



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Tesis profesional:

“CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL ANÁLISIS Y  
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS DE  
PERFORACIÓN FIJAS EN SITIO TIPO OCTÁPODO EN LA  
SONDA DE CAMPECHE”

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

*Presenta:*

Blanca Anilú Pichardo Álvarez

*Asesor:*

Doctor en Estructuras Guillermo Martínez Ruíz

Morelia, Michoacán Octubre del 2013



## I.RESUMEN

La presente tesis tiene por objeto mostrar los aspectos generales del proceso de la ingeniería costa fuera en su fase operativa (en sitio), para Plataformas Marinas de perforación fijas de ocho patas a instalarse en la Sonda de Campeche. Se mencionarán en el capítulo I los distintos tipos de plataformas marinas que se han diseñado, fabricado e instalado en la Sonda de Campeche bajo la versión tipo octápodo. Esta categorización es la señalada en la norma de referencia **NRF-003-PEMEX-2007** con el objeto de que se identifiquen y visualicen cada uno de los componentes estructurales que conforman una plataforma marina fija tipo octápodo. Se tratará de manera cualitativa la modelación estructural de cada uno de los componentes. De relevancia será la descripción de las cargas a las que será sometida la estructura en su fase operativa, así como los criterios de análisis y dimensionamiento usuales para esta zona dentro de la república mexicana.

## II. TABLA DE CONTENIDO

<b>I. RESUMEN</b> .....	<b>0</b>
<b>II. TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>2</b>
<b>III. INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>4</b>
<b>IV. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>9</b>
<b>DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS TIPO OCTÁPODO.</b>	
1.1 Plataforma de perforación.....	11
1.2. Plataforma de producción. ....	12
1.3 Plataforma de enlace.....	13
1.4. Plataforma habitacional. ....	14
1.5 Plataforma de Rebombeo.....	14
1.6. Plataforma de compresión de gas. ....	15
1.7. Plataforma de inyección de agua. ....	16
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>17</b>
<b>DESCRIPCIÓN PARTICULAR DE PLATAFORMA MARINA FIJA TIPO OCTAPODO.</b>	
2.1 Superestructura. ....	19
2.2. Subestructura.....	22
2.3. Cimentación. ....	36
2.3.1. Sistema Suelo-Pilote .....	38
2.3.2. Sistema Subestructura – Pilote.....	40
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>43</b>
<b>DESCRIPCIÓN DE LAS ACCIONES DE DISEÑO.</b>	
3.1. Acciones verticales. ....	44
3.2. Acciones ambientales.....	56
3.2.1. Fuerzas de oleaje. ....	57
3.2.2. Mareas.....	59

3.2.3. Corriente marina.....	59
3.2.4. Viento. ....	59
3.3. Acciones accidentales.....	60
<b>3.4. Condiciones de carga.....</b>	<b>63</b>
<b>3.5. Combinación de carga .....</b>	<b>65</b>
<b><i>CAPÍTULO 4 .....</i></b>	<b><i>68</i></b>
<b><i>DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS.</i></b>	
4.1. Análisis para trabajo en sitio.....	69
4.2. Análisis de operación y de tormenta .....	70
4.3. Análisis dinámico debido al oleaje. ....	73
4.4. Análisis de fatiga. ....	78
4.5. Análisis sísmico. ....	81
<b><i>CAPÍTULO 5 .....</i></b>	<b><i>84</i></b>
<b><i>REQUISITOS DE DIMENSIONAMIENTO PARA PLATAFORMAS MARINAS DE PERFORACIÓN.</i></b>	
5.1. Dimensionamiento de los pilotes.....	85
5.2. Dimensionamiento de la subestructura .....	90
5.3. Dimensionamiento de la superestructura.....	93
<b><i>CONCLUSIONES .....</i></b>	<b><i>95</i></b>
<b><i>REFERENCIAS.....</i></b>	<b><i>99</i></b>
<b><i>ANEXO A .....</i></b>	<b><i>101</i></b>



## IV.INTRODUCCIÓN



La nacionalización de la industria petrolera del país en el año de 1938 no le otorgó de inmediato su total independencia, pues el país necesitaba desarrollar la tecnología y conocimientos técnicos que poseían las empresas extranjeras.

A fin de reducir esta dependencia los técnicos mexicanos le hacen frente a esta responsabilidad destacando la labor del *ingeniero civil*, con su colaboración para la generación de la documentación técnica de ingeniería de diseño de las instalaciones petroleras, necesarias para realizar las actividades de extracción del crudo y gas natural.

La perforación dio inicio con plataformas de madera erigidas en el agua con poca profundidad cuando en 1922 se descubrió petróleo bajo las aguas del Lago Maracaibo, Venezuela. Las primeras plataformas se montaron sobre torres arriba de pilotes de madera de árbol ciprés. La perforación marina en el Golfo de México empezó en los años treinta con pozos puestos en los pantanos de Louisiana, se usaron plataformas de maderay se dragaron canales para que las barcazas del suministro pudieran alcanzar los sitios de perforación.

En México la explotación de yacimientos de hidrocarburos costa fuera inicia en 1958 con la instalación de plataformas fijas de acero frente a la Barra de Santa Ana, Tabasco. En 1975 se lleva a cabo la perforación del primer pozo exploratorio denominado Chac-1 a 80 Km al norte de Carmen, Campeche. La perforación exploratoria así como los estudios geofísicos y la perforación de los pozos Akal y Nohoch permiten confirmar la existencia del yacimiento Cantarell, (con una extensión de 8000 km<sup>2</sup>), que fuera el mayor yacimiento marino del mundo y primer productor de crudo en el mar por muchos años, la sonda de Campeche se mantendrá como una área fundamental de los esfuerzos exploratorios y de producción de Petróleos Mexicanos ( ver figura I, ubicación de zonas de plataformas en el Golfo de México)

En 1977, con la perforación de los pozos Akal-1 y Bacab-1, se descubrieron 2 campos más. En 1980 en la sonda de Campeche se había descubierto un total de 12 campos productores.

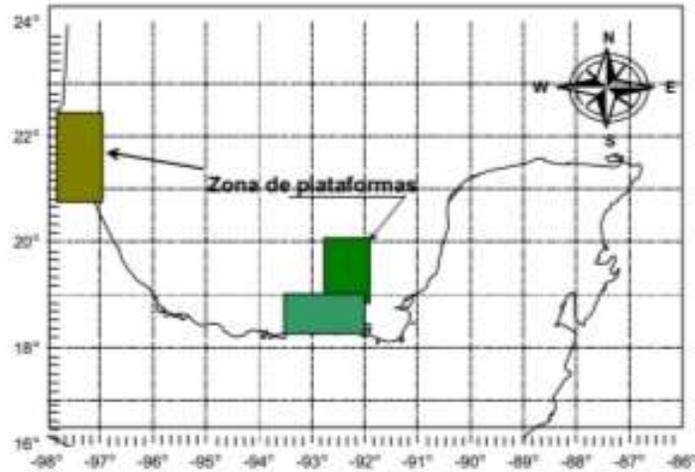


Figura I Ubicación de zonas de plataformas en el Golfo de México.

Las fechas de instalación de las plataformas marinas de la sonda de Campeche varía en forma aproximada de acuerdo a la figura II, el 23% se instaló hace más de 20 años, el 31% hace más de 15 años y únicamente menos del 36%, cuentan con menos de 18 años de operación.

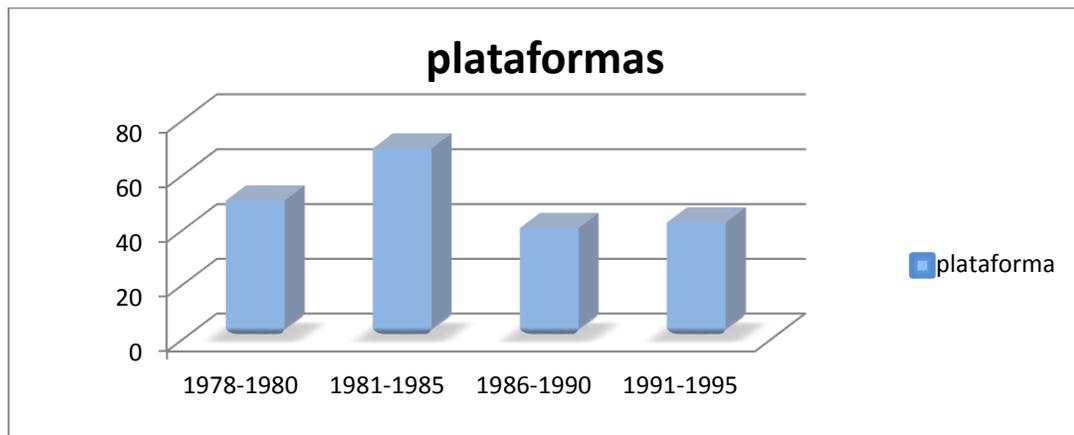


Figura II. Frecuencia y periodos de instalación de plataformas en la sonda de Campeche.

Los trabajos de ingeniería de diseño se inician en México a principios de los años ochenta, por ingenieros civiles Mexicanos participando con asesoría principalmente de empresas Norteamericanas y con ayuda de equipo y programas especializados para tal fin.

En la actualidad Petróleos Mexicanos cuenta con una infraestructura para la explotación de hidrocarburos en el Golfo de México de aproximadamente 248 plataformas marinas fijas.

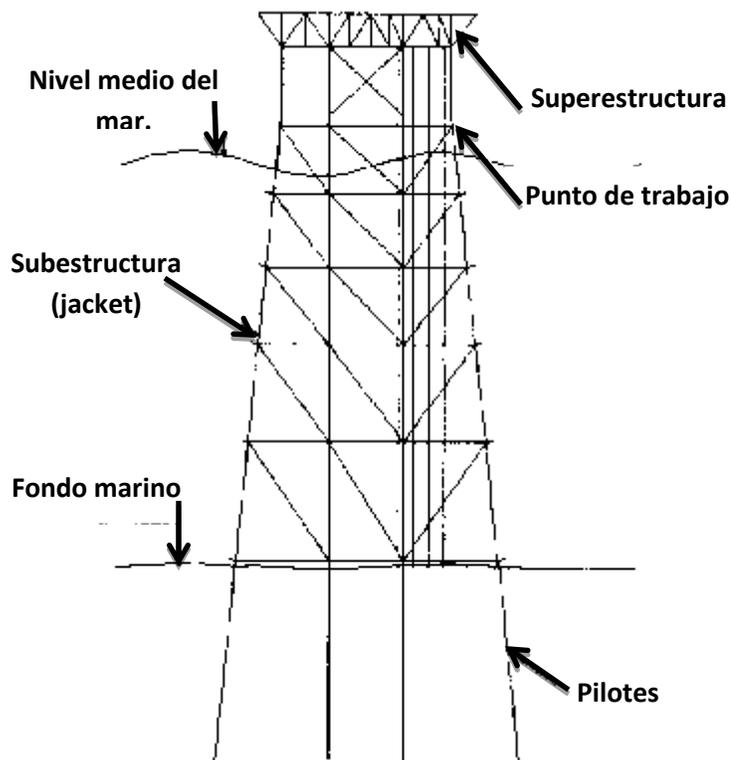
Las instalaciones marinas están sujetas a efectos ambientales extremos y a prácticas de operación propias de la zona particular de interés, por lo que deben ser diseñadas o evaluadas de acuerdo a normas y estándares que reflejen estas características locales, así como las condiciones económicas propias del país. Como resultado de extensivos estudios sobre el peligro ambiental, el riesgo y la confiabilidad estructural de plataformas que se han realizado para el Golfo de México, se establece una normatividad propia para el diseño, construcción, instalación, inspección, mantenimiento y evaluación de plataformas marinas fijas de las regiones Marina Noreste, Marina Suroeste y Norte, de Petróleos Mexicano Exploración y Producción, teniendo independencia para la realización de tales actividades por profesionistas nacionales, no obstante que persiste aun la dependencia tecnológica expresada en códigos, especificaciones, programas y equipo especializado para el diseño.

## **CAPÍTULO 1**

### **DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS TIPO OCTÁPODO.**



Una plataforma petrolera es una estructura de grandes dimensiones cuya función es extraer petróleo y gas natural de los yacimientos del lecho marino que luego serán trasladados hacia la costa. También sirven como vivienda de los trabajadores que operan en ella. En este trabajo se tomarán en cuenta especialmente las plataformas marinas fijas de ocho patas, (figura 1.1.)



*Figura 1. 1Partes de una plataforma fija tipo octápodo*

A continuación se describe la función específica y característica de cada uno de los diferentes tipos de plataformas fijas tipo octápodo ubicadas en la Sonda de Campeche: Perforación, Producción, Enlace, Habitacional, Rebombeo, Compresión de gas e Inyección de agua.

### **1.1 Plataforma de perforación.**

La plataforma de perforación (figura 1.2) es la encargada de llevar a cabo la perforación de los yacimientos, para lo cual se requiere de un equipo de perforación ubicado en el nivel superior generalmente a una elevación de (+) 25.500 m sobre NMM (nivel medio del mar) esta altura definida por las dimensiones de los paquetes para la perforación, siendo regularmente del mismo tamaño todos los paquetes para las plataformas fijas de 8 piernas, el equipo está conformado por un paquete de lodos, paquete e líquidos, cuarto de máquinas, paquete habitacional, torre de perforación, paquete de solos y un nivel de servicio ubicado en la elevación (+) 19.100 m sobre NMM como mínima, este nivel definido por la altura máxima de ola, Las plataformas de perforación constan de 12 conductores a base de perfiles tubulares circulares de 30 pulgadas de diámetro los cuales están hincados debajo del lecho marino y son necesarios para protección de las tuberías por las cuales se extraerá el crudo. Cuando el yacimiento tiene abundante producción se llegan a incluir 6 pozos más con sus respectivos conductores. Los pozos de perforación deberán estar orientados hacia el norte de la plataforma y la plataforma deben ubicarse considerando los vientos reinantes y dominantes de la sonda de Campeche, esto buscando la seguridad del personal que desempeña labores en las plataformas de perforación. Es importante mencionar que una vez instalados los paquetes de perforación, se efectúan las interconexiones de mecánica, eléctrica, tuberías, instrumentación, pintura y armado de la torre de perforación. El periodo que se requiere para terminar las interconexiones es de 30 a 45 días aproximadamente, y una vez finalizada dicha actividad la plataforma se entrega para su operación.



*Figura 1.2. Plataforma de perforación.*

### **1.2. Plataforma de producción.**

Las plataformas de producción, (Figura 1.3.) tienen como fin soportar compresores, tanques de almacenamiento, equipo de tratamiento y otros servicios adjuntos. Es básicamente una plataforma para separar aceite-gas-agua del petróleo producido, en aceite, crudo, gas natural y agua y dar un tratamiento simple a cada uno de ellos en el sitio antes de transportarlo, desecharlo o reinyectarlo en el suelo. La plataforma de producción tiene accesos por puentes de enlace tanto con la plataforma de perforación vecina, como con la plataforma de fuga de gas y protección contra incendios. El sistema o sistemas de abastecimiento de agua deben ser adecuados para los servicios y la protección contra incendios.



*Figura 1.3. Plataforma de producción.*

### **1.3 Plataforma de enlace.**

La plataforma de enlace (figura 1.4) aloja equipo para manejar la explotación de diferentes plataformas de producción, es necesario instalar plataformas de enlace ya que en ellas se concentraran los hidrocarburos para su separación y en estas se construyen cabezales de recepción y envío de aceite, crudo y gas.

A estas plataformas llegan las líneas de tuberías que recolectan el crudo con gas de las plataformas de perforación y lo distribuyen a las plataformas de producción para su procesamiento; a de más unen las líneas que recolectan el crudo con los oleoductos que los transportan a tierra. En las plataformas de enlace se cuenta con instalaciones para lanzar y recibir tapones conocidos como “diablos” que sirven para limpiar el interior de las líneas conectoras.



*Figura 1.4. Plataforma de enlace.*

#### **1.4. Plataforma habitacional.**

Las plataformas habitacionales (figura 1.5) se construyen lo suficientemente cerca de la plataforma de perforación o producción para permitir que las dos estén conectadas por un puente. Este tipo de plataformas pueden albergar de 127 a 415 personas, y cuentan con helipuerto, sistema de radiocomunicación, sistema contra incendio, potabilización de agua, planta de tratamiento de aguas negras, cocina, comedores, salas de recreación, biblioteca, plantas generadoras de energía, clínica, gimnasio, etc.



*Figura 1.5. Plataforma habitacional.*

#### **1.5 Plataforma de Rebombeo.**

La plataforma de Rebombeo (figura 1.6) se encuentra colocada en el punto medio entre la de enlace y tierra, la función específica de este tipo de plataformas es aumentar la presión y capacidad de transporte de crudo.

Generalmente dispone de turbinas de gas para accionar las bombas y generadores con capacidad de 5502 KW cada uno para satisfacer sus necesidades de energía eléctrica.



*Figura 1.6. Plataforma de Rebombero.*

### **1.6. Plataforma de compresión de gas.**

La plataforma de compresión de gas (ver figura 1.8.), es la encargada de suministrar al gas la presión necesaria para su transporte, así como su condicionamiento, por ejemplo el endulzamiento de gas amargo. El gas comprimido es enviado a las correspondientes plataformas de enlace de gas. Los módulos de compresión, permite aprovechar el 98 % del gas natural, lo que evita quemarlo a la atmósfera.



**Figura 1.8. Plataforma de compresión de gas.**

### 1.7. Plataforma de inyección de agua.

La plataforma de inyección de agua (ver figura I.9.) tienen como tarea perforar pozos para inyectar agua presurizada a los estratos productores de crudo para así incrementar el rendimiento de los pozos. Estas plataformas tienen cubiertas con capacidad prácticamente

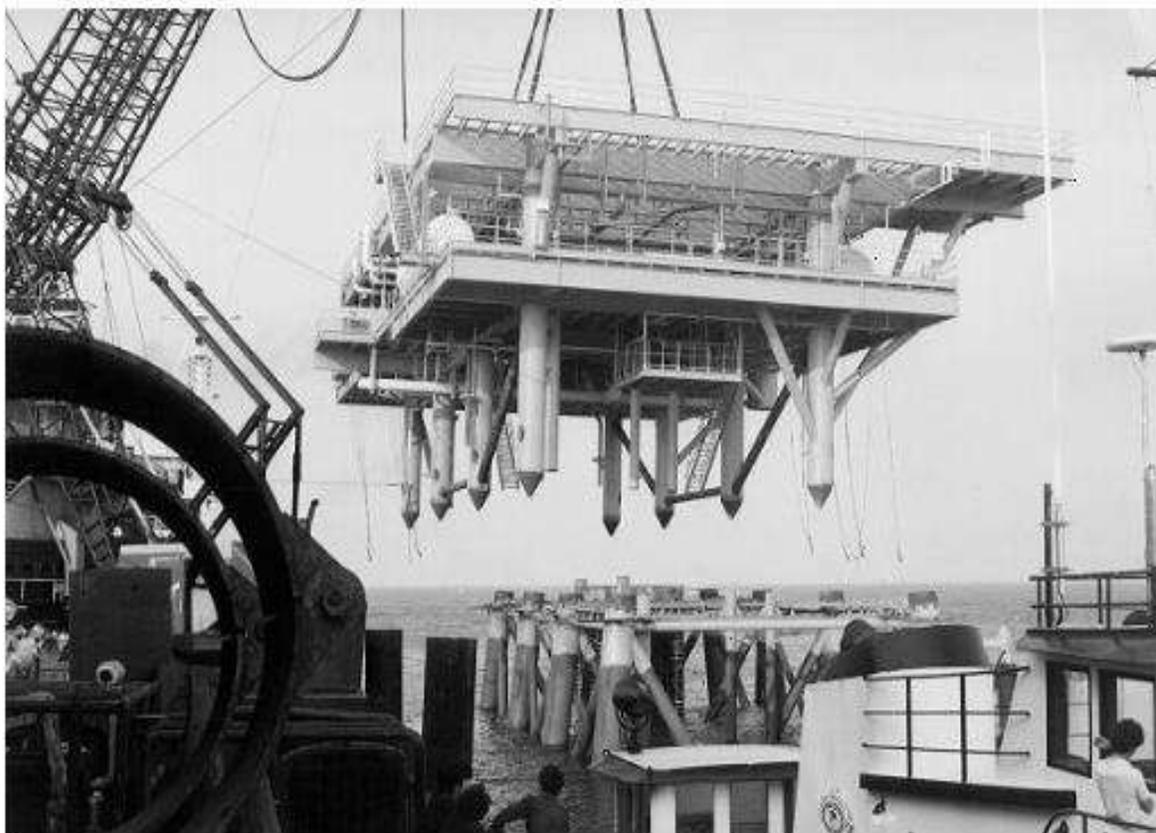
Idénticas a las plataformas de perforación.



Figura1.9. Plataforma de inyección de agua.

**CAPITULO 2**

**DESCRIPCIÓN PARTICULAR DE PLATAFORMA MARINA FIJA TIPO OCTAPODO.**



Una plataforma marina está compuesta por tres partes estructurales principales: superestructura, subestructura y Cimentación como se muestra en la figura 2.1.

