre con base en el número de Reynolds y el número de rugosidad (Fig. 3.3).

Para cilindros lisos, con aproximadamente $Re = 10$ el flujo laminar se vuelve turbulento. Su característica es que las partículas del fluido realizan un movimiento al azar alrededor de una posición determinada. Debido a estos movimientos rápidos de las partículas de agua, cualquier perturbación local se distribuye rápidamente sobre una gran área del fluido, lo que resude su importancia. Esto origina la crisis de arrastre ya que la separación de los límites de frontera es menos dramática que en los flujos laminares, reduciendo así el coeficiente de arrastre y causando la caída de la curva C_d-Re en dicha zona.

3.5 Coeficiente de inercia (C_m)

El segundo término de la ecuación de Morison que involucra la aceleración o deceleración del fluido necesita de un coeficiente en la expresión de la fuerza, llamado coeficiente de inercia o de masa (C_m).

El coeficiente de inercia es una función de la forma de la sección transversal y orientación del cuerpo, del número de Reynolds, de la rugosidad y del número de Keulegan-Carpenter:

$$K = \frac{U_n T}{D}$$

donde

U_n velocidad normal del flujo

T período del flujo

D diámetro del miembro.

La determinación del coeficiente de inercia puede ser hecha de manera teórica con algunos modelos. Así, Sarpkaya (1981) determina que en un fluido irrotacional como el supuesto en la teoría de olas, el coeficiente de inercia debe ser igual a 2 para un cilindro. Obtenerlo de manera experimental presenta los problemas señalados al obtener el coeficiente de arrastre, más el que se presenta al utilizar un fluido acelerado.

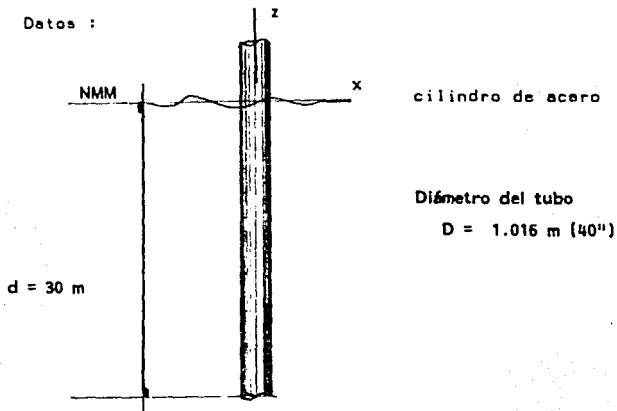
Para uso práctico, se han realizado tablas que dan el coeficiente de inercia únicamente con base en la forma de la sección transversal de un elemento paralelo a la fuerza (Fig. 3.4).

Ya que las velocidades y aceleraciones de las partículas dependen de la teoría de olas usada, los valores de C_d y C_m son estrictamente válidos sólo cuando se usan para la teoría con que fueron obtenidos. Sin embargo, los coeficientes obtenidos para la teoría de Stokes de 5o, orden (que son los más comunes), pueden ser aplicados sin error significativo en la teoría de Airy.

3.6 Fuerzas de Oleaje en un Elemento Cilíndrico (Ejemplo Ilustrativo)

Se mostrará la aplicación de las fórmulas anteriores mediante un ejemplo :

Datos :



Características de la ola :

Altura H : 16.70 m.

Período : 16.00 s.

Longitud : 305.04 m.

Cálculo del número de la ola :

$$k = \frac{2}{L} = \frac{2}{305.04} = 0.0065568$$

Cálculo de la fuerza de oleaje en el intervalo:

$$- 9.00 < z < - 6.250$$

Es necesario determinar C_m y C_d . Por ser una sección circular

$$C_m = 2.00$$

El número de Reynolds en la altura $-9.00 < z < - 6.250$:

$$Re = \frac{U_e D}{\gamma}$$

U_e en el punto medio es 1.00 m/s aproximadamente, por tanto

$$Re = \frac{1.000 \text{ m/seg} \times 1.016 \text{ m}}{9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}}$$

$$Re = 1.129 \times 10^5$$

De la tabla que se incluye en el Reglamento Det Norske Veritas 1981 (Fig. 3.3) y considerando que el crecimiento máximo es supuesto ya que no se conoce ($\frac{k_r}{D} = 1 \times 10$)

$$C_d = 1.11$$

Aplicando la ecuación de Morison

$$F = \frac{1}{2} c_d \rho D U |U| + C_m \rho A \dot{U}$$

$$F = 0.5 \times 1.1 \times 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1.016 \text{ m} \times \int_{-4.6}^{-6.25} \frac{H \cosh(kx) \cosh \theta dz}{T \sinh(kd)}$$

$$\dots \left[\begin{array}{c} H \cosh (ks) \cos \theta \, dz \\ T \sinh (kd) \end{array} \right]_{-1.00}^{+1.25} + 2.00 \times 1025 \times$$

$$0.25 \left[\begin{array}{c} H \cosh (ks) \cos \theta \, dz \\ T \sinh (kd) \end{array} \right]_{-1.00}^{+1.25} + 2 \left[\begin{array}{c} H \cosh (ks) \cos \theta \, dz \\ T \sinh (kd) \end{array} \right]_{-1.00}^{+1.25}$$

$$F = 577.98 \left[\begin{array}{c} H \cosh (ks) \cos \theta \\ T \sinh (kd) \end{array} \right]_{-1.00}^{+1.25} + 1662.005 \times 0.00 \left[\begin{array}{c} H \cosh (ks) \cos \theta \\ T \sinh (kd) \end{array} \right]_{-1.00}^{+1.25}$$

$$F = 88,767.25 \text{ Newton}$$

Si dividimos entre la longitud del elemento en el intervalo, se obtiene la fuerza de oleaje distribuida.

$$\text{Longitud} = 2.75 \text{ m}$$

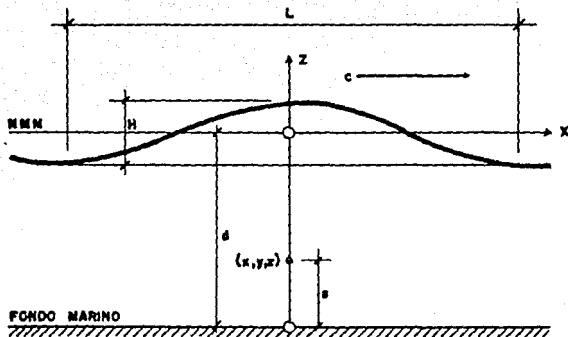
$$F = \frac{88\,767.25}{2.75}$$

$$F = 32,279.00 \text{ Newton/m}$$

Aplicando este procedimiento para diversas condiciones y varios intervalos, se obtienen los perfiles de fuerzas de oleaje.

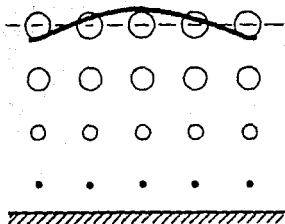
TABLA III.1 FUERZA DE OLEAJE EJEMPLO IIUSTRATIVO

INTERVALO	V A R I A B L E				Cd CONSTANTE	
	Cd CON CREC.MARINO		SIN CREC.MARINO			
	Cd	Fuerza	Cd	Fuerza	Cd	Fuerza
6.26 a 8.35	1.11	33,519.93	0.44	13,170.60	0.65	19,633.76
4.18 a 6.26	1.11	35,921.58	0.44	14,377.89	0.65	21,030.99
2.09 a 4.18	1.11	38,609.13	0.45	15,759.24	0.65	22,593.45
0.00 a 2.09	1.11	41,612.12	0.46	17,339.25	0.65	24,337.99
-0.875 a 0.0	1.10	12,228.71	0.29	3,251.39	0.65	7,254.74
-0.875 a -0.875	1.10	12,609.92	0.29	3,350.08	0.65	7,443.88
-2.625 a -1.750	1.10	12,947.40	0.29	3,454.34	0.65	7,642.58
-3.50 a -2.625	1.10	13,301.82	0.30	3,564.42	0.65	7,851.22
-5.25 a -3.50	1.11	30,445.77	0.46	12,557.83	0.65	17,811.68
-9.00 a -6.25	1.11	32,278.93	0.47	13,531.53	0.65	18,876.29
-11.75 a -9.00	1.11	34,479.95	0.47	14,724.36	0.65	20,153.68
-14.50 a -11.75	1.11	37,090.79	0.49	16,171.72	0.65	21,667.75
-18.375 a -14.50	1.12	36,407.84	0.54	17,469.31	0.65	21,211.29
-22.250 a -18.375	1.12	37,093.11	0.54	17,899.38	0.65	21,606.89
-26.125 a -22.250	1.12	38,489.69	0.54	18,784.32	0.65	22,412.80
-30.00 a -26.125	1.12	40,650.66	0.55	20,175.54	0.65	23,659.01

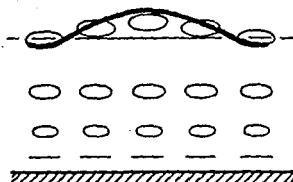


- L = LONGITUD DE LA OLA
- H = ALTURA DE LA OLA
- c = VELOCIDAD DE LA OLA
- d = PROFUNDIDAD DEL AGUA
- s = ALTURA DEL ELEMENTO MEDIDA DESDE EL FONDO MARINO

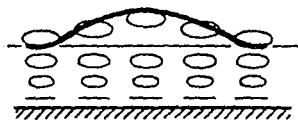
Fig. 3.1 PARAMETROS DE LA OLA



AGUAS PROFUNDAS $\frac{d}{L} > 0.5$



AGUAS INTERMEDIAS $0.5 > \frac{d}{L} > 0.02$



AGUAS SOMERAS $0.02 > \frac{d}{L}$

Fig. 3.2 ORBITA DE LAS PARTICULAS DE AGUA

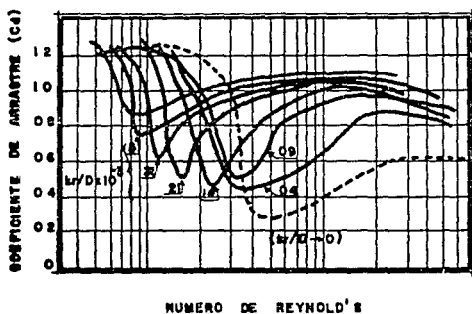
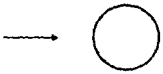
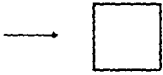
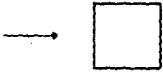


Fig. 3.3 COEFICIENTE DE ARRASTRE SEGUN EL NUMERO DE REYNOLD'S

PERFIL DE LA SECCION	CM
	2.0
	2.0
	2.0

SAUNDERS, 1957

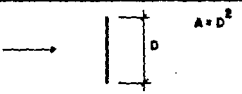


	1.0
	2.3
	2.2

Fig. 3.4 COEFICIENTES DE INERCIA PARA FORMAS ESTRUCTURALES COMUNES

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL PROGRAMA PARA CALCULAR FUERZAS DE OLAJE

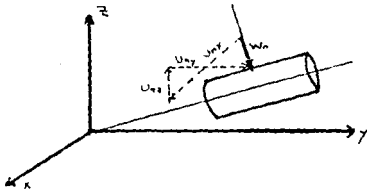
El programa desarrollado en esta tesis es para microcomputadoras compatibles con el sistema IBM-PC. Se mencionan las suposiciones que tiene el programa, por ejemplo, las simplificaciones de la gráfica del coeficiente de arrastre, la generalización de la ecuación Morison, el crecimiento marino en el elemento estructural, entre otras. También se enlistan las limitaciones de uso del programa y se describe el mismo con un diagrama de flujo general, para que en su utilización con subrutinas más eficientes se conozca cómo ensamblarlas. Por último, se incluye un manual de usuario del programa.

4.1 SUPOSICIONES

4.1.1 Generalización de la Ecuación de Morison

Debido a que la ecuación de Morison sólo sirve para obtener la fuerza debida al oleaje en cilindros verticales se requiere de una generalización de la ecuación para poder aplicarse en el caso de un cilindro orientado en cualquier dirección.

Sarpkaya (1981) desarrolló una generalización de la ecuación de Morison y que se explica a continuación.



