



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERIA

**CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL ANALISIS  
EN SITIO DE UNA PLATAFORMA MARINA FIJA DE  
OCHO PATAS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**JESUS CANO TORRES**

ASESOR:

**ING. OSCAR E. MARTINEZ JURADO**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**2008**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# ÍNDICE

CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL ANÁLISIS EN SITIO DE UNA PLATAFORMA MARINA FIJA DE OCHO PATAS.

<b>CONTENIDO.</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO I DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS DIVERSOS TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS FIJAS DE OCHO PATAS.</b>	<b>8</b>
I.1. Plataforma de Perforación.	9
I.2. Plataforma de Producción.	10
I.3. Plataforma de Enlace.	11
I.4. Plataforma Habitacional.	12
I.5. Plataforma de Rebombear.	13
I.6. Plataforma de Compresión de Gas.	14
I.7. Plataforma de Inyección de agua.	14
<b>CAPÍTULO II DESCRIPCIÓN PARTICULAR DE PLATAFORMA MARINA FIJA DE OCHO PATAS.</b>	<b>16</b>
II.1. Superestructura.	17
II.2. Subestructura.	28
II.2.1. Accesorios de la Subestructura	44
II.3. Cimentación.	56
II.3.1. Sistema suelo - pilote.	61
II.3.2. Sistema Subestructura - Pilote	63
II.4. Apéndices.	65
II.4.1. Ductos ascendentes.	65
II.4.2. Conductores.	65
<b>CAPÍTULO III MODELACIÓN ESTRUCTURAL.</b>	<b>67</b>
III.1. Modelo estructural de Superestructura y Subestructura.	67
III.2. Modelo de la cimentación.	69

III.3.	Elementos no estructurales y accesorios.....	69
III.3.1.	Protección contra la corrosión. ....	69
III.3.2.	Modelado de defensas, embarcaderos, risers, camisas, etc. ...	70
III.3.3.	Descripción del área de viento .....	75
III.3.4.	Placas base. ....	82
III.3.5.	Otros accesorios.....	82
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LAS CARGAS. ....</b>	<b>92</b>
IV.1.	Cargas verticales. ....	92
IV.2.	Cargas ambientales. ....	105
IV.3.	Condiciones de carga. ....	114
IV.4.	Combinaciones de carga. ....	116
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS .....</b>	<b>118</b>
V.1.	Análisis y diseño en sitio.....	118
V.2.	Análisis de Operación y de Tormenta.....	119
V.2.1.	Descripción del análisis. ....	119
V.3.	Análisis dinámico debido a oleaje.....	123
V.3.1.	Descripción de la secuencia de análisis. ....	123
V.3.2.	Rigidez equivalente del pilote. ....	124
V.3.3.	Cálculo de masas. ....	125
V.3.4.	Extracción modal. ....	125
V.3.5.	Análisis de respuesta al oleaje. ....	128
V.4.	Análisis de fatiga.....	130
V.4.1.	Descripción de la secuencia de análisis. ....	130
V.4.2.	Rigidez.....	131
V.4.3.	Cálculo de masas. ....	131
V.4.4.	Extracción modal. ....	131
V.4.5.	Preparación de los datos de ola. ....	132
V.4.6.	Funciones de transferencia.....	132
V.4.7.	Análisis de esfuerzos. ....	132
V.4.8.	Resultados del análisis de fatiga. ....	132
V.5.	Análisis sísmico. ....	133

V.5.1. Descripción de la secuencia de análisis. ....	133
V.5.2. Rigidez equivalente del pilote. ....	134
V.5.3. Cálculo de masas. ....	134
V.5.4. Extracción modal. ....	134
V.5.5. Análisis sísmico por nivel de resistencia.....	135
V.5.6. Verificación de esfuerzos. ....	135
V.5.7. Sismo de intensidad desconocida. ....	136
<b>CAPÍTULO VI MATERIALES UTILIZADOS Y PROTECCIÓN</b>	
<b>ANTICORROSIVA.....</b>	<b>137</b>
VI.1. Materiales utilizados; Superestructura, Subestructura, Pilotes, apéndices y accesorios.....	138
VI.2. Protección anticorrosiva; zona de alcance del oleaje zona sumergida, zona enterrada, zona seca o atmosférica. ....	139
<b>CAPITULO VII CONCLUSIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA. ....</b>	<b>143</b>

## **CONTENIDO.**

El presente trabajo tiene por objeto mostrar los aspectos generales del proceso para el desarrollo de la ingeniería en su fase operativa (en sitio), para una Plataforma Marina fija de ocho patas a instalarse en la Sonda de Campeche.

Revisaré los distintos tipos de plataformas marinas que se han diseñado, fabricado e instalado en la Sonda de Campeche bajo la versión de ocho patas, y los cuales serán mostrados en el capítulo I.

Con el objeto que se identifiquen y visualicen cada uno de los componentes estructurales de que se integra una plataforma fija de ocho patas, se llevara a cabo una descripción general en el capítulo II.

Con base en lo mencionado en el capítulo II, desarrollaré en forma enunciativa el capítulo III, de la modelación estructural, de cada uno de los componentes, para estar en condiciones de integrarlos en nuestro programa técnico especializado de apoyo.

De relevancia será la descripción de las cargas a las que será sometida la estructura. Así como las combinaciones de carga que serán mencionadas en el capítulo IV.

Con base al entendimiento de los capítulos II, III y IV, estaré tratando en el capítulo V la descripción de los análisis, a lo que será sometida la estructura en su fase operativa (en sitio).

Finalmente mencionaré en el capítulo VI, en forma general, los materiales y la protección anticorrosiva que se utilizará en nuestra estructura. Así como las conclusiones a las que llegamos en el desarrollo de este trabajo.

## INTRODUCCIÓN.

La nacionalización de la industria petrolera del país en el año de 1938, no le otorgo 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, en la colaboración para la generación de la información requerida para la ingeniería de diseño, de las instalaciones petroleras, necesarias para realizar las actividades de extracción de petróleo crudo y gas natural.

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 kilómetros al norte de la Isla del 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, teniendo una extensión de 8000 kilómetros cuadrados, ubicado en la porción occidental de la plataforma marina de Yucatán.

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: Akal, Nohoch, Abkatum, Maloob, Ku, Ixtoc, Kutz, Bacab, pool, Kawac, Chac y Ek (ver figura 1).

Las fechas de instalación de las plataformas marinas de la Sonda de Campeche, varía en forma aproximada de acuerdo a la figura 2, el 23% se instalo hace más de 20 años, el 31% hace más de 15 años y únicamente menos del 36%, cuentan con menos de 15 años de operación.

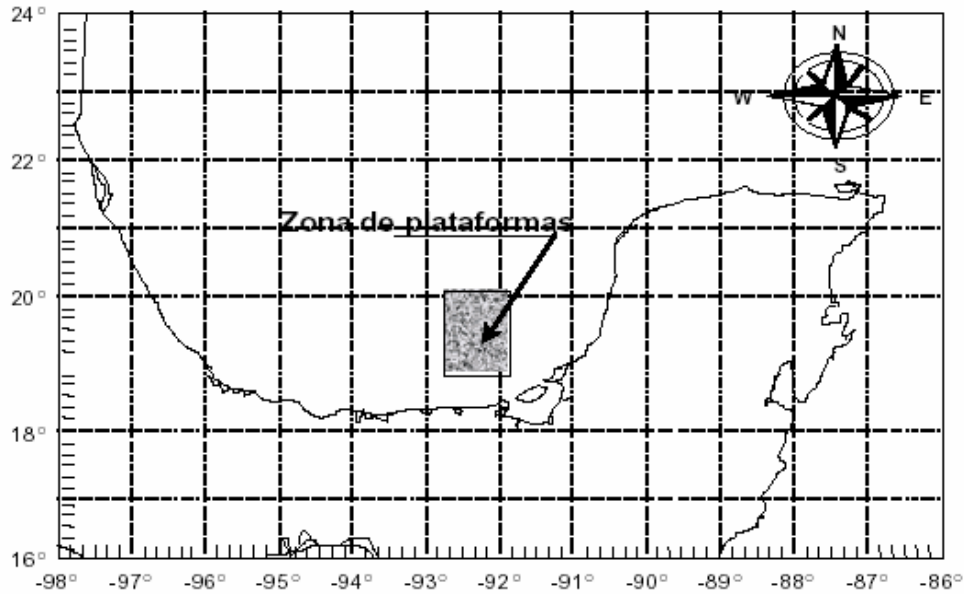


Figura 1. Sonda de Campeche.

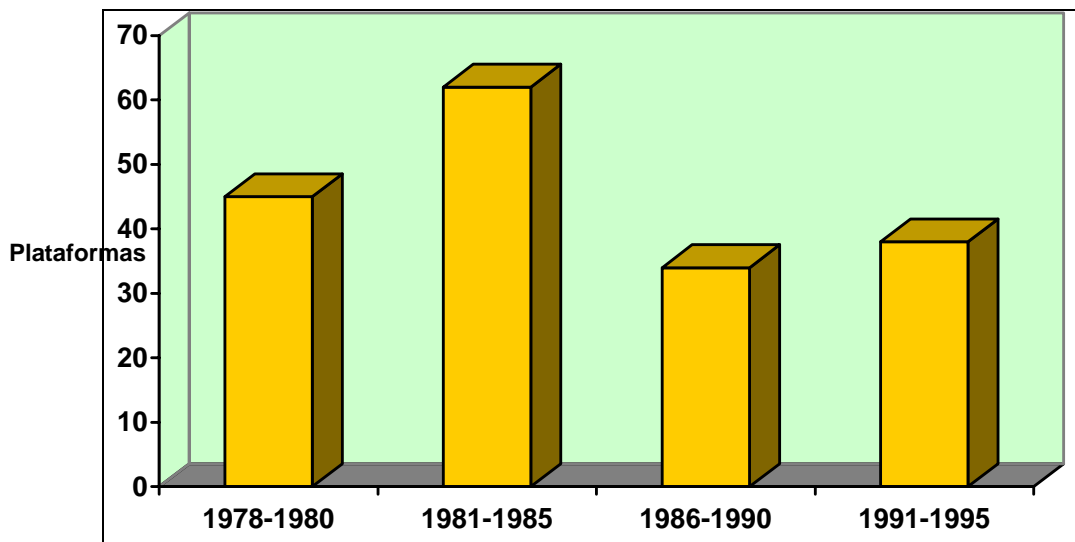


Figura 2. Frecuencia y periodos de instalación de Plataformas en la Sonda de Campeche.

Por su situación geográfica, la parte sur del Golfo de México, es afectado por la zona ciclógena I que se localiza en el Atlántico Norte, ya que es aquí donde se generan los huracanes que viajan por el Mar Caribe alcanzando la Península de Yucatán y la vertiente del Golfo de México.



Como se puede observar en la figura 2, después de 37 años de la expropiación petrolera, el país no logra la independencia tecnológica y los conocimientos técnicos para sus instalaciones terrestres, y menos aún para el desarrollo de las instalaciones costa fuera, estando en manos de empresas extranjeras como Estados Unidos de Norteamérica, Noruega, Francia, Holanda, y Gran Bretaña.

Los trabajos de Ingeniería de Diseño se inician en México; a principios de los años ochenta, por Ingenieros Civiles Mexicanos participando con la asesoría principalmente de Empresas Norteamericanas y con ayuda de equipo y programas especializados para tal fin. Tiempo después, en los años noventa, se logra la 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 requerido para el diseño.

# CAPÍTULO I

## DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS DIVERSOS TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS FIJAS DE OCHO PATAS

A continuación se describe la función específica y características de cada uno de los siguientes tipos de plataformas: de Perforación, de Producción, de Enlace, Habitacional, de Rebombeo, de Compresión de Gas e Inyección de Agua (ver figura 3).

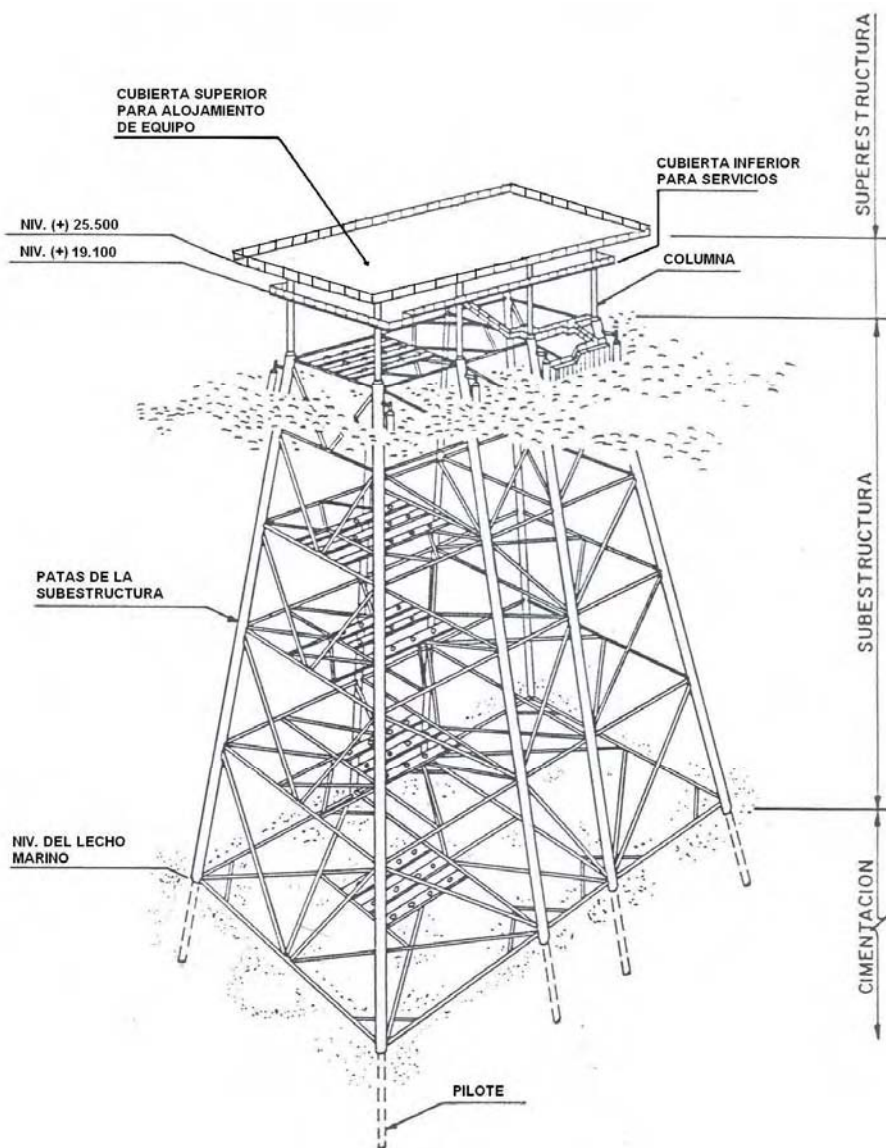


Figura 3. Estructura tipo plataforma marina fija de ocho patas.

## **I.1. Plataforma de Perforación.**

La plataforma de perforación (ver figura 4), aloja el equipo mediante el cual se perfora el pozo y tiene también como función colocar la tubería que permitirá explotarlo y el cabezal donde se instalará más tarde la plataforma de producción.

Este tipo de plataforma dispone de 12 conductores de 30 pulgadas de diámetro, hincados a 60 cm. Aproximadamente por debajo del lecho marino, así como de un equipo compuesto por varios paquetes, de perforación.

La cubierta consta de dos niveles, uno de producción a 19.10 m sobre el nivel del mar y otro de perforación a 25.50 m. Esta cubierta es soportada por ocho columnas y se construye con traveses armados de placas, que unidas a la columna, forman marcos rígidos para disponer de mayor espacio, facilitando la instalación del equipo y el movimiento de tuberías y simplificando su fabricación y colocación. Aquí se localiza el equipo de perforación, los tanques de lodo, la maquinaria y el paquete habitacional.

Cuando se encuentra debidamente instalada la Superestructura, se procede a marcar sobre la cubierta las zonas donde van a estar localizados los seis paquetes de perforación, mismos que deberían colocarse en tres niveles: inferior, intermedio y superior, sobre la cubierta. Los paquetes se transportan por medio de un chalán, y para su colocación se utiliza el barco grúa.

Una vez instalados los paquetes de perforación, un grupo de técnicos efectúa las interconexiones de mecánica, electricidad, tuberías, instrumentación, pintura y armado de la torre de perforación.

El período que se requiere para terminar las interconexiones es de 30 a 45 días, y una vez finalizada dicha actividad, la plataforma se entrega para su operación.

El peso estimado de una plataforma de este tipo es de 3,000 toneladas, que incluye Superestructura, Subestructura y Cimentación, sin equipo de perforación.



Figura 4. Plataforma de Perforación.

## **I.2. Plataforma de Producción.**

La plataforma de producción (ver figura 5), aloja al equipo cuya función consiste en separar el gas del crudo y bombear este último a tierra. Está compuesta por:

- Una Subestructura metálica de ocho columnas fabricadas en cuatro ó cinco niveles, según la profundidad de instalación, que varía entre 40 y 60 metros.
- Una Superestructura que consta de dos niveles, soportada también por ocho columnas directamente acopladas a la Subestructura. Las cubiertas se construyen con viguetas de acero tipo T, apoyadas sobre marcos rígidos hechos de placa, unidos estructuralmente a las columnas.

Su peso estimado es de 3,600 toneladas e incluye además de Superestructura,

Subestructura y Cimentación, el trípode-quemador y los puentes.

La plataforma de producción tiene acceso por puentes de enlace, tanto con la plataforma de perforación vecina, como con la plataforma de enlace.



Figura 5. Plataforma de Producción.

### **I.3. Plataforma de Enlace.**

La plataforma de enlace (ver figura 6), aloja equipo para manejar la producción de las diferentes plataformas, es necesario instalar algunas de enlace, en las que se construyen los cabezales de recepción y envío de aceite crudo y gas.

A dichas plataformas llegan las líneas que recolectan el crudo con gas de las plataformas de perforación y lo distribuyen a las plataformas de producción para su procesamiento; también unen las líneas que recolectan el crudo con los oleoductos que los transportan a tierra. A bordo de estas plataformas, se cuenta con instalaciones para lanzar y recibir tapones conocidos como "diablos", para limpiar el interior de las líneas.





Figura 6. Plataforma de Enlace.

#### I.4. Plataforma Habitacional.

La plataforma habitacional (ver figura 7), está diseñada para otorgar asistencia habitacional que requieren los trabajadores de los diferentes complejos de producción de crudo y gas.



Figura 7. Plataforma Habitacional.

Esta plataforma puede albergar de 45 a 127 personas, y cuenta con helipuerto, sistemas 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.

### **I.5. Plataforma de Rebombeo.**

La plataforma de rebombeo (ver figura 8), 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.

Se dispone en ellas de ocho turbinas de gas para accionar las bombas y tres generadores con una capacidad de 550 KWA cada uno, suficientes para satisfacer sus necesidades de energía eléctrica.



Figura 8. Plataforma de Rebombeo.

## **I.6. Plataforma de Compresión de Gas.**

La plataforma de compresión de gas (ver figura 9), tiene como función suministrar al gas la presión necesaria para su transporte, así como su acondicionamiento, por ejemplo, el endulzamiento de gas amargo. El gas comprimido es enviado a las correspondientes plataformas de enlace de gas.

Los módulos de compresión, permiten aprovechar el 98% del gas natural, lo que evita quemarlo a la atmósfera (los primeros módulos fueron colocados en el complejo Akal "C", en noviembre de 1981).



Figura 9. Plataforma de Compresión de Gas.

## **I.7. Plataforma de Inyección de agua.**

La plataforma de inyección de agua (ver figura 10), tiene como función la de perforar pozos para inyectar agua presurizada a los estratos productores de crudo y así incrementar el rendimiento de otros pozos.



Estas plataformas tienen cubiertas con capacidades prácticamente idénticas a las plataformas de perforación.