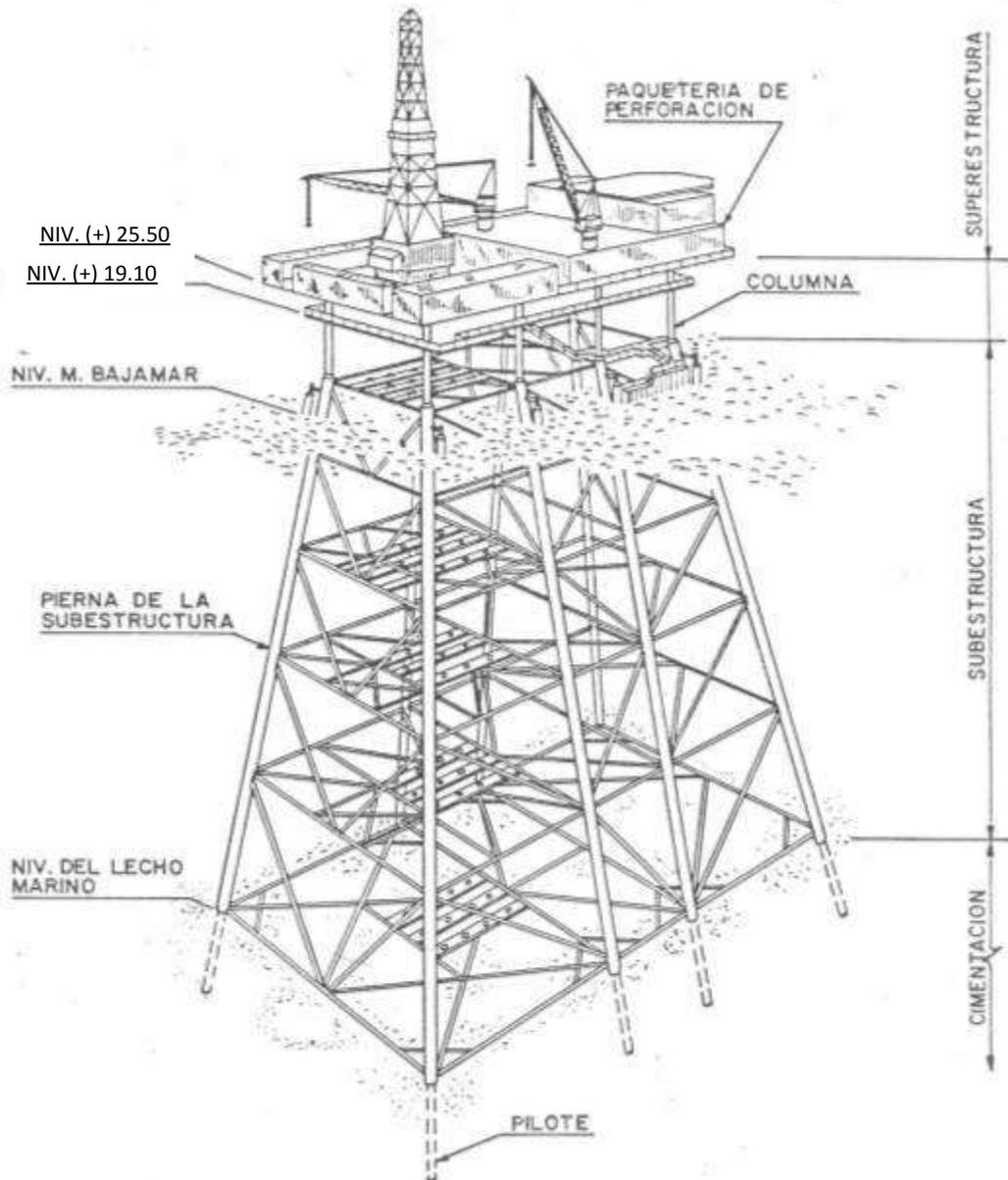


FIGURA 2.1. ESTRUCTURA DE UNA PLATAFORMA MARINA

## 2.1 Superestructura.

La superestructura también llamada Deck, es la parte superior de la plataforma y en la cual se instala el equipo de operación ver figuras 2.2. y 2.3. Está formada por marcos rígidos a base de columnas de sección tubular circular las cuales se encuentran apoyadas sobre extremos superiores de los pilotes; e interconectadas mediante traveses de sección **I** fabricadas de placas, a base de acero al carbón ASTM-36 regular ( $F_y = 36$  ksi): en traveses transversales longitudinales, puntales, pedestales de grúa, columnas interiores etc. Y en Ocasiones se emplea ASTM-537 Clase 1 ( $F_y = 50$  ksi): en columnas de esquina en algunas ocasiones.

La superestructura cuenta con dos sistemas de piso o cubiertas. Los sistemas de piso están formados por largueros de sección **I**, patín rectangular (**W** o **WF**) rolados en caliente, sobre los que se apoya rejilla de soleras dentadas, placas antiderrapante o madera tratada con retardante o inhibidor de fuego, dependiendo del tipo de trabajo y operación del equipo que contengan.

La primera cubierta se encuentra en elevación (+)19.100 m con respecto al nivel medio del mar, bajo las consideraciones de que el equipo que aloja se mantiene por arriba de la cresta de una ola con periodo de retorno de 100 años. La elevación de la segunda cubierta se establece en función de la altura libre requerida entre cubiertas para la instalación y operación del equipo. (Manuel, 2005)

Los patines superiores del sistema de largueros se soportan lateralmente mediante elementos secundarios, los cuales pueden ser sección canal u otra de tipo ligero. Los largueros por su parte impiden el pandeo lateral de patín superior de las traveses principales en los puntos en que se conectan con ellas.

La planta estructural de la cubierta principal y cubierta inferior tienen traveses, que son elementos que sirven para dar soporte a sistemas de piso donde se apoya el equipo.

La variación de la sección transversal en traveses de esta cubierta, se obtiene al incrementar el ancho y espesor de los patines, manteniendo constante su peralte, favoreciendo el tránsito por debajo de la cubierta, de tuberías con grandes dimensiones y

peso, permitiendo su proximidad con las columnas y evitando efectos de flexión excesiva sobre las propias traves



*FIGURA 2.2. CUBIERTAS DE LA SUPERESTRUCTURA EN PATIO DE CONSTRUCCIÓN.*



*FIGURA 2.3. SUPERESTRUCTURA CON PAQUETE DE PERFORACIÓN*

La concurrencia de traves acarteladas horizontales, sobre cada columna origina la formación del anillo alrededor de ésta, que reduce notablemente los efectos locales sobre la columna durante la transmisión de elementos mecánicos en el nodo, a este elemento se le puede llamar como placa rigidizadora ver figura 2.4.



FIGURA 2.4. CONVERGENCIA DE TRABES ACARTELADAS

En la segunda cubierta las traves principalmente se conecta entre sí apoyándose sobre las columnas, esto causado por la operación de la torre de perforación, cuya base se desliza sobre los patines superiores de las traves longitudinales.

El sistema de cargas gravitacionales de esta cubierta se da por cargas concentradas sobre traves longitudinales, provenientes de paquetería de perforación y torre de perforación ver figura 2.5., de la cual su estructura es independiente de la cubierta.



Figura 2.5. Torre de perforación

Las traves correspondientes a marcos transversales sobre las cuales inciden cargas gravitacionales relativamente pequeñas, se hallan solicitadas por elementos mecánicos importantes, como resultado de los desplazamientos de la plataforma por efecto de las

fuerzas de oleaje y viento principalmente. El sistema de largueros impide el pandeo lateral en los patines superiores de estas traveses cuya sección transversal es constante.

Con lo que respecta a las columnas, su diámetro se define en función del diámetro de los pilotes el cual será determinado por el análisis y diseño, estos deberán ser compatibles. El espesor requerido en las columnas en conjunto con el diámetro determina que estos elementos no sean objeto de pandeo local. Los efectos locales por concentraciones de esfuerzos originados a partir de la incidencia de miembros sobre las columnas, son resistidos con la utilización de anillos soldados por el interior de estas o con solapas exteriores de placa rolada ver figura 2.6.



Figura 2.6. Incidencia de miembros unidos por placa rolada.

## 2.2. Subestructura.

Las plataformas empleadas en la Sonda de Campeche para explotación de hidrocarburos pertenecen a la clasificación de plataformas de acero fijas, de acuerdo (Institute, 2007).

Las características de estas plataformas son principalmente el tipo de subestructura conformada de un jacket de 8 ejes comúnmente llamadas piernas de la plataforma con un arreglo de 2x4 piernas estando interconectadas y arriostradas en y entre si, la forma de la subestructura de este tipo de plataformas es de forma piramidal la cual está definida por una

inclinación de relación 1:8 m (horizontal : vertical), esta relación se da debido a la estabilidad y mejor comportamiento que le ofrece a la subestructura, otra característica las propiedades de acero aunado a los perfiles los cuales son de sección tubular circular de diferentes diámetros los cuales dependerán de las sollicitaciones del diseño los aceros que se emplean son ASTM-36, API-5L-GB en elementos de arriostramiento, ASTM-537 Clase 1: en aproximadamente un tercio de las patas y en las uniones de arriostramientos con las piernas las cuales reciben el nombre de carretes donde habrá cargas de punzonamiento, este tipo de plataformas se construyen para yacimientos encontrados bajo tirantes de 25.0m a 80.0 m los cuales son considerados como pequeños, siendo estos los que predominan en la Sonda de Campeche; resulta ser una plataforma económica con lo que respecta costos.

El trabajo de la subestructura se realiza en combinación con los pilotes, que se hay dentro de sus piernas, a través de las cuales han sido hincados en el suelo marino; siendo conectados con las piernas de la Subestructura. De esta manera, la subestructura se apoya en los extremos superiores de los pilotes. Ver figura 2.6.



*FIGURA 2.6. UNIÓN DE LA SUPERESTRUCTURA CON EL JACKET.*

La subestructura contiene en el interior de sus piernas, placas que reciben el nombre de placas espaciadoras, que limitan la separación existente entre el diámetro interior de éstas y el diámetro exterior de los pilotes, las cuales serán encargadas de distribuir las

cargas del jacket a los pilotes causados principalmente por oleaje y corriente marina, esta distribución se dará a lo largo la longitud de las piernas de la plataforma además de que disminuye las longitudes libres de pandeo de los pilotes ver figura 2.7.

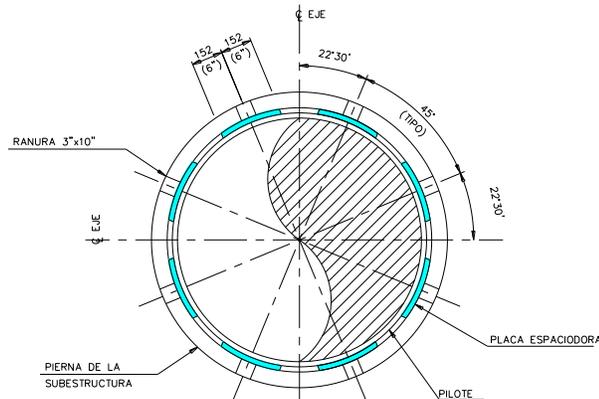


FIGURA 2.7. PLACAS ESPACIADORAS

La subestructura constituye junto con los pilotes una estructura con rigidez y estabilidad suficiente, y debe ser capaz de resistir las cargas provenientes de la superestructura, así como de las actuantes sobre ella debidas al peso propio y oleaje.

Las dimensiones de los elementos que integran a las piernas de la subestructura, se encuentran determinados por el diámetro de los pilotes que habrán de contener, así como por las diversas condiciones que habrán de resistir: construcción, embarque, transporte, lanzamiento y operación en sitio.

Alguno de los conceptos que determinan el requerimiento de elementos tubulares de sección circular en la Subestructura, son los siguientes:

Gran parte de ellos trabajan como viga-columna, siendo predominados en el efecto axial.

1. El tipo de pilotes y la sección transversal de éstos.
2. Obtención de conexiones seguras, de manufactura relativamente sencilla de gran resistencia a la fatiga.
3. Baja oposición multidireccional al movimiento del agua, originando fuerza mínima de oleaje.
4. Buen comportamiento ante fuerzas hidrostáticas.
5. Ligereza, debida a las cualidades propias de su geometría.
6. Aprovechamiento de su flotación durante las maniobras de instalación.
7. Mínima superficie mojada, en relación a su protección anticorrosiva.

### **Accesorios complementarios de la subestructura y superestructura**

#### **Accesorios de la subestructura**

Las condiciones por las que transita la estructura desde su fabricación hasta la instalación, establecen la necesidad de que cuente con accesorios que permitan y/o favorezcan su fabricación y manejo, así su instalación y operación. Cada uno de los accesorios cumple una función específica y cada uno de ellos se sujeta a un análisis y diseño estructural. A continuación se describen las características y funciones principales de los accesorios que complementan el diseño de la subestructura.

#### **Sistema de deslizamiento.**

Es un sistema constituido por dos vigas, donde cada una está compuesta de una cama de placa la cual está conectada a un arreglo de polines como se observa en la fig. 2.8., sobre las cuales se inicia el proceso de fabricación de la subestructura, las funciones principales son de este sistema de deslizamiento son:

- Proporcionar apoyo a la subestructura durante la fabricación.
- El sistema constituye un esquí para deslizamiento de la Subestructura durante la maniobra de arrastre, en las etapas de embarque y lanzamiento.
- Distribuye cargas del peso propio de la Subestructura sobre las piernas en que se apoya.

- El arreglo de madera proporciona es el material de contacto entre la estructura y las traveses sobre las que se apoya y desliza.



*FIGURA 2.8. SISTEMA DE DESLIZAMIENTO DURANTE EL LANZAMIENTO DE LA SUBESTRUCTURA*

### **Orejas de arrastre.**

Sistema formado por cuatro elementos compuestos por placas y conectados en las dos piernas en las que se apoya la Subestructura durante su fabricación, ver figura 2.9. Su función consiste en proporcionar puntos de apoyo, para tirar de la Subestructura, con la ayuda de un sistema de cables, poleas y malacates u otro medio de tracción con objeto de deslizarla.



FIGURA 2.9. OREJAS DE ARRASTRE

### **Sistema de Flotación.**

El sistema de flotación lo forman perfiles tubular de sección circular los cuales se encuentran herméticamente sellados en sus extremos por tapas (ver figura 2.10.) este sistema ayudara al jacket a mantenerse flotando en la superficie para posteriormente llevarlo a la ubicación su posicionamiento una vez ubicado en las coordenadas correspondientes.



FIGURA 2.10. SISTEMA DE FLOTACIÓN

### **Tapas de la Piernas.**

El trabajo de estas tapas es sellar las piernas es evitar que entre agua en la piernas de la plataforma y esta se mantenga en flotación, lo cual es necesario para su instalación en el sitio correspondiente.

Hay dos tipos de tapas las superiores y las inferiores, estas últimas llamadas así por que se encuentran en la parte de inferior dentro de cada una de las piernas del jaket, estas están diseñadas para que una vez que el jaket está posicionado en su sitio se proceda al hincado de pilotes, las tapas se romperán por el impacto de caída libre de la primer pieza del pilote en cada una de la piernas, rompiendo la tapa sin ningún problema.

Las tapas superiores son elementos planos constituidos por placa, colocadas en el extremo superior de cada pierna de la Subestructura, sirviendo además como base para el apoyo de tanques de flotación y provistas con válvulas utilizadas para la prueba de hermeticidad y durante la inundación de las piernas en la etapa inicial de la instalación. Ver figura 2.11.



*FIGURA 2.11. INSTALACIÓN DE TAPAS SUPERIORES*

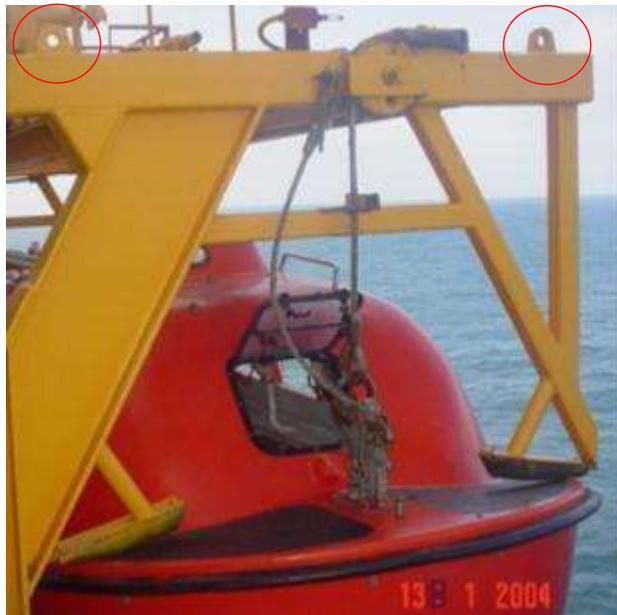
### **Sistema de Inundación.**

Consiste en válvulas de 4" de diámetro y 1/4" de vuelta, instaladas en el extremo inferior de cada una de las piernas de la Subestructura, operadas mediante una extensión que se manipula desde el extremo superior.

Permanecen cerradas durante la etapa de lanzamiento y flotación y son abiertas para permitir la inundación de las piernas durante la instalación de la subestructura, completamente esta acción con las válvulas ubicadas en las tapas superiores, que al abrirse, permiten las salidas del aire.

### **Orejas de Izaje**

La subestructura debe ser provista de elementos a partir de los cuales pueda sujetarse y manipularse con la grúa de instalación. Las orejas de izaje cumplen este objetivo, utilizándose en la etapa posterior al lanzamiento, para girar a la estructura a su posición vertical y para mantenerla suspendida en esta posición durante su acarreo has la localización de su instalación ver figura 2.13. Se colocan en el extremo superior de las piernas interiores.



*FIGURA 2.13. OREJAS DE IZAJE EN EL PESCANTE UN BOTE SALVAVIDAS.*

### **Placa Base**

Para llevar a cabo el hincado de pilotes, que constituyen la cimentación definitiva de la plataforma, es necesario que la subestructura se apoye temporalmente sobre el suelo, requiriendo para ello una cimentación a base de placas, ver figura 2.14. Que le proporcionan características de estabilidad ante condiciones de carga prevalecientes durante la instalación (acciones de oleaje y peso propio). Al concluir el hincado de pilotes y la conexión de estos con la subestructura, la placa base termina su función principal.

Los elementos principales que forman parte de la placa base, se constituyen en apoyos laterales de algunos arriostramientos de la Subestructura.



*FIGURA 2.14. PLACA BASE DE UN JACKET TIPO OCTÁPODO VISTA DURANTE SU LANZAMIENTO*

### **Defensas**

Una vez que la plataforma inicia su operación, será abastecida de insumos, mediante embarcaciones con desplazamientos promedio de 20,000 toneladas

Por lo que es necesario protegerla de posibles impactos sobre su estructura, mediante defensas provistas con amortiguadores ver figura 2.15. y 2.16., ubicadas en cada una de las piernas de la Subestructura, a pesar de que la aproximación de las embarcaciones

se halla restringida a condiciones ambientales de mar en calma altura de ola 1.5 m. en promedio.

Las defensas se integran de un elemento vertical principal, protegido con una camisa de caucho, apoyado en sus extremos sobre amortiguadores en posición horizontal. peso de la defensa es soportado mediante una cadena que deberá tensarse durante la instalación.

Las defensas de riser están compuestas de elementos verticales de acero unidos entre si ver figura 2.17., su función es proteger los risers los cuales transportan el crudo a otras plataformas y a tierra para su recolección.



FIGURA 2.15. DDEFENSA UNIDA A LA PIERNA SISTEMA DE AMORTIGUAMIENTO



FIGURA2.16. DEFENSAS PARA PROTECCIÓN DE POSIBLES IMPACTOS SOBRE LA ESTRUCTURA



FIGURA 2.16. DEFENSAS DE RISER

### **Embarcaderos.**

Los embarcaderos tienen una función similar a las defensas e incluso trabajan en combinación con ellas. Los embarcaderos ver figura 2.18. Tienen por objetivo principal el proporcionar una estructura que permita el acoderamiento de la embarcación con la plataforma, para abastecimientos de insumos, así como el embarque o desembarque del personal ver figuras 2.18 Y 2.19.

Debe de estar formado por una armadura tridimensional, sujeta por un marco principal a las piernas. Se debe emplear elementos de sección tubular y todos los extremos deben estar cerrados. Los elementos tubulares verticales frontales deben estar llenos de concretos con un  $f'c = 9,80 \text{ MPa}$  ( $100 \text{ kg/cm}^2$ ) y estar provistos de dispositivos “rubstrip” (Manuel, 2005) (tira de caucho que debe proporcionar una superficie de contacto en el atracadero, dándole protección a las embarcaciones cuando atracan, este aditamento debe prever la raspadura y del deterioro del recubrimiento anticorrosivo de miembros estructurales y embarcaciones en servicio).

Además debe contar con dos escaleras marinas, un área de maniobras cubierta por rejilla y una escalera fija o marina que permita el acceso a los pasillos de la primera planta de la subestructura. .

Las elevaciones y dimensiones de las conexiones para estos sistemas no deben interferir entre sí, ni con otros elementos estructurales, diagonales, horizontales y verticales

de arriostamiento, entre otros, con la pierna de la subestructura y/o abrazaderas del ducto ascendente.



*FIGURA 2.17. EMBARCADERO EN PLATAFORMA DE PERFORACIÓN*



*FIGURA 2.18. EMBARCADERO PARA EMBARQUE Y DESEMBARQUE DE PERSONAL E INSUMOS.*

### **Pasillos, Barandales y escaleras.**

Los pasillos (ver figura 2.20), barandales y escaleras proporcionan los conductos por los cuales el personal, tiene acceso a los diversos sitios de la plataforma, a donde llegar en forma apropiada y segura.

Las escaleras ver figura 2.21. Exteriores deben tener las dimensiones establecidas en las normas de diseño. Los barandales y escaleras exteriores deben ser de acero ASTM A36/A36M o equivalente y estar galvanizados por inmersión en caliente. La rejilla utilizada en las escaleras exteriores deben ser de acero electroforjado de barra dentada, galvanizada por inmersión en caliente y con dimensiones mínimas de 4,8 mm x 31,8 mm, según el estándar NAAM MBG 531-00, o equivalente.

Las escaleras marinas ver figura 2.22 son empleadas para llegar a zonas elevadas, como cabina de grúa, mezaninne, accesos etc. y en los cuales el espacio es reducido, deben estar diseñadas bajo la norma NRF-003-2007



*FIGURA 2.19. PASILLO DE ACCESO Y BARANDALES*



*FIGURA 2.20. ESCALERA DE RAMPA Y BARANDALES*



*FIGURA 2.21 ESCALERA MARINA CON JAULA DE PROTECCIÓN*

### **Conductores.**

Los conductores considerados como apéndices por no ser parte de la plataforma ya que no contribuye necesariamente a su rigidez estructural; si no por el contrario, en algunos casos representa cargas adicionales importantes ver figura 2.29.a 2.30. Son elementos verticales de 30" requeridos para la protección contra el oleaje de los tubos utilizados para la perforación de pozos, extendiéndose desde la cubierta inferior hasta llegar debajo del lecho marino.