El vector e es el vector unitario en el sentido del cilindro. Entonces

$$e = e_x \hat{i} + e_y \hat{j} + e_z \hat{k}$$

donde \hat{i} , \hat{j} , \hat{k} son, los vectores unitarios en los sentidos de los ejes x , y , z , y e_x , e_y , e_z son los cosenos directores respectivos.

El vector de velocidad normal al cilindro está dado por

$$W_n = \hat{i} U_{nx} + \hat{j} U_{ny} + \hat{k} U_{nz} = e \times [(\hat{i}u + \hat{j}y) \times e]$$

donde U y U son los componentes de velocidad de la partícula de agua en los sentidos x e y respectivamente.

Al desarrollarlo se obtiene :

$$\begin{aligned} U_{nx} &= U - e_x (e_x U + e_z U) \\ U_{ny} &= -e_y (e_x U + e_z U) \\ U_{nz} &= U - e_x (e_x U + e_z U) \end{aligned}$$

donde los componentes de velocidad U y X pueden ser obtenidas por medio de la Teoría de Oleaje de Airy.

El valor absoluto de W es

$$|W_n| = [U^2 + U^2 - (e_x U + e_z U)^2]^{1/2}$$

El número de Reynolds para obtener el coeficiente de oleaje es

$$Re = \frac{|W_n| D}{\nu}$$

Por lo que la ecuación de Morison puede ser escrita como sigue

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} = 0.5 C_d D |W_n| \begin{Bmatrix} U_{nx} \\ U_{ny} \\ U_{nz} \end{Bmatrix} + 0.25 \gamma C_m D^2 \begin{Bmatrix} U_{nx} \\ U_{ny} \\ U_{nz} \end{Bmatrix}$$

donde F_x , F_y y F_z son los componentes correspondientes a los ejes globales x , y , z de la fuerza de Oleaje sobre un miembro cilíndrico orientado en cualquier sentido.

4.1.2 Suposiciones Varias

Al quedar los elementos estructurales sumergidos en el mar, se desarrollan sobre las caras de los mismos diversos organismos como algas, coral, moluscos, estrellas de mar etc. A ésto se le llama crecimiento marino.

El crecimiento marino altera la rugosidad del elemento y el coeficiente de arrastre resulta afectado. El programa se basa en el reglamento para estructuras marinas Det Norske Veritas del año 1981 (ref. 5), que proporciona gráficas para obtener el Coeficiente de Arrastre según el crecimiento marino que presenta el miembro, mismas que fueron modificadas para poder trabajar con ellas en el programa (Fig. 4.1 a 4.8).

La presencia de crecimiento marino modifica el diámetro del elemento haciéndolo más grande, los cálculos del programa al diámetro del elemento que se utiliza se agrega el doble del crecimiento marino, excepto en el caso del crecimiento marino supuesto, donde toma el valor del diámetro original durante todas las operaciones que realice.

Cuando en un elemento exista una diferencia de cotas verticales en sus extremos, el programa realiza una integración, por el método de Simpson, de los valores de velocidad y aceleración para obtener un valor más exacto.

Con el fin de obtener un perfil más preciso de las fuerzas que actúan sobre el miembro, cada uno se divide en cuatro tramos iguales que se analizan separadamente.

4.2 LIMITACIONES DEL PROGRAMA

El programa sólo se puede utilizar en micocomputadoras que trabajen con el lenguaje Basic de tipo GW-Basic y que tengan impresora. Sin embargo, cambiando algunas instrucciones de manejo de archivos y de uso de pantalla e impresora, se puede aplicar en cualquier lenguaje Basic.

Debido a que la mayoría de las estructuras marinas cumplen con las condiciones de uso de la Teoría de Oleaje de Airy, se utiliza únicamente esta teoría. Sin embargo, se debe

verificar que el problema a analizar se encuentre dentro del rango de aplicación de la misma (Ver Capítulo II)

Debido a que el programa toma el coeficiente de inercia constante para toda la estructura, únicamente se puede utilizar en estructuras con secciones de tipo tubular.

El análisis de la ola es unidireccional, con la posición de la ola fija, coincidiendo los ejes de la ola con los ejes globales de la estructura. Se puede analizar con la ola en otra posición o sentido, moviendo las coordenadas de la estructura respecto a los ejes globales, o modificando la variable de tiempo dentro del programa (por omisión, ésta variable se consideró de valor cero).

El programa no considera el caso de que un miembro o grupo de miembros provoquen vortices o difracciones, que generan cambios pequeños en las fuerzas de oleaje, debido a que analiza cada miembro independiente de los demás.

4.3 DESCRIPCION DEL PROGRAMA

En realidad se trata de un programa principal, que realiza todas las operaciones y de dos programas auxiliares. Estos tres programas son independientes uno del otro.

Los programas auxiliares llamados DATNUD y DATMIE sirven para introducir los datos de la estructura, siendo éstos almacenados en archivos de diskette. Estos programas tienen la opción de verificar y corregir los datos.

El programa principal comienza con un menú en el se piden los datos generales de la estructura y de la ola, después dá inicio el ciclo para obtener las fuerzas de oleaje miembro por miembro, lee los datos del miembro así como las coordenadas de los puntos que definen la posición del miembro. A continuación divide el miembro en 4 partes iguales, en las cuales se obtiene la fuerza que genere la ola en cada parte del miembro, haciendo un ciclo por cada parte del miembro.

Cada ciclo comienza con el cálculo de los valores de velocidad y aceleración de la partícula de agua en los tres sentidos x , y , z . En el caso de los valores correspondientes al eje z , se efectúa el cálculo por medio de una integración numérica para mayor exactitud del resultado.

El siguiente paso es obtener el coeficiente de arrastre que se usará al aplicar la ecuación de Morison. Dicho coeficiente lo obtiene tomando en cuenta el Número de Reynolds, el Crecimiento Marino y el Diámetro del tubo (Fig. 4.1 a 4.8). Una vez obtenido este coeficiente, el programa calcula las fuerzas de oleaje referidas a los ejes globales x, y, z.

El programa imprime los datos utilizados y los resultados.

El diagrama de flujo del programa se muestra en la figura 4.9.

4.4 MANUAL DE USUARIO DEL PROGRAMA

El programa principal requiere que primero se corran los dos programas auxiliares para poder tener datos.

4.4.1 Programas Auxiliares

Antes de correr estos programas se debe colocar un diskette en blanco, debidamente formateado en el puerto B de la microcomputadora, donde se almacenarán los datos de los miembros y nudos de la estructura, siendo importante que sea el mismo para los dos programas.

Estando en Basic, se debe colocar el disco con los programas en el puerto A de la microcomputadora y para empezar a correr se teclean las siguientes instrucciones:

Run "A: DATMIE.BAS (para el programa de datos de miembros)
Run "A: DATNUD.BAS (para el programa de coordenadas de nudos)

A continuación se presenta un menú con las diversas opciones que tienen los programas y toda la información necesaria para utilizarlos aparecerá en la pantalla.

Todos los datos que involucren medidas de longitud (coordenadas, diámetros, crecimiento marino) deberán darse en metros.

Los ejes de coordenadas debe coincidir con el eje de la ola (en caso de que se quiera que la cresta de la ola coincida con el centro de la estructura), el eje vertical Z debe ser positivo hacia arriba, el eje X debe estar en sentido de la dirección de la ola y positivo, quedando el eje Y perpendicular a la dirección de la ola siguiendo un sistema derecho (Fig. 4.10). El origen debe estar en el nivel medio del mar, en el punto donde se desea la cresta de la ola.

El nudo K del miembro es un punto que se encuentra fuera del plano formado por los nudos i y j (Fig. 4.11).

4.4.2 Programa Principal

Antes de correr el programa principal, es necesario que el archivo con los datos de nudos y miembros esté completo; el diskette que los contenga deberá estar en el puerto B y la impresora debe estar encendida.

Para correr el programa se instala primero el sistema Basic y a continuación se teclea la siguiente instrucción :

```
RUN "B:AIRY.BAS
```

El menú que aparecerá en la pantalla indica todos los datos, así como las unidades requeridas para los mismos.

Los resultados saldrán impresos y las unidades de fuerza de los mismos son: Newton/metro .

El sentido positivo de la fuerza coincide con el sentido positivo del eje que se trate.

```

5 REN a1ry
10 REN PROGRAMA HECHO POR EMILIO MENDOZA
20 REN PARA TESTE PROFESIONAL
30 REN PROGRAMA PRINCIPAL
40 :
50 DEFDA L A = (DEFDBL N = 2
60 DIM DT(15), DT1(5), DT2(5)
70 CLR
80 COLOR 4
90 PRINT "CLAVE: "; COLOR 0; INPUT AS
100 IF AS <> "A1RY" THEN 90
110 CLS
120 COLOR 15, 4
130 PRINT : PRINT "          H E R U   G E N E R A L
      " : PRINT
140 COLOR 10, 0, 10
150 PRINT SPC(3); "TITULO DEL PROBLEMA _____
      " : PRINT
160 PRINT : PRINT SPC(10); "DATOS DE LA ESTRUCTURA"
170 PRINT : PRINT SPC(3); "NUMERO DE MIEMBROS _____ NUMERO DE BUDOS
      "
180 PRINT SPC(3); "CRECIMIENTO MARINO SUPUESTO (S/MO) _____"
190 PRINT SPC(3); "COEFICIENTE DE ARRASTRE CONSTANTE (S/MO) _____"
200 PRINT : PRINT : PRINT SPC(10); "DATOS DE LA OLA": PRINT
210 PRINT SPC(3); "PERIODO DE LA OLA _____ seg."
220 PRINT SPC(3); "ALTURA DE OLA _____ metros."
230 PRINT : PRINT : PRINT SPC(10); "PROFUNDIDAD DEL AGUA _____ metros."
240 COLOR 14
250 LOCATE 5, 22, 1; INPUT "TITULO DEL PROBLEMA"; TITR
260 LOCATE 6, 26, 1
270 INPUT "NUMERO DE MIEMBROS"; NMEMB
280 LOCATE 7, 48, 1; INPUT "NUMERO DE BUDOS"; NBUDOS; LOCATE 12, 48, 1; INPUT "COEFICIENTE DE ARRASTRE";
290 IF NBUDOS <= 0 OR NMEMB <= 0 THEN 330
300 LOCATE 13, 1, 1; COLOR 10
310 PRINT "VALOR DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE _____"; COLOR 14; L
320 LOCATE 13, 40, 1
330 INPUT "C"; C
340 LOCATE 17, 25, 1; INPUT "TOLERA"; TOL; LOCATE 18, 25, 1; INPUT "MOLA"; MOLA
350 LOCATE 21, 33, 1; INPUT "MAYOR PROFUNDIDAD"; DEEP
360 CLS
370 P1 = 0.14 * (NBUDOS / NMEMB)
380 P2 = 0.1 * (NBUDOS / NMEMB)
390 :
400 :
410 :
420 :
430 :
440 :
450 :
460 :
470 :
480 :
490 :
500 :
510 :
520 :
530 :
540 :
550 :
560 :
570 :
580 :
590 :
600 :
610 :
620 :
630 :
640 :
650 :
660 :
670 :
680 :
690 :
700 :
710 :
720 :
730 :
740 :
750 :
760 :
770 :
780 :
790 :
800 :
810 :
820 :
830 :
840 :
850 :
860 :
870 :
880 :
890 :
900 :
910 :
920 :
930 :
940 :
950 :
960 :
970 :
980 :
990 :