Figura 10. Plataforma de Inyección de Agua.

## CAPÍTULO II

### DESCRIPCIÓN PARTICULAR DE PLATAFORMA MARINA FIJA DE OCHO PATAS.

Una plataforma marina está compuesta por tres partes estructurales principales: Superestructura, Subestructura y Cimentación (ver figura 11), y de apéndices, que si bien no contribuyen como parte estructural principal, cumplen con una función que explicaremos más adelante.

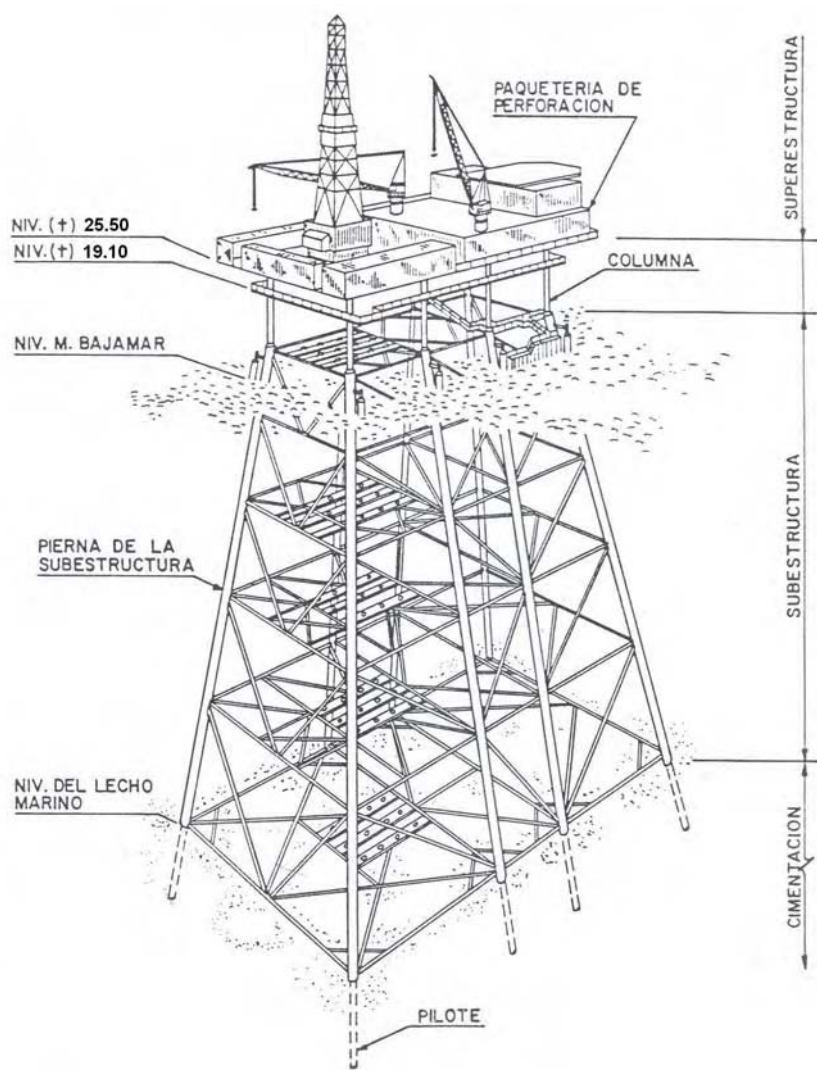


Figura 11. Estructura de una plataforma marina.

## II.1. Superestructura.

La Superestructura es la parte de la estructura destinada a dar alojamiento y soporte al equipo de operación de la plataforma. Se halla formada por marcos rígidos con columnas de sección tubular circular de 48" (1.22 m) de diámetro generalmente (ver figuras 12 hasta 19), apoyadas sobre los extremos superiores de los pilotes en la elevación de referencia (+) 34'-8" (10.57 m); e interconectadas mediante traveses de sección I fabricadas de tres placas, con peraltes que oscilan entre 3' - 6" (1.07 m) y 6' - 0" (1.83 m) en promedio. Las traveses dan soporte a sistemas de piso donde se apoya el equipo (ver figuras 12 y 13).

La Superestructura cuenta con dos sistemas de piso o cubiertas, con una superficie aproximada de 11,250 pies cuadrados (1,045.7 metros cuadrados) cada una. 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, placa antiderrapante o madera tratada con retardantes e inhibidores de fuego, dependiendo del tipo de trabajo y operación del equipo que contengan.

La primera cubierta se ubica en la elevación (+) 62' - 7<sup>15</sup>/<sub>16</sub>" (19.100 m) con respecto al nivel medio bajamar, bajo la consideración de que el equipo que aloja se mantiene por arriba de la cresta de una ola con período 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.

Los patines superiores del sistema de largueros se soportan lateralmente mediante elementos secundarios, los cuales pueden ser de 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.

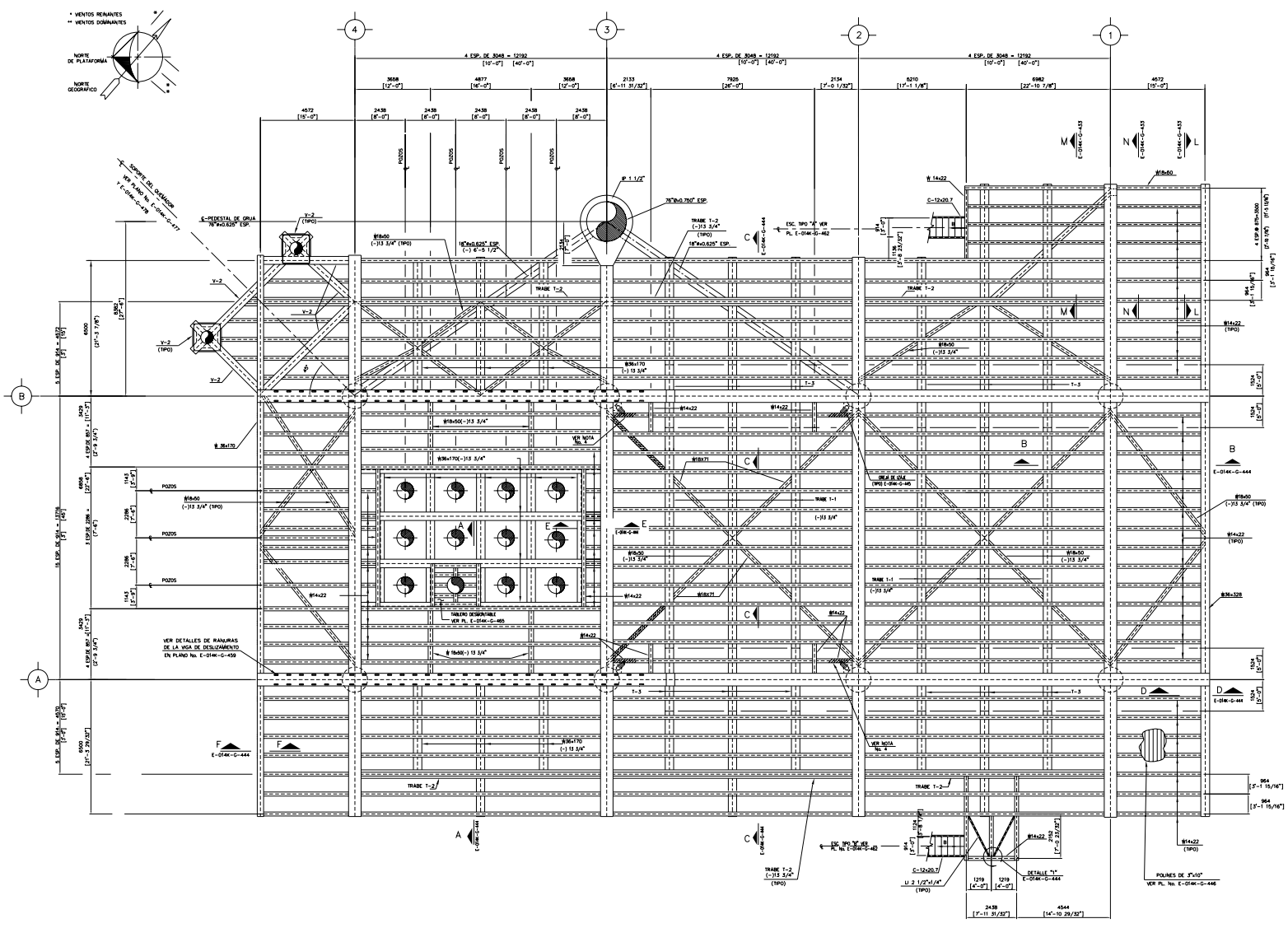


Figura 12. Planta estructural de la cubierta principal nivel (+) 25.500 (83'-7 15/16").

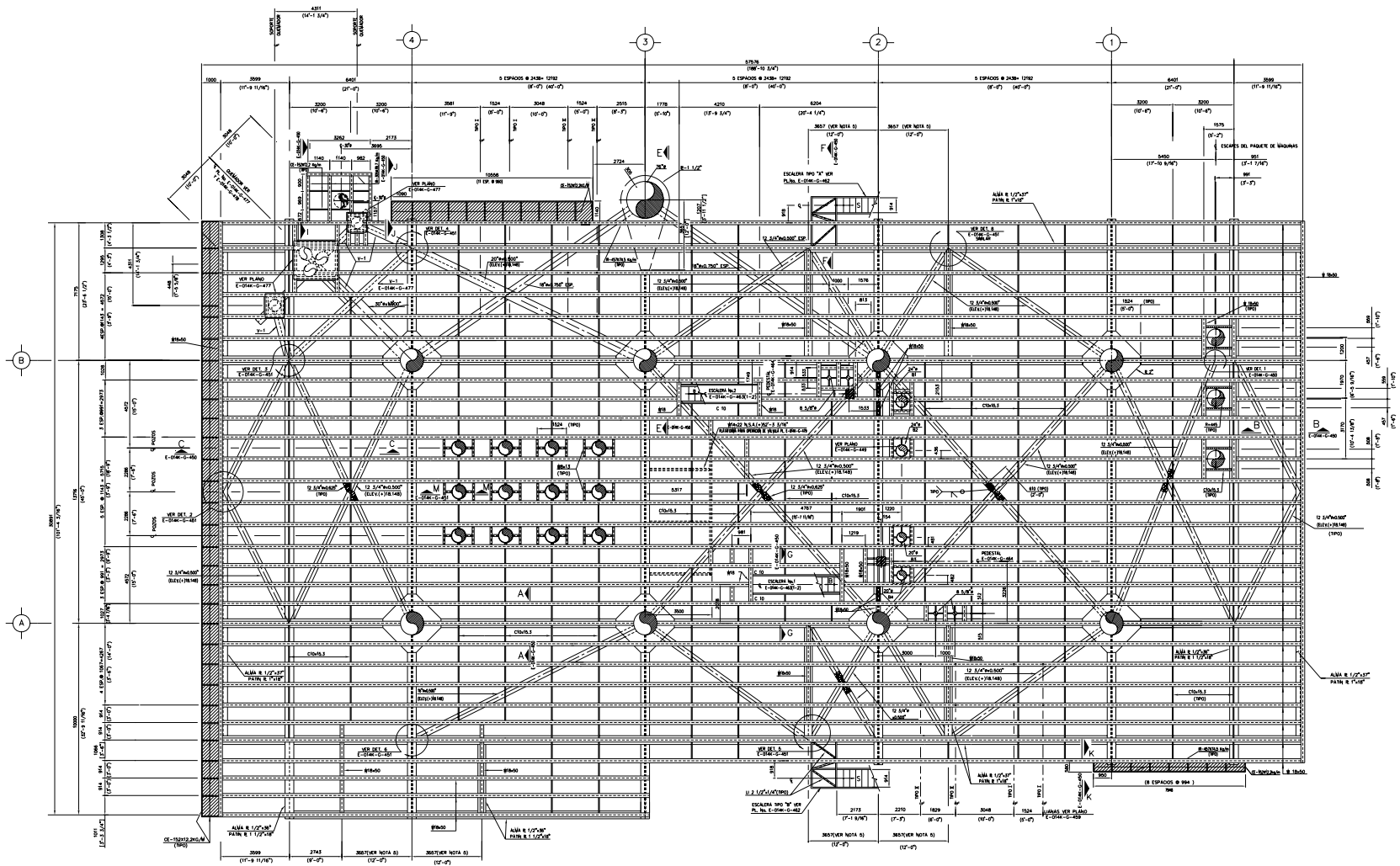


Figura 13. Planta estructural de la cubierta inferior nivel (+) 19.100 (62'-7 15/16").

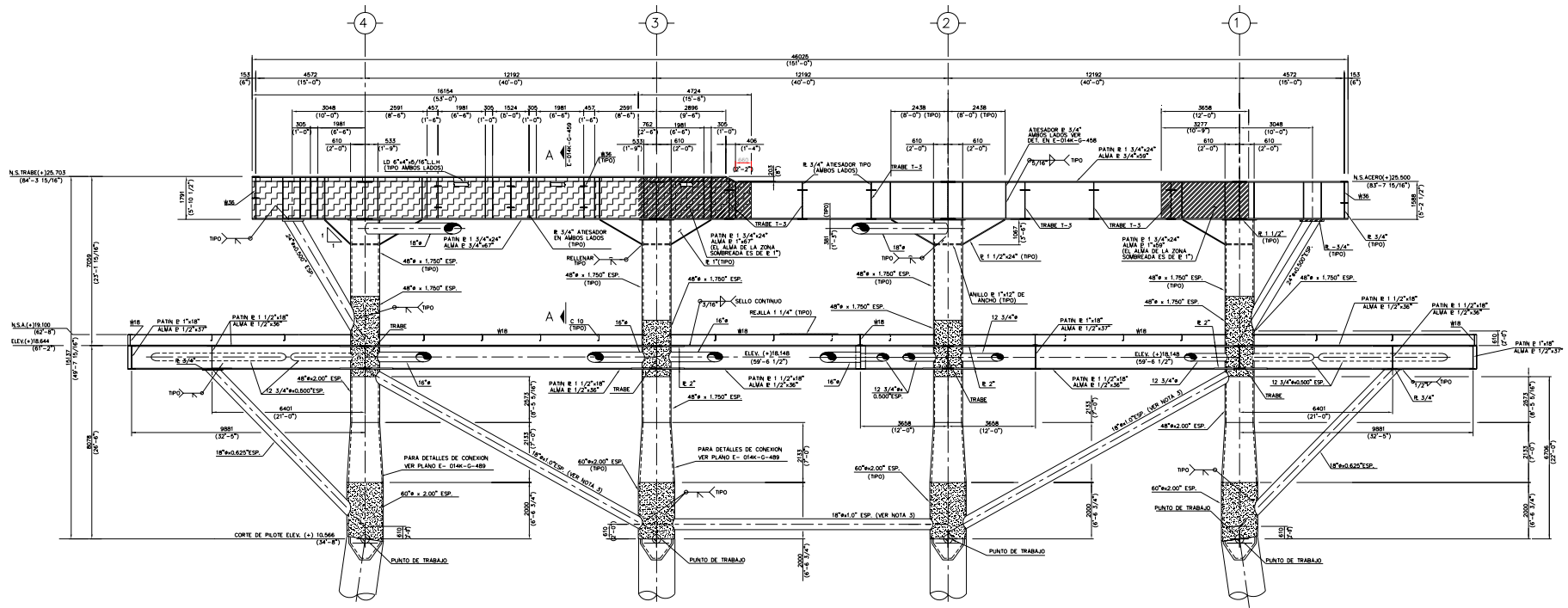


Figura 14. Superestructura elevación eje "A" (figura de referencia 12).

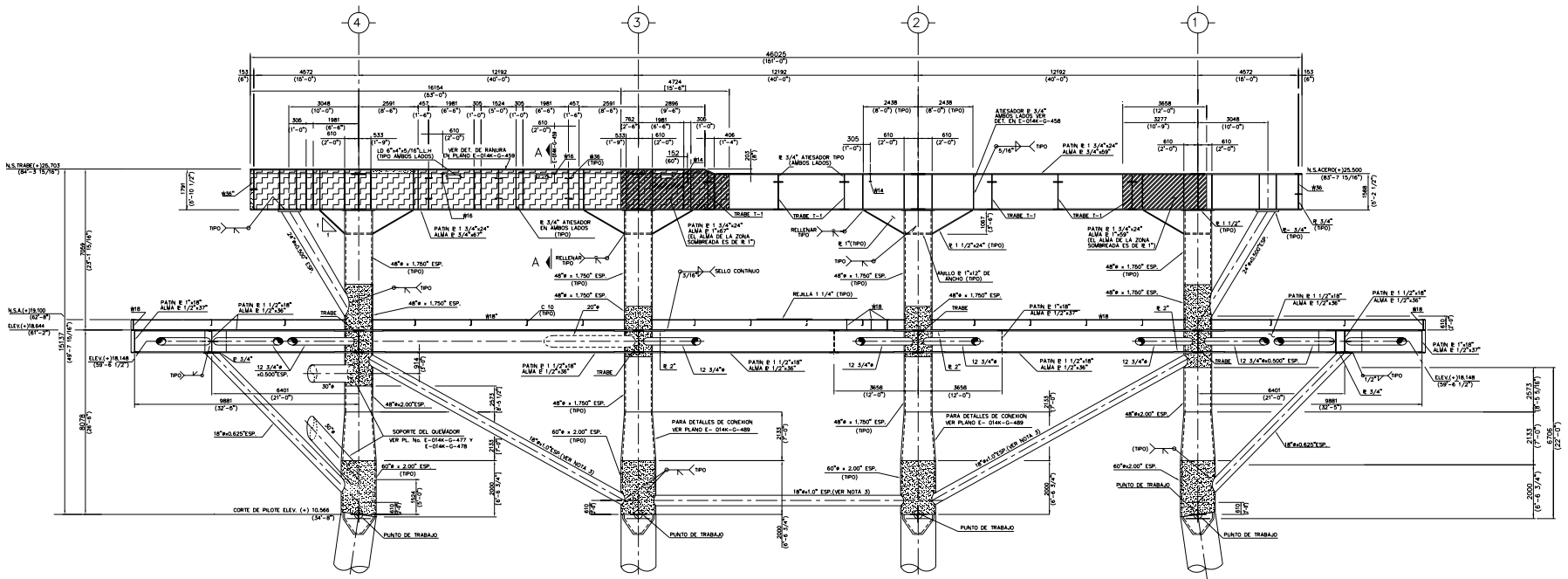


Figura 15. Superestructura elevación eje "B" (figura de referencia 12).