La subestructura de toda plataforma de perforación está provista de una retícula formada por elementos tubulares en cada una de sus plantas de arriostamiento horizontal para proporcionar allí apoyo lateral a los conductores. Esto aunado al hecho de que los

conductores están prácticamente empotrados en el suelo, hace que la Subestructura y los conductores interactúen importantemente entre sí. Algunas veces el cortante de oleaje absorbido por los conductores permite reducir el cortante sobre los pilotes.



*FIGURA 2.22. CONDUCTORES PARA LA PROTECCIÓN DE TUBOS UTILIZADOS PARA LA PERFORACIÓN DE POZOS.*



*FIGURA 2.23. PLATAFORMA DE PERFORACIÓN CONDUCTORES DE TUBOS DE PERFORACIÓN*

### **2.3. Cimentación.**

La cimentación ver figura 2.23. Correspondiente a la plataforma fijas de acero en la Sonda de Campeche, se halla constituida por pilotes tubulares de sección circular, con punta abierta cuyas características principales se describen a continuación.

1. Cada pilote consta de dos partes, una de ellas se encuentra contenida en el suelo marino, penetrando hasta encontrar estratos de alta dureza y difícil o nula penetración. La otra parte sobresale del suelo, ubicándola en el interior de las piernas de la subestructura, a través de los cuales se extiende hasta la elevación (10.57 m) sobre el nivel medio del mar.
2. La condición anterior determina la división de pilote en dos sistemas:
  - a. Sistema suelo-pilote
  - b. Sistema subestructura-pilote

División que obedece también a las diferencias en cuanto al comportamiento del pilote y al tratamiento que se da a su diseño y análisis.

3. El pilote se integra de varios segmentos variando sus espesores, de acuerdo a la magnitud de los elementos mecánicos que actúan en él y a la variación que presentan a lo largo de su longitud. Las secciones más grandes se ubican en las proximidades del lecho marino, donde los elementos mecánicos son máximos.
4. Las secciones y perfiles que se requieren para estos elementos, será definido por el resultado del análisis y diseño, por lo general los aceros que se emplean son de carácter especial (**ASTM A-537 ó ASTM-A633**) en la zona de elementos mecánicos máximos. Para no recurrir a espesores excesivamente grandes con acero normal (**ASTM-A36**).
5. Los segmentos que conforman pilotes se conectan con soldadura de penetración completa de acuerdo con los requerimientos de API-RP2A, en base a lo dispuesto por el Código **ANSI AWS D1.1**.
6. El pilote se hinca en el suelo marino por percusión requiriendo en la punta un bisel que favorezca el corte del terreno, facilitando la penetración.



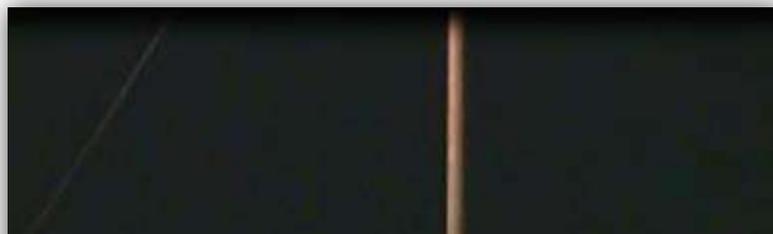
*FIGURA 2.24. PIEZAS PARA ENSAMBLADO DE PILOTES.*

### **2.3.1. Sistema Suelo-Pilote**

El sistema integrado por el suelo y los pilotes construye el sistema de apoyos de la plataforma con la cual interactúa a través del sistema Subestructura-pilotes ver figura 2.24.

El trabajo integrado por el suelo y los pilotes es de carácter no lineal, lo que origina que la determinación de su comportamiento resulte compleja y se requiera normalmente el empleo de software como podría ser el caso del SACS o SAP para su rápida solución.

Las características mecánicas del suelo en la Sonda de Campeche, dan lugar a que el sistema soporte por fricción el mayor porcentaje de las cargas axiales y la participación de la punta sea baja, a excepción de algunos sitios en donde esta puede ser fabricada en estratos arenosos resistentes. Cabe mencionar que solamente en condiciones de carga accidentales es solicitada la participación de la punta del pilote. La fricción demandada por la carga, desarrollada entre el suelo y el pilote, origina la disminución gradual de dicha carga, en función de la penetración del pilote, requiriéndose por consiguiente secciones de menor área a profundidades mayores.



*FIGURA 2.25. INTRODUCCIÓN DE LA PRIMERA SECCIÓN DEL PILOTE DEJÁNDOLO CAER POR SU PROPIO PESO PENETRANDO EL LECHO MARINO.*

El confinamiento que el suelo proporciona al pilote, impide su falla por inestabilidad, por lo que el diseño del pilote se efectúa en base a los esfuerzos permisibles para columnas cortas.

En relación a las cargas laterales, el terreno posee en general escasa capacidad en los estratos superiores, lo que provoca una mayor participación del pilote en esta zona para soportar tal requerimiento, induciendo en este últimos, momentos flexionantes de gran importancia.

A mayor profundidad, el suelo adquiere mayor capacidad de carga lateral y tomando gradualmente la carga, disminuyen los efectos flexionantes en el pilote.

La Subestructura ejerce cada uno de los pilotes, restricción al giro al nivel de la superficie del terreno, la cual se halla en función de las propiedades de la sección del pilote, así como de la rigidez de la Subestructura.

Es esta zona la que se ha establecido como la interrelación entre los dos sistemas en que se ha dividido al pilote.

### **2.3.2. Sistema Subestructura – Pilote.**

Los pilotes sobresalen del suelo marino, llegando hasta la elevación 10 m elevación obtenida de diseño considerando alturas de ola máxima en tormenta al llegar a esa altura se conecta con las piernas o columnas de la subestructura, las cuales cuentan con elementos denominados espaciadores conformados por placas que reducen la holgura entre el diámetro exterior del pilote y el diámetro interior de la pierna,

El conjunto de pilotes y Subestructura debe resistir las cargas que afectan la plataforma transmitiendo sus efectos al sistema suelo pilote al nivel del lecho marino, sitio que se considera como frontera entre ambos sistemas.

Las secciones de los pilotes (ver figuras 2.25. a 2.28.) Contenidos en las piernas o apoyos de Subestructura, se diseñan con base a la teoría de flexocompresión, para columnas esbeltas y su análisis se lleva a cabo en forma conjunta con la subestructura y la superestructura en un modelo tridimensional. Los efectos de flexión más importantes se registran en las proximidades del lecho marino y en la zona donde se verifica su conexión rígida con la Subestructura y Superestructura.

La transmisión de cargas entre la subestructura y los pilotes a través de los espaciadores, es exclusivamente de fuerzas cortantes. La acción de las placas espaciadoras se modela como un elemento que conecta al pilote con la pierna de la Subestructura, de tal manera que permite el desplazamiento axial relativo entre ambos.



*FIGURA 2.25. INTRODUCCIÓN DE PILOTES POR MEDIO DE GOLPES DEL MARTILLO HIDRÁULICO*



*FIGURA 2.26. UNIÓN DE DOS PIEZAS DE QUE CONFORMAN EL PILOTE DIFERENCIA DE DIÁMETROS PARA EL ENSAMBLE.*



*FIGURA 2.27. JUNTA DE DOS SECCIONES DEL PILOTE.*



*FIGURA 2.28. SOLDADURA DE SECCIONES DE PILOTE PARA HACER UNA SOLA PIEZA BAJO NORMAS Y SUPERVISIÓN DE CALIDAD.*

### **CAPÍTULO 3**

#### **DESCRIPCIÓN DE LAS ACCIONES DE DISEÑO**



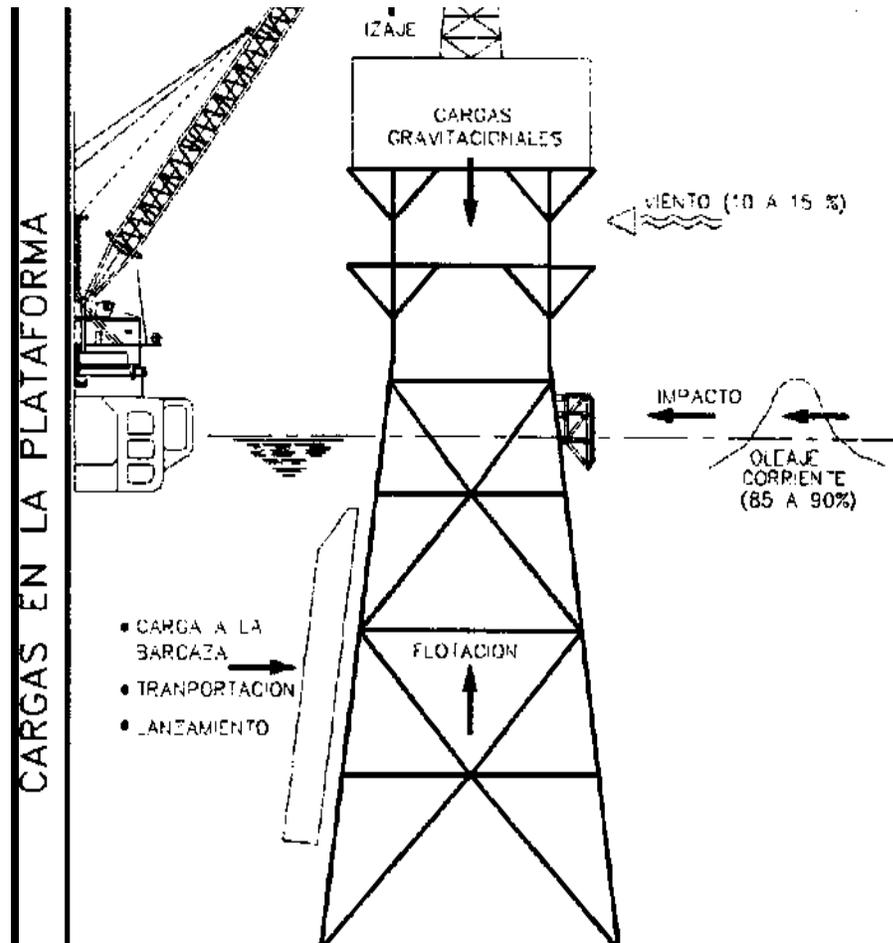


FIGURA 3.1 DESCRIPCIÓN DE CARGAS

### 3.1. Acciones verticales.

Son las cargas gravitacionales que actúan en sentido vertical y se pueden clasificar dependiendo de su permanencia.

- Cargas por flotación
- Cargas gravitacionales

Las acciones por flotación se manifiesta de la siguiente manera: Todo cuerpo sumergido en un líquido, experimenta un empuje vertical de abajo hacia arriba proporcional al peso del líquido desalojado. Por lo cual las plataformas se ven afectadas por este comportamiento hidrostático y este empuje se debe de considerar para fines de análisis y

diseño. La flotación entra de las cargas verticales ya que actúa con la misma dirección pero en sentido contrario de la gravedad.

Dentro de las cargas gravitacionales se encuentran las descritas a continuación:

-Peso propio.

Es el peso de todos los elementos estructurales que forman parte del modelo estructural.

-Carga muerta.

Es el peso estructural total (neto) de todos los componentes estructurales que no son modelados, entre los que están los accesorios de subestructura y superestructura tales como: orejas de izaje, ánodos de sacrificio, pasillo y escaleras, sumideros y camisas para bombas de succión, vigas secundarias y rejillas o placa del sistema de piso.

- Equipo de perforación.

Está compuesto por el piso de perforación, la estructura de soporte del piso de perforación, el equipo sobre piso de perforación y la torre de perforación.

- Vigas de deslizamiento.

Sistema de vigas en cajón que sirven como apoyo para el deslizamiento delo piso de perforación a los diferentes pozos, y como tanques de almacenamiento de agua potable.

- Paquetes auxiliares del equipo de perforación.

Estas cargas incluyen los pesos de los siguientes paquetes:

- Paquetes de bombas.

Incluye el peso de las bombas de lodo, los recipientes de mezclado, la estructura del paquete, las grúas del pedestal de 20 ton cada una cubierta para soporte de tuberías.

- Paquete de químicos.

Incluye el peso de los silos de almacenamiento de polvos químicos y la unidad de cementado.

- Paquete de máquinas.

Incluye el peso de generadores, el centro de control de motores, el compresor de aire, la unidad de destilación, la estructura del propio paquete y la estructura de soporte del módulo habitacional.

- Modulo habitacional incluyendo helipuerto.

Presas de lodos (activas y de reserva incluyendo equipos).

Presas de lodos, una activa de 700 barriles y otro de reserva de 500 barriles de capacidad.

- Paquete de líquidos (tanques de almacenamiento de agua y diésel).

Tanque de agua de perforación con 700 barriles y tanque de diésel de 500 barriles.

- Materiales de perforación.

En el paquete de químicos, un silo de barita con capacidad de 2 000 sacos, un silo de cemento para 2000 sacos.

-Carga viva:

Las cargas vivas son las relativas a las personas, herramientas, equipo menor, etc., que se encuentran ubicadas en las plataformas en un momento determinado.(PEMEX, 2007).

Quedan incluidos dentro del concepto de carga viva, los líquidos contenidos en recipientes y los materiales almacenados. Se deben considerar para cada caso, cual es el valor de permanecer actuando cuando se suspende su operación por mal tiempo.

Para descripción detallada de las cargas de diseño de la cubierta principal ver figura.

Ejemplos de ubicación de las cargas del paquete de perforación, pedestal de grúa y helipuerto ver figuras 3.4 a 3.18.

Tabla 3.1.Ejemplo de Cargas de diseño de la cubierta principal.

No.	DESCRIPCIÓN	DIMENCIONES (mm)	PESO VACÍO (ton)	PESO LLENO (ton)
	Paquete de maquinas	21336x10363	468.00	468.00
	Módulo Habitacional /helipuerto(1)	18897x19278	290.00	458.00
	Paquete de almacenamiento	21336x7315	150.00	490.00
	Paquete de bombas (2)	21336x7925	365.00	365.00
	Paquete de lodos	17678x3200	100.00	500.00
	Paquete de líquidos	18288x3200	80.00	426.00
	Torre de perforación		768.00	1065.00
	Pedestal de grúa(3)		31.25	82.3
PA- 1001/2	Grúa con pedestal sobre paquete de bombas (x2) (4)		34.00	74.00
	Carga máxima de barrena (5)		-	500.00
	Carga máxima de tubería de Perforación. (5)		200.00	-

**Notas:**

- (1) Considerando que el peso del bote salvavidas ha sido considerando en el paquete habitacional;
- (2) Considerando que el peso de los tanques siguientes se ha incluido en el paquete de bombas: Tanque de recuperación de cemento; Tanque de recuperación de barita;
- (3) Las cargas de la grúa colocada sobre el paquete de bombas se distribuyeron en los mismos puntos de las reacciones del paquete de bombas.
- (4) Considerando la carga máxima de la barrena ocurre en las condiciones de carga cuando la torre de perforación está a su máxima capacidad y la tubería

de perforación ocurre cuando solamente la torre está a su mínima capacidad (peso vacío).

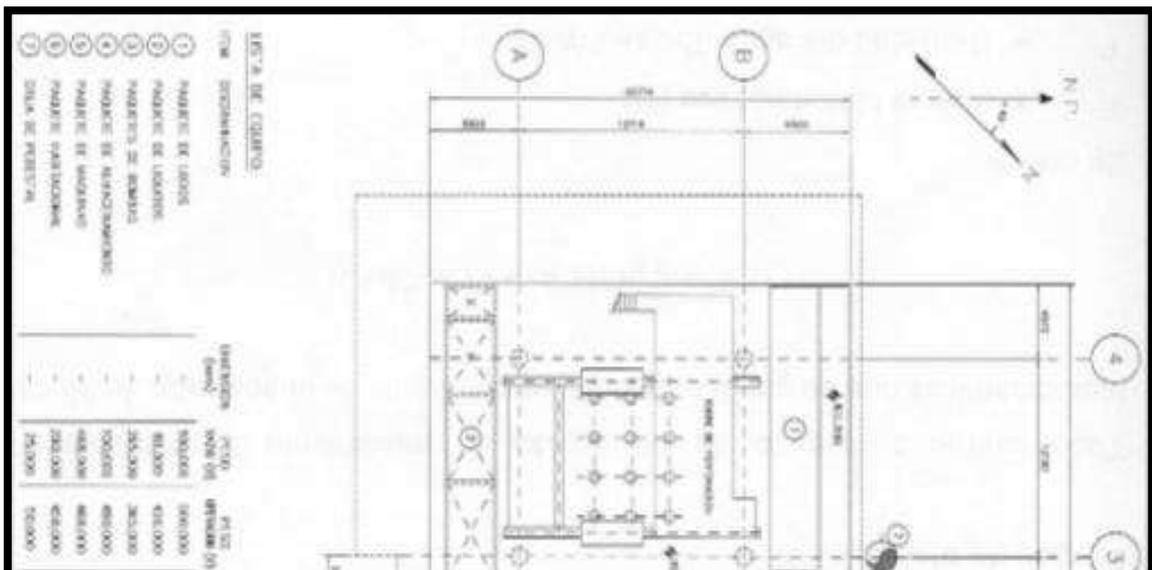


Figura3.2. *Distribución de equipo en planta superior*

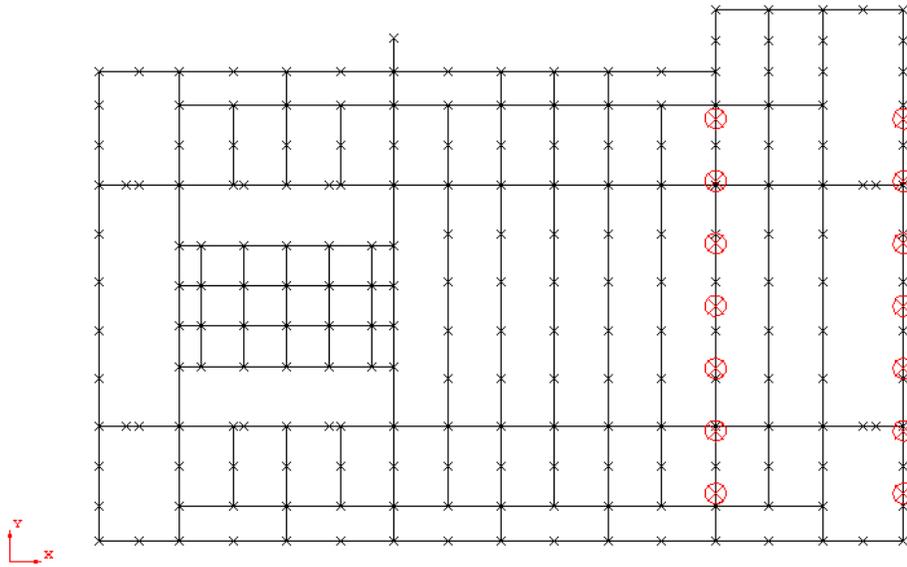


Figura 3.3. Paquete de máquinas – Aplicación de cargas cubierta superior.

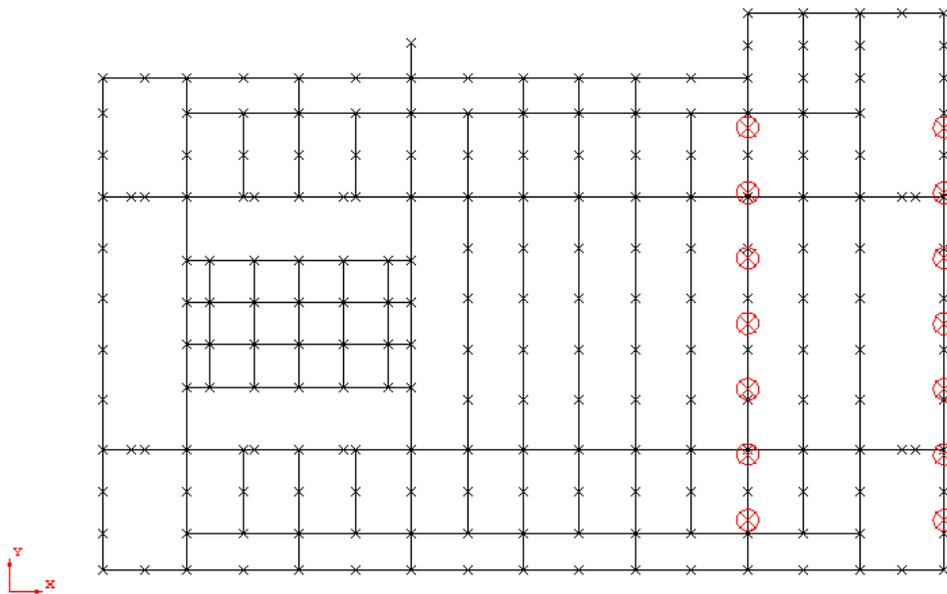


FIGURA 3.4. MÓDULO HABITACIONAL / HELIPUERTO – APLICACIÓN DE CARGAS CUBIERTA SUPERIOR

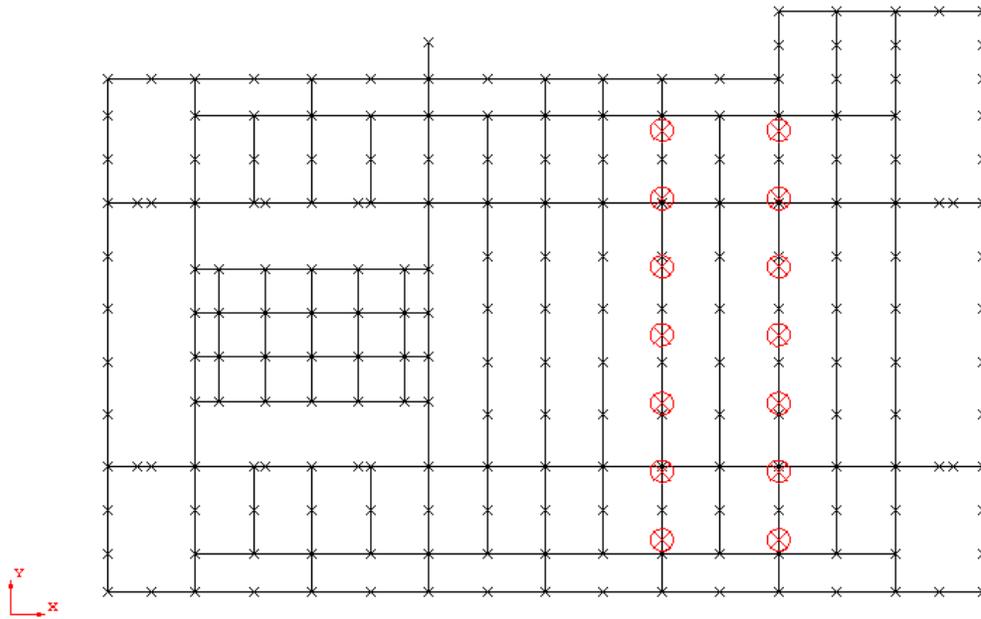


Figura 3.5. Paquete de almacenamiento – Aplicación de cargas.cubierta superior.