```



```

1000 REM COSMOS INTEGRACION
1010 ON MOINT COSMOS 10480,11560
1020 UNEL = RINTE
1030 :
1040 OPCION = 2
1050 VCTE = PI * NOLA * SIN(PAR2) / (TOLA * (EXP(PAR1)-EXP(-PAR1))/2)
1060 REM COSMOS INTEGRACION
1070 ON MOINT COSMOS 10480,11560
1080 VVEL = RINTE
1090 :
1100 OPCION = 3
1110 UACTE = 2*PI*2*NOLA* SIN(PAR2) / (TOLA*2 * (EXP(PAR1)-EXP(-PAR1))/2)
1120 REM COSMOS INTEGRACION
1130 ON MOINT COSMOS 10480,11560
1140 UACEL = RINTE
1150 :
1160 OPCION = 4
1170 VVCTE = 2*PI*2*NOLA* COS(PAR2) / (TOLA*2 * (EXP(PAR1)-EXP(-PAR1))/2)
1180 REM COSMOS INTEGRACION
1190 ON MOINT COSMOS 10480,11560
1200 VACEL = RINTE
1210 :
1215 :
1216 UIR = SQB ((CX-XI)*2 + (YJ-YI)*2 + (ZJ-ZI)*2 )
1217 TRAC(1,1)=(CX-XI)/UIR : TRAC(2,1)=(YJ-YI)/UIR : TRAC(3,1)=(ZJ-ZI)/UIR
1218 :
1220 UNVX = UNEL * (TRAC(1,1)*TRAC(1,1)*VVEL + TRAC(3,1)*VVEL)
1230 UNVY = -TRAC(2,1)*(TRAC(1,1)*VVEL + TRAC(3,1)*VVEL)
1240 UNVZ = VVEL * (TRAC(3,1)*(TRAC(1,1)*VVEL + TRAC(3,1)*VVEL)
1250 :
1260 UMAX = UACEL * (TRAC(1,1)*(TRAC(1,1)*UACEL + TRAC(3,1)*UACEL))
1270 UMY = -TRAC(2,1)*(TRAC(1,1)*UACEL + TRAC(3,1)*UACEL)
1280 UMZ = UACEL * (TRAC(3,1)*(TRAC(1,1)*UACEL + TRAC(3,1)*UACEL)
1290 :
1300 UM = SQB ( UNVX*2 + UNVY*2 + UNVZ*2 - (TRAC(1,1)*VVEL + TRAC(3,1)*VVEL)*2 )
1310 UN = ABS (UM)
1320 :
1330 VIAGRA = 9.000001E-06
1340 REY = (UN * DIAME)/VIAGRA
1350 :
1360 IF ARRASTRES*MI < ON ARRASTRES*MSI THEN 1410
1370 :
1380 REM COSMOS COEFICIENTE DE ARRASTRE
1390 COSMOS 11570
1400 :
1410 REM CALCULO DE LAS FUERZAS DE CREEP
1420 :
1430 FRES(1,1) = .5*ROF*DIAME*UN UNVX + .25*PI*ROF*DIAME*2*UMAX
1440 FRES(2,1) = .5*ROF*DIAME*UN UNVY + .25*PI*ROF*DIAME*2*UMY
1450 FRES(3,1) = .5*ROF*DIAME*UN UNVZ + .25*PI*ROF*DIAME*2*UMZ
1460 :
1480 :

```

```

1490 LONG = U18/4
1500 :
1510 :RESULTADO1 = PRES(1,1)/LONG
1520 :RESULTADO2 = PRES(2,1)/LONG
1530 :RESULTADO3 = PRES(3,1)/LONG
1540 :
1550 :
1560 LPRINT "RAMO = ";J1;"          MUD01 = ";MUD01;"MUD02 = ";MUD02;"
"MUOC = ";MUOC;"
1565 LPRINT USING "COEFICIENTE DE ARRASTRE = 00.00";CO
1570 LPRINT USING "FUERZA EJE X = 00000000.00";RESULTADO1
1580 LPRINT USING "FUERZA EJE Y = 00000000.00";RESULTADO2
1590 LPRINT USING "FUERZA EJE Z = 00000000.00";RESULTADO3
1600 LPRINT
1610 NEXT J1
1620 LPRINT
1630 NEXT NIEMBROX
1640 END
1650 :
10200 REN *****
10210 REN          SUBROUTINA LONGITUD DE LA OLA
10220 REN *****
10230 :
10240 D = DEEP
10250 T = TOLA
10260 REN
10270 REN          EMPIEZA ALGORITMO DE LA ECUACION
10280 REN
10290 COCOS=4*PI^2 *D / (GE*1^2)
10300 K11=2*3.141592658/BO
10310 K12= K11+.0000001
10320 FK11=K11*D * ((EXP(K11*D)-EXP(-K11*D)) / (EXP(K11*D)+EXP(-K11*D)))-COCOS
10330 FK12=K12*D * ((EXP(K12*D)-EXP(-K12*D)) / (EXP(K12*D)+EXP(-K12*D)))-COCOS
10340 K13= K12 - FK12 * ((K12 - K11) / (FK12 - FK11))
10350 K44=INT (K13*100000000)
10360 K55=INT (K12*100000000)
10370 IF K44<K55 THEN 10400
10380 K15=K12; K12=K13
10390 GOTO 10320
10400 PRINT:PRINT
10410 PRINT USING "NUMERO DE OLA (K) = 00.0000000";K13
10420 LOCA=2*PI/K13
10430 LPRINT USING "LONGITUD DE LA OLA = 0000000.00"; LILA :LPRINT USING "
10440 RETURN
10450 CLS
10460 :
10470 REN *****
10480 REN          SUBROUTINA INTEGRACION POR EL METODO DE SIMPSON
10490 REN *****
10500 :
10510 AINTE= DZ1(C1F)
10520 BINTE= DZ1(C1F)

```

```

10530 IF BINTE = NOLA/2 THEN BINTE = NOLA/2
10540 :
10550 REM EINTE= TOLERANCIA
10560 EINTE = .000001
10570 NINTE= (AINTE+BINTE) / 2
10580 NINTE = (BINTE-AINTE) /40
10590 GOSUB 10960
10600 REM EVALUA LOS TERMINOS PRINCIPALES DE LA INTEGRAL DEFINIDA
10610 NINTE= ((BINTE-AINTE)*5*(NINTE/EINTE/180)*.25
10620 NINTE = 2 * INT (NINTE/2-1)
10630 BINTE = 0
10640 NINTE = AINTE
10650 NINTE = (BINTE-AINTE)/NINTE
10660 FOR IINTE= 1 TO NINTE/2
10670 GOSUB 10790
10680 NINTE = NINTE + FINTE
10690 NINTE = NINTE + NINTE
10700 GOSUB 10790
10710 NINTE = NINTE + 4 * FINTE
10720 NINTE = NINTE + NINTE + NINTE
10730 GOSUB 10790
10740 NINTE = NINTE + FINTE
10750 NEXT IINTE
10760 NINTE=NINTE*NINTE/3
10770 IF DZ(1) > NOLA/2 THEN BINTE = 0
10780 GOTO 11140
10790 REM***** SUBROUTINA QUE DEFINE LA FUNCION *****
10800 IF OPCION = 1 THEN 10860
10810 IF OPCION = 2 THEN 10880
10820 IF OPCION = 3 THEN 10900
10830 IF OPCION = 4 THEN 10920
10840 PRINT "ERROR EN EL PROGRAMA" :GOTO 11140
10850 :
10860 FINTE = VCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
10870 GOTO 10930
10880 FINTE = VCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
10890 GOTO 10930
10900 FINTE = VCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
10910 GOTO 10930
10920 FINTE = VCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
10930 RETURN
10940 :
10950 REM***** SUBROUTINA EVALUACION DEL ERROR *****
10960 BINTE = 0
10970 NINTE = NINTE - 2 * BINTE
10980 GOSUB 10790
10990 DINTE = DINTE + FINTE
11000 NINTE = NINTE - NINTE
11010 GOSUB 10790
11020 DINTE = DINTE - 4 * FINTE
11030 NINTE = NINTE - NINTE
11040 GOSUB 10790

```



```

11050 DINTE = DINTE + 6 * FINTE
11060 XINTE = XINTE + FINTE
11070 GOSUB 10790
11080 DINTE = DINTE - 4 * FINTE
11090 XINTE = XINTE + 2 * FINTE
11100 GOSUB 10790
11110 DINTE = DINTE - FINTE
11120 DINTE = ABS (DINTE /FINTE)*4
11130 RETURN
11140 RETURN
11150 :
11350 REM *****
11360 REM      SUBROUTINA DE VELOCIDAD Y ACCELERACION DIRECTA
11370 REM *****
11380 :
11390 XINTE = ZI
11400 IF OPCION = 1 THEN 11460
11410 IF OPCION = 2 THEN 11430
11420 IF OPCION = 3 THEN 11500
11430 IF OPCION = 4 THEN 11520
11440 PRINT "ERROR EN EL PROGRAMA" : STOP
11450 :
11460 XINTE = UCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
11470 GOTO 11530
11480 XINTE = VCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
11490 GOTO 11530
11500 XINTE = UUCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
11510 GOTO 11530
11520 XINTE = VVCTE*(EXP (PAREN*(XINTE+DEEP))-EXP(-PAREN*(XINTE+DEEP)))/2
11530 IF ZI > NOLA/2 THEN XINTE = 0
11540 RETURN
11550 :
11560 REM *****
11570 REM      SUBROUTINA DE COEFICIENTE DE ARRASTRE
11580 REM *****
11590 :
11600 GOSUB 11620
11610 RETURN
11620 RANGO = 1000*CREMAR/DIAH
11630 :
11640 IF SUPUESTO = "S1" THEN 12690
11650 IF RANGO > .2 THEN 11660 ELSE 11770
11660 IF RANGO > .45 THEN 11670 ELSE 11910
11670 IF RANGO > 1.75 THEN 11680 ELSE 12050
11680 IF RANGO > 1.75 THEN 11690 ELSE 12210
11690 IF RANGO > 2.4 THEN 11700 ELSE 12330
11700 IF RANGO > 4.05 THEN 11710 ELSE 12450
11710 IF RANGO > 7.5 THEN 11720 ELSE 12570
11720 IF RANGO > 15 THEN 11730 ELSE 12690
11730 :
11740 PRINT "NO EXISTE TABLA DISPONIBLE PARA ESE CRECIMIENTO MARINO"
11750 PRINT "EN EL REGLAMENTO DEL MORSE VERITAS"

```

11760 STOP
 11770 REN CURVA CURVA TUMD L180
 11780 REN INTERVALO REY 56000 A 200000
 11790 IF REY < 200000 THEN CD = 0 *REY + 1.25 : RETURN
 11800 REN INTERVALO REY 200000 A 300000
 11810 IF REY < 300000 THEN CD = -.0000025 *REY + 1.75 : RETURN
 11820 REN INTERVALO REY 300000 A 370000
 11830 IF REY < 370000 THEN CD = -8.857143E-06 *REY + 3.657143 : RETURN
 11840 REN INTERVALO REY 370000 A 430000
 11850 IF REY < 430000 THEN CD = -1.666667E-06 *REY + .9966666 : RETURN
 11860 REN INTERVALO REY 430000 A 2250000
 11870 IF REY < 2200000 THEN CD = 1.920904E-07 *REY + .1974011 : RETURN
 11880 REN INTERVALO REY 2200000 A 6000000
 11890 IF REY < 6000000 THEN CD = 7.89473E-09 *REY + .6026316 : RETURN
 11900 :
 11910 REN CURVA 0.4 E-3
 11920 REN INTERVALO REY 62000 A 120000
 11930 IF REY < 120000 THEN CD = 0 *REY + 1.25 : RETURN
 11940 REN INTERVALO REY 120000 A 190000
 11950 IF REY < 190000 THEN CD = -2.285714E-06 *REY + 1.524286 : RETURN
 11960 REN INTERVALO REY 190000 A 320000
 11970 IF REY < 320000 THEN CD = -6.846154E-06 *REY + 2.010769 : RETURN
 11980 REN INTERVALO REY 320000 A 900000
 11990 IF REY < 900000 THEN CD = 2.413793E-07 *REY + .3827586 : RETURN
 12000 REN INTERVALO REY 900000 A 1200000
 12010 IF REY < 1200000 THEN CD = 9.999999E-07 *REY + -.2999999 : RETURN
 12020 REN INTERVALO REY 1200000 A 6000000
 12030 IF REY < 6000000 THEN CD = -1.458333E-08 *REY + .9174999 : RETURN
 12040 :
 12050 REN CURVA 0.9 E-3
 12060 REN INTERVALO REY 52000 A 105000
 12070 IF REY < 105000 THEN CD = 1.886791E-07 *REY + 1.200189 : RETURN
 12080 REN INTERVALO REY 105000 A 170000
 12090 IF REY < 170000 THEN CD = -5.384616E-06 *REY + 1.575385 : RETURN
 12100 REN INTERVALO REY 170000 A 270000
 12110 IF REY < 270000 THEN CD = -.0000048 *REY + 1.816 : RETURN
 12120 REN INTERVALO REY 270000 A 410000
 12130 IF REY < 410000 THEN CD = 4.285715E-07 *REY + .6042857 : RETURN
 12140 REN INTERVALO REY 410000 A 620000
 12150 IF REY < 620000 THEN CD = 1.476191E-06 *REY + -.0252381 : RETURN
 12160 REN INTERVALO REY 620000 A 1900000
 12170 IF REY < 1900000 THEN CD = 8.593751E-08 *REY + .8367188 : RETURN
 12180 REN INTERVALO REY 1900000 A 6000000
 12190 IF REY < 6000000 THEN CD = -2.439025E-08 *REY + 1.046341 : RETURN
 12200 :
 12210 REN CURVA 1.4 E -3
 12220 REN INTERVALO REY 98000 A 120000
 12230 IF REY < 120000 THEN CD = -1.42857E-07 *REY + 1.257143 : RETURN
 12240 REN INTERVALO REY 120000 A 230000
 12250 IF REY < 230000 THEN CD = -6.72727E-06 *REY + 2.047273 : RETURN
 12260 REN INTERVALO REY 230000 A 410000
 12270 IF REY < 410000 THEN CD = 1.777778E-06 *REY + 9.11112E-02 : RETURN