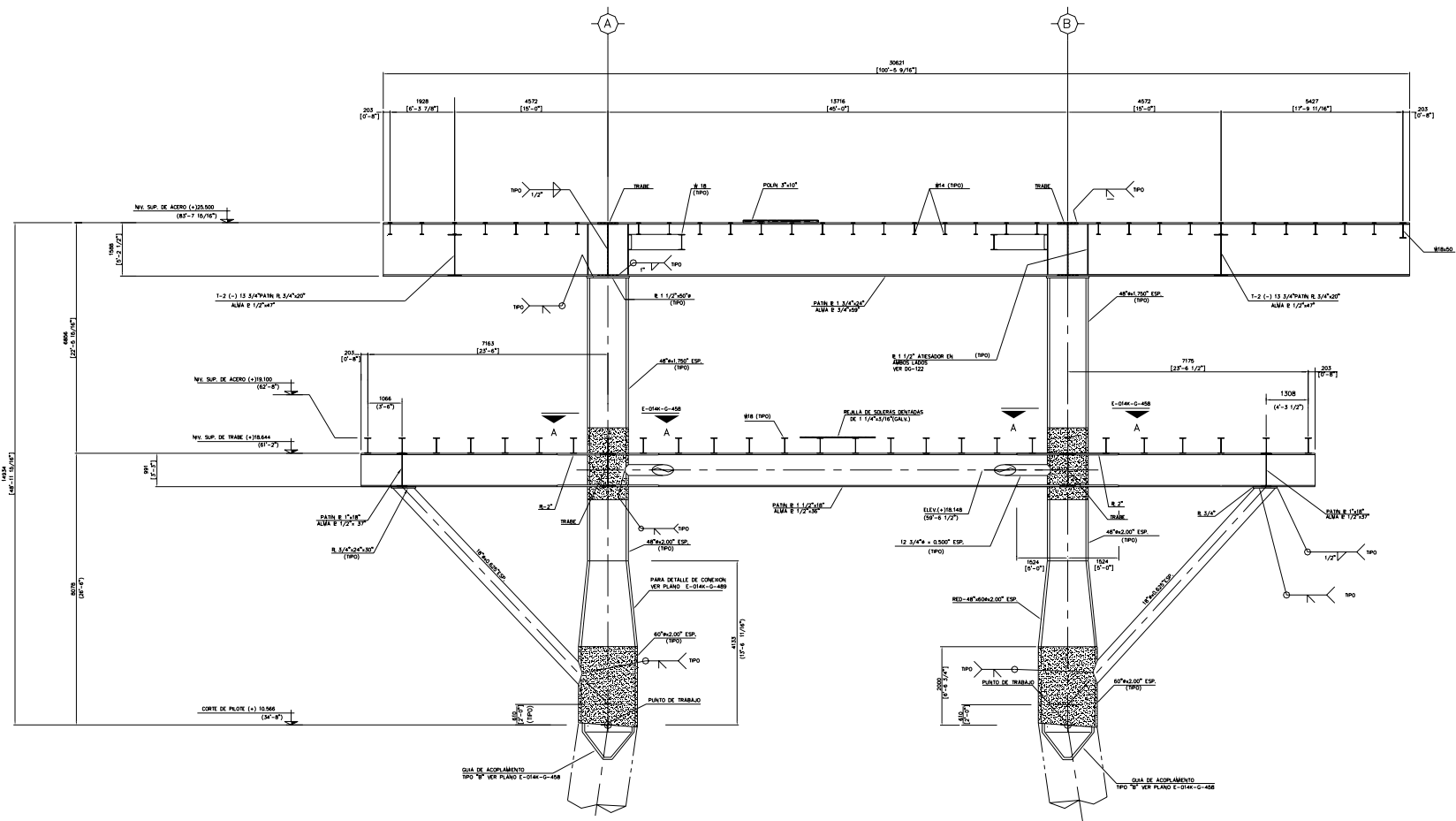


Figura 16. Superestructura elevación eje "1" (figura de referencia 12).



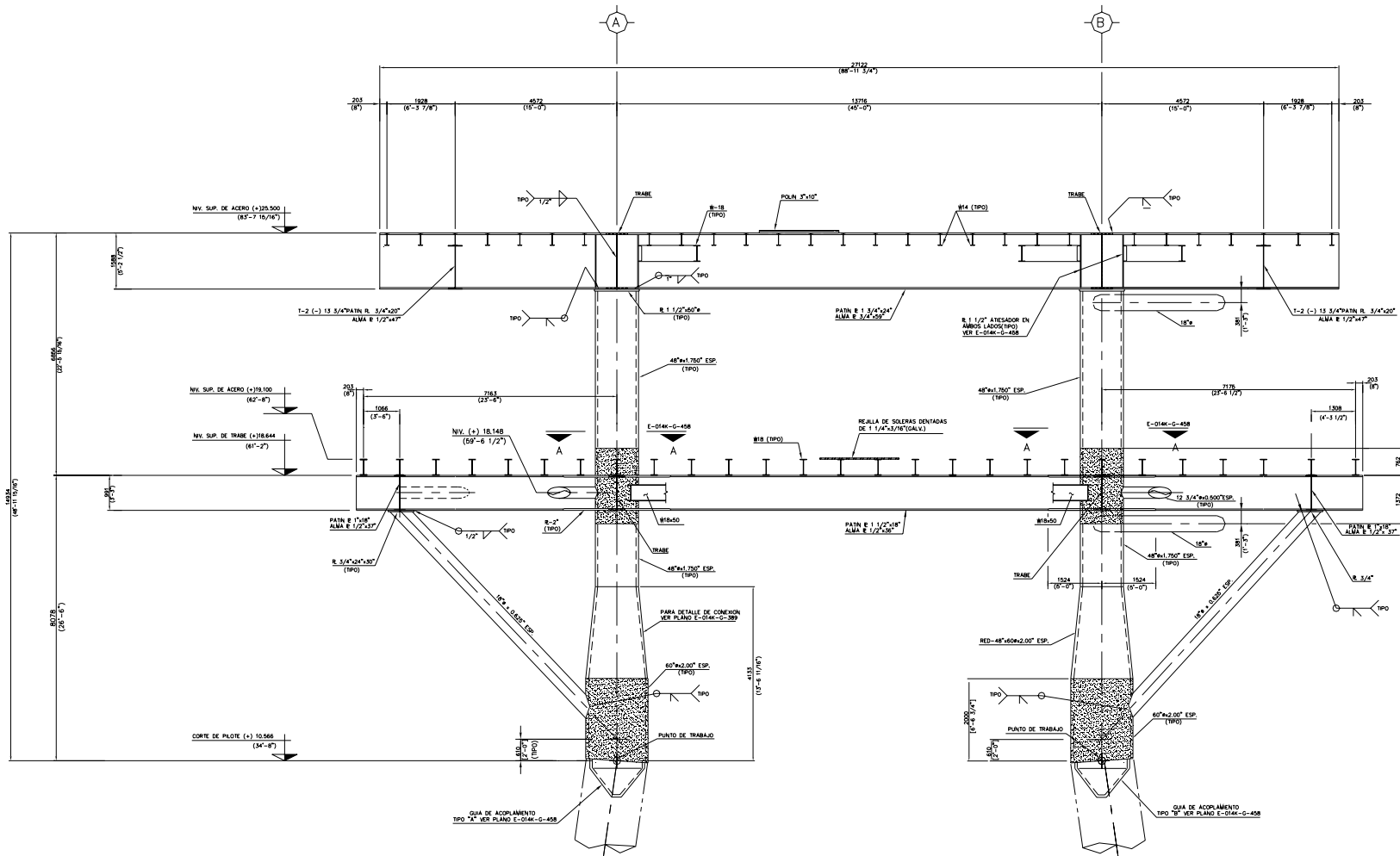


Figura 17. Superestructura elevación eje "2" (figura de referencia 12).

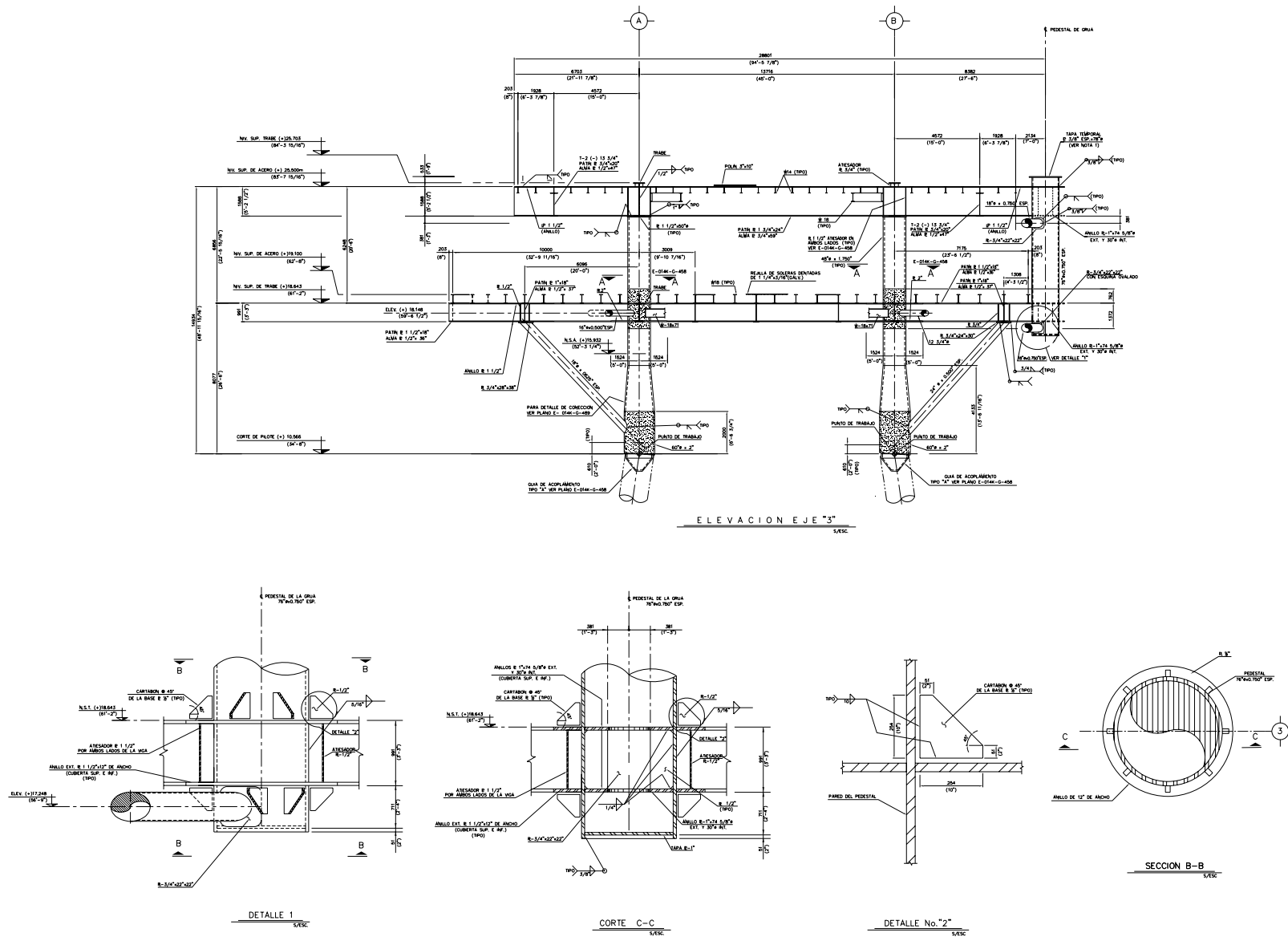


Figura 18. Superestructura elevación eje "3" y detalles (figura de referencia 12).

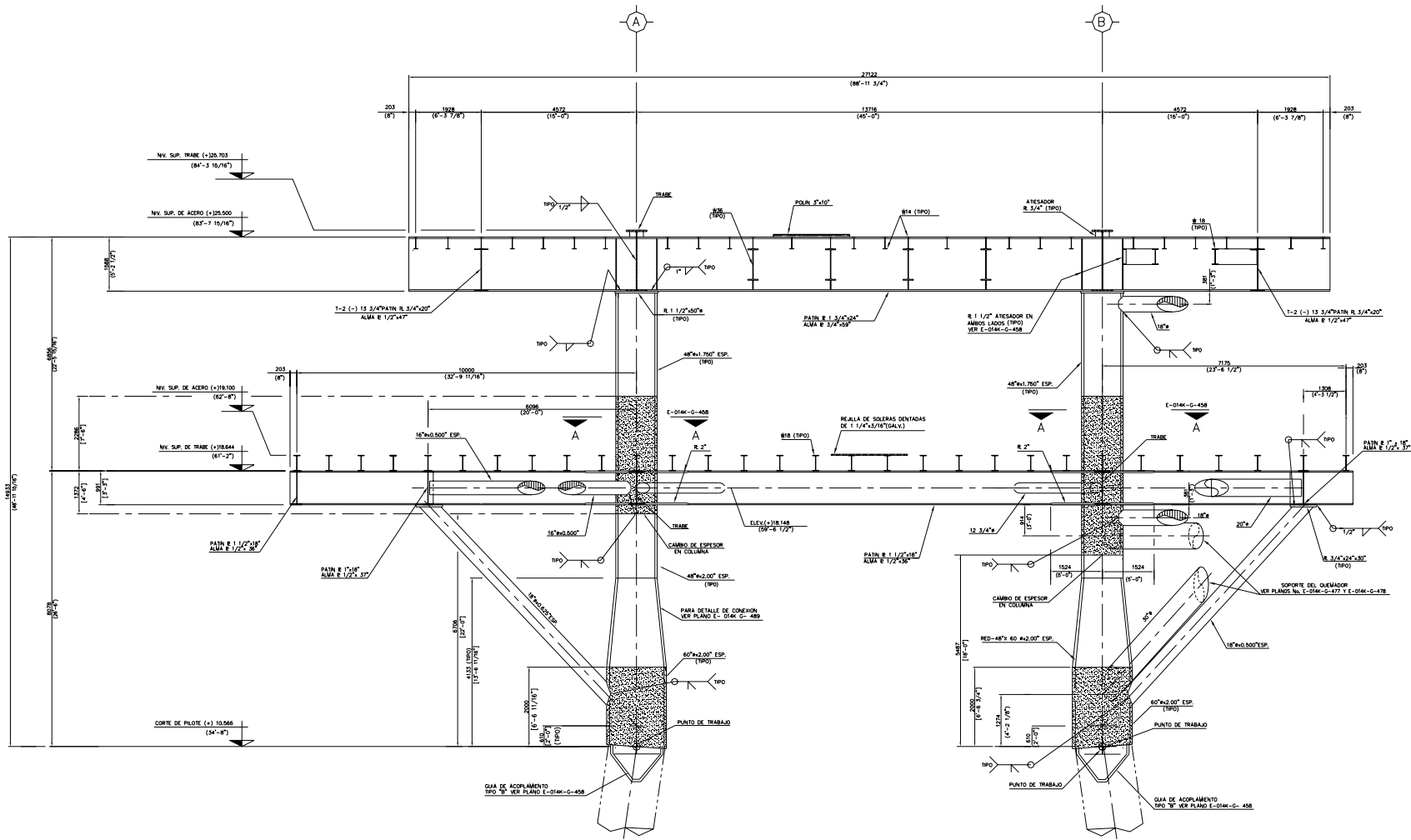


Figura 19. Superestructura elevación eje "4" (figura de referencia 12).

La sección transversal de las traveses de la primera cubierta, en su conexión con las columnas, aumenta considerablemente con objeto de proporcionar mayor restricción al giro de estas últimas, induciendo de esta manera una mayor capacidad de carga axial en ellas. El acartelamiento de las traveses en sus extremos, sigue en forma aproximada la envolvente de los diagramas de momentos flexionantes obtenidos para las condiciones de diseño en operación y tormenta.

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 traveses.

La convergencia de traveses acarteladas horizontalmente, sobre cada columna origina la formación de un anillo alrededor de ésta, que reduce notablemente los efectos locales sobre la columna durante la transmisión de elementos mecánicos en el nodo (ver figura 20).

En general el sistema de cargas gravitacionales que afectan a esta cubierta se canaliza a través de los largueros sobre las traveses de los marcos transversales principalmente.

En la segunda cubierta las traveses principales se conectan entre sí apoyándose sobre las columnas, debido sobre todo a la operación de la torre de perforación, cuya base se desliza sobre los patines superiores de las traveses longitudinales.

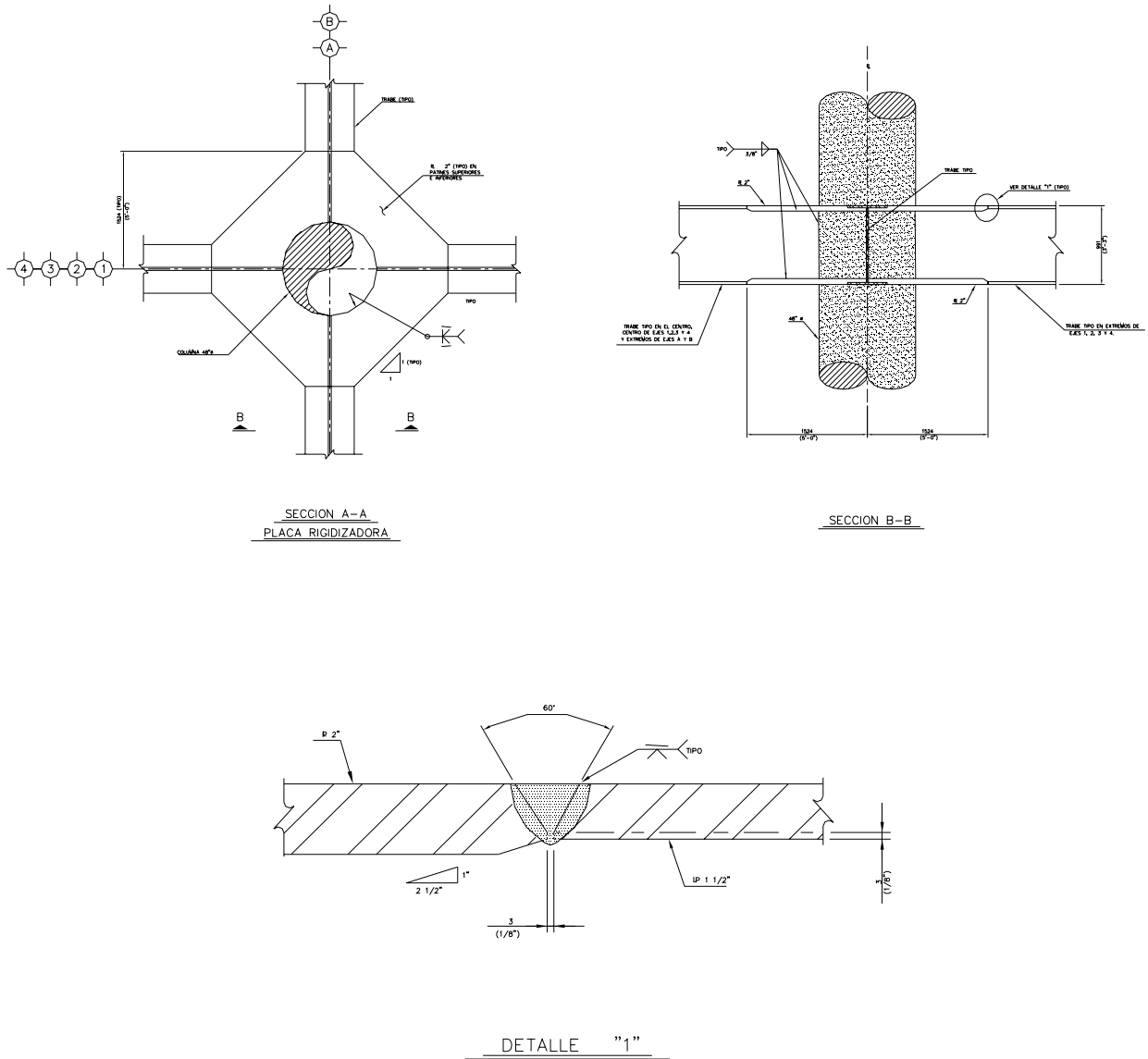


Figura 20. Placa rigidizadora.

El sistema de cargas gravitacionales de esta cubierta está integrado en general por cargas concentradas sobre las traves longitudinales, provenientes de edificios (paquetería de perforación) y torre de perforación, cuya estructura es independiente de la cubierta. Las traves longitudinales son apoyadas lateralmente en todo su peralte por traves intermedias a cada 10' - 0" (3.05 m) y son diseñadas con acartelamientos verticales en sus extremos, logrando una mayor área de cortante y módulo de sección acorde con los requerimientos por flexión.

Las traveses 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 cargas 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 relación a las columnas, su diámetro se establece en función del diámetro de los pilotes, con el que deben ser compatibles; y a su vez, el pilote debe ser compatible con el espesor de la columna. El espesor requerido en las columnas es de 1 3/4" (4.45 cm) en promedio, el cual relacionado 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 éstas, o con solapas exteriores de placa rolada.

## **II.2. Subestructura** (ver figuras 21 hasta 32).

Las plataformas empleadas en la Sonda de Campeche para la explotación de hidrocarburos pertenecen a la clasificación de plataformas de acero fijas, de acuerdo con el API (American Petroleum Institute).