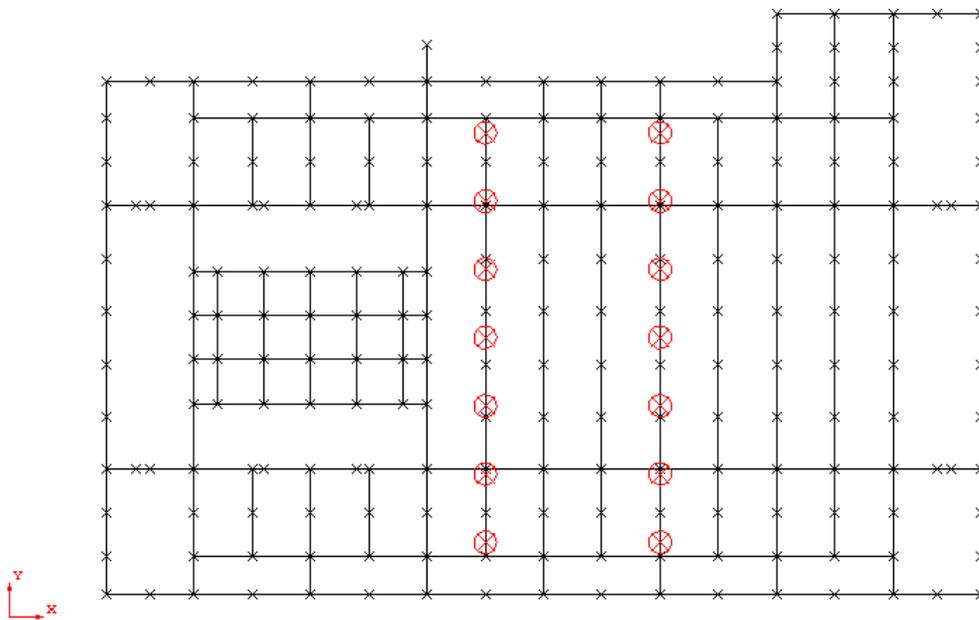


FIGURA 3.6 PAQUETE DE BOMBAS – APLICACIÓN DE CARGA CUBIERTA SUPERIOR.

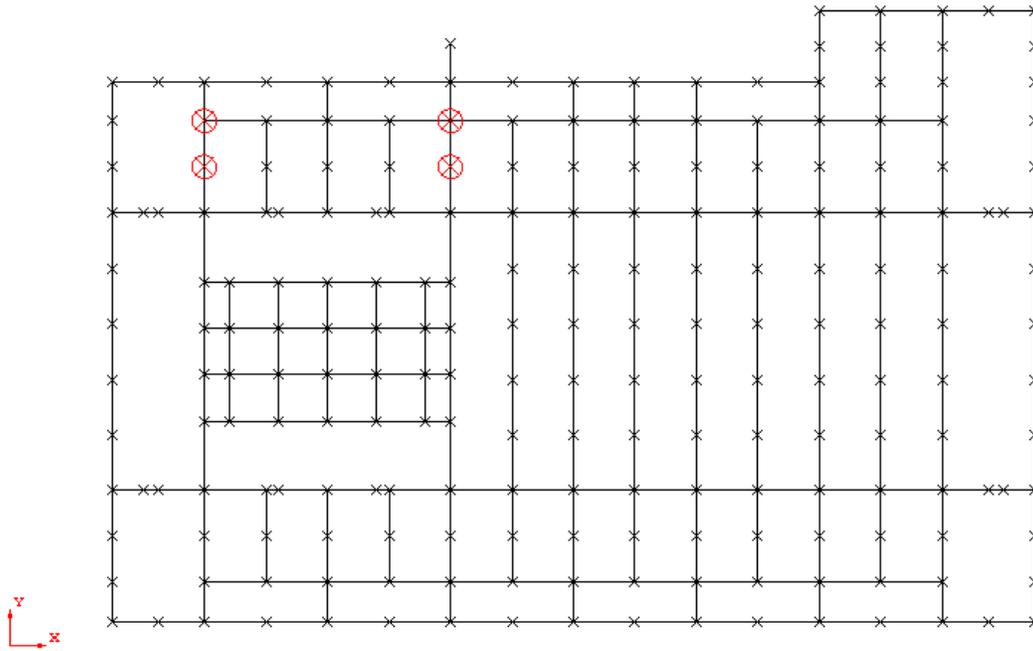


FIGURA 3.7. PAQUETE DE LODOS – APLICACIÓN DE CARGA CUBIERTA SUPERIOR.

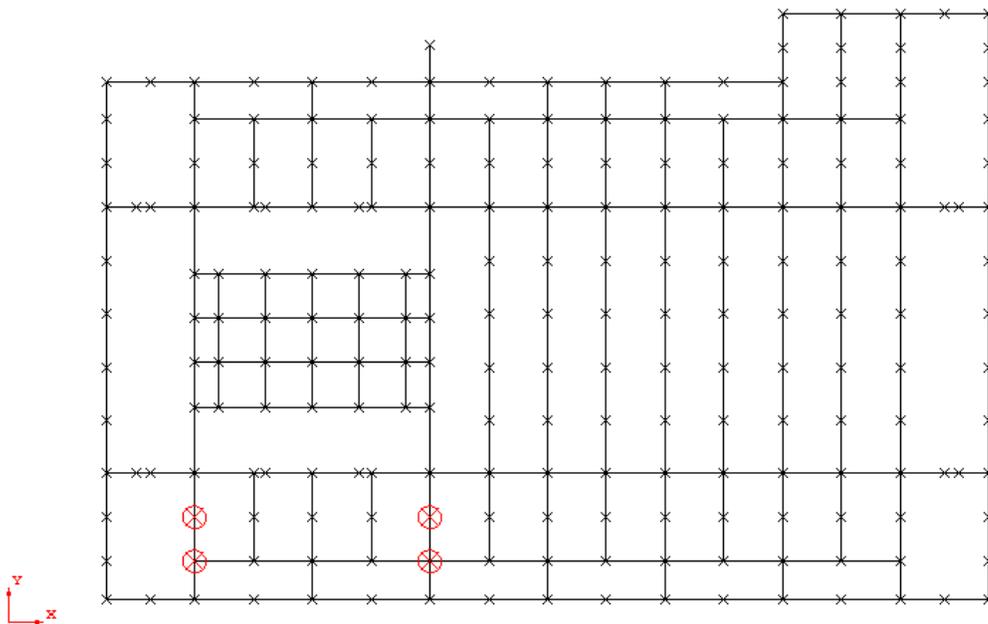


FIGURA 3.8. TANQUES DE AGUA – APLICACIÓN DE CARGAS CUBIERTA SUPERIOR

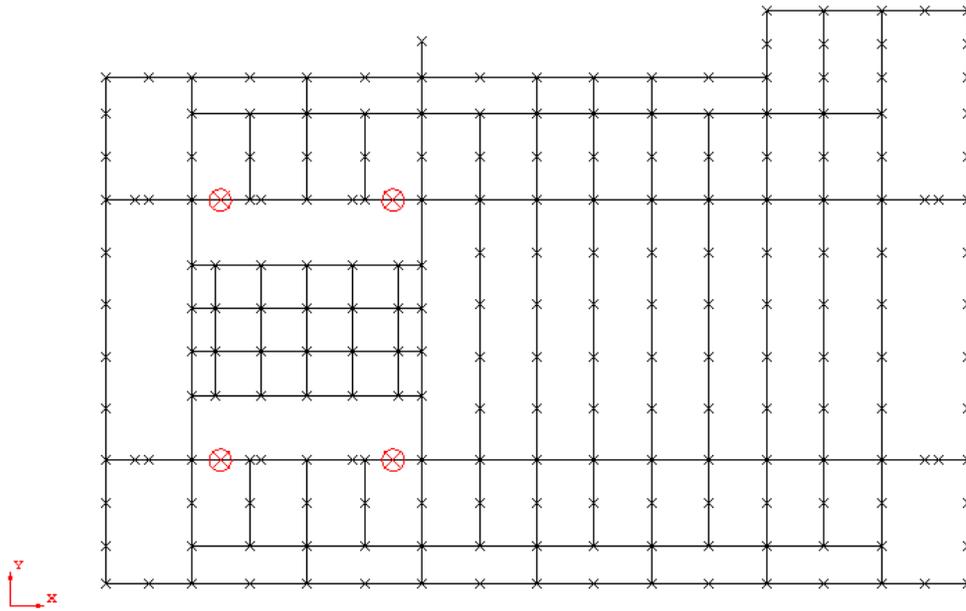


FIGURA 3.9. TORRE DE PERFORACIÓN – TUBERÍAS – APLICACIÓN DE CARGAS CUBIERTA SUPERIOR.

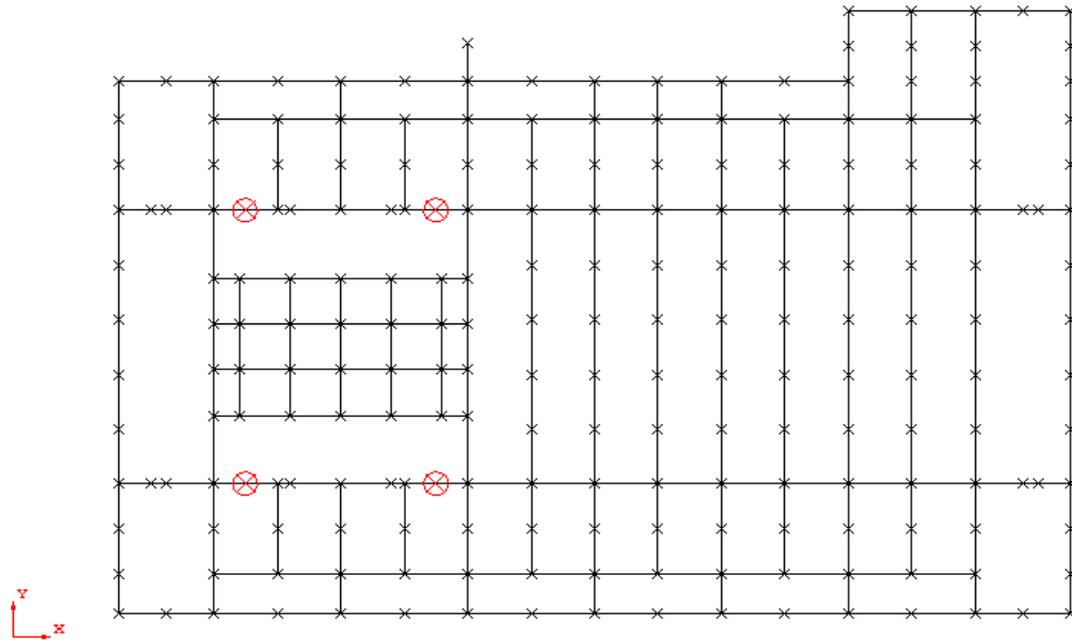


FIGURA 3.10. TORRE DE PERFORACIÓN – CARGA DE BARRENA – APLICACIÓN DE CARGA CUBIERTA SUPERIOR.

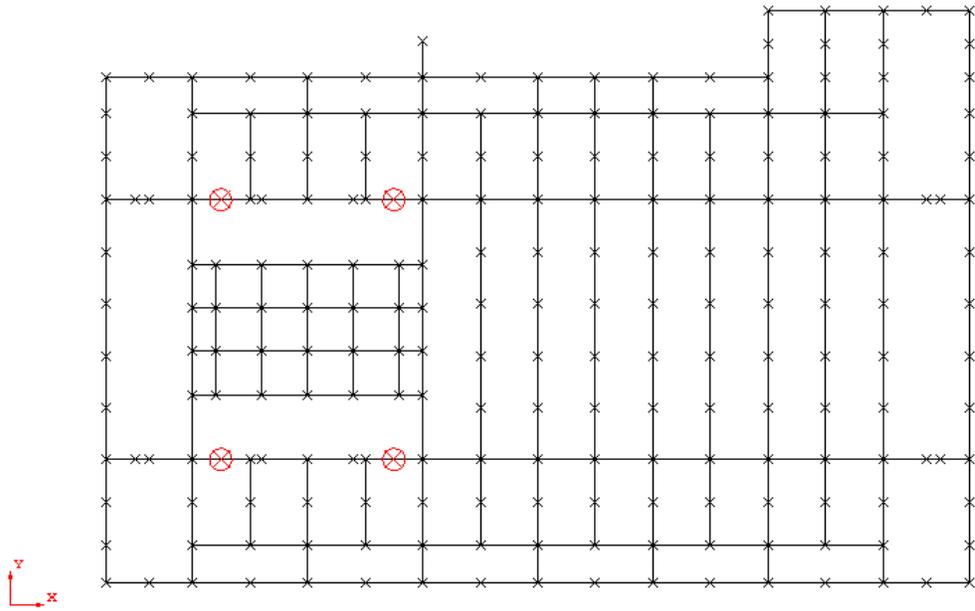


FIGURA 3.11. TORRE DE PERFORACIÓN – POSICIÓN DE CARGA 2 – APLICACIÓN DE CARGA CUBIERTA SUPERIOR.

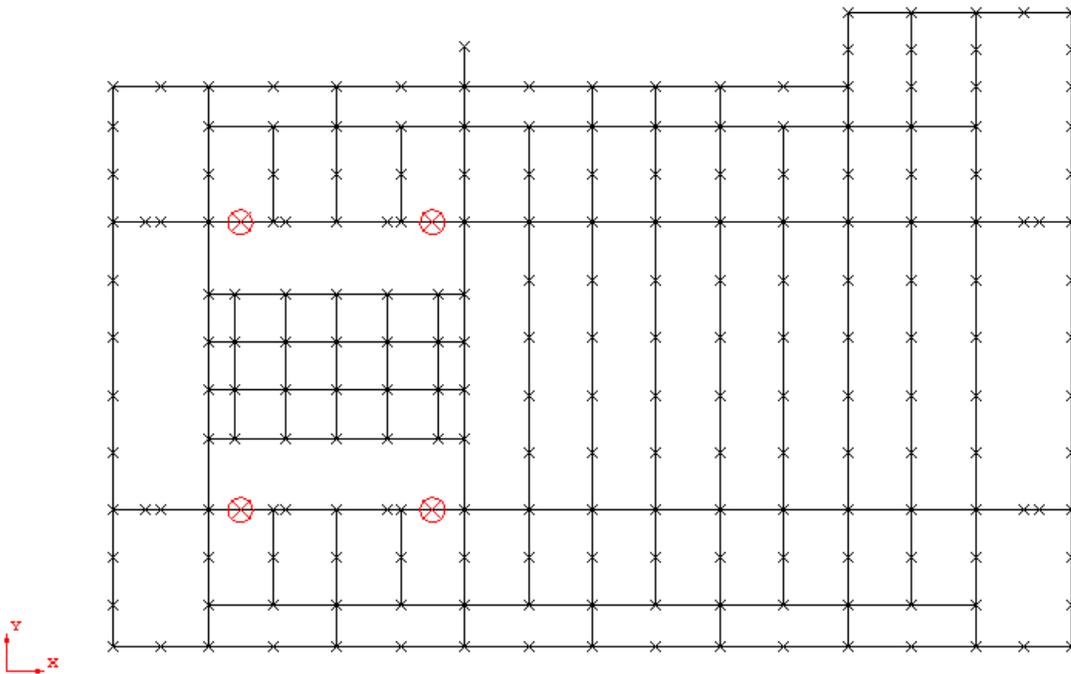


FIGURA 3.12. TORRE DE PERFORACIÓN – POSICIÓN DE CARGAS 3 – APLICACIÓN DE CARGASCUBIERTA SUPERIOR.

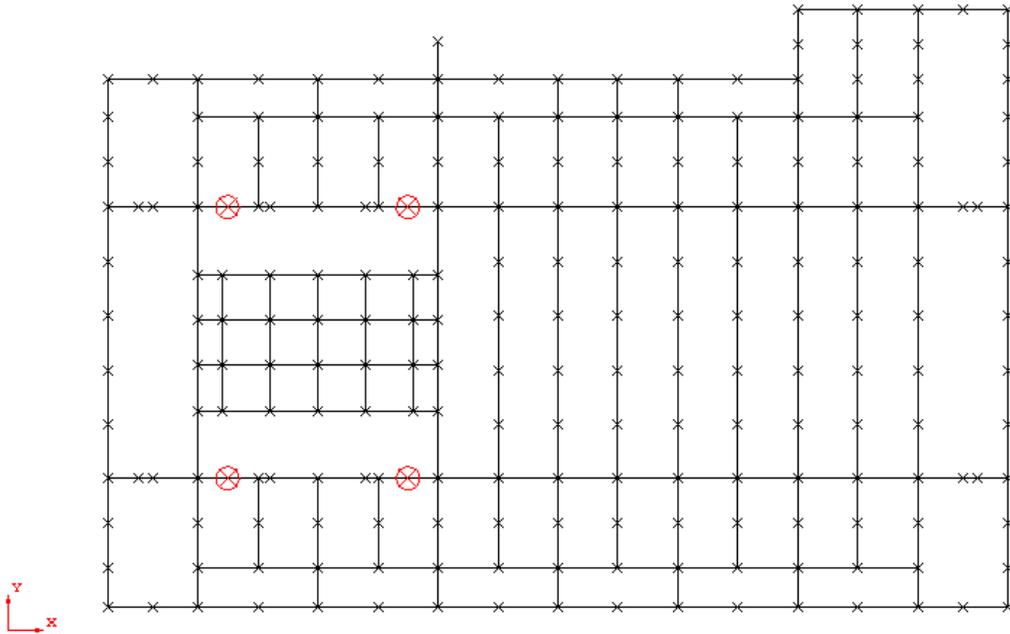


Figura 3.13. Torre de perforación – Posición de cargas 4 – Aplicación de cargascubierta superior.

LOAD CONDITION 2

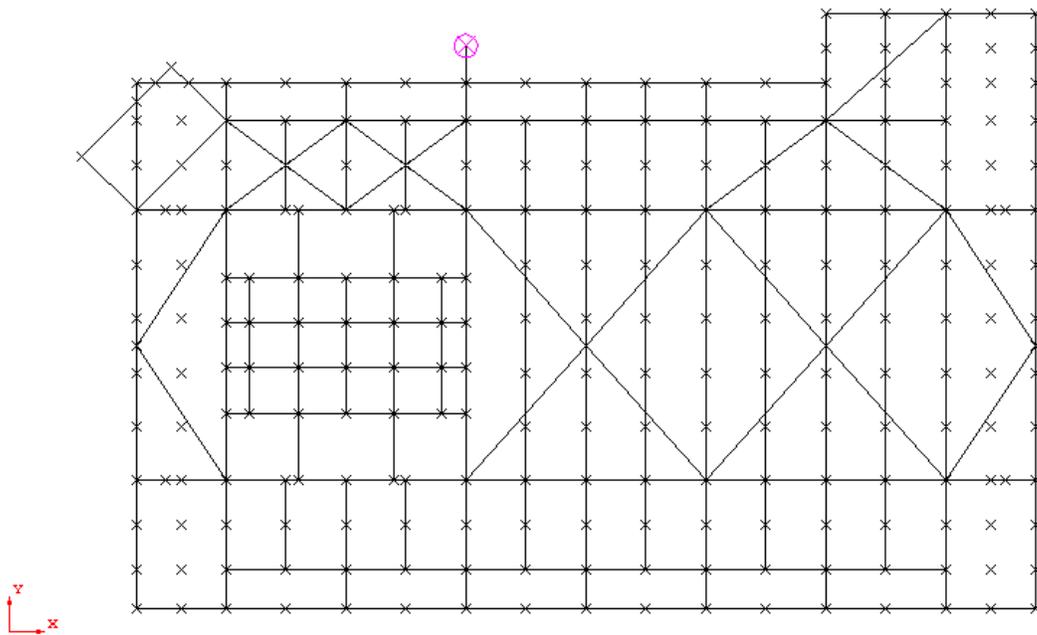


Figura 3.14. Grúa de pedestal – Aplicación de cargascubierta superior.

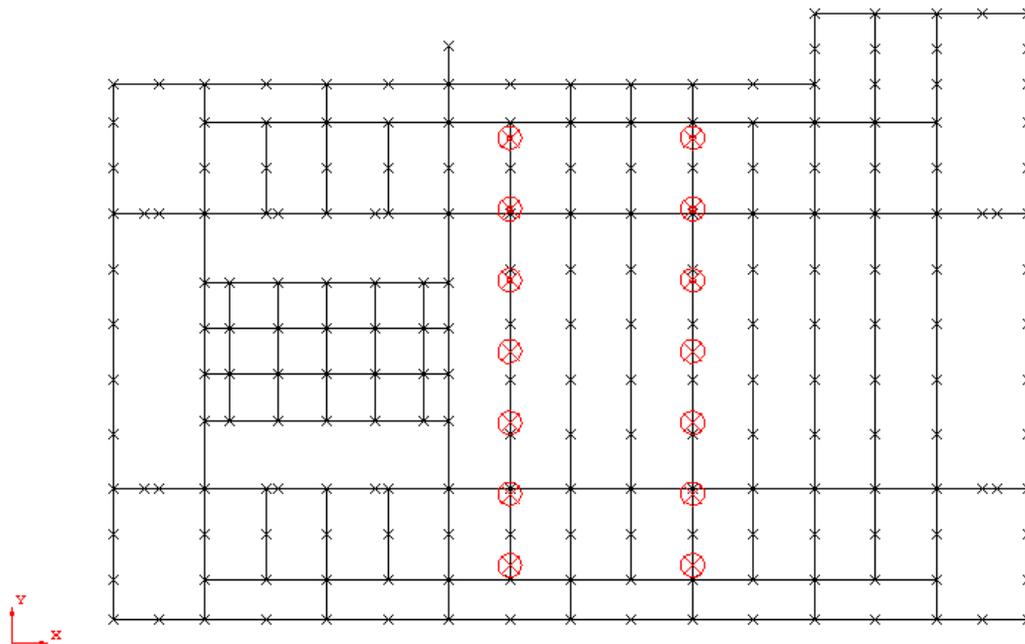


Figura 3.15. Grúa de pedestal sobre el paquete – Aplicación de cargas cubiertas superiores.