12280 REM INTERVALO REY 410000 A 1100000
 12290 IF REY < 1100000 THEN CD = 3.768117E-07 *REY + .6655072 : RETURN
 12300 REM INTERVALO REY 1100000 A 6000000
 12310 IF REY < 6000000 THEN CD = -4.285715E-08 *REY + 1.127143 : RETURN
 12320 :
 12330 REM CURVA 2.1 E3
 12340 REM INTERVALO REY 92000 A 110000
 12350 IF REY < 110000 THEN CD = -1.055555E-05 *REY + 2.271111 : RETURN
 12360 REM INTERVALO REY 110000 A 140000
 12370 IF REY < 140000 THEN CD = -2.033333E-05 *REY + 3.346667 : RETURN
 12380 REM INTERVALO REY 140000 A 210000
 12390 IF REY < 210000 THEN CD = 4.571429E-06 *REY + -.14 : RETURN
 12400 REM INTERVALO REY 210000 A 610000
 12410 IF REY < 610000 THEN CD = 5.749999E-07 *REY + .6992501 : RETURN
 12420 REM INTERVALO REY 610000 A 3200000
 12430 IF REY < 3200000 THEN CD = 1.158305E-08 *REY + 1.042934 : RETURN
 12440 :
 12450 REM CURVA 3.1 E-3
 12460 REM INTERVALO REY 60000 A 90000
 12470 IF REY < 90000 THEN CD = -4.333333E-06 *REY + 1.54 : RETURN
 12480 REM INTERVALO REY 90000 A 110000
 12490 IF REY < 110000 THEN CD = -.0000265 *REY + 3.535 : RETURN
 12500 REM INTERVALO REY 110000 A 200000
 12510 IF REY < 200000 THEN CD = 2.888889E-06 *REY + .3022223 : RETURN
 12520 REM INTERVALO REY 200000 A 600000
 12530 IF REY < 600000 THEN CD = 3.5E-07 *REY + .81 : RETURN
 12540 REM INTERVALO REY 600000 A 3500000
 12550 IF REY < 3500000 THEN CD = 3.448273E-09 *REY + 1.017931 : RETURN
 12560 :
 12570 REM CURVA 5.0 E-3
 12580 REM INTERVALO REY 60000 A 75000
 12590 IF REY < 75000 THEN CD = -9.999999E-06 *REY + 1.85 : RETURN
 12600 REM INTERVALO REY 75000 A 87000
 12610 IF REY < 87000 THEN CD = -2.916667E-05 *REY + 3.287501 : RETURN
 12620 REM INTERVALO REY 87000 A 400000
 12630 IF REY < 400000 THEN CD = 1.277955E-06 *REY + .638618 : RETURN
 12640 REM INTERVALO REY 400000 A 3000000
 12650 IF REY < 3000000 THEN CD = 0 *REY + 1.15 : RETURN
 12660 REM INTERVALO REY 3000000 A 6000000
 12670 IF REY < 6000000 THEN CD = -5.666666E-08 *REY + 1.32 : RETURN
 12680 :
 12690 REM CURVA 1 E-2
 12700 REM INTERVALO REY 45000 A 80000
 12710 IF REY < 80000 THEN CD = -6.666667E-06 *REY + 1.6 : RETURN
 12720 REM INTERVALO REY 80000 A 77000
 12730 IF REY < 77000 THEN CD = -1.82353E-05 *REY + 2.294118 : RETURN
 12740 REM INTERVALO REY 77000 A 400000
 12750 IF REY < 400000 THEN CD = 6.501549E-07 *REY + .8394581 : RETURN
 12760 REM INTERVALO REY 400000 A 3000000
 12770 IF REY < 3000000 THEN CD = 1.153845E-08 *REY + 1.895345 : RETURN
 12780 :
 12790 REM *****

```

12800 REN          SUBROUTINA DE IMPRESION DE DATOS
12810 REN *****
12820 :
12830 LPRINT:LPRINT
12840 LPRINT TITS
12850 LPRINT :LPRINT:PRINT "D A T O S ":LPRINT
12860 LPRINT USING " Numero de miembros: #####";MIE
12870 LPRINT USING " Numero de nudos: #####";NLD
12880 LPRINT USING " Periodo de la ola: ###.##";TOLA
12890 LPRINT USING " Altura de la ola: ###.##";HOLA
12900 LPRINT USING "Profundidad del agua: ###.##";DEEP
12910 LPRINT :LPRINT
12920 LPRINT "      MIEMBRO      NUDO I      NUDO J      NUDO K      DIAMETRO
O      CRE.NAR."
12930 FOR MIEMBRO= 1 TO NMI
12940 OPEN "R", #2, "A:BARBAS.DAT",100
12950 FIELD#2, 1 AS S1, 10 AS S2, 10 AS S3, 10 AS S4, 10 AS S5, 10 AS S6, 10 AS S7
12960 GET #2, MIEMBRO
12970 MUDOIX = CYS (S1)
12980 MUDOUX = CYS (S2)
12990 MUDOCX = CYS (S3)
13000 DIAME = CYS (S4)
13010 CREMAR = CYS (S5)
13020 LPRINT USING" #####;MIEMBRO, MUDOIX, MUDOUX, MUDOCX,
13025 LPRINT USING " #####.###";DIAME, CREMAR
13030 CLOSE #2
13040 NEXT MIEMBRO
13050 LPRINT:LPRINT:LPRINT
13060 LPRINT " NUDO          COORDENADA X      COORDENADA Y      COORDENA
DA Z"
13070 FOR NUDO= 1 TO NNLD
13080 OPEN "R", #1, "A:NUDOS.DAT",30
13090 FIELD#1, 1 AS S1, 10 AS S2, 10 AS S3, 10 AS S4, 10 AS S5
13100 GET#1, NUDO
13110 XI= CYS(S1) : YI= CYS(S2) : ZI = CYS(S3)
13115 LPRINT"  ";NUDO,
13120 LPRINT USING " #####.###"; XI, YI, ZI
13130 CLOSE #1
13140 NEXT NUDO
13150 MUDCO=L :LPRINT:LPRINT :LPRINT :LPRINT
13160 LPRINT " R E S U L T A D O S"
13170 RETURN

```

FIG. 4.1

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO LISO

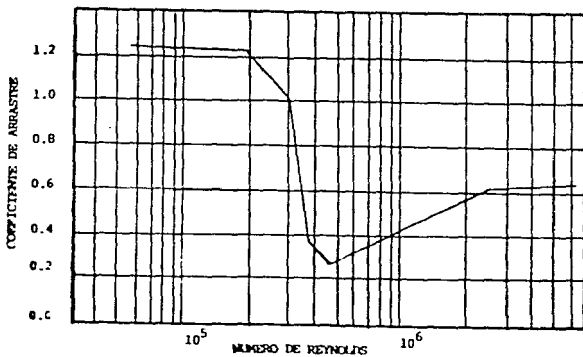
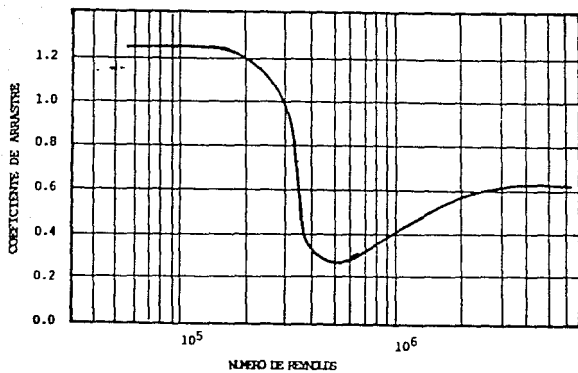


FIG. 4.2

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO CON $Kr/D = 0.4 \times 10$

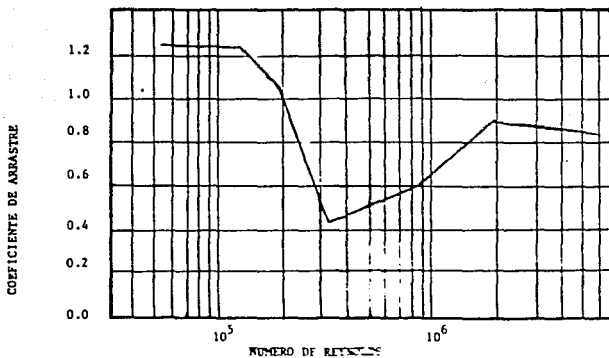
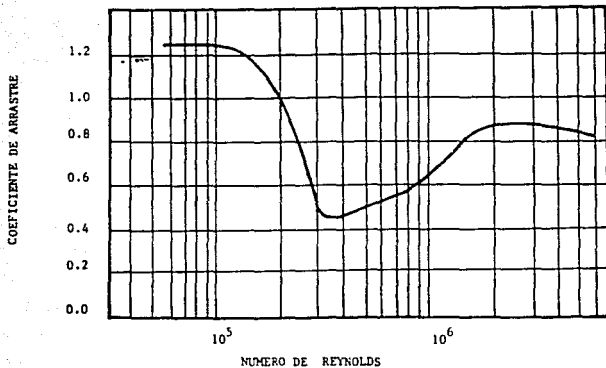


FIG. 4.3

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO CON $Kr/D = 0.9 \times 10^{-3}$

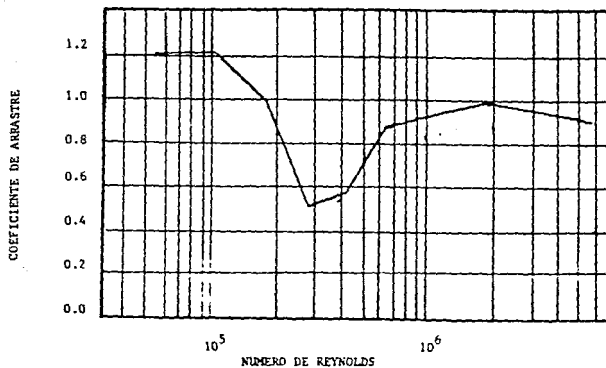
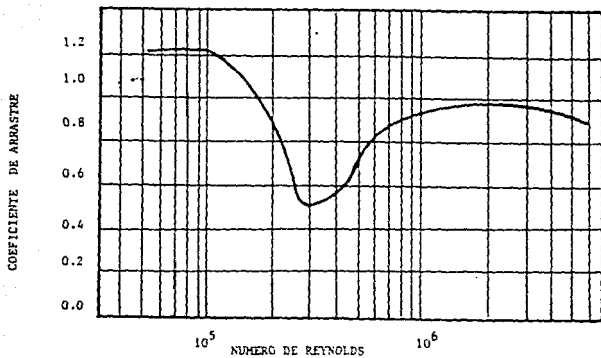


FIG. 4.4

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO CON $K_f/D = 1.4 \times 10^{-3}$