Las características principales que distinguen a este tipo de plataformas, se refieren sobre todo a la Subestructura, ya que el diseño de ésta se halla en función de las variables que determinan la clasificación, así como el período de utilización de la plataforma en un mismo sitio, el cual puede considerarse de carácter permanente (varios años) o temporal (varios meses). Las propiedades del acero y de los perfiles que pueden fabricarse con este material, determinan a su vez características propias de este tipo de plataformas; como la utilización exclusiva

de perfiles tubulares de sección circular (de fabricación comercial en su gran mayoría) y caracterizando aspectos relativos a la construcción, manejo de las estructuras, embarque y transportación, instalación por secciones, conexiones en sitio, así como toda la gama de posibilidades y restricciones inherentes al manejo del acero estructural.

En cuanto a costos se refiere, cada tipo de plataforma resulta económico para un determinado rango de tirantes, fuera del cual, es necesaria la aplicación de otro tipo. Cabe señalar que la clasificación que nos ocupa es sumamente económica para tirantes relativamente pequeños, ya que para éstos, además de la sencillez en la estructuración de la Subestructura, se requiere una infraestructura para fabricación e instalación, acorde con tales dimensiones.

Los tirantes de agua prevaletientes en la Sonda de Campeche son pequeños [de 60'- 0" (18.29 m) a 342' - 0" (90.0 m)], lo cual ha determinado la utilización de este tipo de plataforma.

La Subestructura se integra totalmente por perfiles tubulares de sección circular. Su estructuración se basa en el empleo de elementos principales que constituyen sus piernas (un total de ocho), en un arreglo de 2x4, interconectados y arriostrados por elementos de menor sección, adoptando en conjunto, la forma de una pirámide truncada que se desplanta al nivel del lecho marino y con una altura que la hace sobresalir del mar hasta una elevación de (+) 33'-2" (10.11 m) sobre el nivel medio de su superficie; la inclinación de las piernas, está dada por la relación 1:8 (horizontal:vertical), mejorando las características de rigidez del conjunto y carga axial en los apoyos, en comparación con una estructura de piernas verticales.

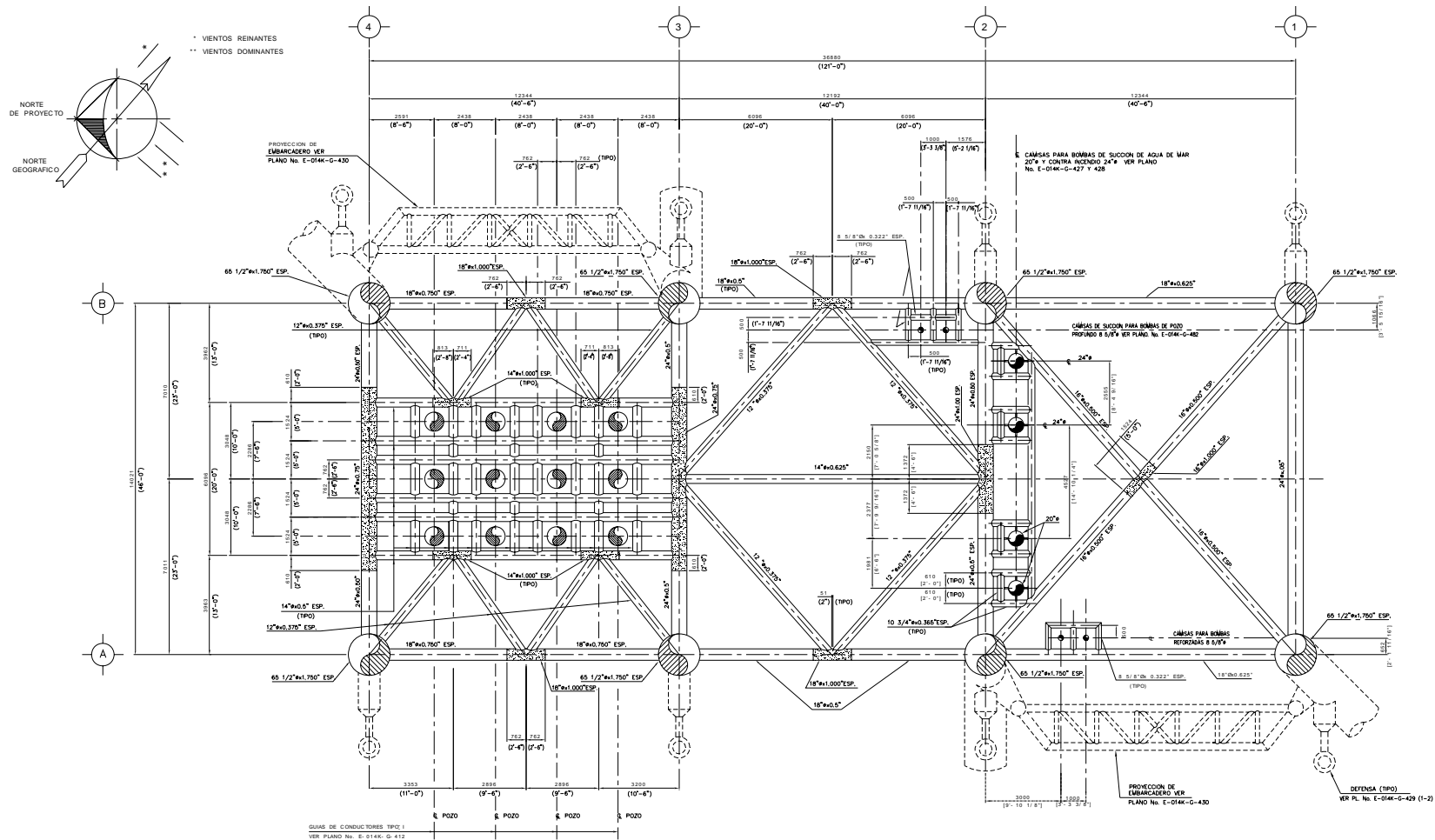


Figura 21. Planta en elevación (+) 9.350 m (30'-8 1/2").



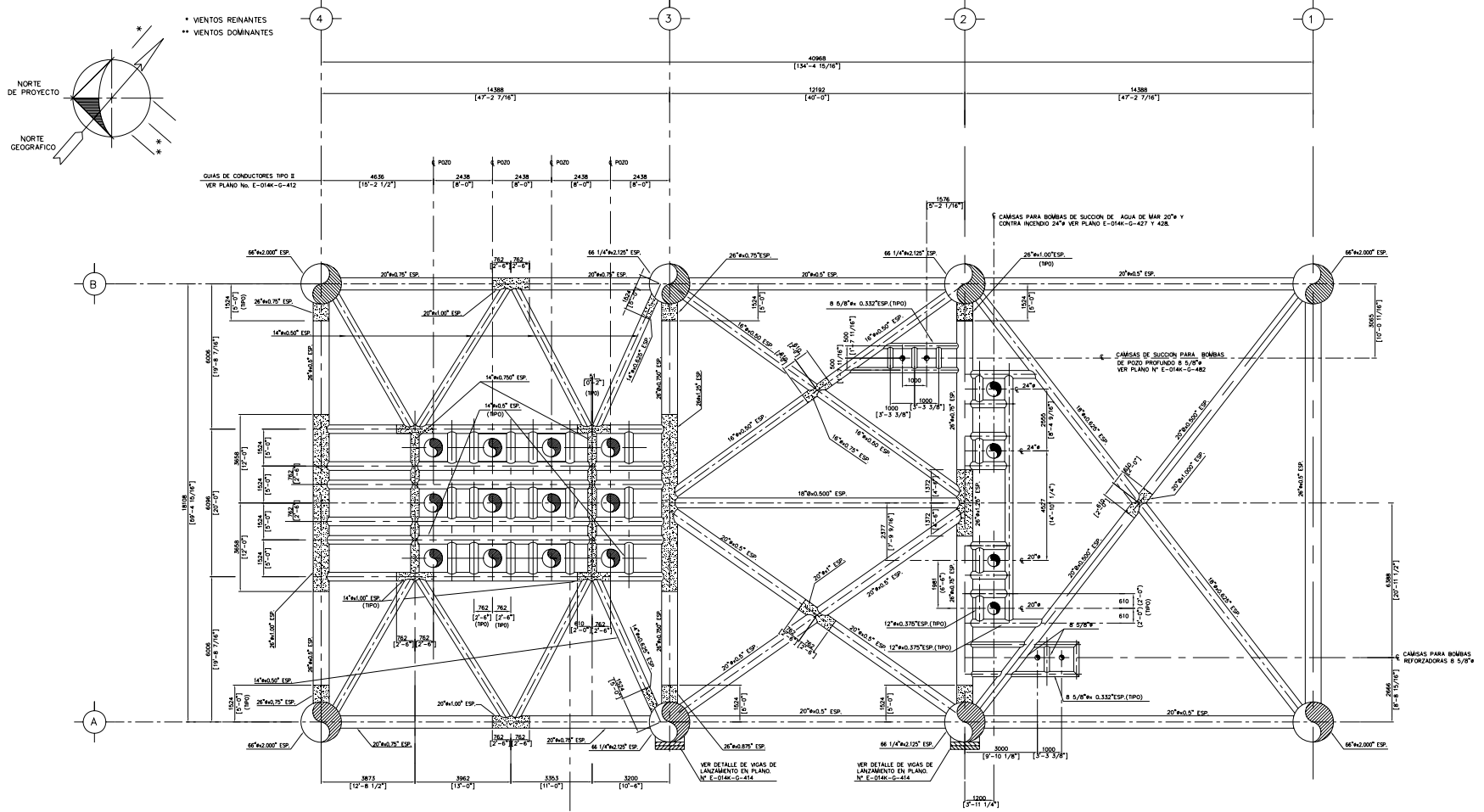


Figura 22. Planta en elevación (-) 7.000 m (22'-11 9/16").

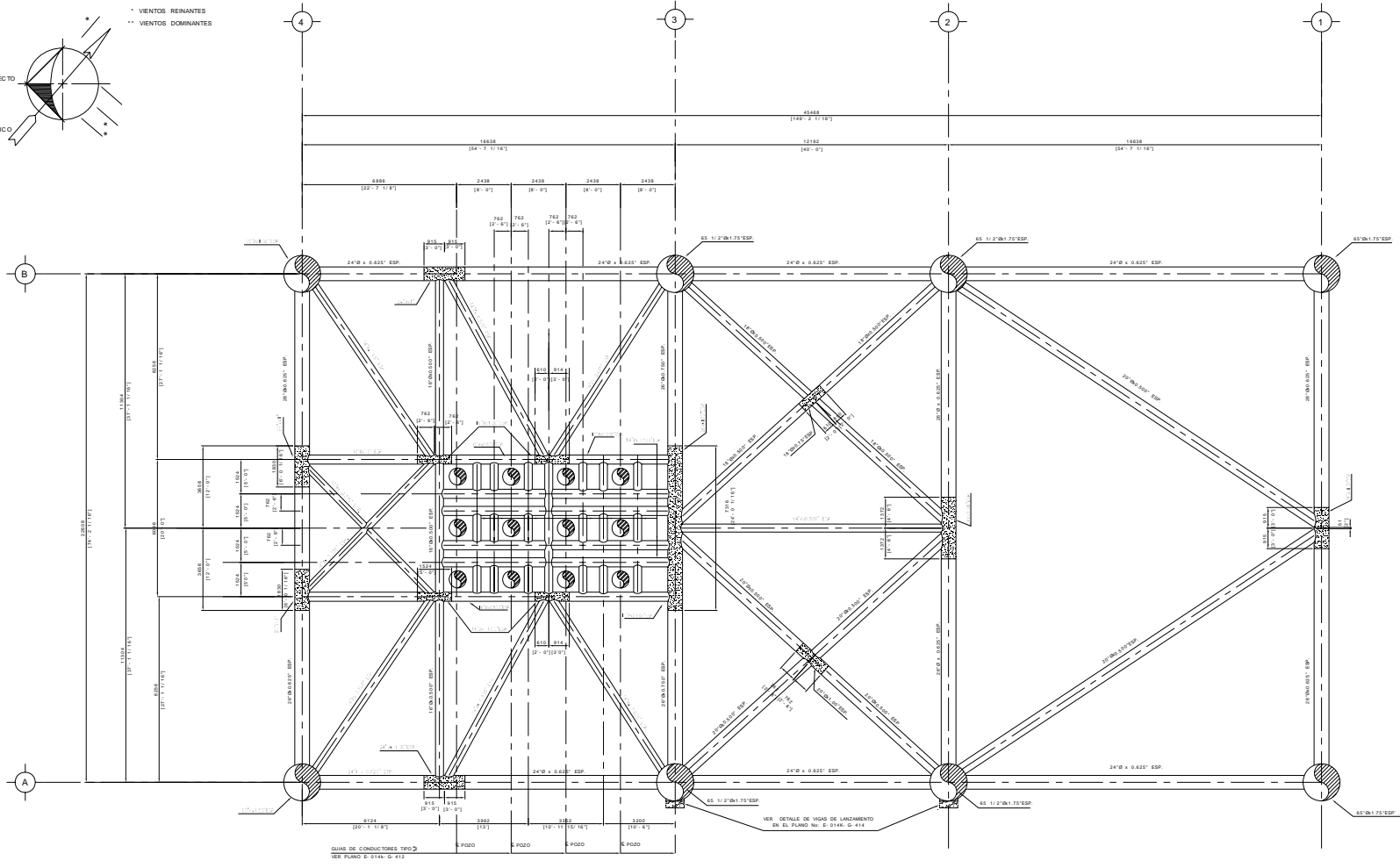
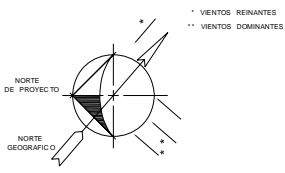


Figura 23. Planta en elevación (-) 25.000 m (82'-0 1/4").

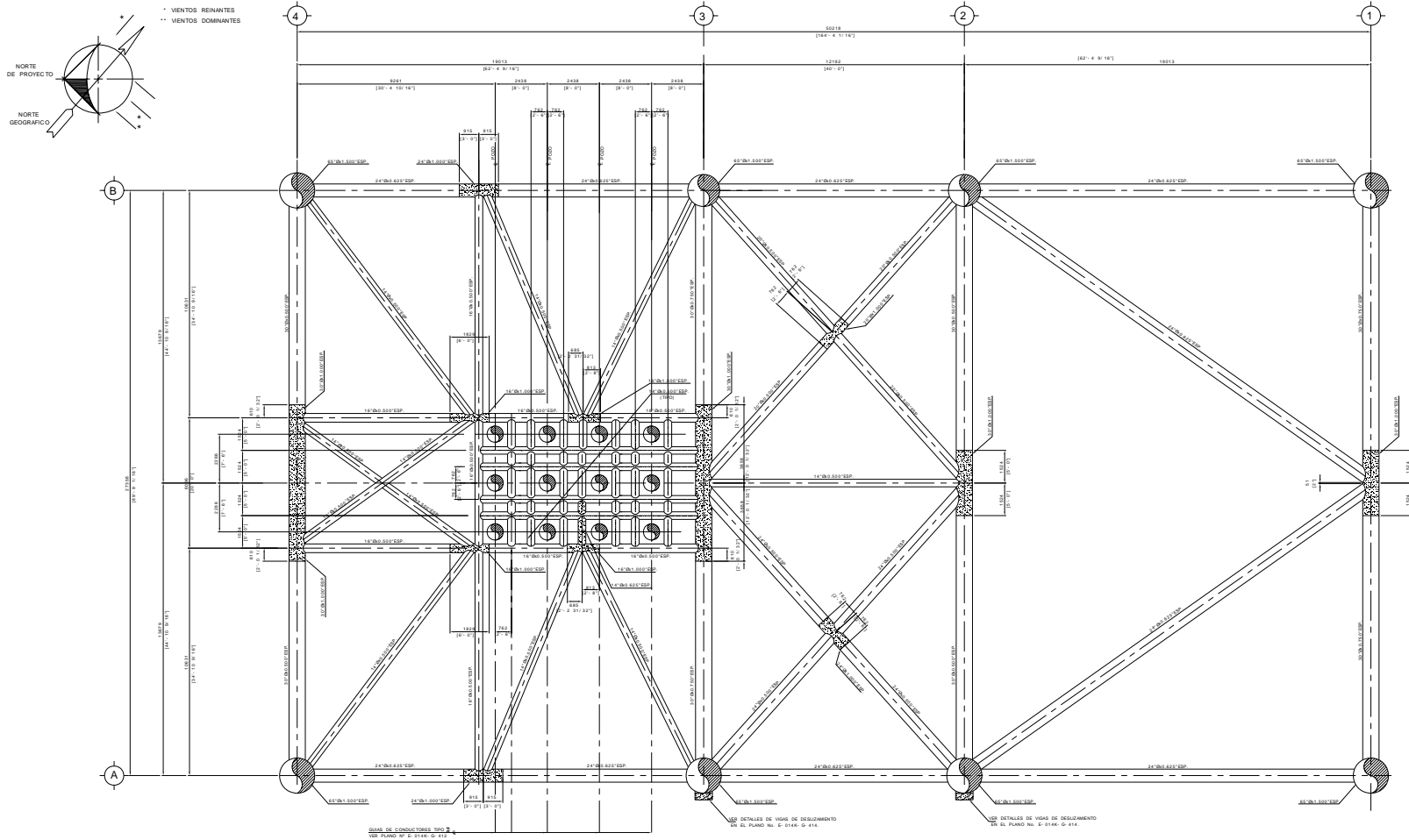


Figura 24. Planta en elevación (-) 44.000 m (144'-4 5/16").

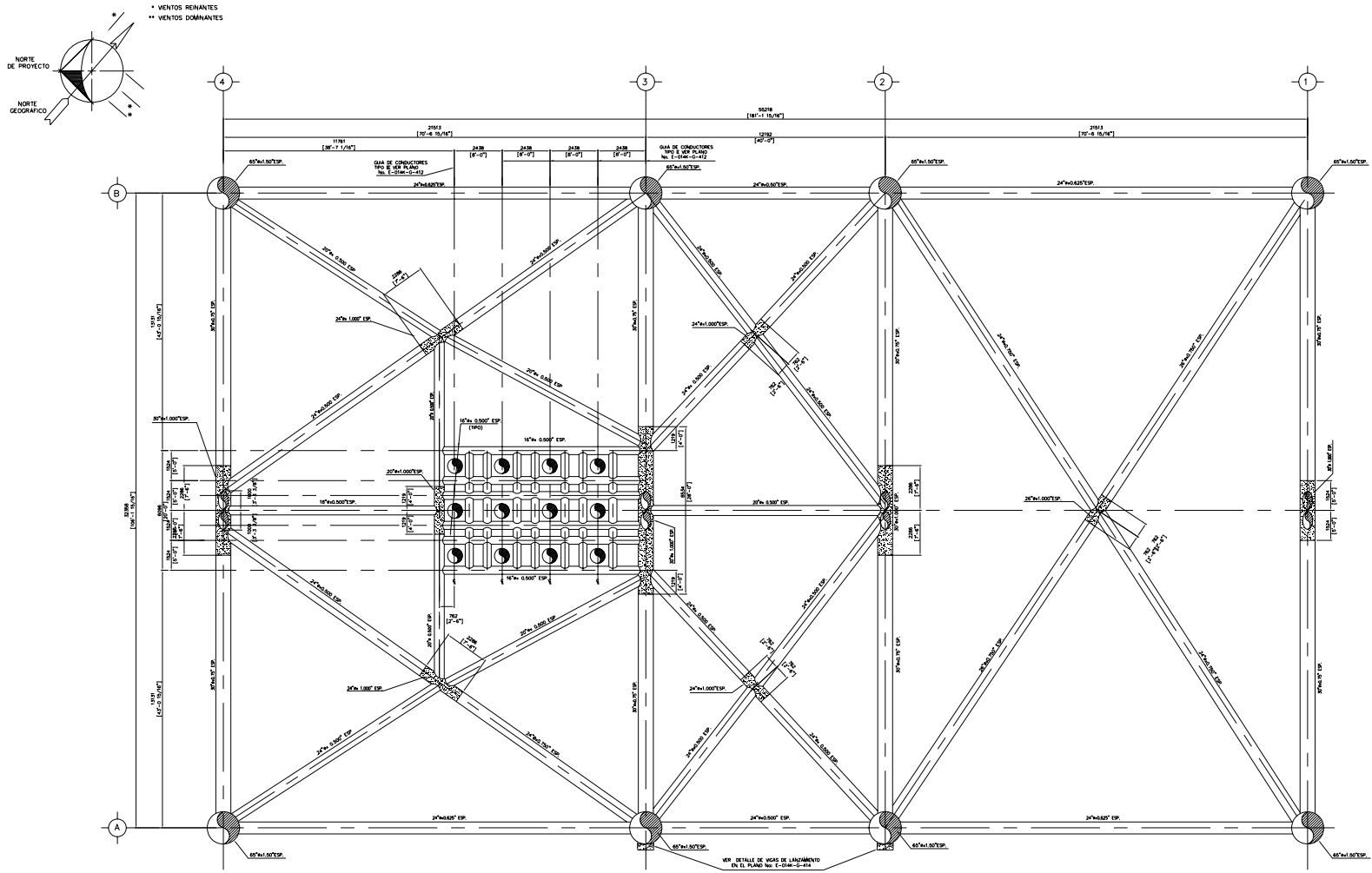


Figura 25. Planta en elevación (-) 84.000 m (209-11 11/16”).