### 3.2. Acciones ambientales.

Las cargas ambientales impuestas por el medio ambiente a la plataforma se integran por las cargas de oleaje, mareas, de corriente marina, viento y sismo.

La ocurrencia simultánea de las cargas ambientales se considera con la adecuada superposición de las mismas.

Las cargas originadas por las condiciones ambientales se clasifican de acuerdo a su grado de intensidad en: Cargas de Operación y Cargas de Tormenta. Las cargas ambientales de operación, corresponden a las condiciones atmosféricas con un periodo de recurrencia de un año y de tal magnitud que aún permiten el desarrollo normal de actividades en la plataforma. Las cargas ambientales de tormenta, corresponden a las condiciones atmosféricas asociadas a una altura de ola de 16.70 metros, indicadas en norma **NRF-003-PEMEX-2007**, Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México. (PEMEX, 2007)(Institute, 2007).

### 3.2.1. Fuerzas de oleaje.

Las olas son causadas por la acción del viento sobre la superficie del mar. Al trasladarse las masas de aire sobre el mar, las pequeñas diferencias de presión que hay en aire y la fricción entre aire y agua producen fuerzas sobre la superficie las cuales ponen en movimiento las partículas de agua. Al encrespase la superficie del mar, el viento ejerce fuerzas de empuje sobre la parte superior de las olas y de succión sobre la parte frontal (Piralla, 2009).

Todo cuerpo sumergido en un Líquido en movimiento experimenta fuerzas hidrodinámicas que se pueden determinar por medio de la ecuación de Morison.(Institute, 2007)

$$F = 1/2 \rho C_d A u^2 + C_m V du / dt$$

F = Fuerza hidrodinámica (Lb).

$\rho$  = Densidad del agua (Lb. seg<sup>2</sup>).

A = Área expuesta proyectada por el elemento en la dirección del movimiento del agua (m<sup>2</sup>).

C<sub>d</sub> = Coeficiente de arrastre.

C<sub>m</sub> = Coeficiente de masa o inercia.

u = componente del vector de velocidad del agua, perpendicular al eje del elemento (m/seg).

V = Volumen desplazamiento por el elemento (m<sup>3</sup>).

du / dt = Componente vector de velocidad del agua, perpendicular al eje del elemento (m/seg<sup>2</sup>).

El perfil de las olas de diseño y sus velocidades y aceleraciones correspondientes se determinan en base a la teoría de oleaje seleccionada para cada combinación particular de tirante de agua, período, altura y longitud de ola.

Las partículas de agua que forman una ola no se trasladan, si no que oscilan formando una trayectoria aproximadamente circular, la posición relativa de una partícula que se encuentra en la superficie, con respecto a las contiguas, varía con el tiempo, en cuanto a que un instante dado ocupa una posición diferente sobre el círculo que está describiendo, de esta manera la superficie del agua adopta una forma como la que se define como perfil de la ola. Ver figura 3.19.y 3.20El perfil de ola, su velocidad, aceleraciones y las presiones sobre los elementos expuestos se obtienen mediante métodos computarizados que contienen las fórmulas para el cálculo de cada uno de los datos mencionados.(Piralla, 2009)(Manuel, 2005)(Holthuijsen, 2007)

Una vez evaluado y establecido los datos de la ola se debe considerar su acción para cada dirección de la cresta, de tal manera que permita conocer la posición crítica de la ola, que al actuar sobre plataforma le provoque el momento de volteo máximo.

Para el cálculo de las fuerzas de oleaje que actúan sobre los elementos de Subestructura se considerar que sus diámetros se incrementan por el efecto del crecimiento marino; que son incrustaciones de animales y plantas marinas, aumentando su diámetro y originando rugosidad en su superficie, implicando un doble efecto en las fuerzas de oleaje, por un lado crece el área expuesta y por otro la rugosidad de los tubos, aumentando los coeficientes de arrastre.

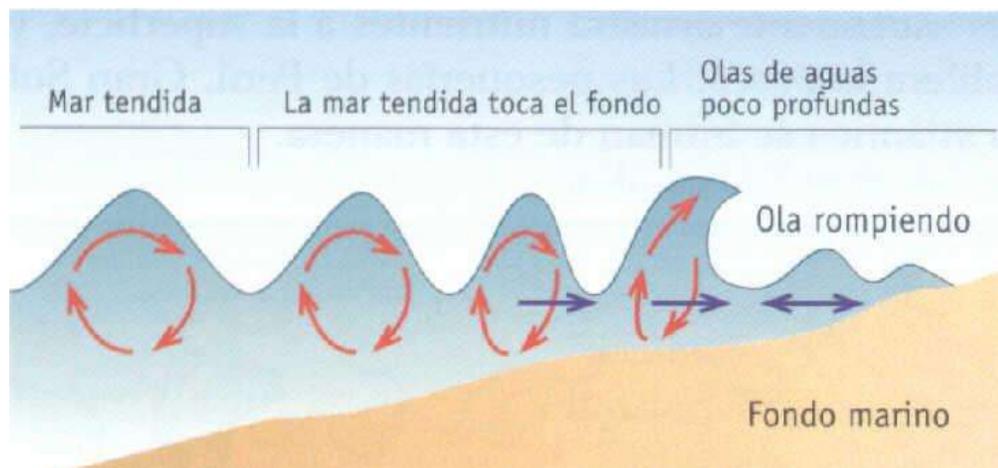


Figura 3.16 variación del perfil a diferentes profundidades

### **3.2.2. Mareas.**

Las mareas se generan por la atracción gravitacional de la luna y el sol. Debido a que la luna se mueve alrededor de la Tierra y a su vez tanto la Tierra como la Luna giran alrededor del sol, se ejercen fuerzas externas que mueven las masas de agua oceánicas de la superficie de la tierra. Experimentamos esto como un ascenso y descenso vertical del nivel del mar.

Las mareas de tormenta son debidas principalmente al empuje y arrastre superficial que ejerce el viento sobre el agua de mar.

Se deberá considerar la presencia simultáneamente de ambos tipos de manera en las condiciones de cargas ambientales, por medio de la suma directa de sus alturas con el tirante de agua del nivel medio bajamar.

### **3.2.3. Corriente marina.**

Las corrientes marinas se deben a tres factores, principalmente constituidos por el arrastre superficial del viento, cambios de densidad del agua de mar y variación del tirante de agua causados por las mareas.

La corriente marina tendrá variación en velocidad y fuerza siendo mayor en el nivel medio del mar permaneciendo constante, y desmullendo a menor cuando profundidad.(Holthuijsen, 2007)

### **3.2.4. Viento.**

Se aplican empujes por viento en direcciones correspondientes al oleaje, sobre las áreas expuestas del equipo, paquetería y elementos estructurales localizados por arriba de la superficie del mar descritas por el perfil de la ola.

Debido a que la altura máxima de la plataforma sobre el nivel medio del mar es aproximadamente de 37 metros, no se considera la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura, utilizándose velocidades constantes.

Las fuerzas de vientos se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$F = K V^2 C_s A$$

En donde:

$F$  = empuje del viento (N, lb).

$C_s$  = Coeficiente de forma.

$A$  = Área expuesta ( $m^2$ ,  $pie^2$ ).

$V$  = Velocidad del viento (kph, mph).

$K = 0.0473$  para sistema métrico.

$= 0.00256$  para sistema inglés.

Se deberá hacer una bajada de cargas que considere los cortantes y momentos debidos a excentricidades en las resultantes de la acción del viento sobre los equipos, tubería y paquetería. El coeficiente de forma depende de las características que presente el área expuesta y toma los siguientes valores (ver tabla 3.2.).

*Tabla 3.2. Coeficientes de forma. (Institute, 2007)*

DESCRIPCIÓN	Cs
Vigas	1.5
Lados de edificios	1.5
Secciones cilíndricas	0.5
Cualquier área proyectada de la plataforma	1.0

### 3.3. Acciones accidentales

#### Impacto de barcos.

El impacto de un objeto sobre cualquier tipo de estructura implica que esta deba disipar una cantidad de energía proporcional a la masa del objeto y al cuadrado de su velocidad. Las plataformas marinas están expuestas a este tipo de cargas ya que los barcos

son los encargados de llevar elementos para construcción, tanques, abastecer insumos y llevar personal, el impacto de un barco es capaz de causar un daño irreversible a una plataforma ya que son elementos de grandes pesos aunados a una velocidad fuera de control por parte del capitán. Para el diseño de una plataforma se debe considerar estas cargas y sobre ellos diseñar las protecciones de las plataformas. (Piralla, 2009), (Manuel, 2005)

### **Explosiones**

Las explosiones ver figura 3.21 son fenómenos que pueden afectar prácticamente toda la plataforma ya que esta expuesta a esto por su alto contenido de materiales altamente flamables y dentro de la clasificación de la plataformas la de perforación se encuentra propensas a explosiones. Una explosión genera un desplazamiento de masa de aire que da lugar a un incremento brusco de presión al frente de una onda de choque  $q$  viaja a gran velocidad.

Las estructuras que han sido proyectadas para resistir efectos sísmicos o de viento poseen en general las características de resistencia a fuerzas laterales, de continuidad y ductilidad adecuadas para soportar sin graves daños efectos de explosiones., debido a este fenómeno de debe diseñar la orientación de los pozos y los muros contra incendios, es importante que el diseño se considere que lo esencial no es tanto proporcionar alta resistencia a fuerzas estáticas, si no gran ductilidad y evitar la posibilidad de que se produzca una falla progresiva.



Figura 3.17. Explosión de una plataforma marina

### **Sismos.**

Los sismos tienen una probabilidad no despreciable de producir acciones significativas en la estructura

PEMEX ha especificado dos tipos diferentes de análisis, uno para el nivel de resistencia y otro para el sismo de intensidad desconocida. Para el primer análisis espectral de respuesta debe realizarse en base al espectro indicado en la norma **NRF-003-PEMEX-2007**, Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México.

Aun considerando que la Sonda de Campeche se encuentra es zona sísmicas de intensidad baja a nula aunque estrictamente ninguna región del globo está exenta de la probabilidad de resistir los efectos sísmicos. Por tanto, en estructuras de particular importancia es necesario considerar estas acciones aun en zonas no sísmicas tal es el caso de las plataformas marinas en la Sonda de Campeche. (CFE, 2004)

### **Condiciones ambientales Extraordinarias**

Con los que respecta a eventos extraordinarios de la naturaleza se encuentra las tormentas huracanes, sismos de gran intensidad, vientos de grandes velocidades,

incremento en la altura de ola, mayor velocidad de la corriente marina etc. es importante conocer el comportamiento que se tiene de estos fenómenos referentes a sus respectivos periodos de retorno, ya que para el análisis y diseño serán estos los valores con los que se diseñará y analizará. Todas la estructuras deben estar preparadas para enfrentar cualquier fenómeno de los mencionados, estos son considerados como condiciones críticas lo cual proporcionara un diseño con un factor de seguridad confiable de resistir estas condiciones.

#### **3.4. Condiciones de carga.**

Para las condiciones de carga se deberán considerar las acciones de las cargas sus combinaciones y los puntos en los cuales se puede manifestar, esto se debe a que la estructura debe de analizarse para cualquier respecto a las condiciones más críticas con esto me refiero a la presencia de acciones combinadas. Siendo el objetivo que la plataformas tenga un respuesta favorable a cualquier carga que se le aplique y no sufra ninguna deformación permanente y mucho menos que esta colapsara terminando con el periodo de vida del plataforma.

Por eso es importante analizar detenidamente las forma en q los fenómenos naturales van a impactar a nuestra estructura en diseño, y mediante el análisis analizar y aprobar que esta será capaz de resistir acciones en conjunto.

A continuación se muestra en tablas 3.3 y 3.4 las combinaciones de las cargas y los factores a considerar según el Angulo en el que se efectúen las cargas. Ver figura 3.22.

Tabla 3.3. Condiciones de carga

No.	DESCRIPCIÓN
1	Carga muerta modelada
2	Carga muerta no modelada
3	Equipo vacío en cubierta inferior 1ª fase de perforación
4	Equipo lleno en cubierta inferior 1ª fase de perforación
5	Equipo vacío en cubierta superior 1ª fase de perforación
6	Equipo lleno en cubierta superior 1ª fase de perforación
7	Torre de perforación vacía + tubería de perforación-posiciones 1 a 4
8	Torre de perforación - llena + carga de barrena - posición 1
9	Torre de perforación - llena + carga de barrena - posición 2
10	Torre de perforación - llena + carga de barrena - posición 3
11	Torre de perforación - llena + carga de barrena - posición 4
12	Carga viva en cubierta superior
13	Carga viva en cubierta inferior
14	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 0.0°
15	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 45°
16	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 90°
17	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 135°
18	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 180°
19	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 225°
20	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 270°
21	Carga de oleaje, corriente y viento en operación para 315°
22	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 0.0°
23	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 45°
24	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 90°
25	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 135°
26	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 180°
27	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 225°
28	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 270°
29	Carga de oleaje, corriente y viento en tormenta para 315°
30	Viento en operación - equipo en cubiertas / accesorios / quemador /grúas-0.0°
31	Viento en operación - equipo en cubiertas / accesorios / quemador /grúas-90°
32	Viento en tormenta - equipo en cubiertas / accesorios / quemador /grúas-0.0°
33	Viento en tormenta - equipo en cubiertas / accesorios / quemador /grúas-90°
34	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 0.0°
35	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 45°
36	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 90°
37	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 135°
38	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 180°
39	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 225°
40	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 270°
41	Carga de grúa en operación + pluma de grúa a 315°

A continuación la figura 3.22. Nos muestra la dirección en que se pueden presentar las cargas ambientales.

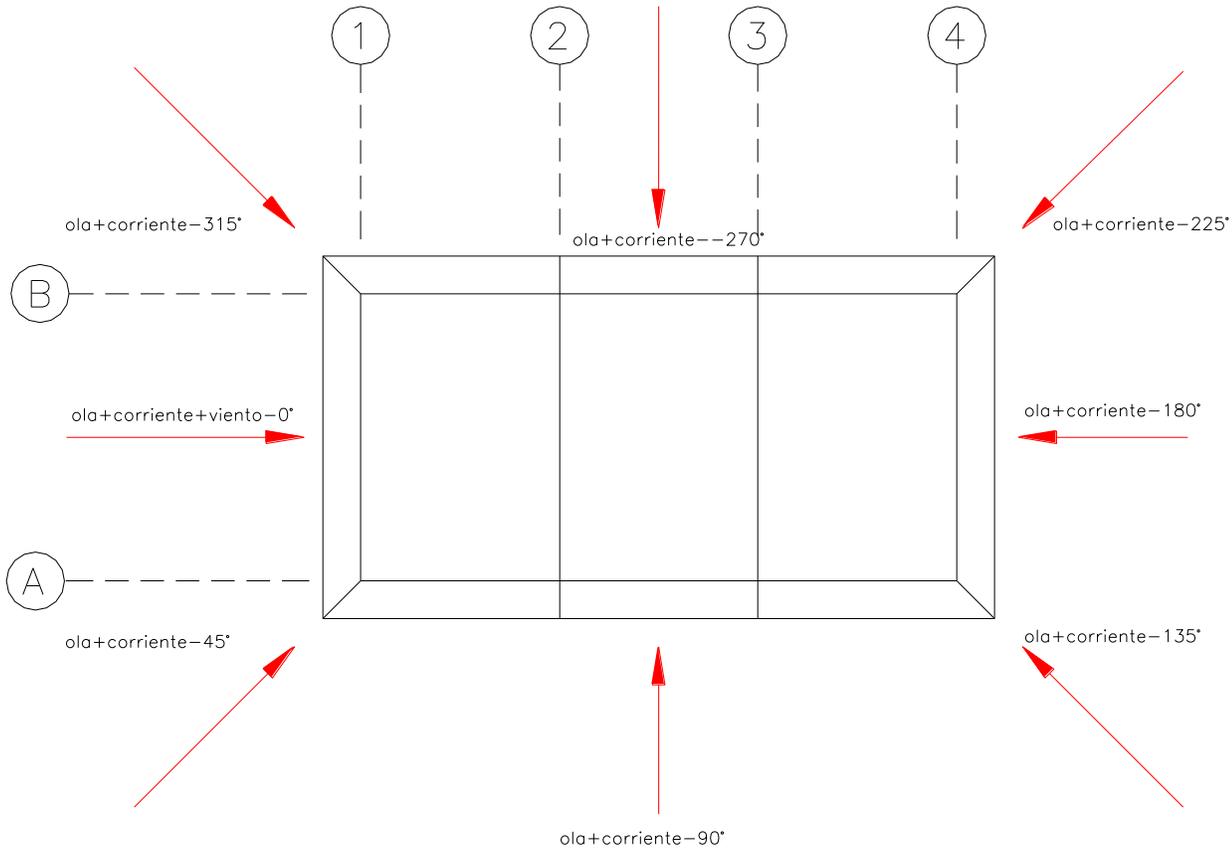


FIGURA 3.18. DIRECCIÓN DE LAS CARGAS AMBIENTALES

### 3.5. Combinación de carga

El comportamiento de las plataformas marinas fijas de ocho patas bajo las diferentes condiciones de carga (ver tabla 3.3.) se analizan y revisan ante los efectos provocados por la acción de cada una de estas en la estructura.

Adicionalmente se identifican los diversos tipos de carga que deben combinarse para intervenir en un análisis determinado, tomando diversos tipos de carga que deben combinarse para incidencia del oleaje. (Diseño y evaluación de plataformas marinas fijas en el Golfo de México. (PEMEX, 2007)(Institute, 2007).

Cada combinación de cargas expresa una condición a la que se sujeta la estructura, con objeto de conocer su comportamiento.

Se considera regularmente las siguientes combinaciones de carga:

1. Solicitaciones ambientales de operación en combinación con pesos muertos y cargas vivas máximas, usando esfuerzos permisibles normales.
2. Solicitaciones ambientales de operación en combinación con pesos muertos y cargas vivas mínimas, usando esfuerzos permisibles normales.
3. Solicitaciones ambientales de tormenta en combinación de pesos muertos y cargas vivas máximas acordes a condiciones extremas, usando un factor de incremento de esfuerzos permisibles de 1.00(Institute, 2007)
4. Solicitaciones ambientales de tormenta en combinación de pesos muertos y cargas vivas mínimas acordes a condiciones extremas, usando un factor de incremento de esfuerzos permisibles de 1.33.(Institute, 2007)

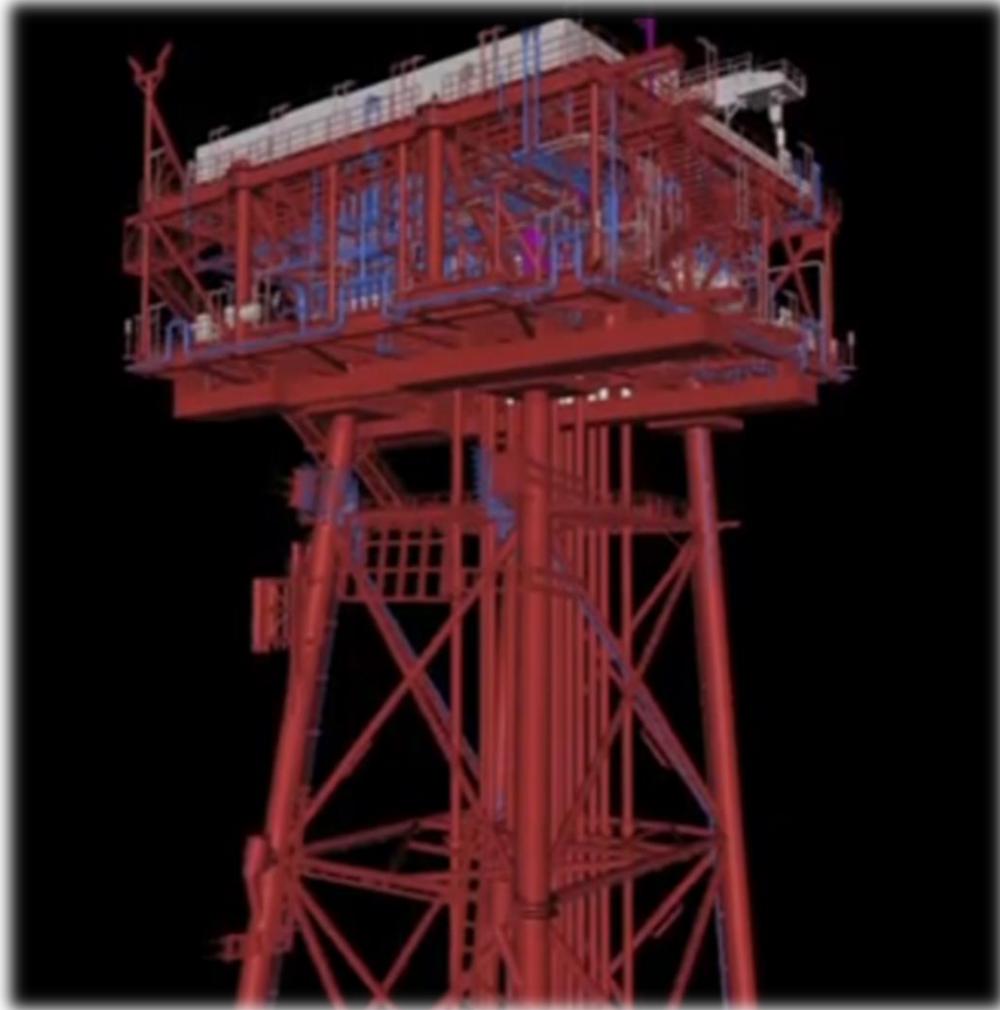
Esta sección contiene una tabla de las combinaciones de cargas consideradas en el análisis (ver tabla 3.4.).