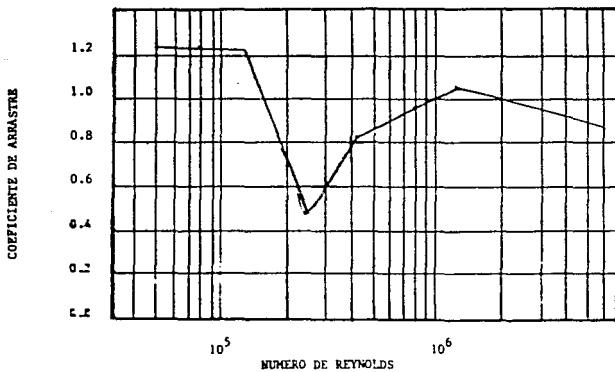
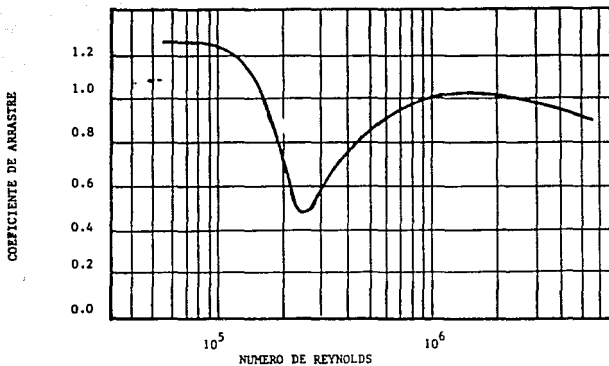


FIG. 4.5

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO CON $Kr/D = 2.1 \times 10^{-3}$

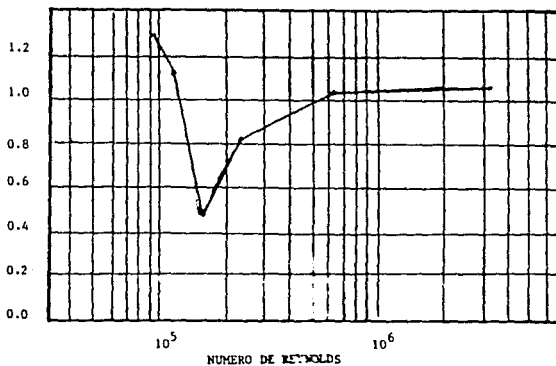
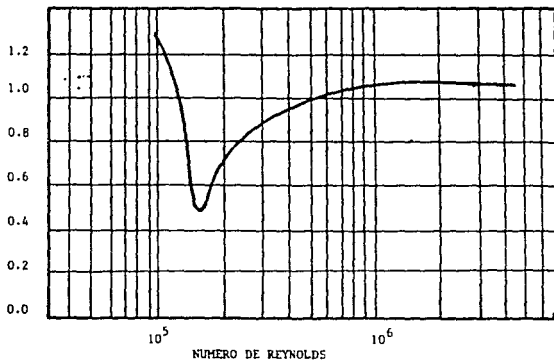


FIG. 4.6

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO CON $K_f/D = 3.1 \times 10^{-3}$

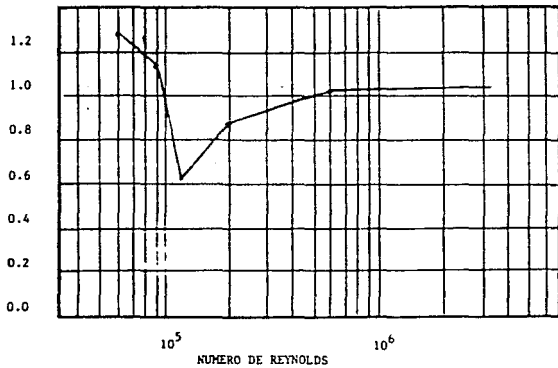
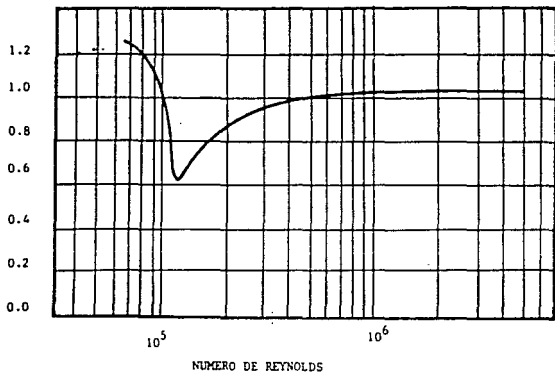


FIG. 4.7

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO CON $Kr/D = 5.0 \times 10^{-3}$

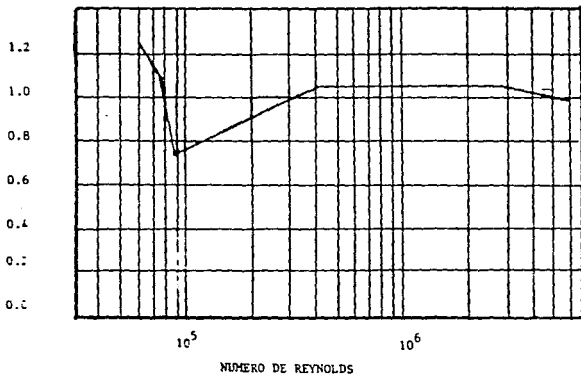
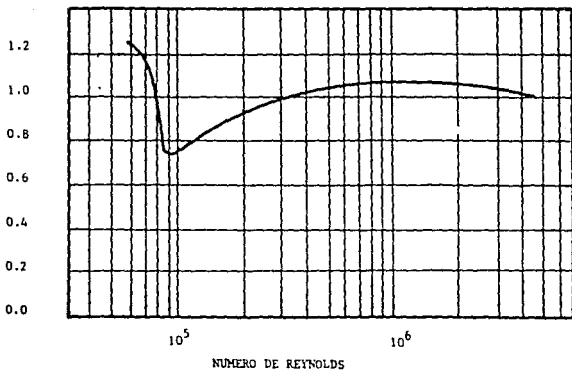


FIG. 4.8

COEFICIENTE DE ARRASTRE EN UN TUBO CON $Kr/D = 1 \times 10^{-2}$

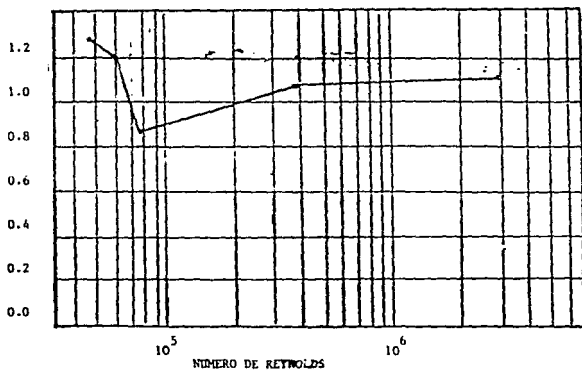
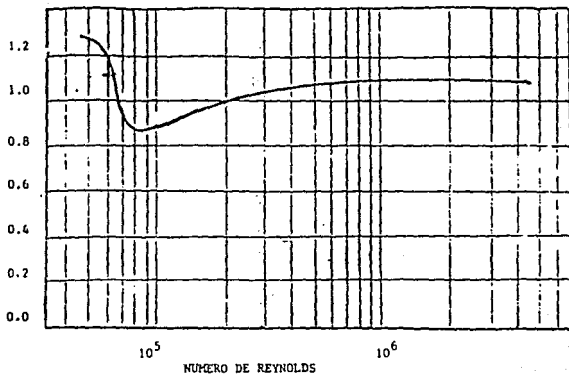


DIAGRAMA DE FLUJO
DE PROGRAMA

FIG. 4.9-A

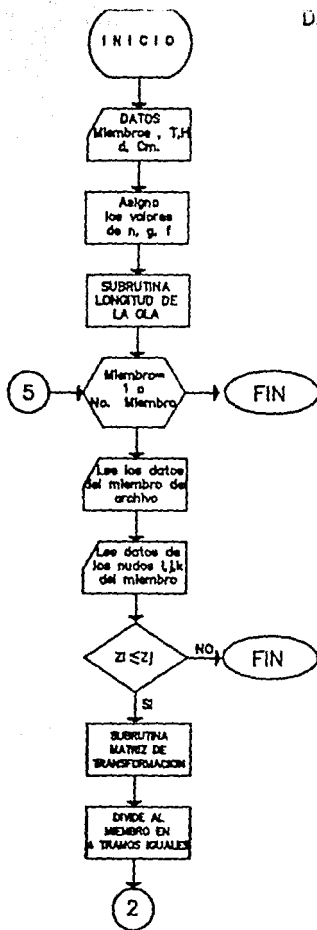


DIAGRAMA DE FLUJO DE PROGRAMA

FIG. 4.9-8

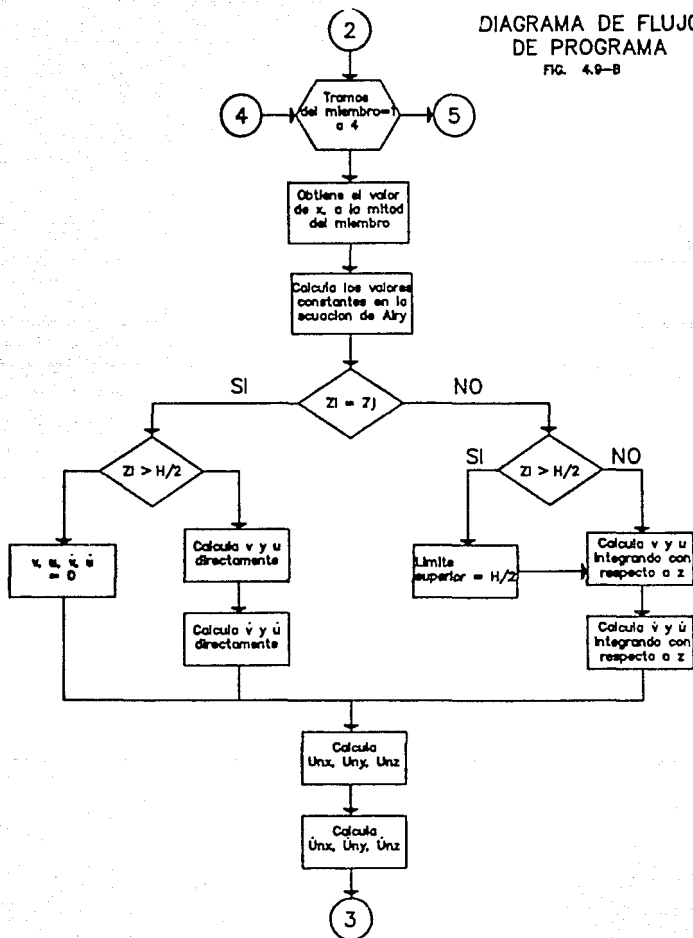


DIAGRAMA DE FLUJO
DE PROGRAMA

FIG. 49-C

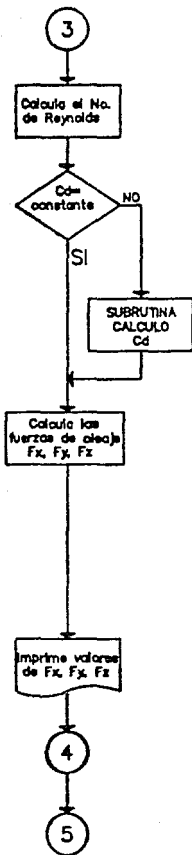
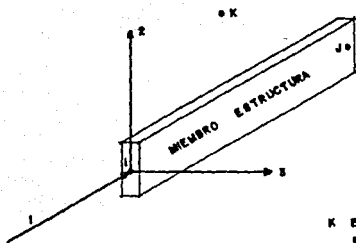


FIG. 4.10



$$K \in [1-2]$$

K ES CUALQUIER PUNTO MODAL QUE CAE
EN EL PLANO LOCAL 1-2
(QUE NO ESTE SOBRE EL EJE 1)

SISTEMA DE COORDENADAS LOCALES

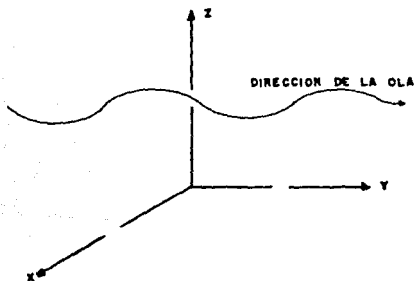


FIG. 4.11 SISTEMA DE COORDENADAS GLOBAL

CAPITULO V

ANALISIS DE LOS COEFICIENTES DE ARRASTRE Y LAS FUERZAS DE OLEAJE

Para determinar la manera en la que las variaciones del Coeficiente de Arrastre inciden en la fuerza de oleaje, se requiere de un análisis completo de la fuerza de oleaje en la estructura, ya que la Ecuación de Morison consta de dos términos y sólo en uno de ellos el Coeficiente de Arrastre afecta el resultado. Como el valor de ambos términos difiere según las variables del miembro que se analiza (localización, diámetro, crecimiento marino, etc.) se hace necesario obtener la fuerza total de oleaje en ese miembro para observar su variación debido a cambios en el Coeficiente de Arrastre. En el presente capítulo se hace una comparación de la variación de la Fuerza de Oleaje en una plataforma marina típica de la Sonda de Campeche de acuerdo a tres análisis: el primero, considerando que el Coeficiente de Arrastre es constante y los otros dos, variándolo en la estructura de acuerdo a dos características: con un crecimiento marino supuesto y sin crecimiento marino.