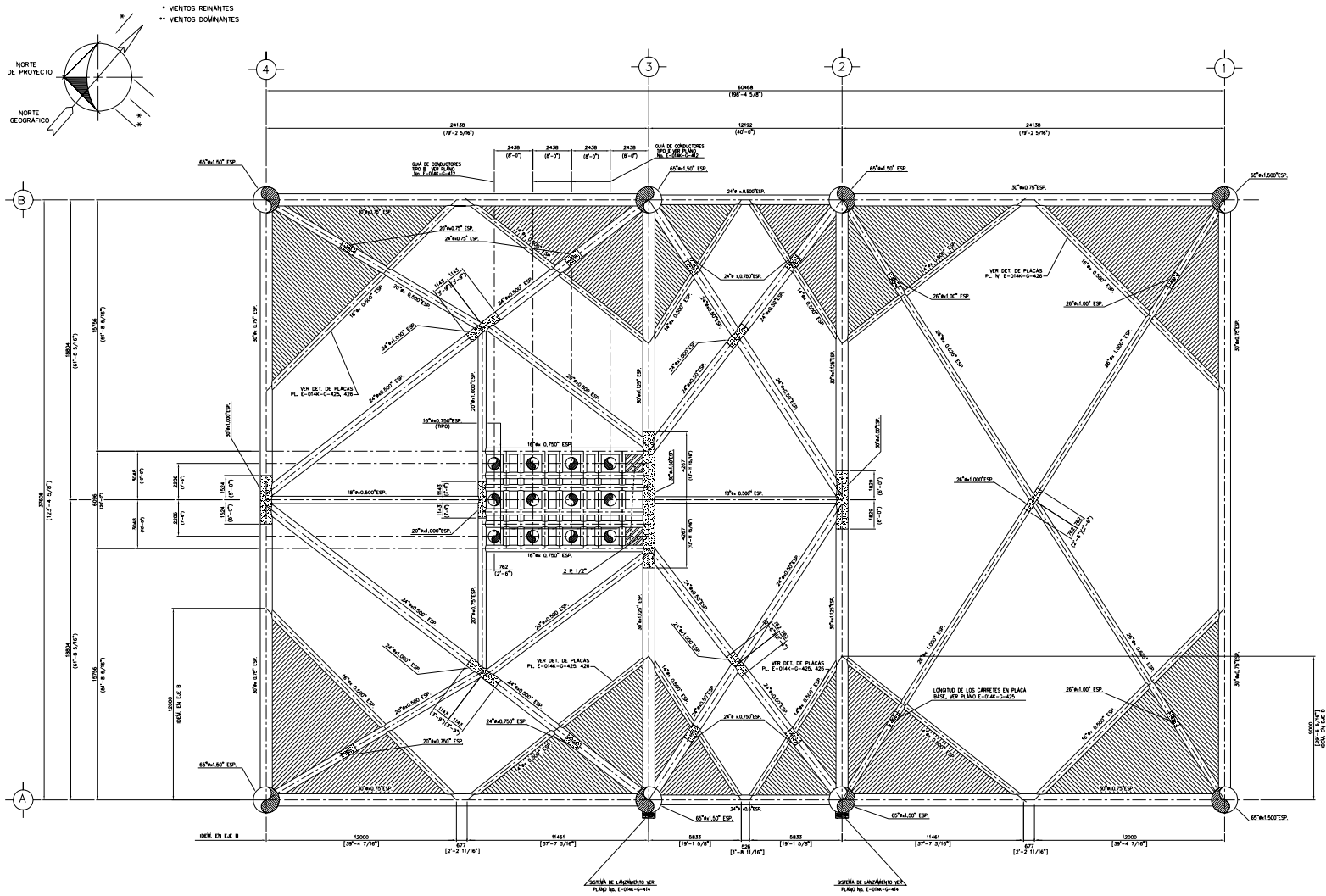


Figura 26. Planta en elevación (-) 85.000 m (278'-10 7/16").

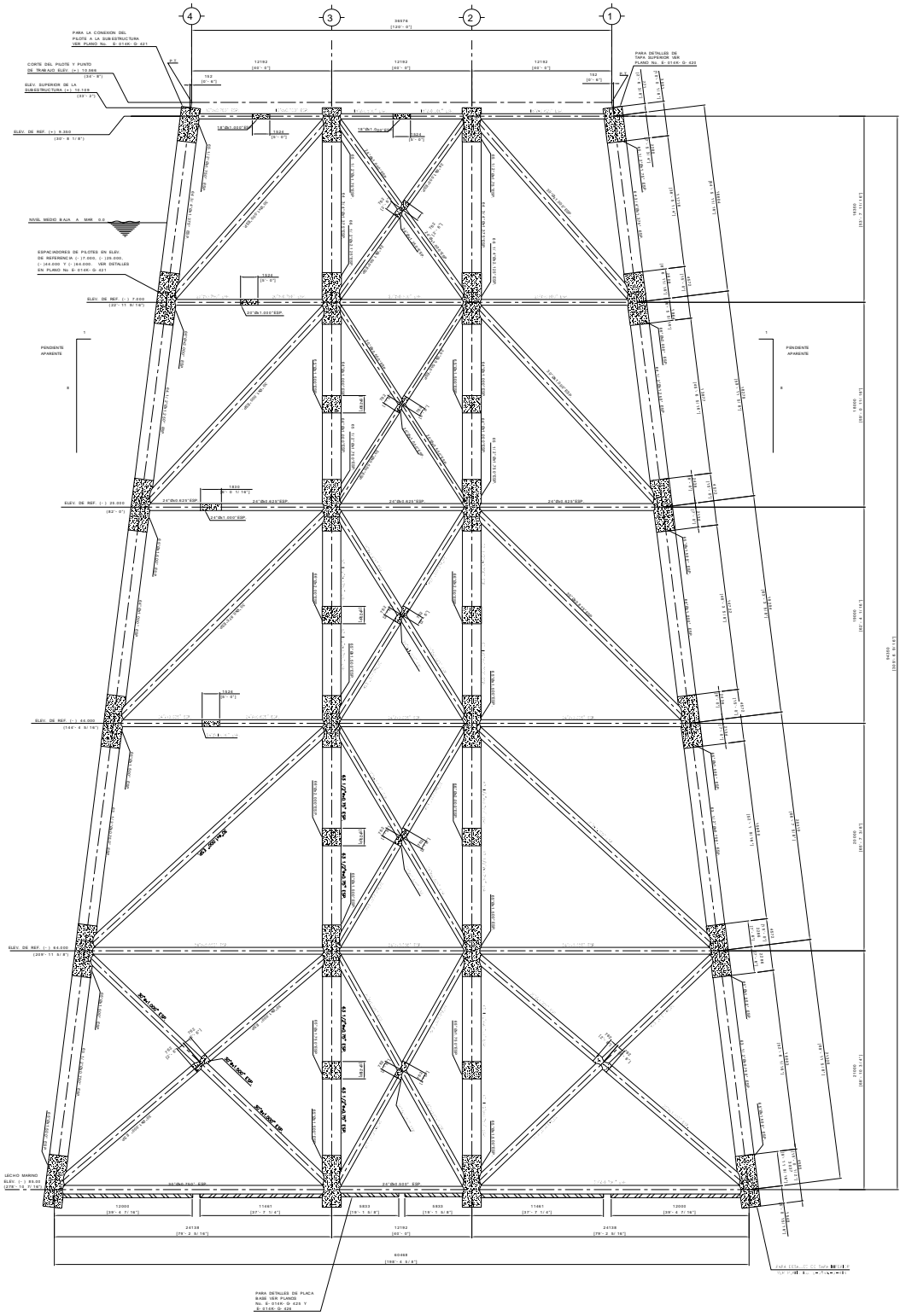


Figura 27. Elevación eje "A" (figura de referencia 21).

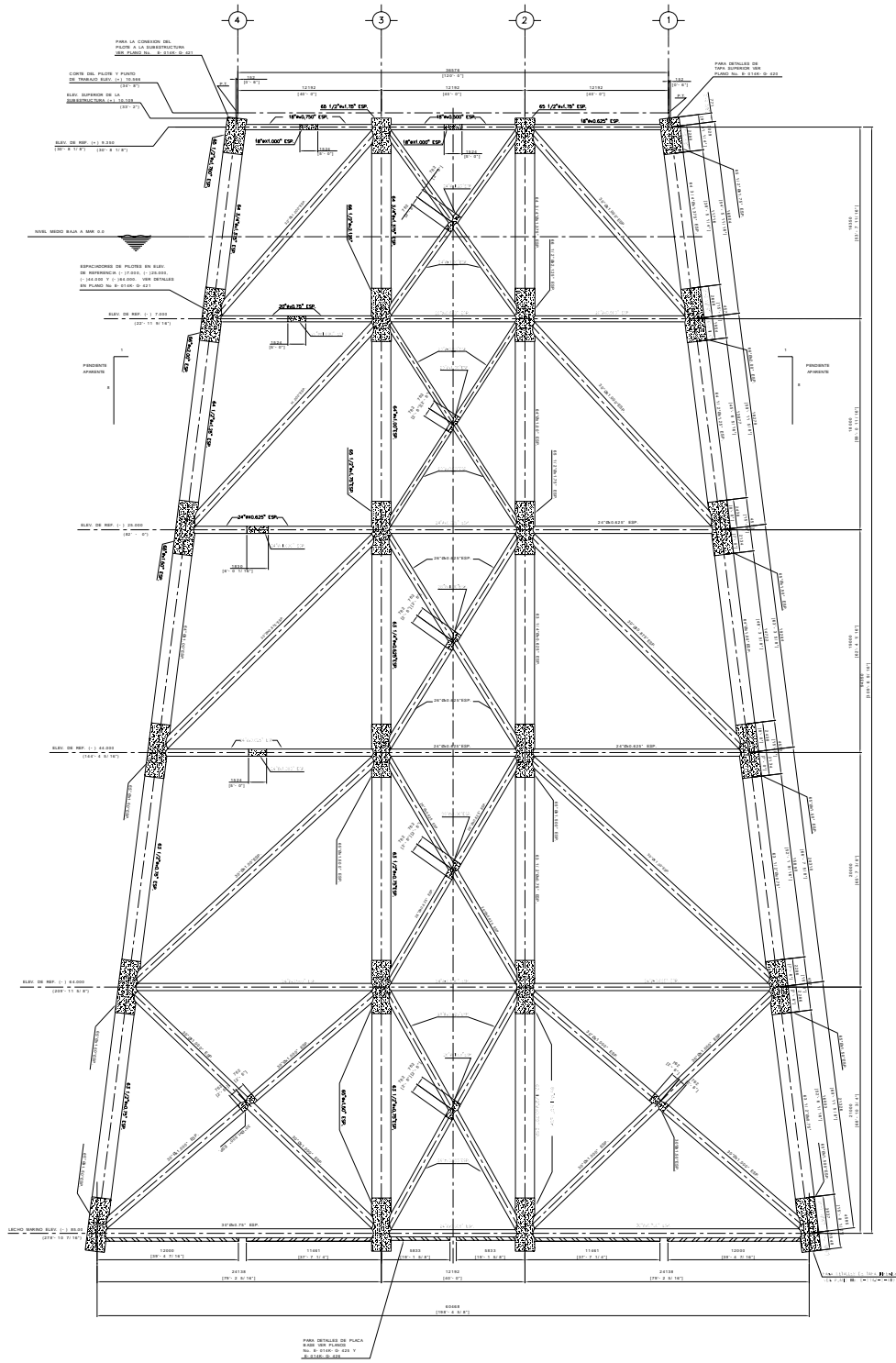


Figura 28. Elevación eje "B" (figura de referencia 21).

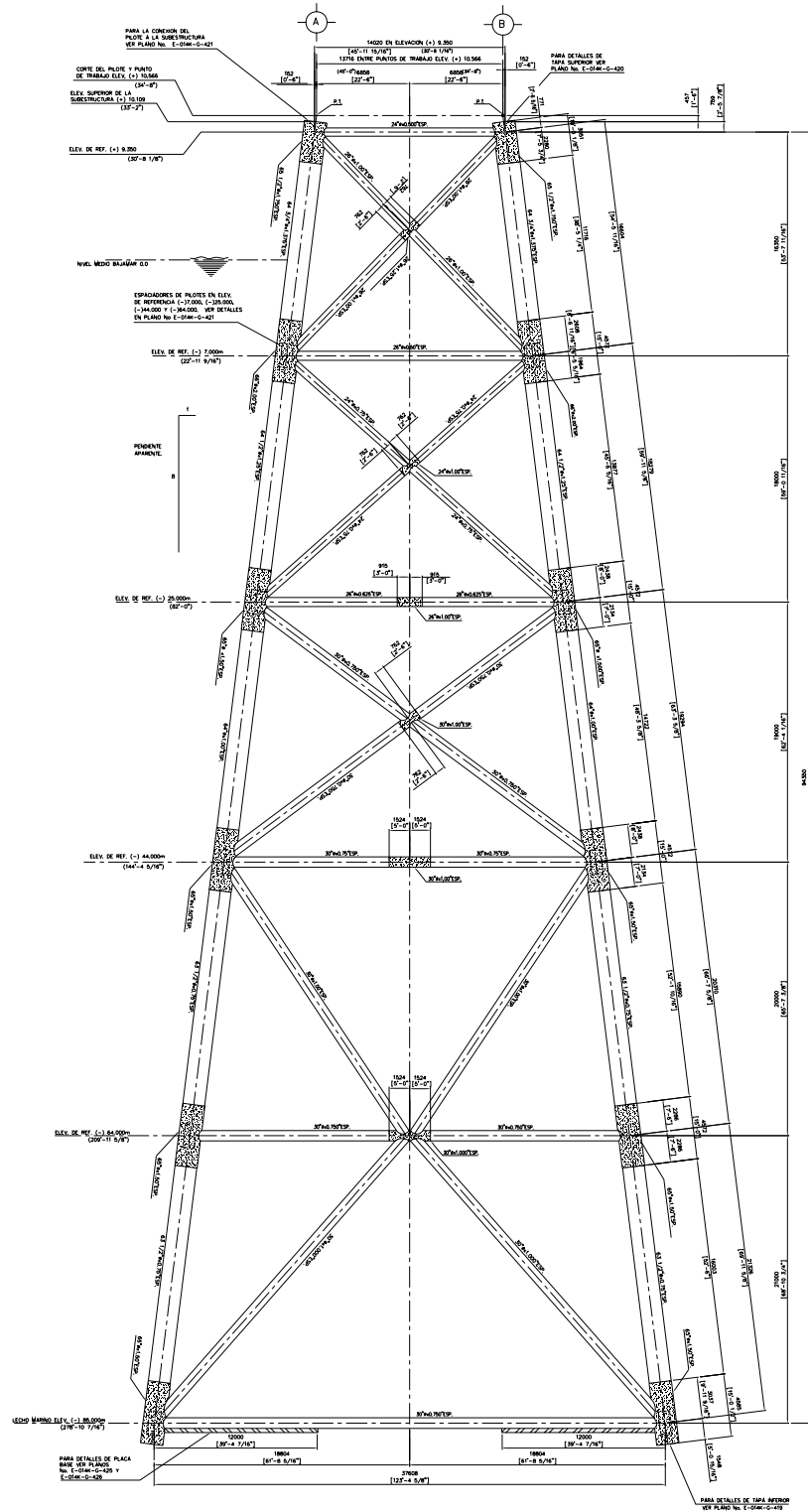


Figura 29. Elevación eje "1" (figura de referencia 21).



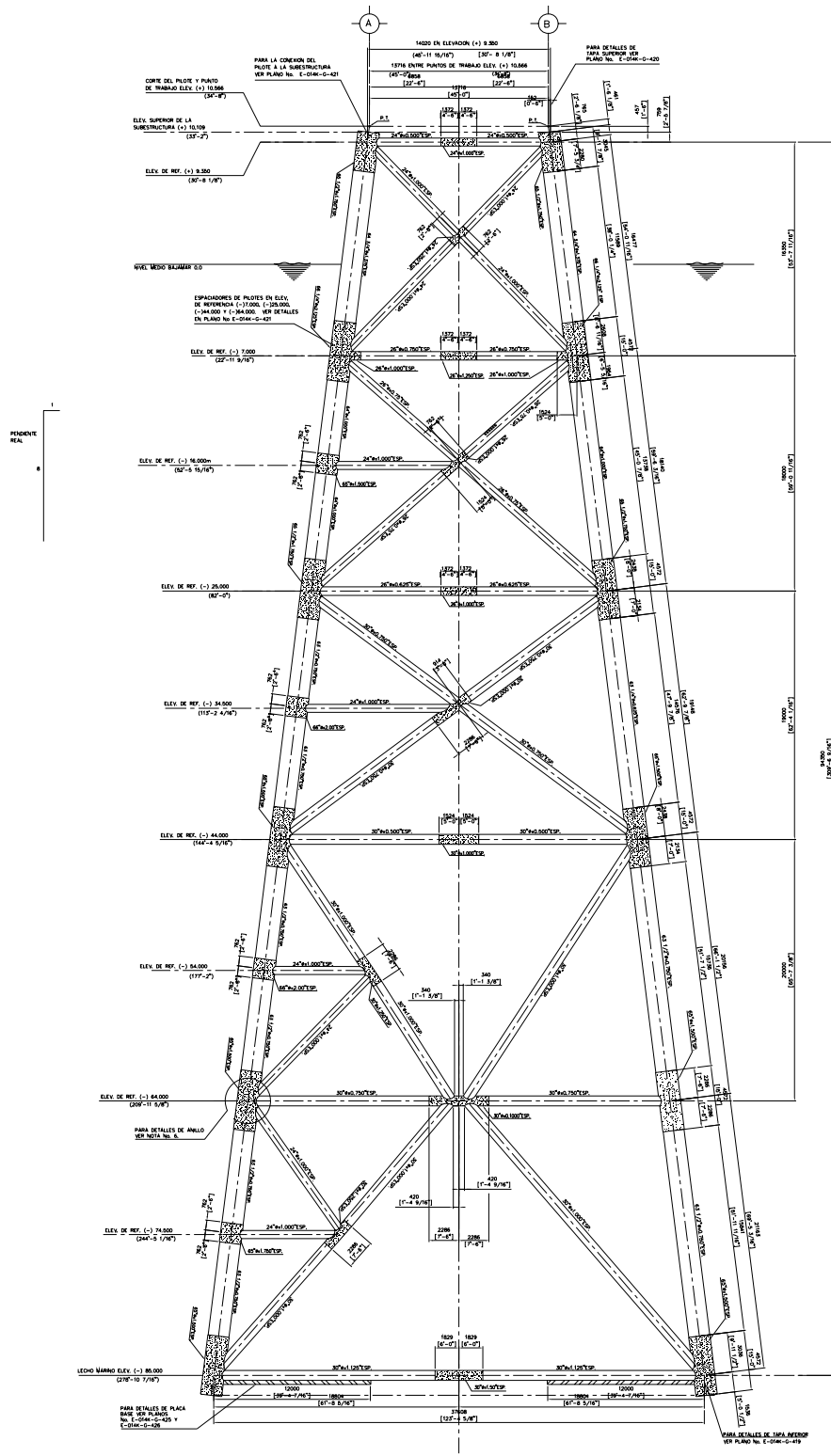


Figura 30. Elevación eje "2" (figura de referencia 21).