Tabla 3.4. De las combinaciones de cargas consideradas en el análisis

	Carga de barrena									Tubería almacenada							Tubería máxima							
	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65
BASIC	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	95	95	95	95	95	95	95	95
2	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	95	95	95	95	95	95	95	95
3	-	-	-	-	-	-	-	-	25	25	25	25	25	25	25	25	100	100	100	100	100	100	100	100
4	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	75	75	75	75	75	75	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	100	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	75	75	75	75	75	75	-	-	-	-	-	-	-	-
13	100	100	100	100	100	100	100	100	75	75	75	75	75	75	75	75	-	-	-	-	-	-	-	-
14	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-
27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100	-
29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	100
30	100	71	-	-70.7	-100	-71	-	71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	-	71	100	70.7	-	-71	-100	-71	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	-	-	-	-	-	-	100	71	-	-71	-100	-71	-	71	100	71	-	-70.7	-100	-71	-	71
33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71	100	70.7	-	-71	-100	-71	-	71	100	70.7	-	-71	-100	-71
34	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## CAPÍTULO 4

### DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS



El diseño integral de una estructura marina implica una serie de análisis relacionados y dependientes entre sí, bajo las condiciones implícitas en cada una de las fases que se desarrollan hasta su puesta en operación. Para las consideraciones que se tomaron en cuenta para la elaboración de la fase del análisis en sitio se consideró el uso de programa SACS (ver descripción del software en el glosario). Para los análisis realizados en este proyecto.

Las fases que se desarrollan son las siguientes:

- Análisis en sitio.
- Análisis de transportación
- Análisis de instalación
- Análisis de fabricación

### **4.1. Análisis para trabajo en sitio**

El análisis estructural de la condición “en sitio” de la plataforma constituye la parte medular en el proceso de su diseño, considerando que en este se estudian las condiciones de carga prevalecientes sobre la estructura durante la vida útil para la que ha sido planeada. Esto implica la participación e interacción de cargas gravitacionales y ambientales, tanto en condiciones excepcionales consideradas como accidentales, dada la magnitud de los elementos que intervienen en ellas, así como los periodos de ocurrencia de estos.

La gran complejidad que existe en la evaluación numérica de cargas provocadas por las condiciones ambientales involucra el empleo de teorías desarrolladas para este objeto, que toma en cuenta aspectos probabilísticos, apoyados en mediciones hechas en sitio, modelos físicos y matemáticos.

El lapso de la vida útil que se pretende para la estructura, así como los márgenes de seguridad con que esta debe operar, dan lugar al establecimiento de las características básicas de las cargas ambientales, basadas en el periodo de retorno de las tormentas.

Petróleos mexicanos ha establecido el empleo de las características de una tormenta con periodo de retorno de “un año” en el diseño estructural para condiciones críticas de operación de la plataforma; así como las características de una tormenta con periodo de retorno de “cien años”, como condición accidental. (*Diseño y Evaluación de plataformas marinas fijas en el Golfo de México. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y organismos subsidiarios.*) (*Prácticas recomendadas para la planeación, diseño y construcción de plataformas marinas fijas.*) (Edición 21)

El análisis estructural en sitio considera ambas condiciones “operación” y “tormenta de cien años” y su objetivo principal es el de examinar el comportamiento de todo el conjunto estructural sometido a las solicitaciones inducidas por cada una de estas condiciones de tal forma que se asegure una respuesta satisfactoria en la estructura sin que presente fallas.

Para este objeto la estructura debe ser sometida a diversos tipos de análisis, cuya aplicación depende de características propias del conjunto estructural así como al medio al que se encuentran, ya que parte de ella se haya dentro del suelo, parte sumergida en el mar y al resto comprendida en la atmósfera.

Algunas de las características del conjunto estructural se constituyen por el material, la estructuración, la distribución de masas, periodo natural de vibración, conexiones entre elementos, etc.

## **4.2. Análisis de operación y de tormenta**

### **Descripción del análisis**

Este análisis no es lineal debido a la interacción suelo estructura, la cual se realiza con las siguientes etapas.

- a) Realiza una condensación estática de la estructura y las condiciones de carga, en los nodos inferiores de la interface subestructura-cimentación. En este caso el análisis

dinámico completo de oleaje, aunque ya es conocido por la experiencia que la amplificación dinámica debido al oleaje es despreciable (en base al periodo fundamental de la estructura).

- b) Se realiza un análisis interactivo de la cimentación, corrigiendo la rigidez del suelo en cada iteración, hasta que se llegue a la convergencia en el desplazamiento de los pilotes. Las propiedades del suelo empleadas para este análisis de definieron en este capítulo. La información con respecto al perfil de un suelo tipo, se presenta un ejemplo en la figura 4.1.
- c) Verificación de esfuerzos en los pilotes  
.
- d) Sustituyendo los desplazamientos, con la finalidad de determinar acciones en la subestructura. Esto se puede realizar automáticamente con el programa SACS.
- e) Verificación de esfuerzos en los elementos de la subestructura y superestructura: verificación a flexocompresión, corte por penetración y colapso hidrostático.

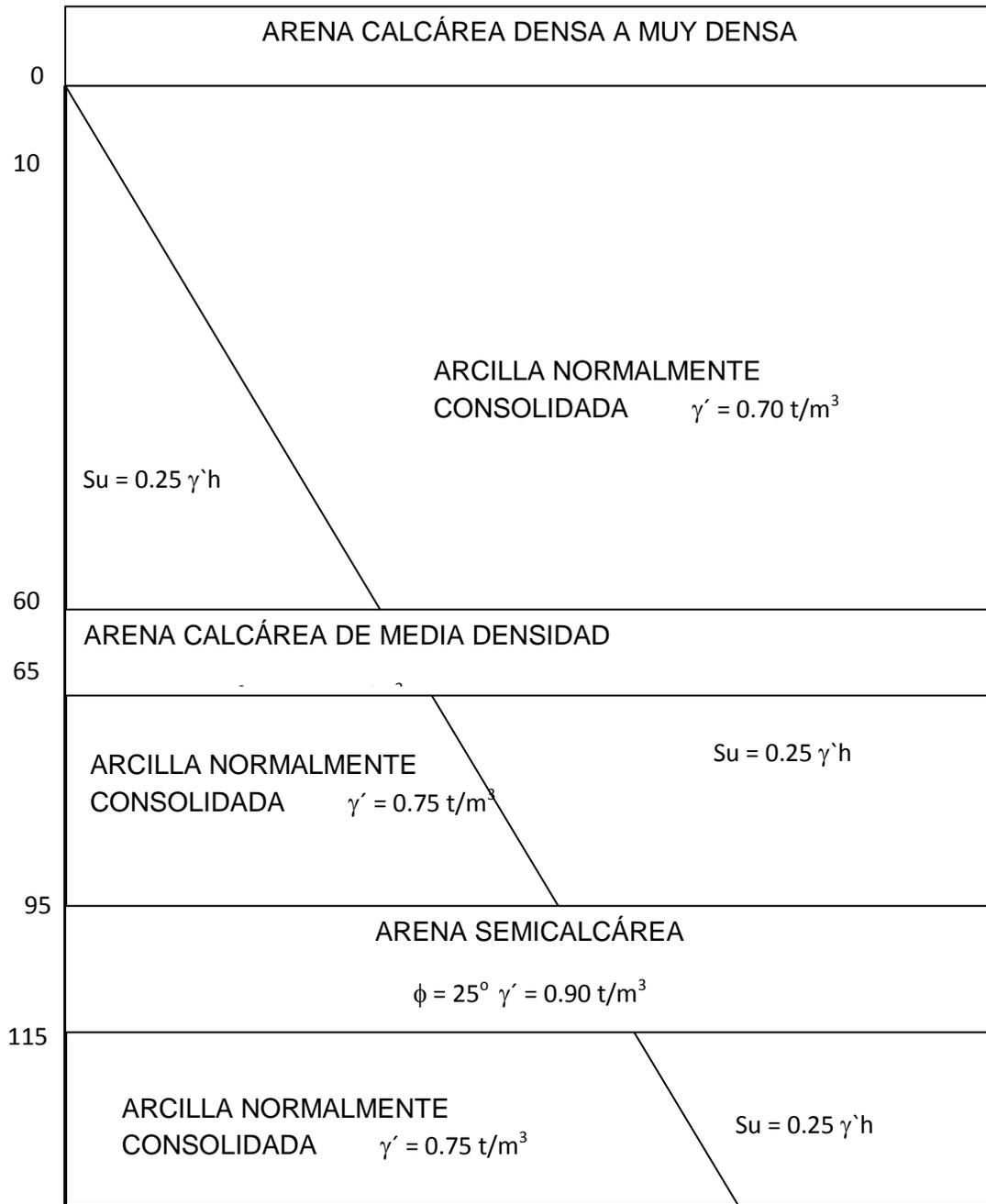


FIGURA 4.1. PERFIL DE SUELO TIPO

EL RESUMEN DE LAS CARGAS DE LOS PILOTES INDICA QUE LA CARGA MÁXIMA EN LOS PILOTES EXTERIORES ES MAYOR QUE LA DE LOS PILOTES INTERIORES.

Debido a la enorme diferencia entre las olas de tormenta y de operación todas las longitudes de los pilotes se determinaran en base a los primeros con un factor de seguridad

de 1.5 es usual que la penetración mínima requerida tanto para los pilotes interiores como los de esquina, considerando el mismo suelo y adicionando las cargas anteriormente descritas.

El arreglo de pilote debe considerar tanto la penetración mínima como la máxima.

### **4.3. Análisis dinámico debido al oleaje.**

#### **Descripción de la secuencia de análisis.**

El comportamiento dinámico de la estructura se evaluará en análisis independientes y las fuerzas inerciales correspondientes normalmente no significativas, pero no obstante se toman en cuenta para los análisis de operaciones y de tormenta.

Las etapas consideradas para este análisis se describen a continuación.

- a) Los de masas estructurales. Esto comprende el peso muerto de la estructura, masa incorporada, masa húmeda del equipo y carga viva (solamente el 75% es permitido por las normas del API(Institute, 2007).
- b) Cálculo de la rigidez equivalente del pilote, relacionada con el promedio de los análisis en sitio para las condiciones de tormenta. Esto se realiza automáticamente durante el análisis de la cimentación con el uso de software como puede ser el SACS. Los pilotes resultantes se denominan súper elementos.
- c) La extracción modal se puede obtener empleando el software SACS para obtener los diez primeros modos de vibración de la estructura.
- d) Determinación de las cargas inerciales debido a respuesta de oleaje para todas las olas del análisis en sitio, empleando el módulo de SACS denominado Wave Response.
- e) Adición de cargas inerciales a las condiciones de carga y oleaje.

Extracción modal.

Con la finalidad de realizar la extracción modal, algunos grados de libertad se obtendrán para los desplazamientos en X Y y Z de todos los nodos más los arriostramientos.

La extracción modal se puede obtener con el módulo Dynpac del software SACS.

Ejemplo de las primeras gráficas típicas de los modos de vibración 4.2.

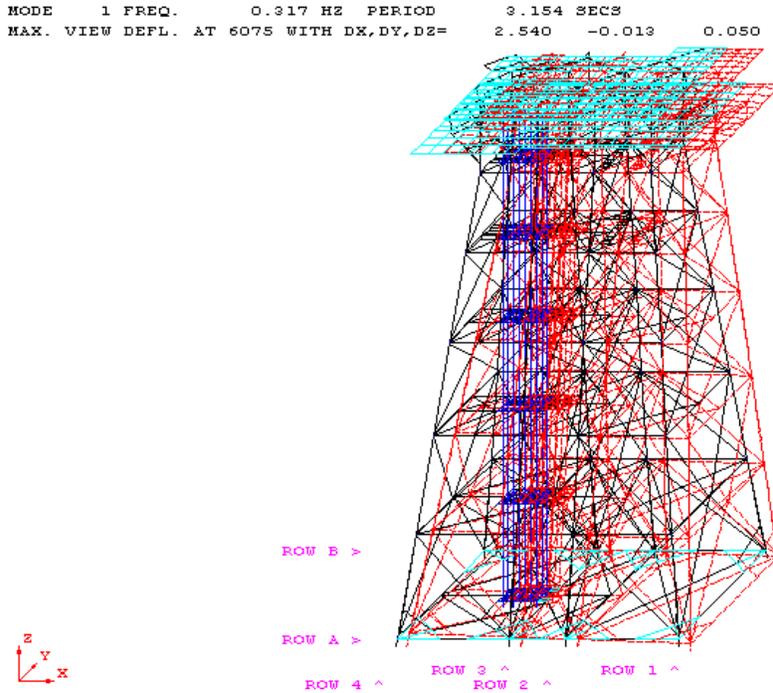


FIGURA 4.2. MODO DE VIBRACIÓN1.

MODE 2 FREQ. 0.337 HZ PERIOD 2.965 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 6151 WITH DX,DY,DZ= 0.045 2.552 -0.059

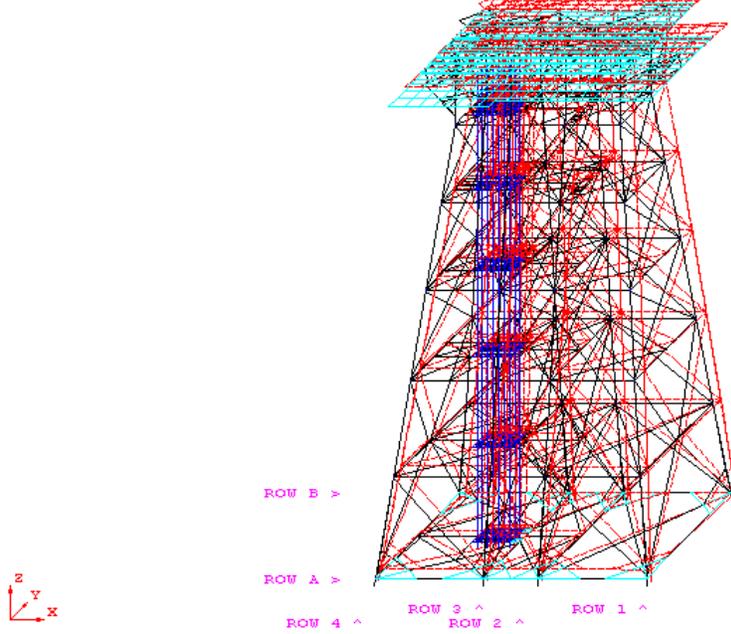


Figura4.3. Modo 2.

MODE 3 FREQ. 0.469 HZ PERIOD 2.044 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 6016 WITH DX,DY,DZ= -1.566 2.357 -0.094

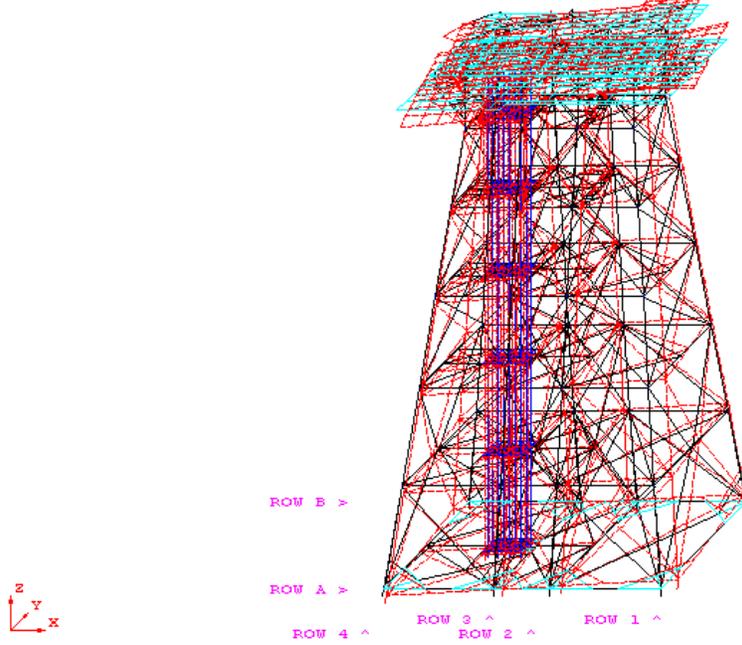


FIGURA 4.4. MODO 3.

MODE 4 FREQ. 0.763 HZ PERIOD 1.311 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 6136 WITH DX,DY,DZ= -0.089 2.572 -0.395

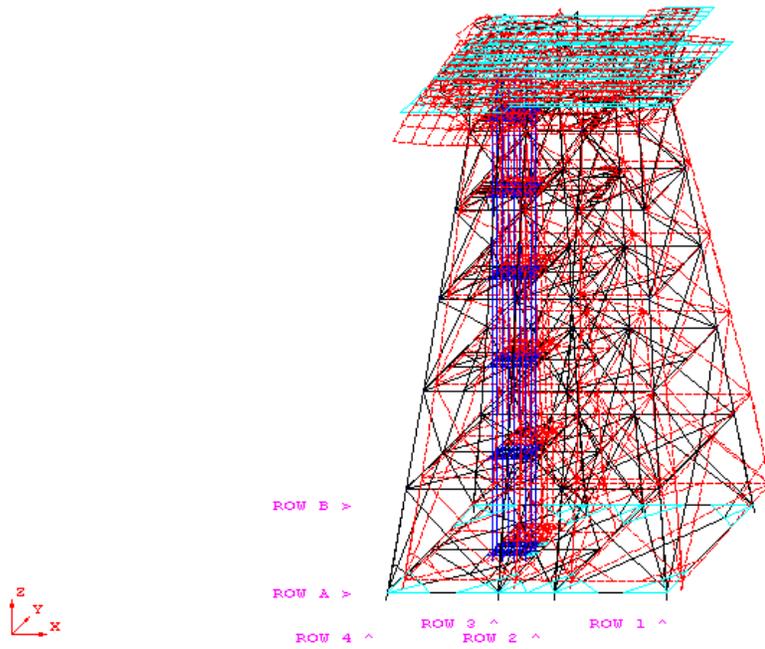


FIGURA 4.5. MODO 4.

MODE 5 FREQ. 0.829 HZ PERIOD 1.207 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 204 WITH DX,DY,DZ= 2.540 0.064 0.567

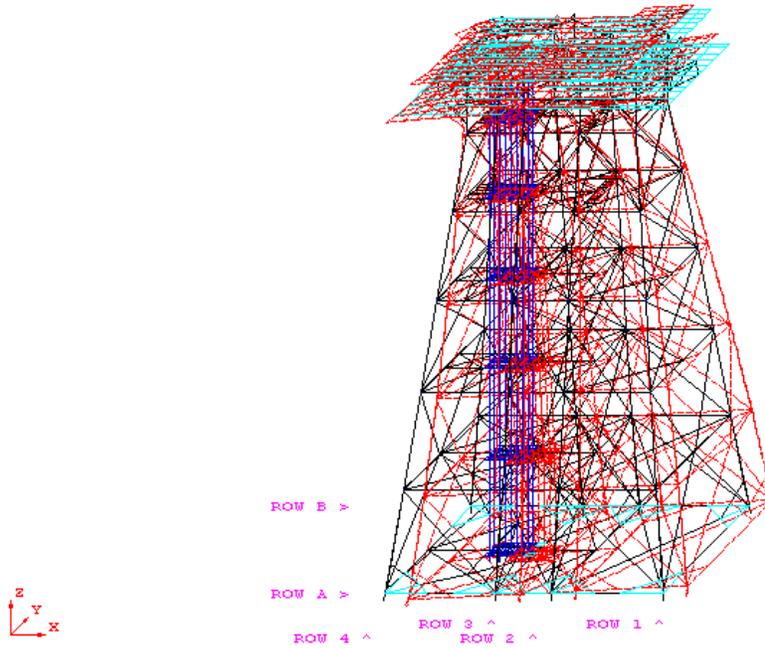


Figura 4.6. Modo 5.

### **Análisis de respuesta al oleaje.**

En estos casos la evaluación se realizará para las mismas olas regulares, las cuales se considerarán en este análisis estático y el objetivo es determinar las fuerzas inerciales adicionales que ocurren debido a la aceleración estructural inducida por el oleaje.

El análisis se realizará en el dominio del tiempo y las olas están colocadas paso a paso hasta llegar a la estructura en intervalos de diez segundos (36 pasos en un solo periodo de la ola). Las fuerzas inerciales se determinaran en cada paso y se sumarán a las fuerzas de oleaje, determinadas en el análisis estático normal.

De esta forma se evitan las incongruencias con los resultados de los miembros producidos en el análisis dinámico. Debido al uso de pocos modos de vibración.

Es bien cierto el hecho de que se evitan las incongruencias con los resultados globales de la estructura (movimiento general), pero genera inexactitud en la determinación de las fuerzas en los miembros.

Los resultados de los cortantes basales típicos producidos en este análisis se presentan en las figuras 4.7. Comparación de las fuerzas de corte basales tanto estáticas como dinámicas para una ola de  $0^\circ$  y figura 4.8., comparación de las fuerzas de corte basales tanto estáticas como dinámicas para una ola de  $45^\circ$ , de oleaje de tormenta. (Institute, 2007)

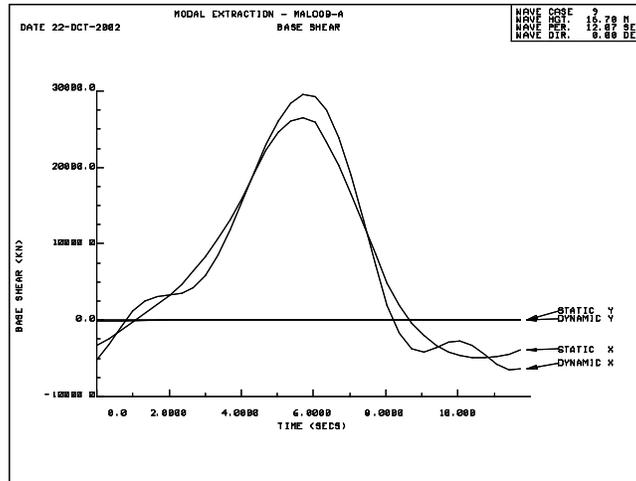


Figura 4.7. Ejemplo de Comparación de las fuerzas de corte basales tanto estáticas como dinámicas para una ola de  $0^\circ$ .