5.1 Modelo Utilizado

El modelo utilizado en esta tesis en el análisis de las fuerzas de oleaje es una plataforma convencional fija de acero (jacket) de cuatro piernas (tetrapodo). Este modelo tiene la estructuración típica de las plataformas ubicadas en la Sonda de Campeche, a base de marcos con contravientos. La estructura tiene cuatro niveles, cada uno actúa como un arriostamiento lateral a la pierna.

Los elementos estructurales son tubos de acero, con diámetros que varían de 1.33 m a 0.51 m y se encuentran soldados entre si.

Para fines de este estudio se omitieron todos los elementos correspondientes a la superestructura y a los accesorios, debido a que la ola no genera fuerzas en el primero de ellos y generadas en el segundo son despreciables.

En las figuras 5.1 a 5.8 se encuentra la estructuración del modelo, así como los diámetros de cada elemento estructural en pulgadas.

Se consideró una profundidad del lecho marino de 31.00 que es aproximadamente la profundidad promedio en la Sonda de Campeche, las características de la ola son las siguientes:

Período de la ola : 16.00 segundos
Altura de la ola: 16.70 metros

Estos datos se tomaron de los parámetros utilizados en el Instituto Mexicano del Petróleo para el análisis de Plataformas Marinas en esta zona, y corresponden a una ola de tormenta con un período de retorno de 100 años.

La estructura está orientada de manera que sus ejes de coordenadas coinciden con los ejes de la ola.

5.2 Resultados

Se efectuaron tres análisis diferentes para determinar la fuerza de oleaje.

En el primero se tomó el Coeficiente de Arrastre Constante para toda la estructura, con valor de 0.65 , normalmente utilizado en los análisis efectuados en el Instituto Mexicano del Petróleo para las plataformas marinas en la Sonda de Campeche.

En el segundo análisis, el coeficiente de arrastre se consideró variable de acuerdo a las características del flujo de agua sobre el miembro analizado, suponiendo que no existe Crecimiento Marino en la estructura.

El tercer y último análisis se consideró que existe crecimiento marino y que el coeficiente de arrastre varía también de acuerdo al flujo de agua sobre el miembro. Este análisis es el que se asemeja más a la situación real.

Para obtener los valores del Coeficiente de Arrastre en los dos últimos análisis, el programa utiliza las gráficas mostradas en el capítulo anterior.

Los resultados de las fuerzas en una pierna de la estructura y en algunos otros elementos característicos, se muestran en las tablas 5.1 a 5.U1.

Un punto interesante en estos resultados se presenta al efectuar el análisis de la fuerza de oleaje que actúa sobre la pierna de la estructura. Se trata de un cambio de los resultados en el intervalo de 0 a -5 metros de profundidad, con el que la fuerza de oleaje tiene un valor menor al real.

Se presentó en todos los análisis efectuados a la pierna de la estructura al utilizar el programa la subrutina de integración numérica, es decir, al efectuar un análisis en donde existe una diferencia de cotas verticales en el miembro. Es posible que se deba a un problema matemático en los límites tomados para la integración en ese intervalo. Se recomienda no tomar en consideración los resultados en este intervalo, sin embargo, la comparación de la fuerza de oleaje se puede hacer a pesar de estos resultados. El estudio de esta anomalía no está dentro de los alcances de esta tesis, por lo que se recomienda efectuar estudios adicionales al respecto.

COMPARACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Los análisis efectuados en el inciso anterior se realizaron con los mismos datos; variando únicamente el Coeficiente de Arresto, lo que permite elaborar un análisis comparativo entre los resultados de los mismos.

Esta comparación se efectuó en los elementos representativos de la estructura siguientes :

- a) Una de las cuatro piernas principales de la estructura (Miembros números 89,82,83,84, 80).
- b) Una trabe longitudinal en el sentido del eje y a una profundidad de - 14.36 (Miembros 29,30)
- c) Una trabe longitudinal en el sentido del eje X a una profundidad de (Miembros 25,26)
- f) Dos contravientos ubicados en el marco A, uno que va de la plataforma elevación - 14.326 a - 3.658 y otro de - 31.00 a - 14.376 metros de profundidad (Miembros 98, 100)

En la pierna principal se observa que al considerar crecimiento marino sobre la superficie de la misma, la

fuerza de oleaje se incrementa notablemente con respecto al caso de Coeficiente de Arrastre constante para toda la pierna. Este incremento es del orden de 72 % (Tabla 5.1) (Gráfica 5.9).

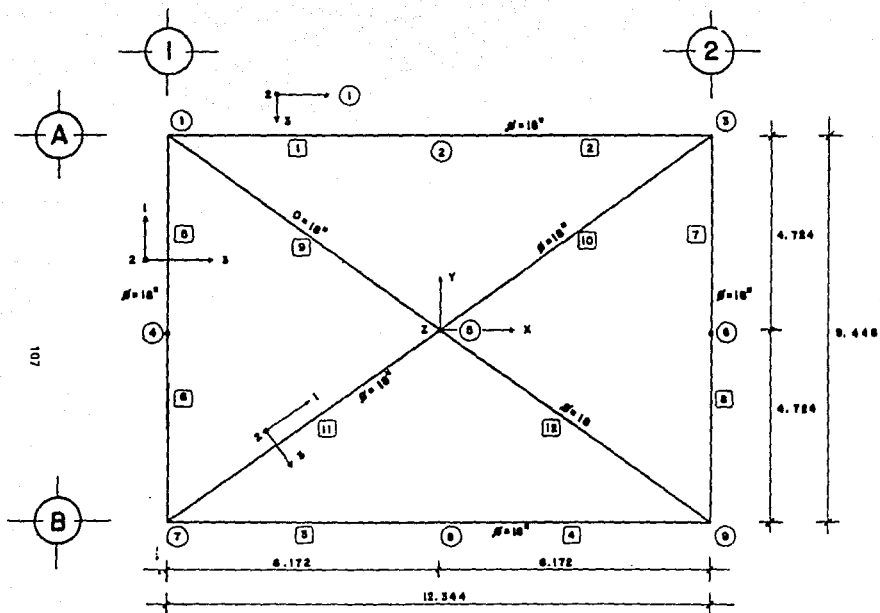
En la trabe sobre el eje y se observa que, si tomamos el Coeficiente de Arrastre constante, la fuerza de oleaje es de una magnitud inferior a la que resulta considerando que el Coeficiente de Arrastre varía de acuerdo a cada miembro, no importando el tipo de variación que se analice, con crecimiento marino o sin crecimiento marino. Con respecto al primero, el incremento fué de 55 % y con respecto al segundo, 67 %, tomando como base los resultados del análisis efectuado con el Coeficiente de Arrastre constante (Gráfica 5.10). En el sentido del eje X la fuerza de oleaje se mantiene igual en los tres casos (Gráfica 5.11).

En los contravientos se observa una gran diferencia entre los resultados obtenidos, sobre todo en el sentido del eje X, donde la diferencia que existe entre los resultados usando el Coeficiente de Arrastre constante y tomándolo con Crecimiento Marino, es de 68 % más en el primero que en el segundo. Si se supone que no existe crecimiento marino pero que varía el Coeficiente de Arrastre la diferencia es de una disminución de 50 % aproximadamente respecto al análisis efectuado con el Coeficiente de Arrastre Constante (Gráficas 5.12, 5.13)

En términos generales, para la estructura estudiada se observa que si el Coeficiente de Arrastre varía de acuerdo a las siguientes dos variables:

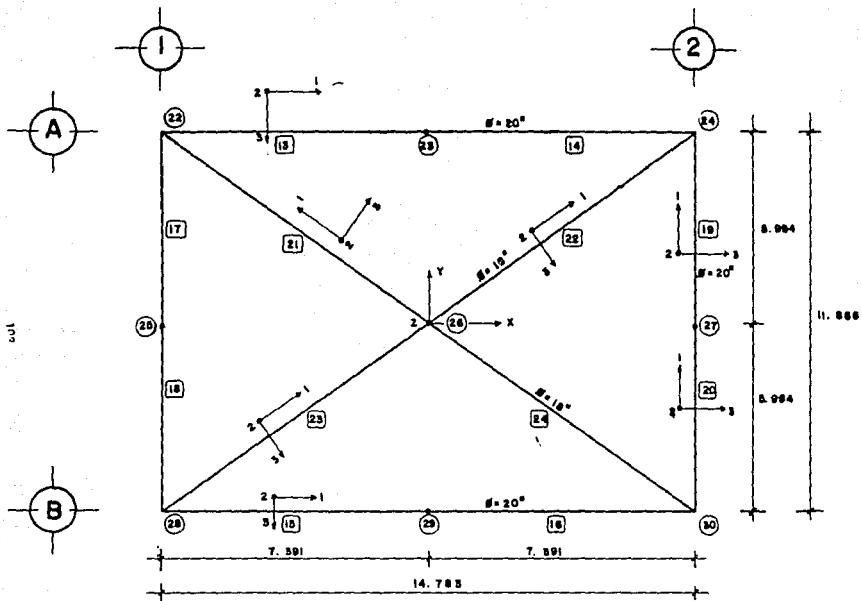
- a) El flujo de agua en cada miembro, y
- b) El Crecimiento Marino

la fuerza de oleaje que actúa sobre los elementos Estructurales se incrementa en magnitud, llegando a ser, en algunos casos de casi el doble de lo que usualmente se obtiene al considerar constante dicho coeficiente.