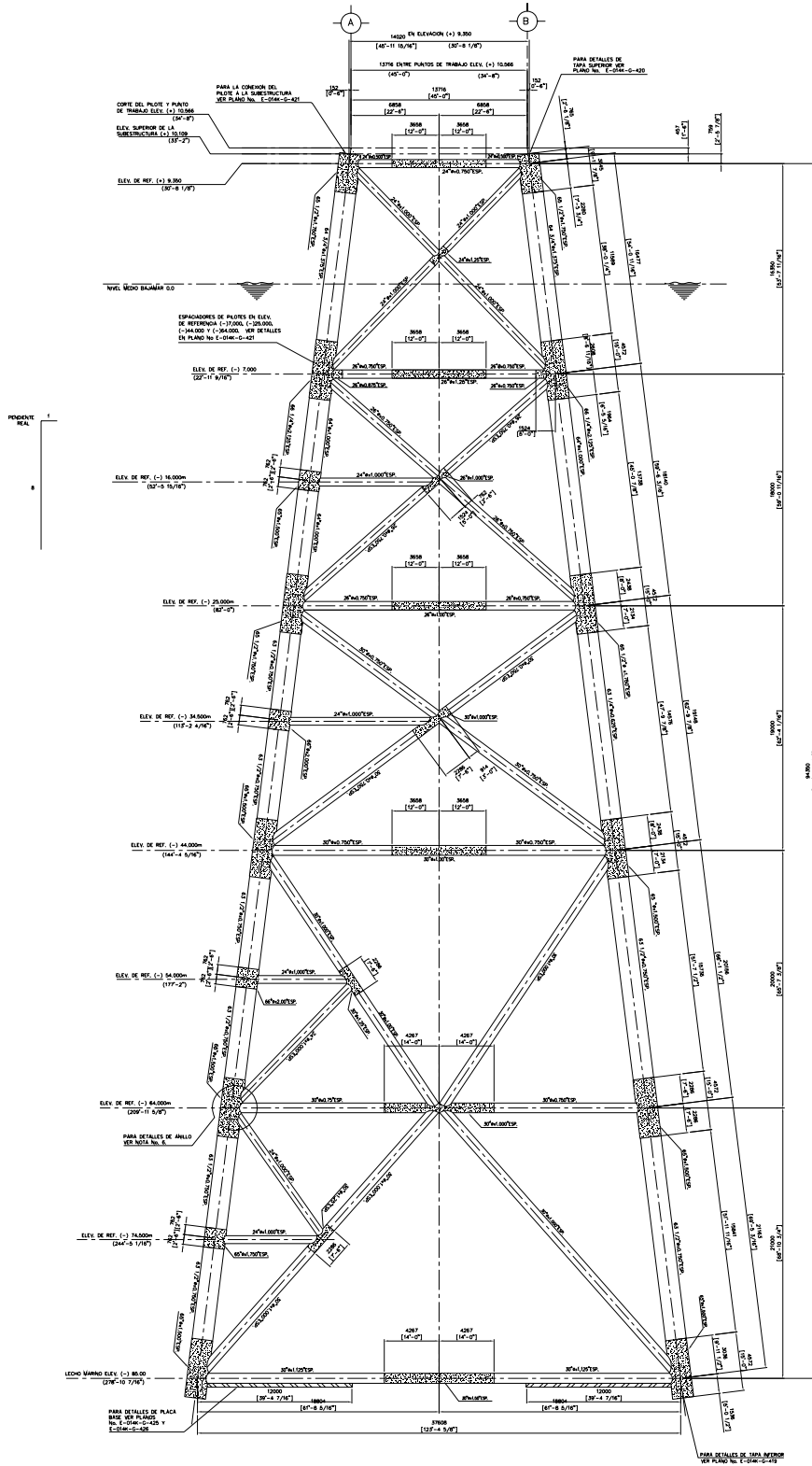


Figura 31. Elevación eje "3" (figura de referencia 21).

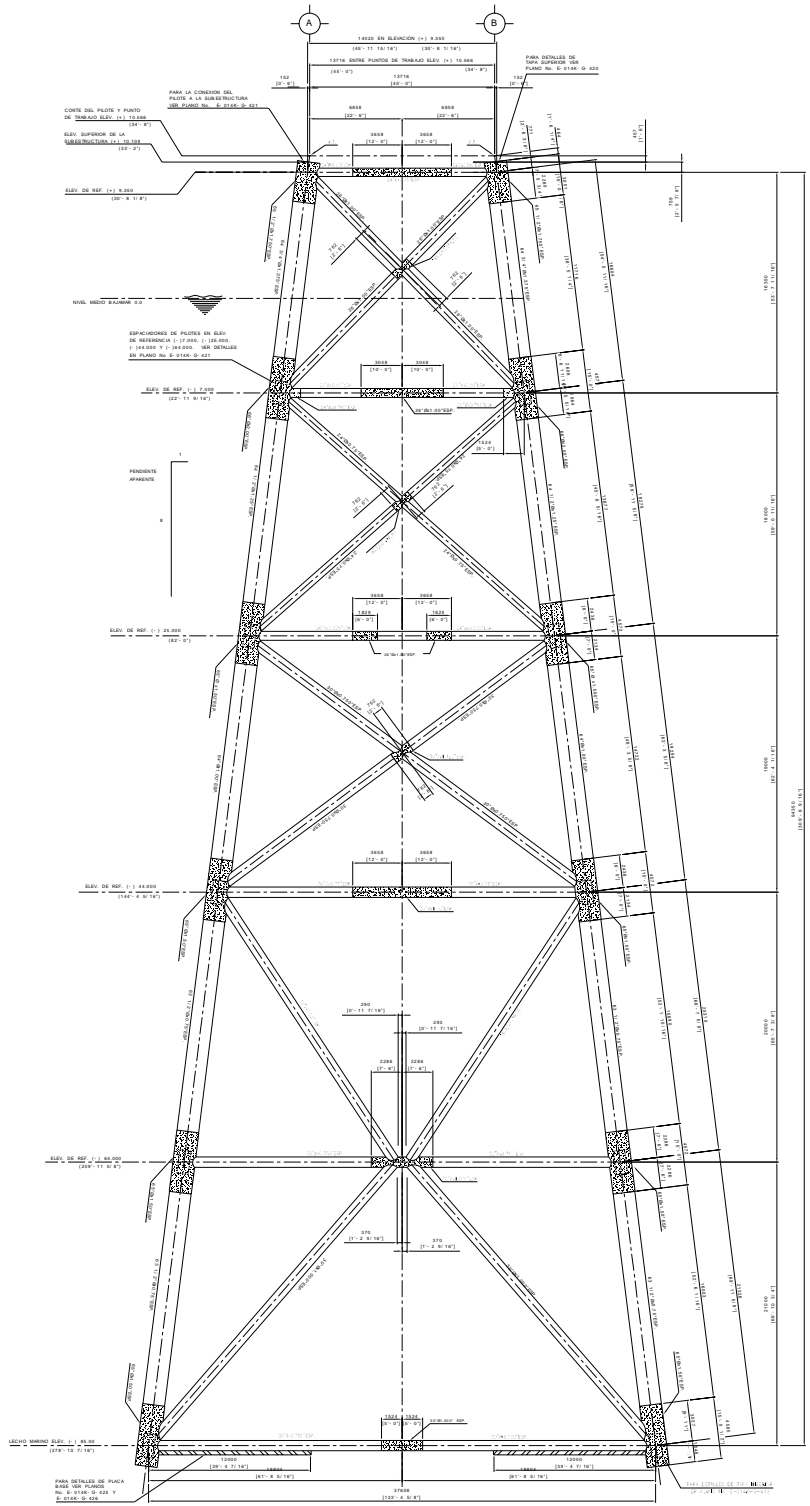


Figura 32. Elevación eje "4" (figura de referencia 21).

El trabajo de la Subestructura se realiza en combinación con los pilotes, que se hallan en forma concéntrica dentro de sus piernas, a través de las cuales han sido hincados en el suelo marino; los pilotes se extienden hasta una elevación de (+)34'-8" (10.57 m) sobre la superficie media del mar, siendo conectados rígidamente con las piernas de la Subestructura en la elevación (+)33'-2" (10.11 m). De esta manera, la Subestructura se apoya en los extremos superiores de los pilotes.

La Subestructura contiene en el interior de sus piernas, placas espaciadoras, que limitan la holgura existente entre el diámetro interior de éstas y el diámetro exterior de los pilotes, constituyendo puntos de contacto entre ambos elementos. Las placas espaciadoras se colocan en varios puntos a lo largo de las piernas, coincidentes con grupos de arriostramientos horizontales.

La Subestructura constituye junto con los pilotes una estructura con rigidez y estabilidad suficientes, capaz de resistir las cargas provenientes de la Superestructura, así como de las actuantes sobre ella, debidas a peso propio y oleaje, lo cual se debe a su interrelación, expresada en los siguientes conceptos:

- A. La Subestructura interconecta a los ocho pilotes, determinando el trabajo conjunto de éstos.
- B. La Subestructura proporciona apoyo lateral a los pilotes a través de las placas espaciadoras: limitando sus longitudes libres de pandeo.
- C. La Subestructura ejerce restricción al giro de los pilotes al nivel del lecho marino.
- D. En los puntos en que tiene contacto con los pilotes, la Subestructura transmite sobre ellos sus cargas de peso propio y oleaje.

La estructuración adoptada en la Subestructura y su participación en la estructura total, determina que sus arriostramientos inclinados trabajen principalmente por carga axial (un 70% de su relación de interacción en promedio), mientras que en

los horizontes, la flexión es la predominante. Los diámetros empleados comúnmente para éstos elementos son desde 12 ¾" hasta 30".

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. Las solicitaciones que afectan a los miembros integrantes de las piernas, son por un lado aquellos elementos mecánicos generados por su participación como barras, y por otro, aquellos de tipo local, debidos al efecto de punzonamiento por parte de los arriostramientos que inciden sobre ellos. Condiciones que aunadas a requerimientos de espesor para su conexión con los arriostramientos, así como el de satisfacer la rigidez necesaria para la transmisión de sus efectos, originan que tales miembros se constituyan de espesores diferentes e incluso de aceros diferentes.

El 100% de las conexiones de la Subestructura son soldadas y las soldaduras empleadas en ellas son de penetración completa, correspondiendo a la clasificación del AWS D1.1, y a los procesos de soldadura recomendados por este código.

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

- 1.- Gran parte de ellos trabajan como viga-columna, siendo predominante el efecto axial.
- 2.- El tipo de pilotes y la sección transversal de éstos.
- 3.- Obtención de conexiones seguras, de manufactura relativamente sencilla, de gran resistencia a la fatiga.
4. Baja oposición multidireccional al movimiento del agua, originando fuerzas mínimas de oleaje.

- 5.- Buen comportamiento ante fuerzas hidrostáticas.
- 6.- Ligereza, debida a las cualidades propias de su geometría.
- 7.- Aprovechamiento de su flotación durante las maniobras de instalación.
- 8.- Mínima superficie mojada, en relación a su protección anticorrosiva.
- 9.- Aplicabilidad de procesos automáticos de corte y soldadura.

### **II.2.1. 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 como 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 (ver figura 33).**

Es un sistema constituido por dos vigas, donde cada una se compone de una cama de placa conectada a un arreglo de polines, sobre el cual se inicia la fabricación de la Subestructura sus funciones principales son:

- A. Dar apoyo a la Subestructura durante la fabricación.
- B. El sistema constituye un esquí para el deslizamiento de la Subestructura durante la maniobra de arrastre, en las etapas de embarque y lanzamiento.
- C. Distribuye las cargas del peso propio de la Subestructura sobre las piernas en que se apoya, así como sobre las traveses de fabricación del patio o de las vigas del chalán durante su transporte y lanzamiento.
- D. El arreglo de madera proporciona el material de contacto entre la estructura y las traveses sobre las que se apoya y desliza.

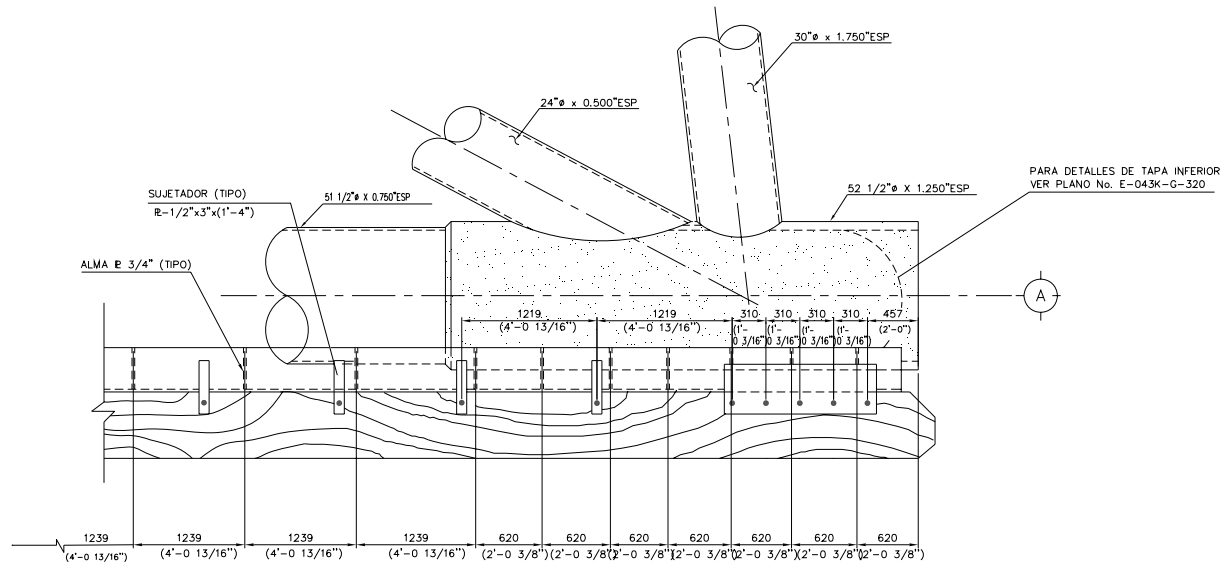
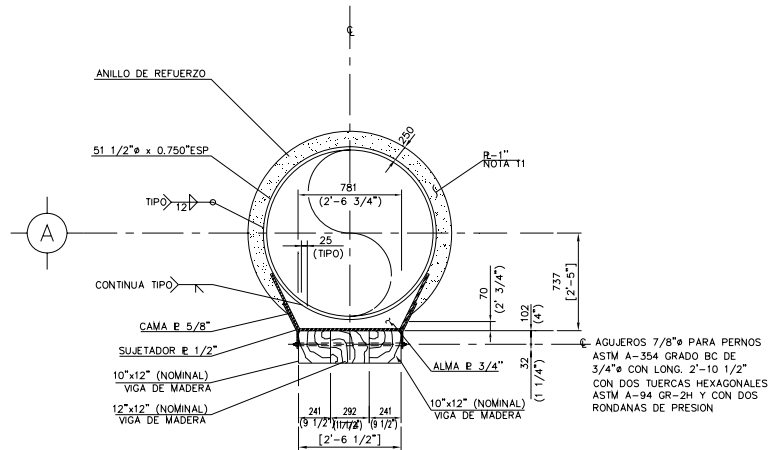
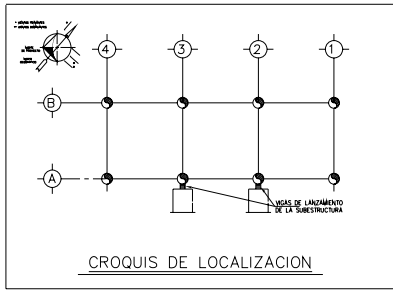


Figura 33. Sistema de deslizamiento.

## Orejas de Arrastre (ver figura 34).

Sistema formado por cuatro elementos constituidos por placas y conectados en las dos piernas en las que se apoya la Subestructura durante su fabricación, localizados en sitios próximos a los extremos. Su función consiste en proporcionar puntos de apoyo, para tirar de la Subestructura, mediante un sistema de cables, poleas y malacates u otro medio de tracción con objeto de deslizarla.

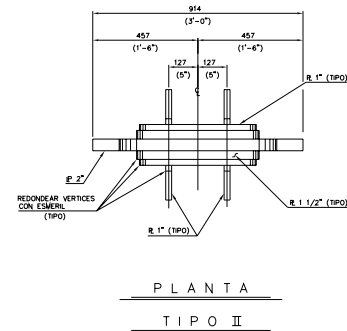
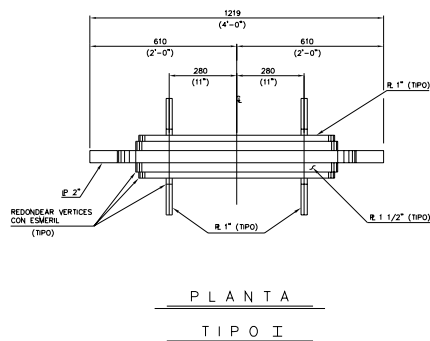
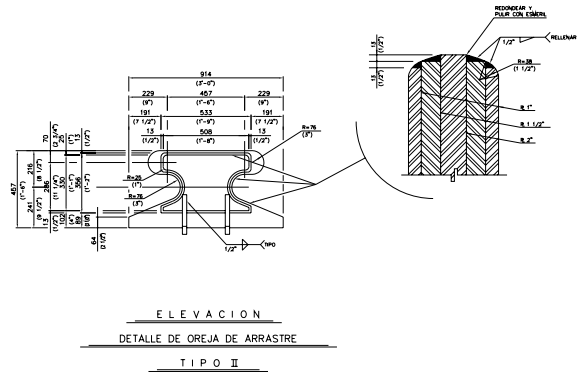
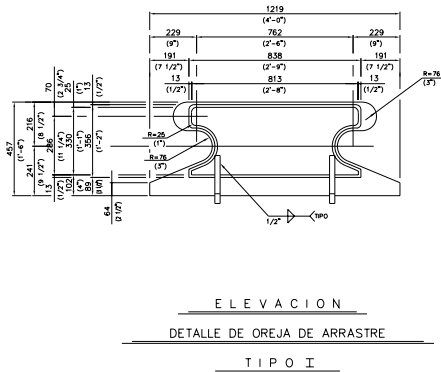
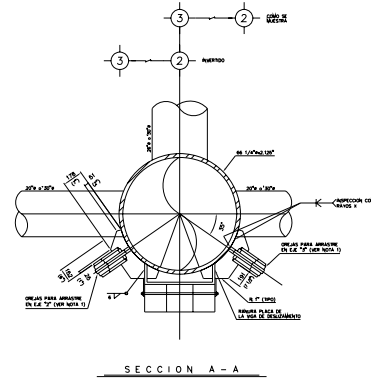
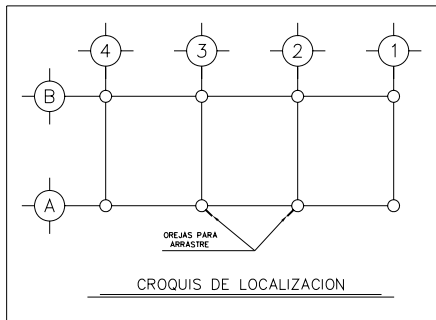


Figura 34. Orejas de arrastre.