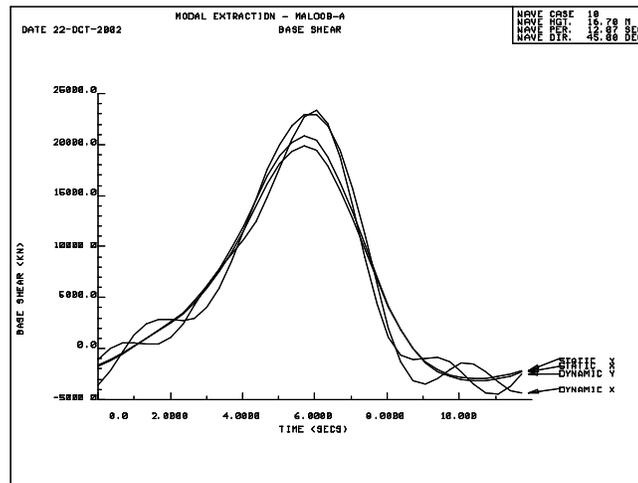


Figura 4.8. Ejemplo Comparación de las fuerzas de corte basales tanto estáticas como dinámicas para una ola de  $45^\circ$ .

#### 4.4. Análisis de fatiga.

En el diseño de las conexiones tubulares, la debida consideración se debe dar a la acción en relación con la fatiga cíclica locales hace hincapié en un detallado análisis de fatiga se debe realizar para todas las estructuras, salvo lo dispuesto a continuación. Se

recomienda se utiliza una técnica de análisis espectral. Otros métodos racionales podrán utilizarse siempre una representación adecuada de las fuerzas y respuestas de los miembros pueden ser demostrados.

En lugar de análisis de fatiga detallada, análisis de fatiga simplificados, que han sido calibrados para el clima de olas diseño, se define en la Sección 1.7 de API-RP2A que:

1. Están contruidos de aceros dúctiles muesca difíciles.
2. Tener redundante marco estructural, registrable.
3. Tener períodos naturales de menos de 3 segundos.

(Institute, 2007)

#### **Descripción de la secuencia de análisis.**

El análisis espectral debido a la fatiga se realizara considerando los datos ambientales en la sección. Especificaciones en **API-RP2A**, Las etapas de los análisis son:

- a) Cálculo de la rigidez equivalente promedio en las cabezas de los pilotes, para las condiciones de carga de operación del análisis en sitio.
- b) Preparación de los datos de oleaje para las cuatro direcciones, especificadas a cada 45° (en las olas que se tengan mayor porcentaje). Las olas de las otras cuatro direcciones se adicionará a las direcciones opuestas, en base a la consideración de que las opuestas producen la misma variación de esfuerzos.
- c) El cálculo de las funciones de transferencia para todas las direcciones del oleaje estarán en base a los periodos y alturas de la ola consideradas.
- d) En el análisis estructural se consideran 18 desplazamientos para cada ola con la finalidad de determinar las variación de esfuerzos correspondientes se debe verificar la necesidad de factores de ampliación dinámicas para las fuerzas de oleaje.
- e) Resumen de daños debido a la fatiga se recomienda en ocho puntos alrededor de la circunferencia de todos los extremos de los miembros, el cálculo se basará en la variación de esfuerzos determinada anteriormente.

### **Cálculo de masa.**

- Las masas estructurales se determinarán en base a las dimensiones de los miembros y a las densidades de masa.
- Las masas añadidas, se determinaran en base a la geometría estructural y a las dimensiones de los miembros.
- Las masas dadas se obtendrán directamente de los datos de carga de SACS, convirtiendo las cargas en masas.(Manuel, 2005)

### **Extracción modal.**

La extracción modal en este caso se realizó empleando la rigidez de los súper elementos determinados en base promedio de las fuerzas del oleaje en operación. Esta rigidez es más grande que el oleaje de tormenta empleado para el cálculo de respuesta dinámica debido a oleaje, de tal forma el periodo esperado es mucho muy pequeño. (Manuel, 2005)

### **Preparación de los datos de ola.**

La presentación de los datos de ola, deberán considerar solamente las cuatro direcciones de oleaje, con los porcentajes más altos de la ola.

### **Funciones de transferencia.**

Los cortantes basales y momentos de volteo de las funciones de transferencia deben ser estudiados con precaución solamente cuando la respuesta dinámica debido a oleaje sea tomada en cuenta, con la finalidad de estar seguro de que todos los valles y crestas se han representado con exactitud.

En este caso la respuesta dinámica debido al oleaje, puede despreciarse, y es suficiente emplear un número de olas que generan ligerezas fuerzas debido al oleaje con sus curvas de período para el análisis de fatiga de las estructura.(Manuel, 2005)

### **Análisis del esfuerzo.**

Para cuando de los períodos de la direcciones de oleaje con porcentajes más altos y par las alturas de ola obtenidas en la proximidad de  $1/20(H=1.56 \times T^2/20)$  los análisis

estructurales se realizarán para cada dirección, considerando 18 desplazamientos para cada ola (a cada veinte grados).

#### **Resultados del análisis de fatiga causada por oleaje.**

La fatiga se verificará en cada extremo y en cada elemento en ocho puntos alrededor del nudo. La variación de esfuerzos nominal mencionada anteriormente fue convertida a zona de concentración de esfuerzos.

#### **4.5. Análisis sísmico.**

##### **Descripción de la secuencia de análisis.**

El análisis sísmico especificado por la **norma NRF-003-PEMEX-2007** realmente se dividió en dos análisis independientes. El primero es un análisis independiente este es un análisis espectral de respuesta no lineal para sismos a nivel de resistencia, empleando el espectro, mientras que el segundo, el cual debe ser un análisis equivalente no lineal para sismos de intensidad desconocida, lo cual ha remplazado el análisis de colapso para una aceleración horizontal, el cual debe exceder a aquel que ocurría en el primer análisis en al menos el 60%. Considerando que la estructura tienen suficiente ductilidad y puede cumplir el criterio solicitado.

La secuencia del primer análisis se define a continuación (análisis sísmico por nivel de resistencia).

- a) Cálculo de la rigidez equivalente para los pilotes de cimentación. Esto se realizará como anteriormente se expresó. En este caso la misma cimentación empleada para el análisis de fatiga se utilizará. Siendo este un valor adecuado.
- b) La extracción modal, considerando la rigidez de la cimentación como se definió anteriormente. Las masas se debió a la estructura + equipo + accesorios + cargas vivas.
- c) Análisis sísmico estructural.
- d) Análisis estructural estático por cargas únicamente (cargas debido a masa definidas con anterioridad)
- e) Combinación de los dos archivos de pos-proceso.

- f) Verificación unitaria de esfuerzos a corte por penetración y flexocompresión axial según lo establecido en **API-RP2A**.

La secuencia del segundo análisis se describe a continuación (análisis colapso).

- a) Modelado de la cimentación como el análisis en sitio, considerando las curvas de resistencia del suelo.
- b) Análisis de la plataforma para todas las cargas muertas + un crecimiento de la aceleración horizontal hasta que la estructura se colapse. El cortante basal total debe exceder el nivel de resistencia sísmico con un valor mayor que 1.6.

### **Verificación de esfuerzos.**

Con el fin de verificar esfuerzos, el API requiere de los resultados del análisis sísmico determinado sean sumados al análisis estático donde se considera únicamente la carga muerta. Tomando en cuenta que el resultado de los análisis han perdido los signos en las combinaciones de carga, esta adición debe hacerse con un criterio sustentable. (Institute, 2007)

Las siguientes combinaciones de carga se han realizado con la finalidad de conservar la seguridad.

- a) Para esfuerzos al flexocompresión axial.

Las fuerzas en los extremos de los miembros serán obtenidas adicionando los momentos debidos a sismos con el mismo signo de análisis estático.

Las fuerzas axiales debidas se consideran como primera instancia a compresión y como segundo lapso a tensión, de esta forma se tienen dos condiciones de carga.

- b) Verificación de corte penetración.

Las condiciones de carga que se considerarán serán las mismas que se especificaron para flexión axial excepto para el hecho de que el sismo se consideró con un factor de dos.

En ambos casos a los esfuerzos permisibles, se permitirá incrementar 70% como se especifica en el API. (*American Petroleum Institute 2007*) Víctor M. Valdés *Conceptos básicos de Ingeniería Civil Costa Afuera. Segunda Edición 2005 TOMO 1*

**Sismos de intensidad desconocida.**

En la norma **NRF-003-PEMEX-2007**, solicita un análisis no lineal de colapso para aceleraciones horizontales para sustituir el sismo de intensidad desconocida, con el objetivo de verificar la ductilidad de la estructura.

Las siguientes cargas se consideraron:

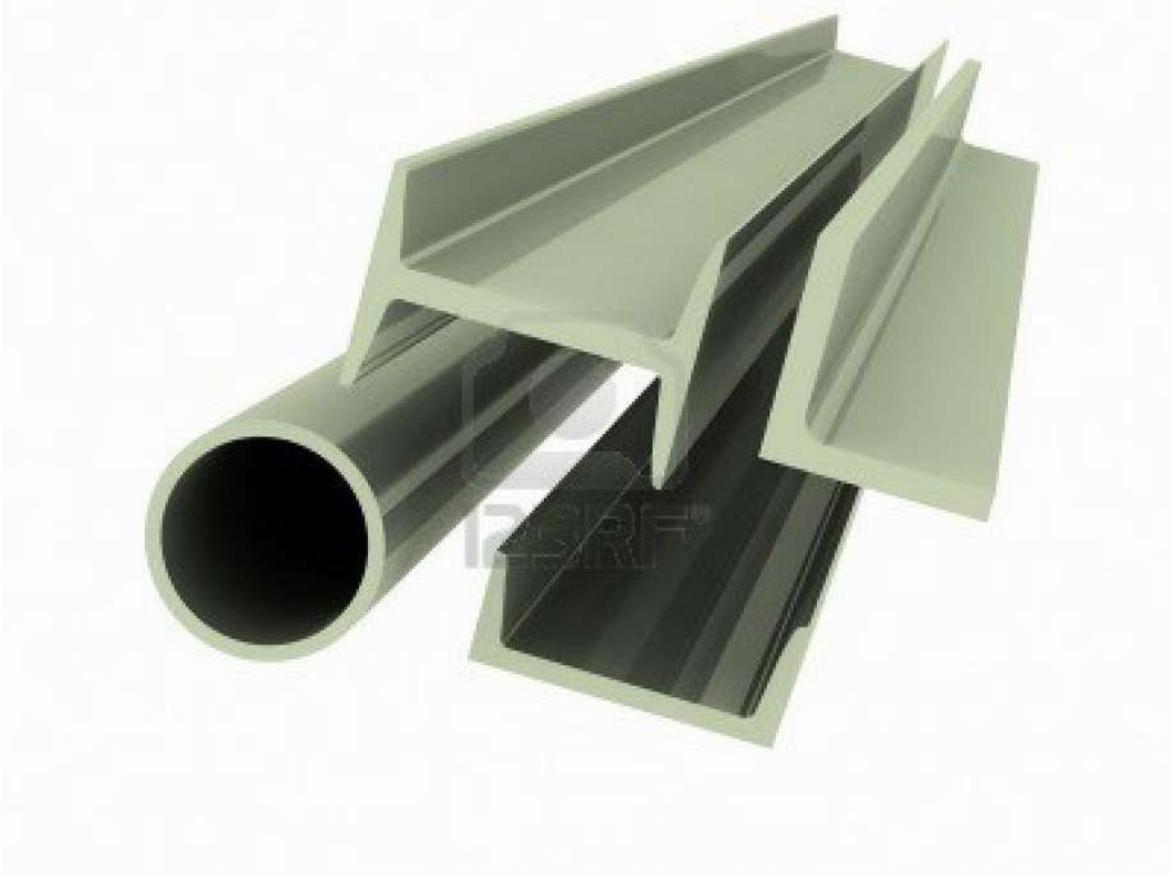
Carga muerta estructural + todo el equipo + cargas vivas.

Las aceleraciones horizontales que producen las fuerzas de corte debido al análisis sísmico por nivel de resistencia, se aplican simultáneamente en ambas direcciones X y Y.

Cabe mencionar y como conclusión, es que el diseño y la evaluación de plataformas marinas fijas en el Golfo de México, y no por sismo, razón por la cual se puede omitir el análisis correspondiente por sismo.(PEMEX, 2007).

**CAPÍTULO 5**

**REQUISITOS DE DIMENSIONAMIENTO PARA PLATAFORMAS MARINAS DE PERFORACIÓN.**



### **5.1. Dimensionamiento de los pilotes.**

Para su diseño los pilotes se dividen en pilotes de esquina y pilotes interiores, atendiendo a la posición que tiene cada uno de ellos en la plataforma, en función de la cual participan para resistir las fuerzas que afectan.

El diseño de cada pilote se basa en aquellas combinaciones de carga que le originan las combinaciones máximas de elementos mecánicos, para las diferentes direcciones en que pueden incidir sobre la plataforma las fuerzas de oleaje. En esta etapa se determina la longitud del pilote y su configuración en cuanto a los espesores de las secciones de que consta, así como la distribución de éstas.

Las condiciones de manejo de los pilotes en el patio de fabricación, así como las de su embarque e hincado, establecen requerimientos adicionales que deben satisfacerse en su diseño, los cuales implican no sólo parámetros de resistencia, sino que involucran aspectos relacionados con características de los equipos de construcción, transporte e instalación. En esta etapa se determina el número, disposición y características de los tramos que integran a cada pilote.

#### **Diseño preliminar.**

Las propiedades mecánicas del suelo determinan que el análisis y diseño de los pilotes se realice mediante iteraciones, por lo cual ambas actividades parten de datos y características preliminares.

-Datos Iniciales

Para obtener el diseño preliminar de un pilote, además de considerar las características estándar descritas al inicio de este capítulo, es necesario contar con el reporte geotécnico de un sondeo efectuado en el sitio donde se instalará la plataforma, y conocer los valores de las fuerzas o elementos mecánicos preliminares que actúan sobre el pilote al nivel del lecho marino, los cuales pueden obtenerse según las siguientes opciones:

- (a). En base a los resultados obtenidos de análisis anteriores, correspondientes a plataformas cuyas características de tirante y estructuración sean similares a los de la plataforma por diseñar.

- (b). Determinando los valores de fuerzas gravitacionales y de oleaje que actúan sobre la plataforma, estimando una distribución de éstas sobre los pilotes.

#### Penetración del Pilote

Conocido el valor de la carga axial que actúa sobre el pilote se determina la penetración requerida en base a la curva de capacidad de carga axial incluida en el Reporte Geotécnico.

#### Configuración del Pilote

Los pilotes constituyen en promedio, el cincuenta por ciento del peso total de la estructura de una plataforma, lo que equivale a un peso aproximado de 1,500 toneladas, lo cual aunado a sus características de longitud, procedimientos constructivos y de instalación, determinan que su configuración revista una gran importancia, ya que en ella se establecen los distintos perfiles que integran al pilote, así como su distribución a lo largo de éste.

Ya que el pilote se halla afectado por cargas que varían a lo largo de su longitud, la cual es muy grande, debe obtenerse un diseño que considere el empleo de diferentes secciones, agregándolas de tal forma que sus características de resistencia se ajusten en lo posible a la variación de las solicitaciones, sin pasar por alto aspectos prácticos como:

1. Espesores comerciales y longitudes en que se fabrican los tubos aplicables al diseño de pilotes en el mercado internacional y nacional.
2. Dimensiones comerciales de placa, ya que por lo regular los tubos de las dimensiones requeridas para los pilotes son de placa rolada en frío.
3. Capacidades del equipo de rolado disponible en el país.
4. Disponibilidad en el mercado de diversos tipos de aceros estructurales.
6. Limitar la variedad de secciones a utilizar.
7. Las transiciones entre las diversas secciones deben ser graduales.

Como inicialmente no se conoce la variación de las solicitaciones que actúan a lo largo del pilote, disponiendo únicamente de datos preliminares de las cargas o elementos

mecánicos que actúan en su cabeza al nivel del lecho marino, la configuración preliminar del pilote puede obtenerse en base a la información de que se disponga optando por alguna de las siguientes alternativas:

- (a). Suponiendo una configuración basada únicamente en las características estándar relativas al diseño de pilotes.
- (b). Tomando como base la configuración de pilotes diseñados con anterioridad cuyas solicitaciones al nivel del lecho marino sean similares.

A partir de la configuración inicial ya establecida puede obtenerse la configuración preliminar para la cual es necesario dividir al pilote según los sistemas subestructura-pilote y suelo-pilote.

En el caso del sistema subestructura-pilote, la configuración inicial del pilote se toma aceptable para la primera iteración del análisis estructural de la plataforma para la condición en sitio. Por su parte, la configuración inicial que corresponde al sistema suelo-pilote, se modela con el empleo de un programa de computadora y se somete a las solicitaciones preliminares que actúan en la cabeza del pilote al nivel del lecho marino, obteniendo como resultado una distribución preliminar de solicitaciones a lo largo de éste, con la cual puede establecerse una configuración más aproximada en la que se toma en cuenta la participación del suelo. La configuración así obtenida puede considerarse como preliminar, empleándose para la obtención del modelo suelo-pilote que se utilizará para la primera iteración del análisis estructural de la plataforma para la condición en sitio.

Una vez definida la configuración preliminar de los pilotes, además de dar lugar al inicio del análisis de la estructura de la plataforma, pueden obtenerse sus listas preliminares de materiales y dibujarse planos con el mismo carácter, los cuales regularmente son requeridos para formar parte de documentos para el concurso de la fabricación de la obra.

#### Arreglo Preliminar de Tramos de Pilotes

En esta etapa es posible establecer el número y características de los tramos que integrarán al pilote. Para ello es necesario considerar los siguientes aspectos:

1. Las longitudes de los tramos del pilote deben ser tales que al efectuar el hincado de cada uno de ellos excepto para el último, la punta del primero quede ubicada preferentemente en estratos arcillosos, con objeto de que la capacidad por punta sea relativamente pequeña, evitando una mayor resistencia del terreno para la reanudación del hincado.
2. Para que el primer tramo del pilote inicie su hincado en el terreno, debe recorrer la longitud de la pierna de la subestructura; se conoce también que este tramo penetra en el suelo por su propio peso los primeros 50 '-0" (15.2 m) en promedio. Tales características permiten que la longitud de éste pueda ser significativamente mayor que la del resto de los tramos. Sin embargo, para cada uno de ellos se trata de obtener la mayor longitud posible, con objeto de reducir al máximo su número, lo cual repercute principalmente en el tiempo requerido para su instalación, mismo que resulta ser de un alto costo.

Los aspectos que influyen en el establecimiento de la longitud del primer tramo del pilote son:

- (a). La altura del gancho auxiliar del barco-grúa utilizado en la instalación.
- (b). La longitud del chalán en que se transportan los tramos de pilotes.
- (c). La propia capacidad del tramo de pilote para ser maniobrado sin sufrir daños.

De los aspectos citados, rige el que se refiere a la altura del gancho del barco-grúa, el cual puede maniobrar tramos con longitudes de hasta 240'-0" (73.2 m), dato relativo a los barcos-grúa para la instalación de plataformas, que operan en la Sonda de Campeche.

Las longitudes de los siguientes tramos se determinan únicamente en base a la condición de carga a la que se sujetan durante su instalación, debida al peso del martillo. La inclinación de las piernas de la subestructura, que corresponde a la misma que adquieren los pilotes, origina que el peso del martillo ejerza un momento flexionante de gran magnitud sobre el pilote, mismo que determina la longitud máxima del tramo considerado.

Para la obtención de los elementos mecánicos que actúan en el pilote, originados

durante esta condición de carga deben incluirse efectos de segundo orden; así mismo, es de suma importancia considerar la manera en que el pilote se apoya en el interior de la pierna de la subestructura a través de las placas espaciadoras, y la holgura existente entre ambos.

3. La longitud de cada tramo debe incluir a aquella requerida por corte de la cabeza dañada por los impactos del martillo.
4. Los extremos consecutivos de los tramos que integran al pilote deben ser del mismo espesor, debido a los requerimientos de su conexión en mar durante su instalación.

En general el arreglo de los tramos de pilotes obtenido, en cuanto a su número y longitudes, es poco susceptible de cambios durante la etapa final del diseño.

El diseño de los pilotes, al igual que el de los demás elementos que forman la estructura de la plataforma se realiza en base a las recomendaciones establecidas por el Instituto Mexicano del Petróleo, específicamente en su publicación API RP2A, donde señala criterios básicos y recomendaciones prácticas que deben considerarse. Asimismo, indica que las fórmulas aplicables al diseño de los pilotes son aquellas contenidas en las especificaciones para diseño, fabricación y erección de edificaciones de acero estructural publicado por el AISC -Instituto Americano de la Construcción de Acero -, correspondiente a su más reciente edición, referidas a los efectos de flexotensión y flexocompresión.

En general, las secciones requeridas usualmente en el diseño de pilotes no rebasan la relación mencionada.

Para la revisión de los tramos del pilote sujetos al peso del martillo durante su instalación, no se considerarán incrementos en los esfuerzos permisibles.