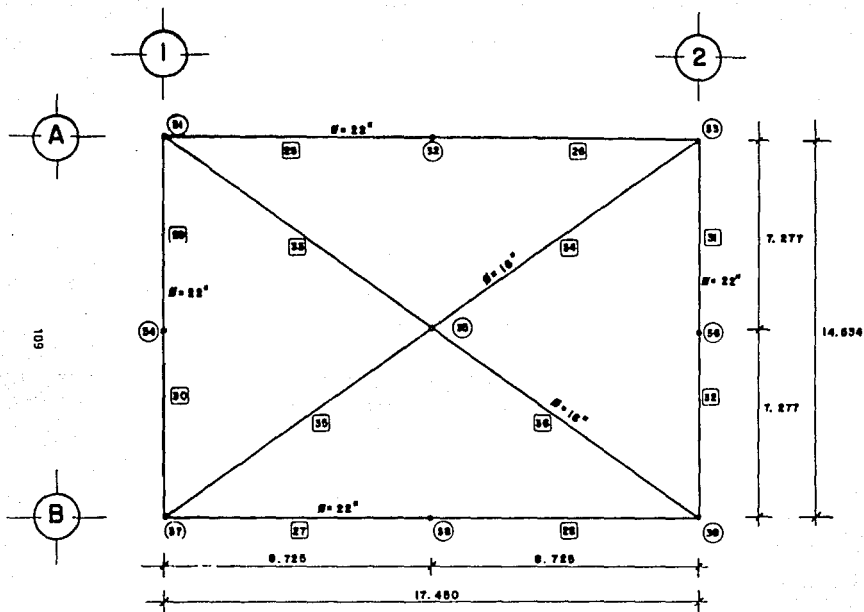
PLANTA DE ELEVACION + 6.096

Fig 5.1



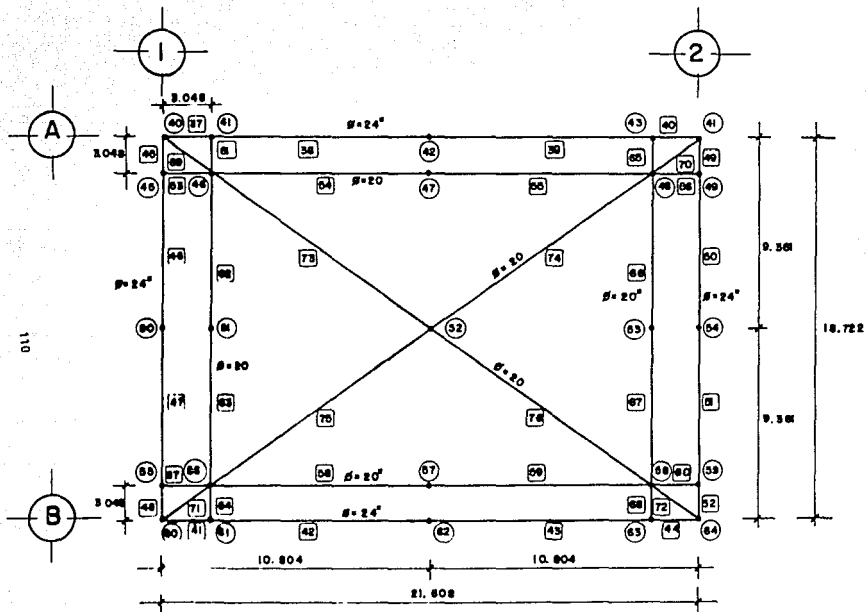
PLANTA DE ELEVACION - 3.658

Fig 5.2



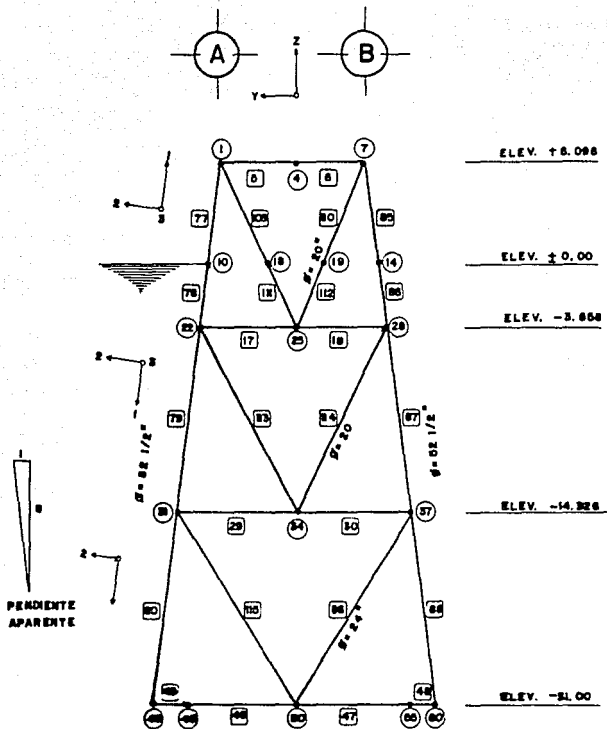
PLANTA DE ELEVACION -14.326

Fig 5.3



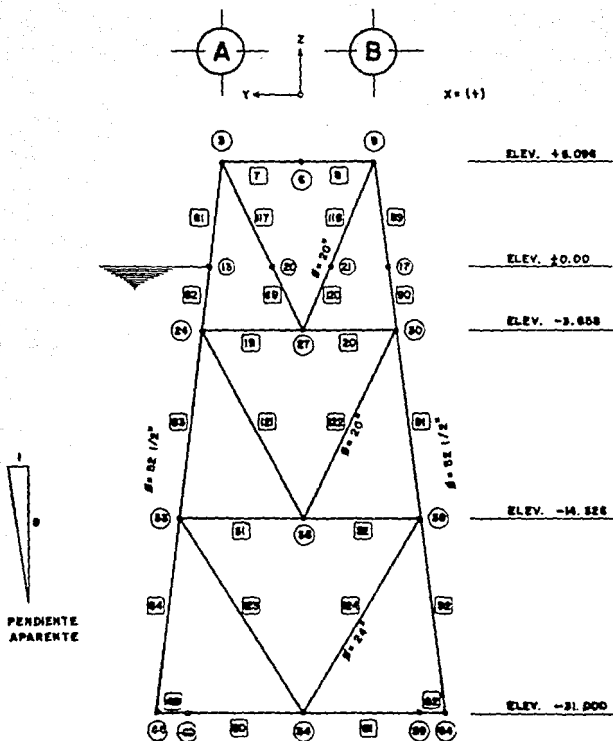
PLANTA DE ELEVACION - 31.000

Fig 5.4



MARCO EJE I

Fig 5.5



MARCO EJE 2

Fig 5.6

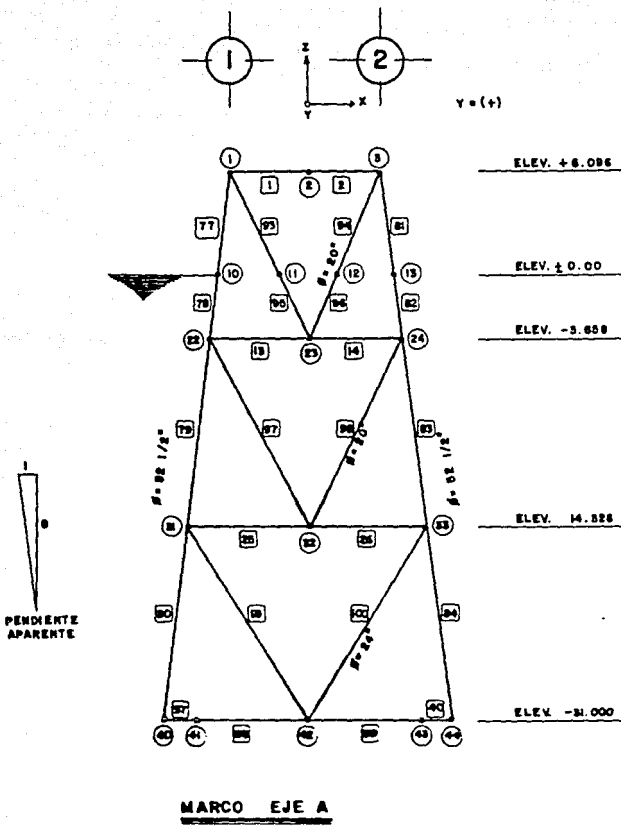
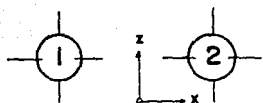
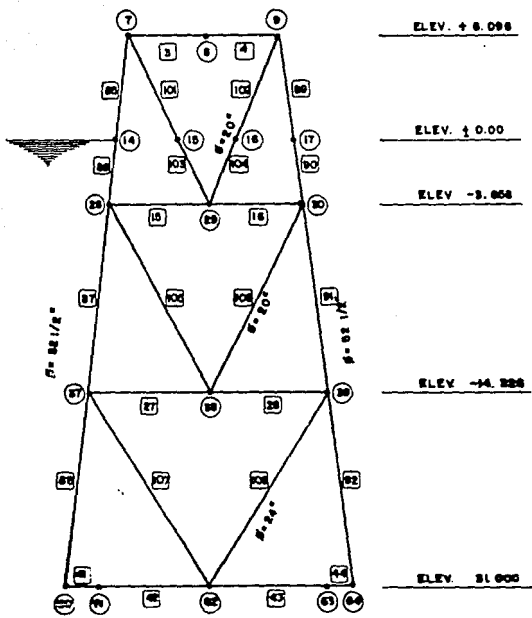


Fig 5.7



$y = (-)$



MARCO EJE B

FIG 5.8

TABLA 5.I PIERNA PRINCIPAL

PROFUNDIDAD		FUERZA EJE X		
		CONSTANTE	S/CREC. MAR	C/CREC. MAR
6.096 A	4.572	16,976.75	10,808.21	29,294.00
4.572 A	3.048	17,835.09	11,511.01	30,787.07
3.048 A	1.524	18,767.17	12,287.22	32,407.97
1.524 A	0.000	19,778.31	13,144.10	34,166.05
0.000 A	-0.915	8,872.04	4,208.32	15,337.25
-0.915 A	-1.829	9,109.51	4,343.64	15,752.49
-1.829 A	-2.744	9,359.89	4,487.64	16,189.90
-2.744 A	-3.658	9,623.70	4,640.76	16,650.42
-3.658 A	-4.572	20,984.60	16,815.95	36,174.47
-4.572 A	-5.486	22,206.50	18,119.59	38,319.03
-5.486 A	-6.400	23,661.97	19,707.40	40,870.91
-6.400 A	-7.314	25,376.48	21,624.71	43,875.43
-7.314 A	-8.228	27,527.37	26,325.87	47,587.55
-8.228 A	-9.142	28,049.86	26,831.72	48,544.30
-9.142 A	-10.056	29,174.98	27,923.67	50,557.34
-10.056 A	-10.970	30,951.72	29,651.06	53,715.43

CONTRAVIENTOS

TABLA 5. II COEF. DE ARRASTRE CONSTANTE

PROFUNDIDAD	FUERZA X	FUERZA Z
-3.658 A -6.325	3960.10	-2708.10
-6.325 A -8.992	4207.17	-2877.40
-8.992 A -11.659	4497.30	-3176.13
-11.659 A -14.326	4835.24	-3307.54
-14.326 A -18.495	8073.76	-4160.45
-18.495 A -22.663	8278.69	-4267.38
-22.663 A -26.832	8660.62	-4465.53
-26.832 A -31.000	9234.42	-4762.57

TABLA 5.III COEF. DE ARRASTRE CONSTANTE SIN CREC. MARINO

PROFUNDIDAD	FUERZA X	FUERZA Z
-3.658 A -6.325	1891.52	-1295.37
-6.325 A -8.992	2034.49	-1393.59
-8.992 A -11.659	2203.20	-1509.40
-11.659 A -14.326	2401.30	-1645.30
-14.326 A -18.495	4809.91	-2478.84
-18.495 A -22.663	4971.27	-2563.12
-22.663 A -26.832	5266.61	-2716.86
-26.832 A -31.000	5712.23	-2947.86

TABLA 5.IV COEF. DE ARRASTRE CONSTANTE CON CREC. MARINO

PROFUNDIDAD	FUERZA X	FUERZA Z
-3.658 A -6.325	6630.42	-4531.77
-6.325 A -8.992	7037.33	-4810.23
-8.992 A -11.659	7517.18	-4810.23
-11.659 A -14.326	8078.00	-5522.15
-14.326 A -18.495	13734.74	-7077.10
-18.495 A -22.663	14060.17	-7246.12
-22.663 A -26.832	14688.29	-7571.11
-26.832 A -31.000	15644.61	-8065.23

TABLA 5.V			
MIEMBRO	CONSTANTE	FUERZA EJE S/CREC. MAR	Z C/CREC. MAR
25	156.79	156.79	156.79
26	156.79	156.79	156.79

TABLA 5.VI			
MIEMBRO	CONSTANTE	FUERZA EJE S/CREC. MAR	X C/CREC. MAR
29	1854.83	3107.90	2887.27
30	1854.83	3107.90	2887.27

FIG. 5.9 PIERNA PRINCIPAL

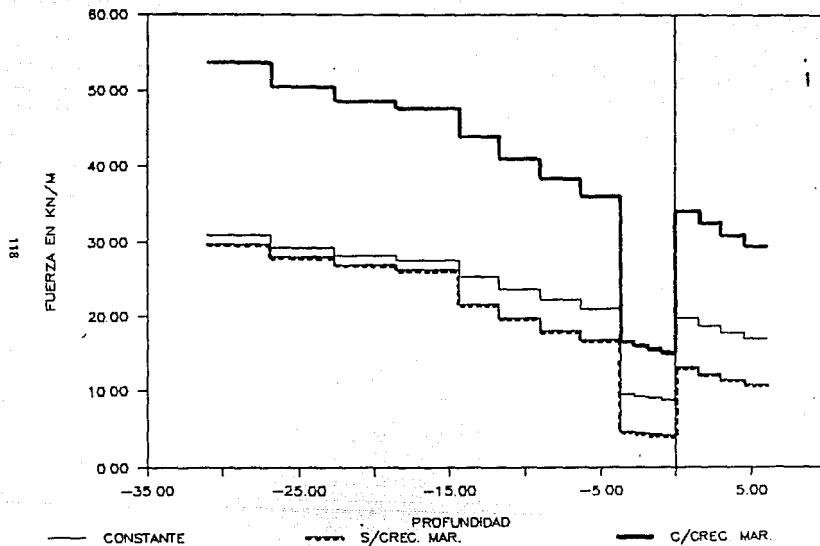


FIG. 5.10 TRABE EJE Y

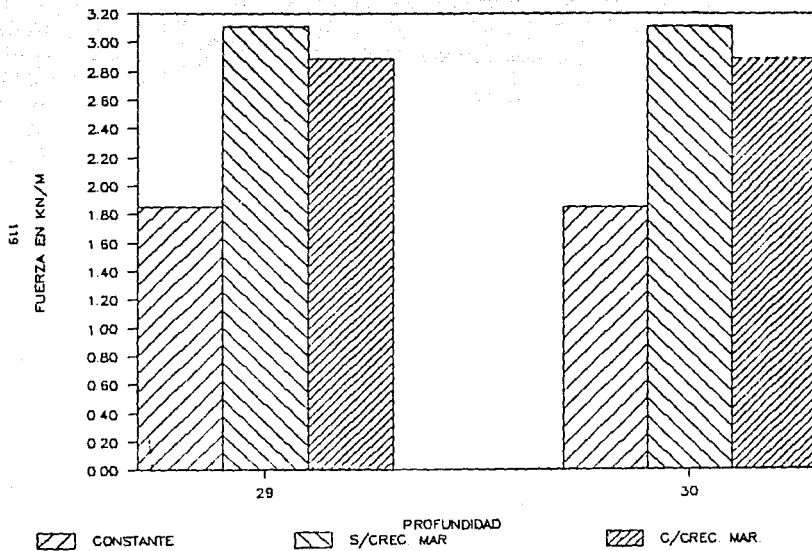


FIG. 5.11 TRABE EJE X .