**Sistema de Flotación** (ver figura 35).

### **Tapas de las Piernas.**

Es menester que la Subestructura misma se provea de suficiente flotación para que sea capaz de flotar satisfactoriamente y proporcione una trayectoria de escasa profundidad dentro del agua, durante su lanzamiento en el mar; condición a la que obedece que le sean instaladas tapas en ambos extremos de cada una de sus piernas.

### **Tapas inferiores**

En el extremo inferior de las piernas (considerando su posición final en el sitio), se colocan tapas con forma y dimensiones diseñadas de tal manera que después de cumplir con su cometido, permitan su rompimiento al ser golpeadas por el impacto de la caída libre del primer tramo de pilote, en la etapa inicial de hincado.

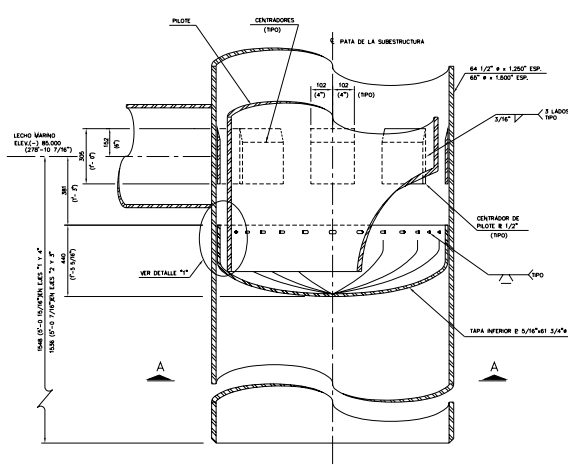
### **Tapas superiores**

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.

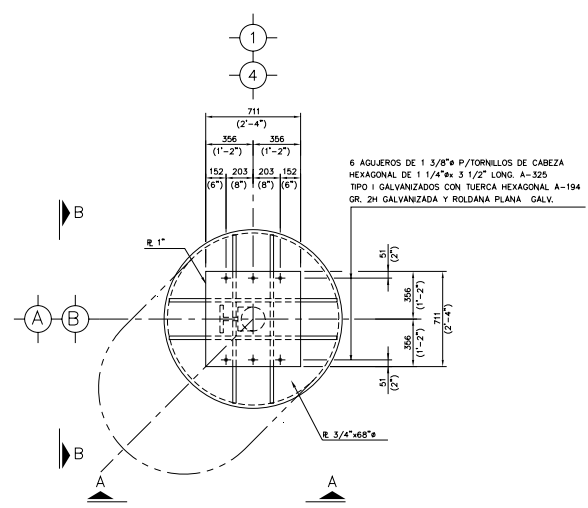
### **Tanques de flotación**

Para complementar la flotación de la Subestructura y proporcionar a ésta una posición final de flotación conveniente (posición horizontal preferentemente), son utilizados tanques constituidos normalmente por tubería de las mismas

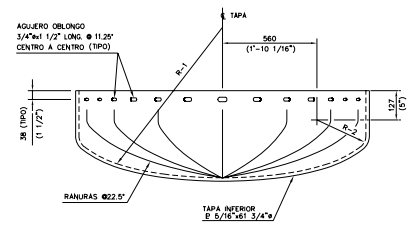
características de la empleada para las piernas. Se ubican en la parte superior de la Subestructura, conectando sus apoyos sobre las tapas superiores.



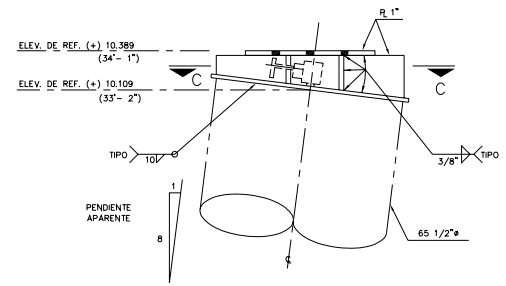
SECCION TIPO PARA LOCALIZACION DE TAPA INFERIOR  
S/ESC



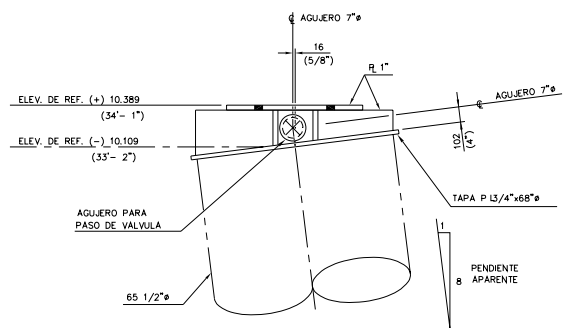
DETALLE " 1 "  
CONEXION DE TAPA EN COLUMNA DE ESQUINA  
ESC: 1:20



ARREGLO DE TAPA INFERIOR  
ESC: 1:100



VISTA " A - A "  
ESC: 1:20



VISTA " B - B "  
ESC: 1:20

Figura 35. Sistema de flotación.

## Sistema de inundación (ver figura 36).

Consiste en válvulas de 4" de diámetro y  $\frac{1}{4}$  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, complementando esta acción con las válvulas ubicadas en las tapas superiores, que al abrirse, permiten la salida del aire.

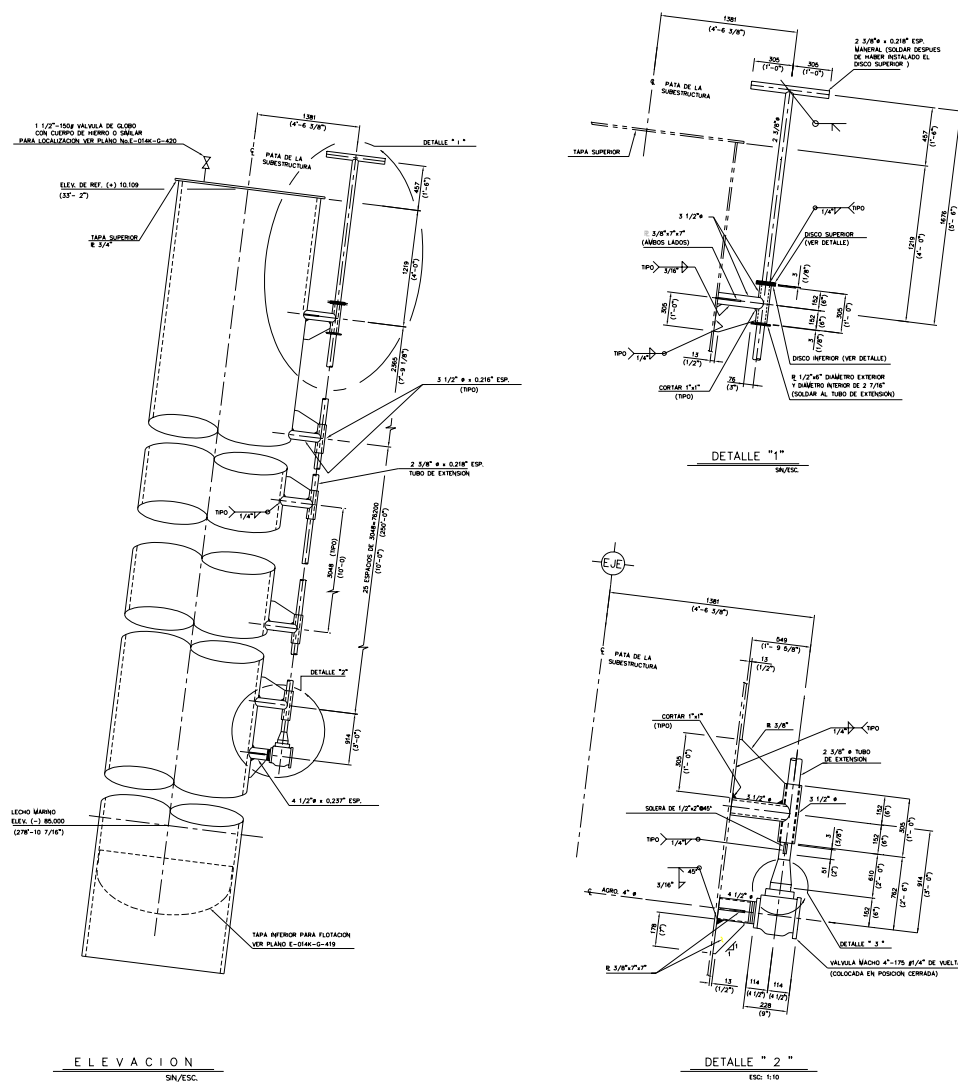


Figura 36. Sistema de inundación.

## Accesorios complementarios.

### Orejas de izaje (ver figura 37).

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 hasta la localización de su instalación. Se colocan en el extremo superior de las piernas interiores.

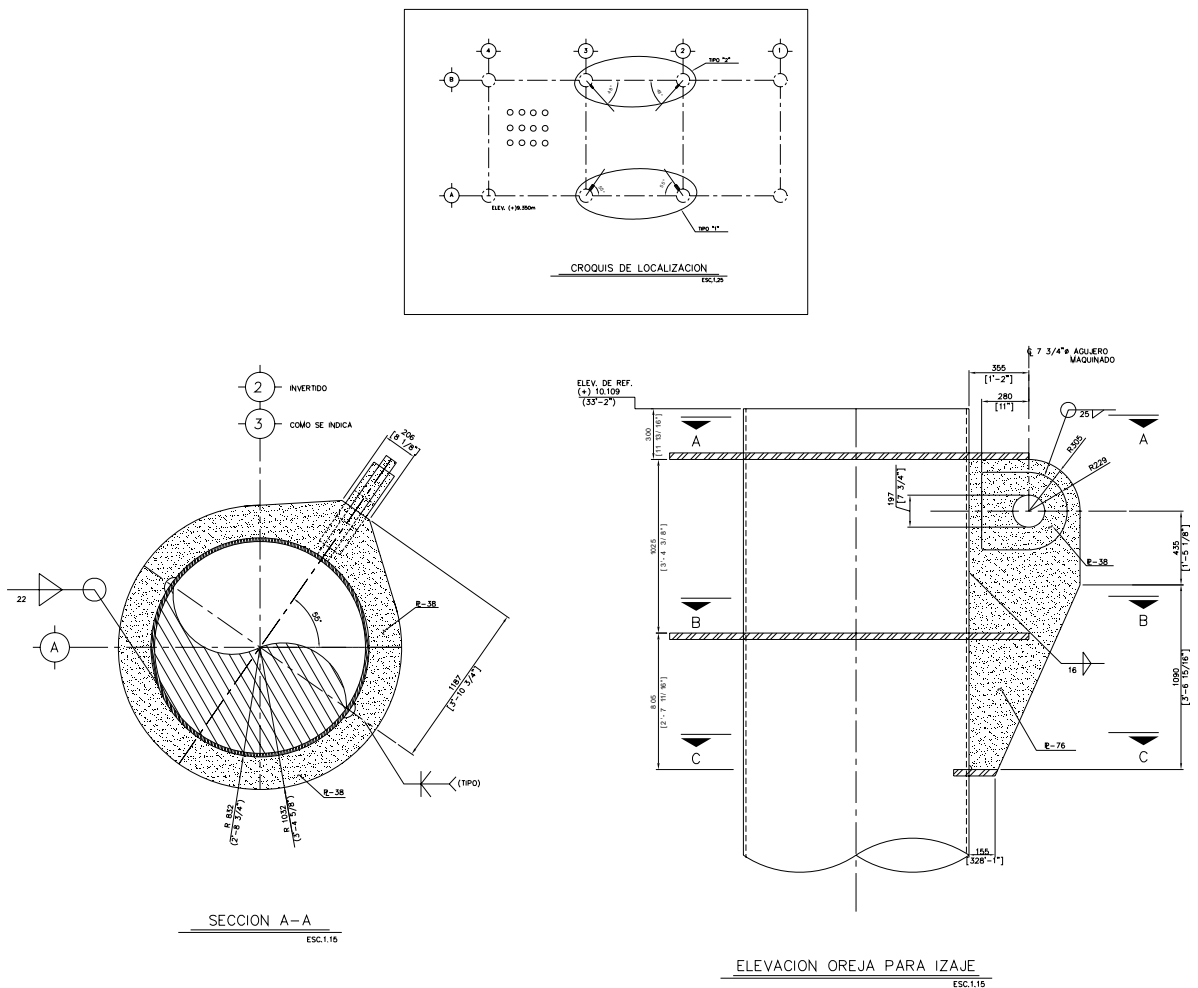


Figura 37. Orejas de izaje.

**Placa base (ver figura 38).**

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, que le proporcionan características de estabilidad ante condiciones de carga prevalecientes durante la instalación (carga de oleaje y peso propio). Al concluir el hincado de pilotes y la conexión de éstos 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.

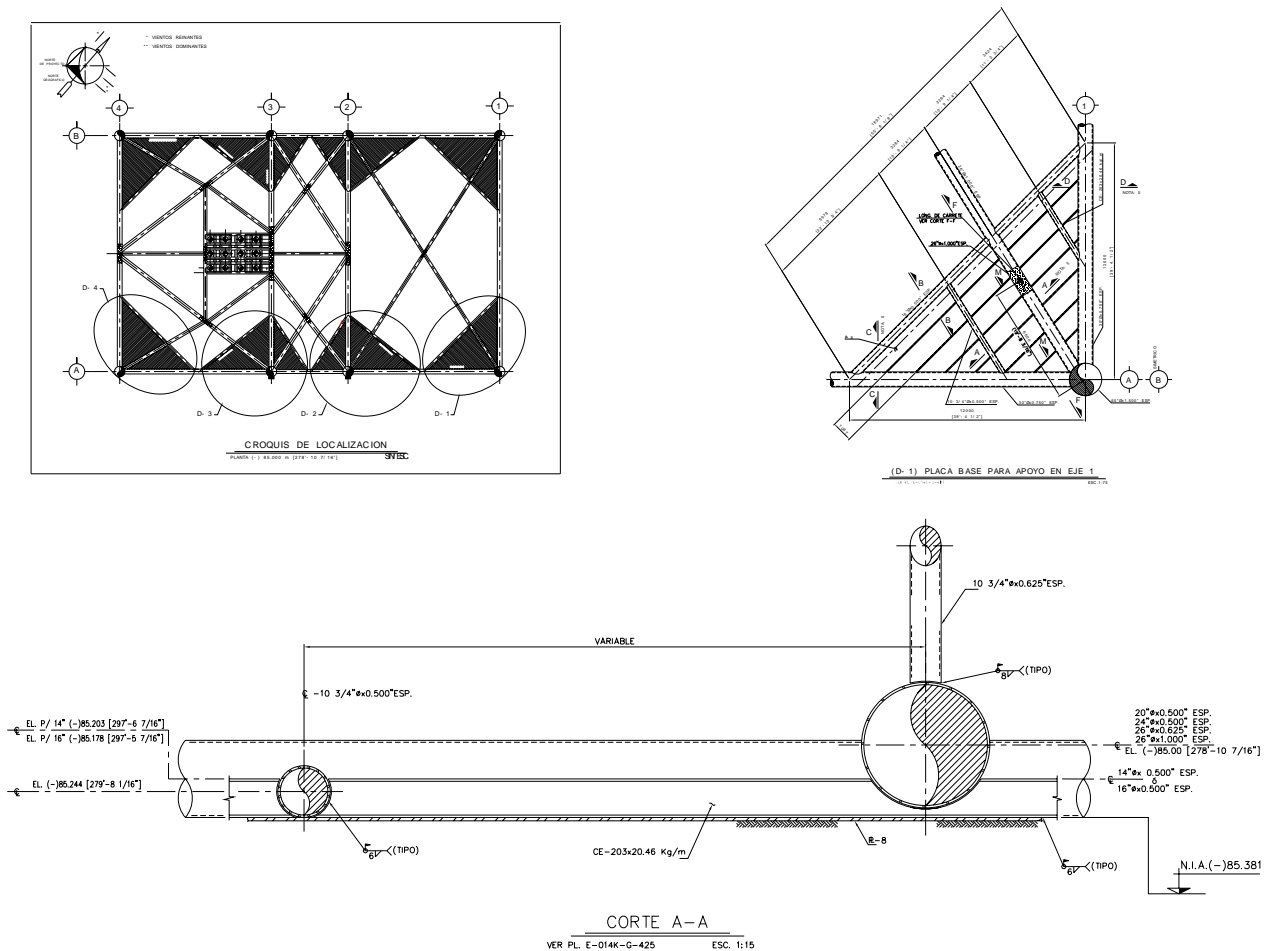


Figura 38. Placa base.

### **Defensas** (ver figura 39).

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

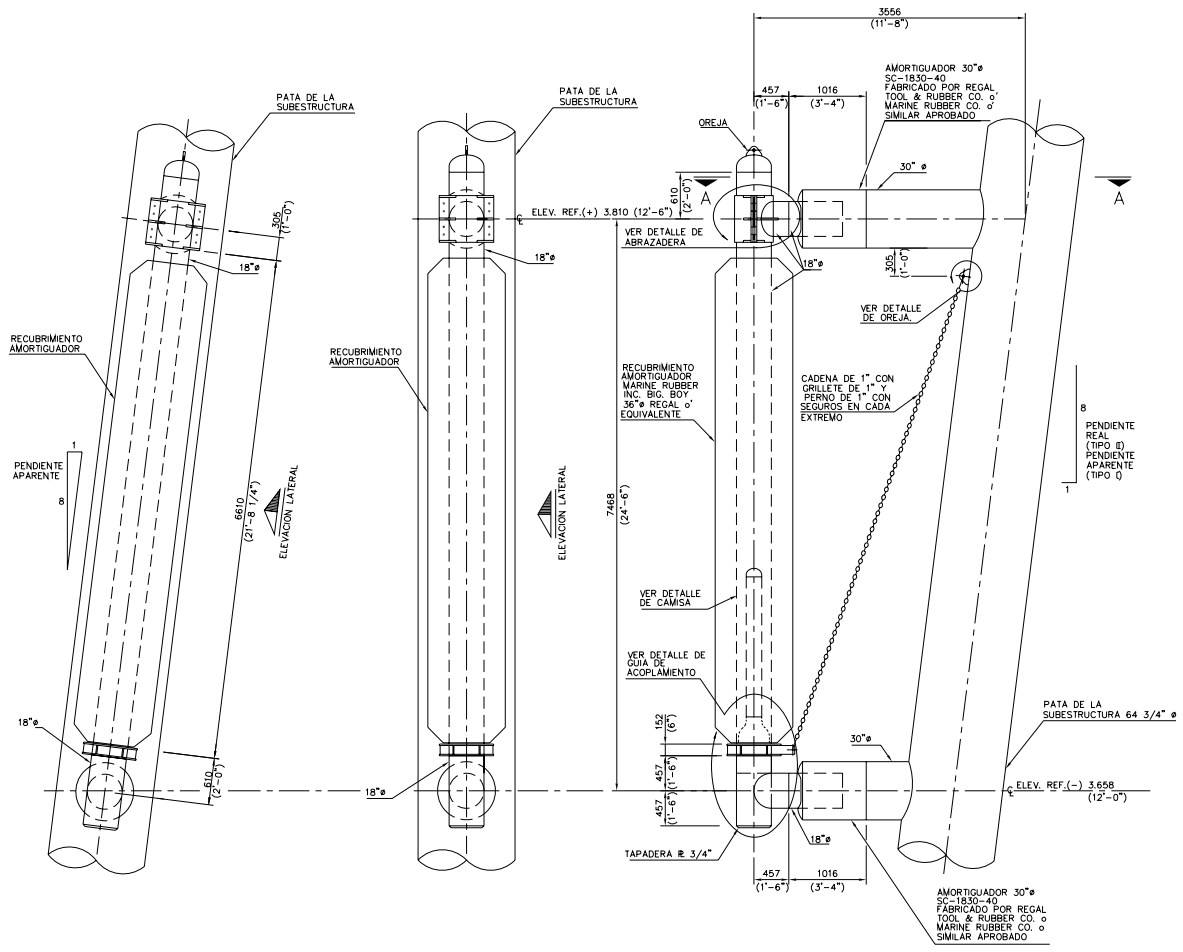
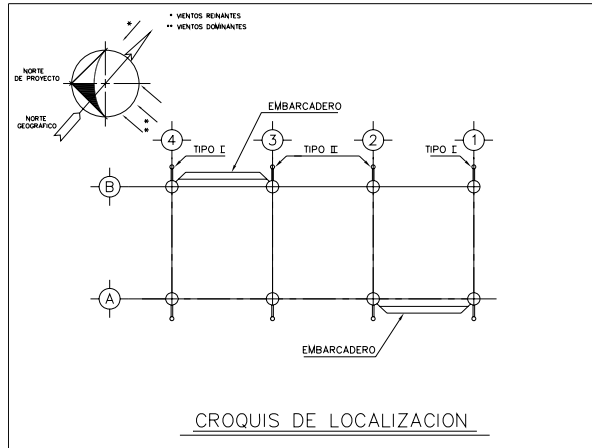
Por lo que es necesario protegerla de posibles impactos sobre su estructura, mediante defensas provistas con amortiguadores, ubicadas en cada una de las piernas de la Subestructura, a pesar de que la aproximación de las embarcaciones se halla restringida a condiciones ambientales de mar en calma [altura de ola de 5 pies (1.5 m) en promedio].