Factores de seguridad para la cimentación.- El sistema suelo-pilote constituye la cimentación de la plataforma; y en vista de las incertidumbres intrínsecas en las teorías y procedimientos para la obtención de las características mecánicas del suelo, se acostumbra recurrir a la utilización de factores de seguridad que proporcionen márgenes admisibles de confianza en cuanto a la respuesta adecuada del terreno ante las solicitaciones de carga. Para la cimentación de plataformas el factor de seguridad se obtiene afectando los valores de capacidad de carga axial del sistema suelo-pilote, de tal forma que para la condición de

operación el factor corresponda a un valor de 2.0 y para tormenta 1.5.

## **5.2. Dimensionamiento de la subestructura**

*Estructuración:* Las actividades con las que se da inicio al diseño de la subestructura corresponden a su estructuración, la cual debe considerar los siguientes conceptos.

El arreglo de los elementos de arriostramiento debe proporcionar al conjunto estructural características de ductilidad, de tal forma que al presentarse la falla de alguno de ellos la estructura sea capaz de redistribuir las cargas que la afectan sin llegar al colapso, Esto aplica principalmente a elementos contenidos en los marcos transversales y longitudinales, debido a que la condición de presunta falla es originada por cargas horizontales extremas.

Usualmente la configuración del sistema de arriostramientos incluye arreglos en "X", "K" y diagonales sencillas.

*Lineamientos Geométricos:* La subestructura realiza la función de rigidizar al grupo de pilotes que contiene dentro de sus piernas, interconectándolos para lograr su trabajo conjunto, de tal forma que sean capaces de resistir las fuerzas que actúan sobre la plataforma y transmitir las a su cimentación.

La presencia de fuerzas horizontales de gran intensidad originadas por la acción del viento y oleaje sobre la plataforma, da lugar al empleo de elementos de arriostramiento en la subestructura, que proporcionen rigidez lateral de conjunto a través de su trabajo axial principalmente. El arreglo del sistema de arriostramiento se integra a base de marcos o tableros formados por las columnas o piernas y elementos horizontales de menor diámetro, cuyos desplazamientos verticales y horizontales se hallan restringidos por diagonales cuya capacidad axial debe satisfacer solicitudes de compresión y tensión.

La altura de los marcos o tableros en que se divide la subestructura se halla limitada por el ángulo de inclinación necesario para el trabajo eficiente del elemento o elementos diagonales, así como por la longitud libre de pandeo de los pilotes contenidos en las piernas, debido a que el contacto entre ambos elementos se lleva a cabo en los nudos donde convergen los miembros horizontales y diagonales.

Los ángulos con respecto a la horizontal, recomendados para los elementos de arriostramiento son:

- (a). Para diagonales sencillas  $40^\circ \leq a \leq 50^\circ$
- (b). Para arreglos en “K”  $45^\circ \leq a \leq 60^\circ$
- (c). Para arreglos en “X”  $45^\circ \leq a \leq 60^\circ$

La inclinación de los elementos que conforman el sistema de arriostramiento de la subestructura debe limitarse también a ángulos que originen que la longitud proyectada de éstos sobre las piernas y otros elementos sea mínima, consiguiendo de esta forma longitudes de soldadura menores, longitudes mínimas en los carretes de refuerzo de las piernas.

El sistema de arriostramiento se completa con elementos diagonales que en conjunto con los elementos horizontales de interconexión entre columnas, forman tableros o marcos horizontales denominados plantas de arriostramiento, que complementan la rigidez lateral de la subestructura, proporcionándole principalmente rigidez a torsión.

Al igual que otros tipos de estructuras, la simetría constituye un factor importante en cuanto a la distribución de las cargas sobre la plataforma, así como en su respuesta ante ellas, por lo que siempre que sea posible debe procurarse, de tal manera que se eviten excentricidades, cuya presencia origina solicitaciones mayores.

*Factibilidad:* Los elementos de juicio que dan lugar a la selección de una configuración apropiada, es decir que proporcione un comportamiento estructural satisfactorio y que tome en cuenta la complejidad y costo de fabricación, son los siguientes:

La rigidez que proporciona el sistema de arriostramiento a la subestructura debe ser tal que permita una distribución uniforme de las cargas actuantes de manera que se logre la participación activa del mayor número de sus elementos. Asimismo debe proporcionar una variación gradual en los desplazamientos relativos entre sus niveles.

Debe encontrarse un equilibrio entre el peso del sistema de arriostramiento y el número de sus piezas y conexiones, los cuales constituyen los conceptos principales para la determinación de su costo. Asimismo, la variación de perfiles y tipos de aceros requeridos constituyen elementos a considerar.

*Dimensionamiento.* El dimensionamiento preliminar de los elementos de la subestructura se refiere básicamente al sistema de arriostramiento, ya que las piernas se dimensionan principalmente en base a las características básicas ya señaladas.

Desde el inicio deben considerarse los aspectos de pandeo local de las secciones, así como el de las barras. Las siguientes relaciones recomendadas para los arriostramientos garantizan el equilibrio entre el peso del elemento y su capacidad de carga:

A).  $D/t \leq 60$

B).  $70 \leq k_i/r \leq 90$

La relación diámetro a espesor inferior a 60 determina que los elementos se hallen exentos del pandeo elástico de sus secciones.

El factor de longitud efectiva "k" adquiere los siguientes valores según la estructuración a la que corresponda:

k= 0.8          Para diagonales principales y elementos que formen parte de una "K"

k= 0.9          Para el elemento de mayor longitud de una "X"

k= 0.7          Para horizontales secundarias

En forma preliminar "i" puede medirse a partir de las intersecciones de los ejes de elementos.

Al mantener la relación de esbeltez dentro del rango establecido se obtiene que los elementos de mayor longitud sean también los de mayor sección transversal y capacidad de carga.

A sabiendas de que los arriostramientos trabajan en esencia axialmente, en su

dimensionamiento sólo se considera su capacidad axial; y dada la forma piramidal de la subestructura, así como la inclinación recomendada para los arriostramientos; y que el total de la carga que afecta a la plataforma se transmite a la cimentación al nivel del lecho marino, dan lugar a que los elementos más grandes se localicen en la parte inferior.

La variación gradual en la capacidad de la carga y rigidez de los elementos de arriostramiento, de acuerdo a la posición que poseen dentro del conjunto de la subestructura, se logra también al dimensionarlos en base a las relaciones de esbeltez indicadas.

Los esfuerzos de compresión originados por la presión hidrostática sobre los elementos de arriostramiento que se hallan sumergidos en el mar, normalmente son poco significativos, debido a esto, su cuantificación e interacción con los esfuerzos debidos a flexocompresión o flexotensión se efectúa en la etapa final de diseño. De igual forma, el efecto de punzonamiento en las conexiones no se revisa sino hasta dicha etapa.

### **5.3. Dimensionamiento de la superestructura.**

La estructuración de la superestructura se forma con marcos, a base de columnas y trabes con sistemas de piso formados por largueros que proporcionan apoyo al equipo y áreas de trabajo, misma que es función de la distribución y operación del equipo de perforación. La dimensión de las cubiertas estará definido por le paquete de perforación a instalar.

Su diseño consiste inicialmente en realizar la bajada de cargas y un análisis simplificado para cada trabe, obteniendo, las bases para definir sus perfiles.

Los largueros se diseñan para una condición general de carga, en base a los datos obtenidos en la bajada de cargas, idealizándolos como vigas continuas. Para el caso particular de algunos de ellos, sobre los que inciden cargas concentradas.

*Trabes Principales.* - Las dimensiones requeridas para los perfiles de trabes principales sólo pueden satisfacerse mediante su fabricación con tres placas soldadas. La selección de las placas y su soldadura, deben realizarse con base en el conocimiento de las dimensiones

de placas comerciales y de los procedimientos de manufactura de elementos soldados.

*Largueros.-* Los largueros por lo regular suelen satisfacerse con perfiles laminados en caliente, ya que en general la sección requerida no es muy grande, y en cambio la cantidad de largueros es significativa, resultando idónea la utilización de tales perfiles; la selección se hace en base a la producción comercial, empleando aquellos que satisfaciendo los requerimientos de diseño sean los más ligeros. En general son utilizados perfiles TIPO IPR o W (perfiles TIPO 1 de patín ancho), los cuales se fabrican expresamente para ser utilizados como vigas.

*Selección de Perfiles:* Columnas. El diámetro de las columnas debe ser compatible con los pilotes, restando sólo la determinación del espesor, mismo que debe corresponder a alguno de los espesores comerciales de placa, ya que la obtención del perfil requerido se realiza mediante el rolado en frío de la placa.

*Dimensionamiento:* El dimensionamiento de las traveses se basa en las especificaciones del AISC, bajo el principio de que las secciones satisfagan los requerimientos de esbeltez para vigas compactas, con objeto de constituir una estructura de comportamiento dúctil y de gran resistencia al colapso.

Las traveses principales son apoyadas lateralmente en ambos patines mediante traveses secundarias, que evitan el pandeo general del patín de compresión por flexión, debido a la presencia de momentos negativos actuantes en gran parte de su longitud, durante la acción de cargas horizontales.

Las traveses sujetas a cargas concentradas de importancia se revisan desde esta etapa por aplastamiento del alma, reforzándose con atiesadores.

*Conexiones:* Al efectuar el dimensionamiento de las traveses principales y secundarias, así como el de largueros y elementos complementarios secundarios, debe mantenerse presente invariablemente el problema de su interconexión, de tal forma que los peraltes y espesores sean compatibles y sea factible su unión, además, de lograr la mayor sencillez y eficacia.

Las conexiones deben realizarse de acuerdo con su idealización para el análisis y viceversa, estableciéndolas en función de las necesidades del diseño.

Desde la etapa preliminar se plantea la solución de las diversas conexiones requeridas en la superestructura, y en general son poco susceptibles de variaciones en la parte final del diseño.

Usualmente la conexión entre patines es de penetración completa, mientras que las almas se conectan con soldaduras de filete regularmente del mínimo tamaño, ya que en general los esfuerzos cortantes son pequeños. Para favorecer la transmisión de elementos mecánicos en la conexión trabe-columna de la cubierta inferior, a la vez de disminuir los efectos locales por la incidencia directa de los patines sobre la pared de la columna, se recurre al empleo de anillos denominados placas rigidizadoras, que constituyen elementos de transición entre trabe y columna. Adicionalmente estas placas aumentan la rigidez de los marcos y de la propia cubierta.

En la cubierta superior las traveses se apoyan sobre el extremo de la columna, con objeto de satisfacer requerimientos de operación de la paquetería de perforación. Los mismos requerimientos establecen que traveses y largueros coincidan en su paño superior, dando lugar al manejo de un gran número de piezas de los largueros, cortes, preparaciones y soldaduras.

La conexión de largueros en la cubierta inferior no se halla condicionada, por lo que su solución consiste en apoyarlos sobre los patines superiores de traveses, soldándolos con filetes, simplificando la conexión evitando su seccionamiento y reduciendo el número de piezas.

Las conexiones para las condiciones del ambiente marino deben evitar hendiduras y cavidades que favorezcan el acumulamiento y permanencia de la humedad y corrosión.

## **CONCLUSIONES**



## **CONCLUSIONES**

El grado de estandarización logrado actualmente en el diseño, construcción e instalación de plataformas para la Sonda de Campeche ofrece beneficios económicos importantes, tanto en el costo directo de la obra, como en la rapidez con que puede realizarse, constituyendo esto

último en múltiples ocasiones el principal aspecto para la empresa de Petróleos Mexicanos.

La escasa investigación que se realiza en nuestro país limita las posibilidades del diseño, el cual se halla restringido a la adopción de modelos para estructuras desarrolladas en el extranjero, ejerciendo únicamente acciones de acondicionamiento de estos a los requerimientos y recursos propios.

El diseño estructural de una plataforma exige del ingeniero una considerable especialización en el conocimiento del problema y los planteamientos de solución existentes, así como en la aplicación de códigos específicos y el empleo de programas de computadora de cierta complejidad, debiendo invertir algunos años para lograr suficiente experiencia. Considerando el reducido mercado que ofrece esta actividad, el cual depende de las necesidades del país PEMEX, puede resultar inconveniente para aquel que pretende desarrollarse en un campo de trabajo más amplio y diversificado.

Por otra parte, el diseño estructural de plataformas ofrece interesantes posibilidades, al requerir al especialista para la solución de problemas tales como: recuperación de estructuras ya instalados, su acondicionamiento y reinstalación en otros sitios, reparación o reforzamiento de estructuras dañadas, ampliaciones y modificaciones.

La capacidad actual de la ingeniería civil en México, encargada del diseño, fabricación e instalación de plataformas marinas resuelve satisfactoriamente las necesidades sin embargo dista mucho de poder afrontar las necesidades futuras, las cuales involucran instalaciones en tirantes mayores, donde no es posible el empleo de estructuras del tipo utilizado en la Sonda de Campeche, por lo que es necesario planear y llevar a cabo la capacitación de ingenieros que oportunamente conozcan la tecnología requerida, de igual forma; llevar a cabo la implementación de la infraestructura necesaria para su construcción e instalación.

En los últimos años no ha habido una política clara del gobierno mexicano, tanto en Petróleos Mexicanos, como en Instituciones de Educación Superior públicas y privadas para:

- Contribuir a la formación de personal altamente capacitado.
- Coadyuvar a la formación de los cuadros docentes que permitan elevar la calidad

de la enseñanza que se imparta en instituciones de educación superior.

- Formar Ingenieros Civiles con una abierta disposición para participar en el desarrollo y/o perfeccionamiento de nuevos métodos, técnicas y tecnologías que tiendan a incrementar la productividad y la calidad del diseño, construcción, mantenimiento, operación y administración de obras de plataformas marinas.

## REFERENCIAS

(AISC) Instituto Americano de la Construcción del Acero, “Especificación para el Diseño, Fabricación y Construcción de Acero estructural para Edificios”, marzo 09, 2005.

(AISC).-American Institute of Steel Construction, “Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings”, marzo 09, 2005.

American Welding Society, “Structural Welding Code”, Miami Florida, AWS D1.1 última edición, año 2007.

Bazán/Meli DISEÑO SISMICO DE EDIFICIOS 1er edición México Limusa, 2011.

(Manuel, 2005).-Conceptos Básicos de Ingeniería Civil Costa Afuera, Tomos I y II, Víctor M. Valdés. Editado por el autor, 2ª edición, 2005

Jack C. McCormac DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO clemson University. 2ª Edición Método LRFD

(Institute, 2007).-American Petroleum Institute, “Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design”, API Recommended Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD) Twenty-First edition, december 2000.

(Institute, 2007).- Instituto Americano del Petróleo, “Prácticas recomendadas para Planeación, Diseño y Construcción de Plataformas Marinas fijas”, WSD 20ª edición, suplemento, año 2000.

(Institute, 2007).-American Petroleum Institute, “Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design”, WSD 20a Edición, Suplemento 1 of the Recommended Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD).

Instituto Mexicano de la Construcción en Acero A. C. Manual de Construcción de Acero Volumen I, última edición, año 2007.

Meli Piralla DISEÑO ESTRUCTURAL 2da Edición México Limusa 2009

(PEMEX, 2007) .- Norma NRF-003-PEMEX-2000. Diseño y evaluación de plataformas marinas fijas en la Sonda de Campeche.

Sociedad Americana de Soldadura, “Código Estructural de Soldadura”, Miami Florida, AWS D1.1 última edición, año 2007.

Dirección URL

-<http://www.ingenieria.unam.mx/~costaafuera/texto.html>

-<http://es.scribd.com/doc/19414760/Tipos-de-plataformas-Petroleras>

-[http://es.wikipedia.org/wiki/Plataforma\\_petroliera](http://es.wikipedia.org/wiki/Plataforma_petroliera)

-<http://arquys.com/arquitectura/cargas-estructurales-tipos.html>

-<http://arquiba.com/monografias-de-arquitectura/introduccion-a-los-tipos-estructurales/>

-<http://www.arquiba.com/monografias-de-arquitectura/introduccion-a-los-tipos-estructurales/>

-<http://www.mexicodesconocido.com.mx/las-plataformas-petroleras-en-la-sonda-de-campeche.html>

## **ANEXO A**

### **Códigos y reglamentos aplicables al diseño de plataformas marinas.**

En este apartado se realiza una breve descripción de los aspectos relevantes de los códigos y normas, cuya aplicación en el diseño y construcción de plataformas marinas en México es fundamental e indispensable, ya que constituyen en conjunto la base y marco de referencia requeridos para el desarrollo de la ingeniería estructural especializada para este efecto.

Cabe mencionar que se trata de códigos y normas reconocido internacionalmente, y de los cuales se ha comprobado su gran aplicabilidad a las condiciones existentes para el diseño y construcción de plataformas para la Sonda de Campeche.

#### **API - RP2A (American Petroleum Institute)**

Su contenido cubre la mayoría de los conceptos y problemas específicos del diseño de plataformas. En lo relativo al diseño de elementos estructurales, se aboca con gran énfasis en el establecimiento de procedimientos de diseño de tubos de sección circular, tales como punzonamiento, colapso hidrostático, fatiga y flexocompresión; por ser este tipo de elementos los idóneos para integrar la subestructura y cimentación de la plataforma.

En lo relativo a las cargas que actúan sobre la plataforma, destaca aquellas cuya importancia es determinante para el diseño de la estructura, como son las cargas ambientales (oleaje y viento), estableciendo recomendaciones y parámetros que deben ser considerados.

Dedica particular atención a la cimentación de la plataforma, en el análisis de las características del suelo y la determinación de la capacidad de carga de este en combinación con los pilotes, así como el diseño de éstos, considerando aspectos de fabricación, manejo e instalación.

Establece recomendaciones relativas a cada una de las diferentes etapas del diseño, construcción, transporte e instalación de las partes principales constitutivas de la estructura (superestructura, subestructura y cimentación).

En general las recomendaciones que establece tienen aplicación directa en los

diseños realizados en el país, ya que el modelo de plataforma al que otorga atención, corresponde al modelo de plataforma empleado para la Bahía de Campeche.(Institute, 2007)

### **API - 2B**

#### Especificaciones para Fabricación de Tubos para Estructuras

Estas especificaciones comprenden la fabricación de tubos para estructuras, formados a partir de placa de acero ralada, con soldadura longitudinal y circunferencial, para diámetros mayores que 16 pulgadas, con espesores de 0375 pulgadas en adelante, y hasta 40 pies de longitud, destinados a formar parte de la estructura de una plataforma fija; tanto en pilotes, como en elementos principales.

Especifica los procedimientos de soldadura aplicables, así como las pruebas de calidad a que deben sujetarse los cordones de soldadura longitudinal y circunferencial respectivamente, de acuerdo con el código ANSI/A WS D 1.1.

Marca las tolerancias aplicables en las dimensiones de los tubos fabricados a partir de placa rolada, en lo relativo al diámetro, longitudinal, espesor, redondez, perímetro y rectitud; así como en la preparación de los extremos.

Gran cantidad de los elementos tubulares que forman parte de la estructura de una plataforma, requieren ser fabricados a partir de placa ralada, tomando en cuenta las grandes dimensiones que deben satisfacer; pudiendo observarse la importancia y extensa aplicación de las presentes especificaciones.(Institute, 2007)

### **AISC (American Institute of Steel construction)**

#### Manual para Construcción de Acero

El contenido de este manual comprende la definición detallada de las propiedades geométricas y estructurales de las diversas secciones laminadas que existen en el mercado estadounidense, así como la identificación de cada una de ellas en base a las características estructurales que dieron origen a su manufactura.

Lo más sobresaliente de su contenido lo integran las especificaciones de diseño, fabricación y construcción; las cuales representan una ayuda extraordinaria para el cálculo estructural y el desarrollo de la ingeniería de detalle.

Considera los diseños plásticos y elástico, aunque abunda sobre todo en este último, especificando esfuerzos permisibles para el diseño de elementos sujetos a tensión, compresión, flexión y cortante, así como fórmulas de interacción para la acción combinada de tales esfuerzos.

Su contenido incluye gráficas y tablas cuyo empleo agiliza los cálculos para el diseño. Adicionalmente incluye un resumen de las principales propiedades mecánicas de los aceros estructurales contenidos en ASTM, así como las recomendaciones y especificaciones principales sobre soldaduras del código ANSI/A WS D 1.1.

Dada la importancia del contenido de este manual, las especificaciones y procedimientos de diseño que establece se hayan vertidas en programas para diseño por computadora de plataformas marinas.(AISC)

#### ANSI/AWS (American National Standards Institute/American Welding Society)

##### Código de Soldadura para Estructuras de Acero

Este código contiene la descripción de los conceptos involucrados en los procesos de soldadura estructural, así como la simbología de los diversos tipos de soldadura para su representación en los planos del proyecto,

Establece los diferentes procedimientos de soldadura estructural, tales como arco metálico protegido, arco sumergido, arco metálico en gas inerte y arco con fundente en el núcleo.

Contiene los procedimientos para el diseño de conexiones de soldadura de filete, limitaciones y recomendaciones en la aplicación de este tipo de soldadura. Así mismo, establece los requerimientos de las soldaduras de penetración completa, indicando los diversos tipos de preparaciones para los elementos por conectar y los márgenes de aplicación de éstos.

En relación a los materiales, indica las características de los aceros estructurales susceptibles de ser conectados mediante soldadura, así como las características propias y denominación de los diversos electrodos.

Incluye las técnicas de aplicación de la soldadura, y las pruebas a que debe ser sometida para su inspección y calificación.

La aplicación de éste código en el diseño y construcción de las estructuras de plataformas es fundamental, ya que el 100% de las conexiones que en ellas se verifican son soldadas.

### **Normas ASTM (American Society for Testing Materials)**

#### Sección Acero Estructural

Este grupo de normas contiene especificaciones, métodos de prueba, definiciones y clasificaciones, relacionados con los aceros estructurales utilizados en la fabricación de plataformas marinas.

Establece la composición química y estructura metalúrgica de los aceros estructurales, así como sus propiedades mecánicas.

Especifica las pruebas a que deben sujetarse los diversos aceros y los rangos de valores en que deben satisfacerlas, de acuerdo con su clasificación. Así mismo, especifica las aplicaciones de cada uno de los aceros en el mercado.

Las cargas de diseño consideradas en el análisis y diseño de los componentes de una plataforma marina fija de ocho patas, se divide en dos ramas principales: cargas verticales y cargas ambientales. (NORMAS ASTM, 2013)