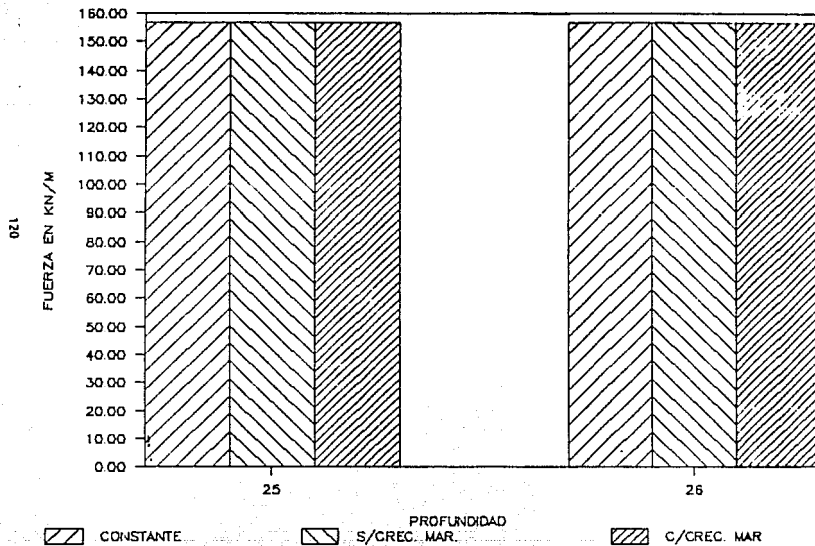


FIG. 5.12 CONTRAVIENTO EJE Z

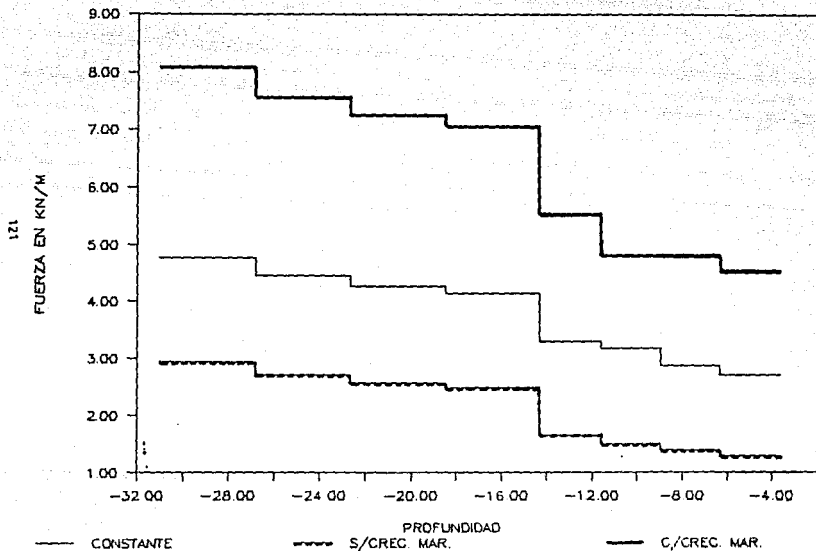
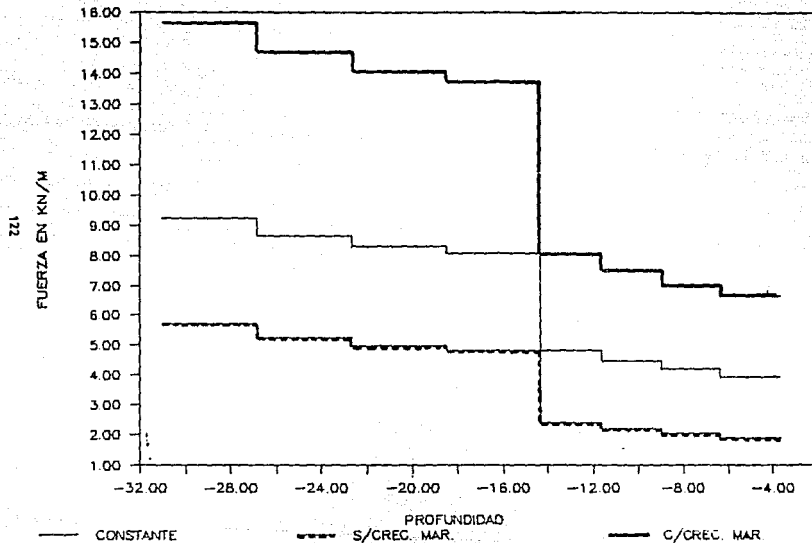


FIGURA 5.13 CONTRAVIENTO EJE X



CONCLUSIONES

1. Para las características que existen en los campos petroleros ubicados en la Sonda de Campeche, zona de aguas someras a intermedias, de baja sismicidad, el mejor tipo de estructura costa afuera para llevar a cabo la explotación de los mismos son las plataformas fijas convencionales de acero. Esto se debe a que la tecnología empleada en ellas ha sido probada durante muchos años, por lo que son confiables; además, en México existe la capacidad para diseñar y construir este tipo de plataformas que representan una alternativa económica al no pagar tecnología al extranjero.
2. El microcomputador es una herramienta de trabajo muy difundida y cualquier ingeniero puede efectuar un análisis de la fuerza de oleaje, sin embargo, es importante recalcar que los resultados obtenidos por este medio deben ser revisados e interpretados por una persona con experiencia en el tema, toda vez que se pueden presentar errores en los resultados por no considerar las limitaciones de los programas que se empleen.
3. Existen diversas teorías para obtener la fuerza de oleaje en una estructura, pero no todas son aplicables a todos los casos, siendo importante conocer el rango de aplicación de cada una de ellas. Es por esto que al efectuar un análisis de la fuerza de oleaje se debe verificar que la plataforma marina que analizada quede dentro de aplicabilidad de la teoría que se utilice.
4. Para predecir los efectos que tienen las olas sobre una plataforma marina es necesario hacer uso de una ecuación empírica (Ecuación de Morison) postulada con base en experimentos, no siendo posible considerar totalmente exactos los resultados que se obtengan de un análisis de fuerza de oleaje en el que se utilice dicha ecuación.
5. Al realizar el análisis de una plataforma marina es conveniente asumir la consideración de que el Coeficiente de Arrastre varía para cada elemento, ya que ésta suposición es más real que suponerlo

constante para toda la estructura.

La diferencia entre estas dos consideraciones es importante ya que el Coeficiente de Arrastre influye de manera notable en el resultado de la Fuerza de Oleaje que arroje el análisis de la plataforma.

6. En base al análisis comparativo efectuado en esta tesis se verifica que el crecimiento marino que se desarrolla sobre cada elemento de la estructura es un factor importante en la fuerza de oleaje, ya que al tomarlo en cuenta en el análisis de una plataforma marina, la fuerza de oleaje toma un valor mayor al que se obtendría si no se le considera. Es por esto recomendable hacer estudios del Coeficiente Marino que existe en las plataformas instaladas en la Sonda de Campeche, para tener el valor real del espesor del coeficiente y aplicar este valor en los análisis de la Fuerza de Oleaje.

7. Recomendaciones

Debido a que el crecimiento marino es un factor que incide de manera importante en la magnitud de la fuerza de oleaje, se recomienda realizar un estudio más profundo del mismo en las plataformas mexicanas ubicadas en la Sonda de Campeche.

La fuerza de oleaje es una carga cíclica durante la vida de una plataforma, lo que origina esfuerzos por fatiga en la estructura. Este concepto no ha sido estudiado al detalle en nuestro país, por lo que se sugiere investigar hasta que punto puede ser importante la fatiga en el diseño de una plataforma marina.

REFERENCIAS

- 1 CIRIA . Dynamics of Marine Structures: Method of calculation the dynamic response of fixed structures subject to wave and current action
CIRIA Underwater Engineering Group
Londres, Inglaterra 1977
- 2 Sarpkaya, Turgut e Isaacson, Michael. Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures
Van Nostrand Reinhold Company
N.Y., U.S.A. 1981
- 3 Mc Cormick, Michael E. Ocean Engineering Wave Mechanics
John Wiley and Sons
U.S.A. 1973
- 4 Brown and Root Inc. Advanced Engineering Training Program Manual Vol. 2
Brown and Root Inc.
U.S.A. 1985
- 5 Det. Norske Veritas . Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures
Det Norske Veritas
Noruega 1977 (Reimpresión con correcciones 1981)
- 6 Det. Norske Veritas . Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures
Apendice B
Det Norske Veritas
Noruega 1977 (Reimpresión con correcciones 1982)
- 7 API - Recommended Practice for Planning, Designing and Construction Fixed Offshore Platforms.
American Petroleum Institute
U.S.A. October 1984
- 8 Graff, W.J. Introduction to Offshore Structures
Gulf Publishing Company
U.S.A. 1981
- 9 Catalog of New Technical Ideas
Ocean Industry
Gulf Publishing Company
Houston, U.S.A. Diciembre 1984, Vol. 19, No. 12

10. Triantafyllou, M. y Chryssostomidis, C.
Environmental Description, Force, Prediction
and Statistics for Design Applications in
Offshore Engineering
MIT
Massachusetts, U.S.A. Junio 1980
11. Granell C. Enrique y Silva B. Jorge : Análisis
Sísmico Dinámico de una Plataforma
Marina en 150 metros de Profundidad de Agua.
Memorias del V Congreso Nacional de Ingeniería
Estructural (30 Abril - 3 de Marzo de 1986)
Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural
México 1986
12. Granell Enrique y Valle Oscar : Análisis Dinámico de
Estructuras para Plataformas Marinas
Revista de la Sociedad Mexicana de Ingeniería
Sísmica, Número 30
México, Agosto 1983
13. Innovative Concepts for Offshore Operation
Revista Ocean Industry
Gulf Publishing Company
Houston, U.S.A. Abril 1984, Vol. 19 No. 4
14. Fixed Offshore Platform Under Construction and Planned
Revista Ocean Industry
Gulf Publishing Company
Houston, U.S.A. Marzo 1984, Vol. 19 No. 3
15. Ten Tension Leg Platform Designs
Revista Ocean Industry
Gulf Publishing Company
Houston, U.S.A. Mayo 1983, Vol. 18 No. 5
16. Novel Construction Concepts for Deepwater Platform
Revista Ocean Industry
Gulf Publishing Company
Houston, U.S.A. Abril 1983, Vol. 18 No. 4
17. Exxon Guyed Tower Installed in 1,000 ft. Water
Revista Ocean Industry
Gulf Publishing Company
Houston, U.S.A. Julio 1983, Vol. 18 No. 7