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

### **Embarcaderos** (ver figuras 40 y 41).

Los embarcaderos cumplen una función similar a la de las defensas e incluso trabajan en combinación con ellas. Su objetivo principal es el de proporcionar una estructura que permita el acoderamiento de la embarcación con la plataforma, para abastecimiento de insumos, así como embarque o desembarque de personal.

El embarcadero, constituye un acceso a la plataforma por vía marítima, cuenta con elementos de caucho adosados a los miembros estructurales que tienen contacto con la embarcación; se halla conectado rígidamente a las piernas de la Subestructura, a las que transmiten las cargas de impacto mediante elementos cuya sección se amplía considerablemente en la conexión.



DEFENSA TIPO I  
(SE REQUIEREN 2)

DEFENSA TIPO II  
(SE REQUIEREN 2)

ELEVACION LATERAL

Figura 39. Defensas.

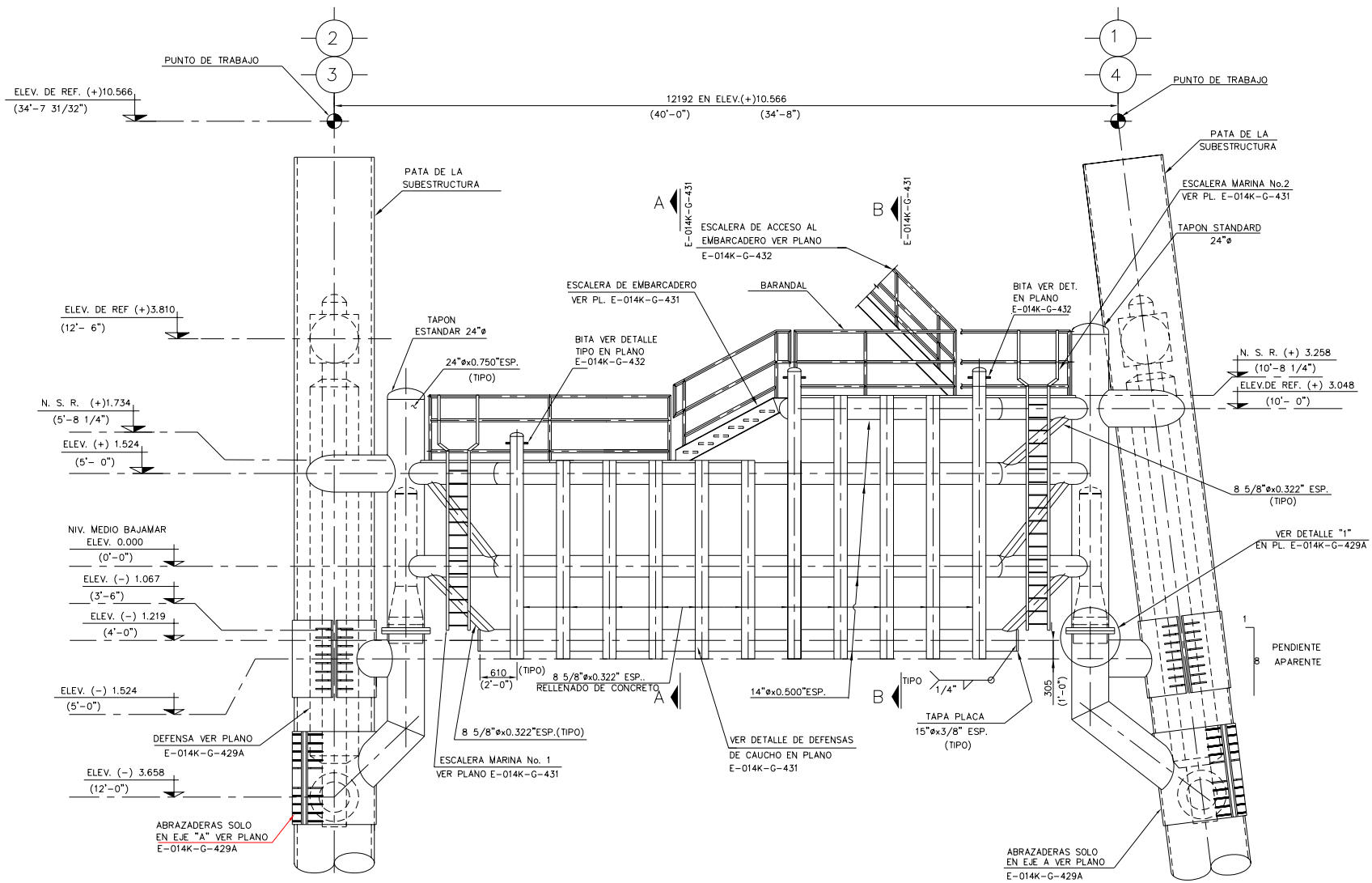


Figura 40. Embarcadero elevación.



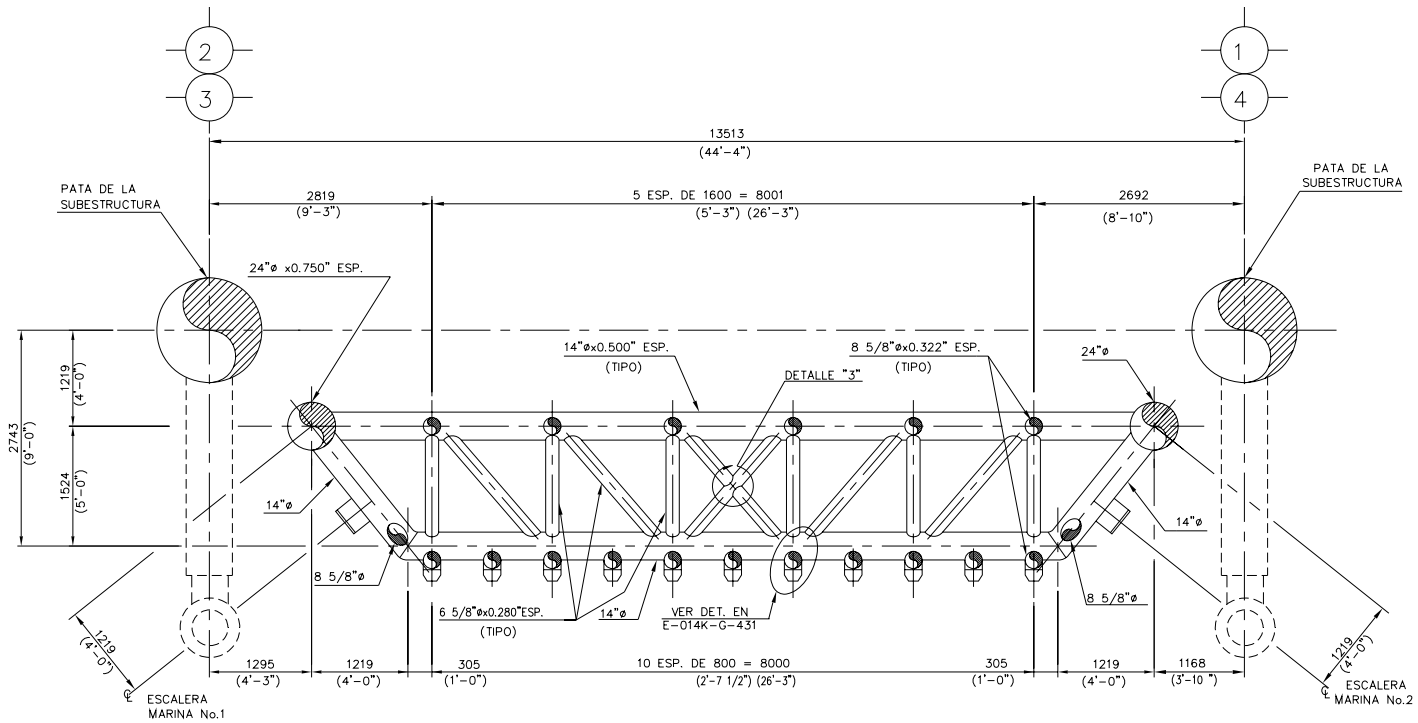
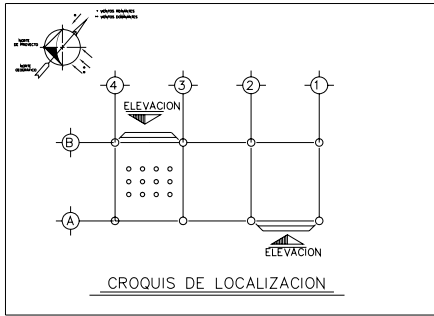


Figura 41. Embarcadero planta.

### **Pasillos, barandales y escaleras** (ver figuras 42 hasta 45).

Los pasillos, barandales y escaleras proporcionan los conductos por los cuales el personal tiene acceso a los diversos sitios de la plataforma, a donde debe llegar en forma apropiada y segura. Los pasillos se integran de elementos tubulares y rejilla galvanizada. Los barandales son de tipo tubular, desmontables, para facilitar las maniobras de instalación de la Subestructura; de igual forma, las escaleras que conducen a los embarcaderos son desmontables, cuyas alfardas se integran por secciones canal, contraventeadas con ángulo. Los escalones son de rejilla galvanizada, conectados a las alfardas mediante tornillos.

### **II.3. Cimentación** (ver figura 46).

La cimentación correspondiente a las plataformas 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 halla contenida en el suelo marino, penetrando a profundidades que oscilan entre 250' - 0" (76.22 m) y 350' - 0" (106.71 m) en promedio. La otra parte sobresale del suelo, ubicándola en el interior de las piernas de la Subestructura, a través de las cuales se extiende hasta la elevación (+) 34'-8" (10.57 m) sobre el nivel medio del mar.
  
2. La condición anterior determina la división del pilote en dos sistemas:
  - A. Sistema suelo-pilote, y
  - 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.

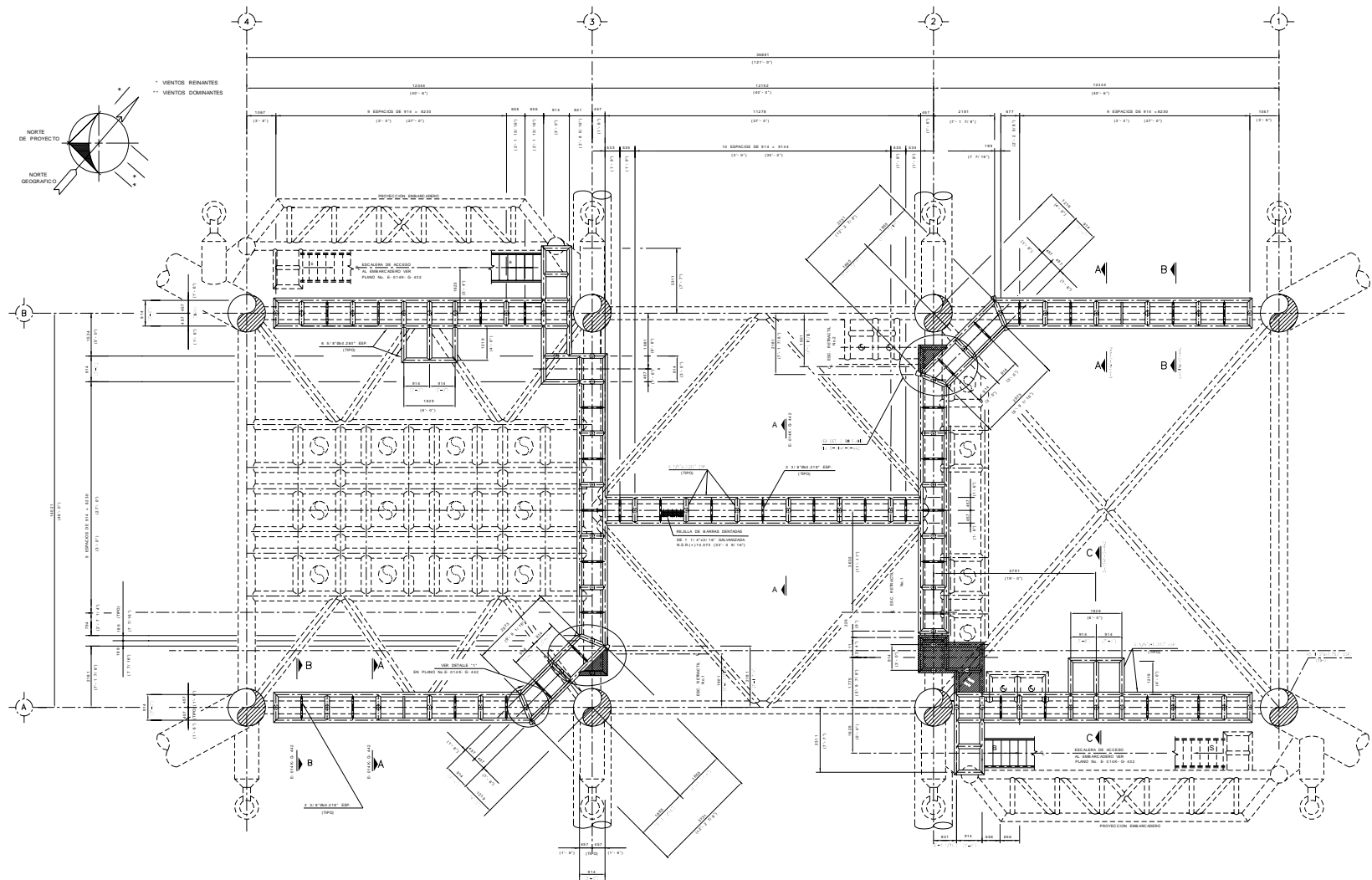
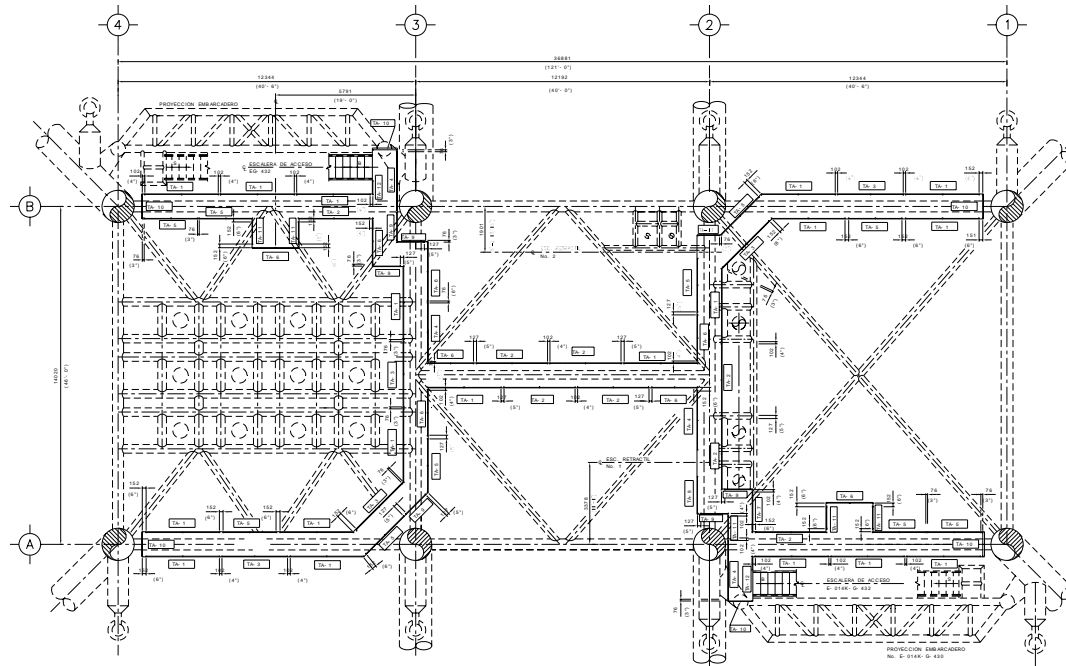
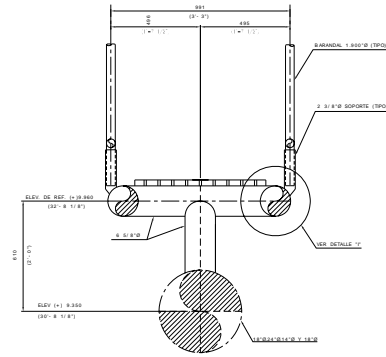


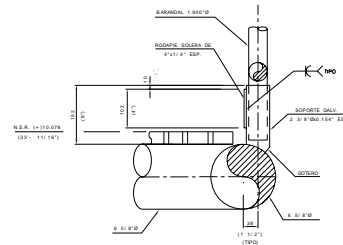
Figura 42. Planta de pasillos de la Subestructura.



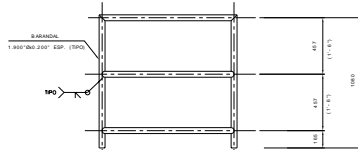
**BARANDALES DE PASILLOS DE LA SUBESTRUCTURA**  
 (TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN REFERIDAS A LA ELEV. (+) 0.350 (30' - 0 1/8")) ESC: 1/75



**ELEVACION DE BARANDAL**  
 ESC: 1/10



**DETALLE "1"**  
 ESC: 1/35



CL-1	1,07 (3' - 6 1/8)	1 REQUERIDOS
CL-2	8,33 (27' - 4 1/8)	1 REQUERIDO
CL-3	1,67 (5' - 6 1/8)	6 REQUERIDOS
CL-10	8,17 (27' - 0 1/8)	6 REQUERIDOS
CL-11	8,17 (27' - 0 1/8)	6 REQUERIDOS
CL-12	8,17 (27' - 0 1/8)	2 REQUERIDO

BARRANDA 1.800 Ø 100 Ø 100		
CL-1	1,07 (3' - 6 1/8)	1 REQUERIDOS
CL-2	8,33 (27' - 4 1/8)	1 REQUERIDO
CL-3	1,67 (5' - 6 1/8)	6 REQUERIDOS
CL-4	8,17 (27' - 0 1/8)	6 REQUERIDOS
CL-5	8,17 (27' - 0 1/8)	6 REQUERIDOS
CL-6	8,17 (27' - 0 1/8)	16 REQUERIDOS
CL-7	8,17 (27' - 0 1/8)	7 REQUERIDOS

**DETALLES DE BARANDAL**  
 ESC: 1/15

Figura 43. Barandales.

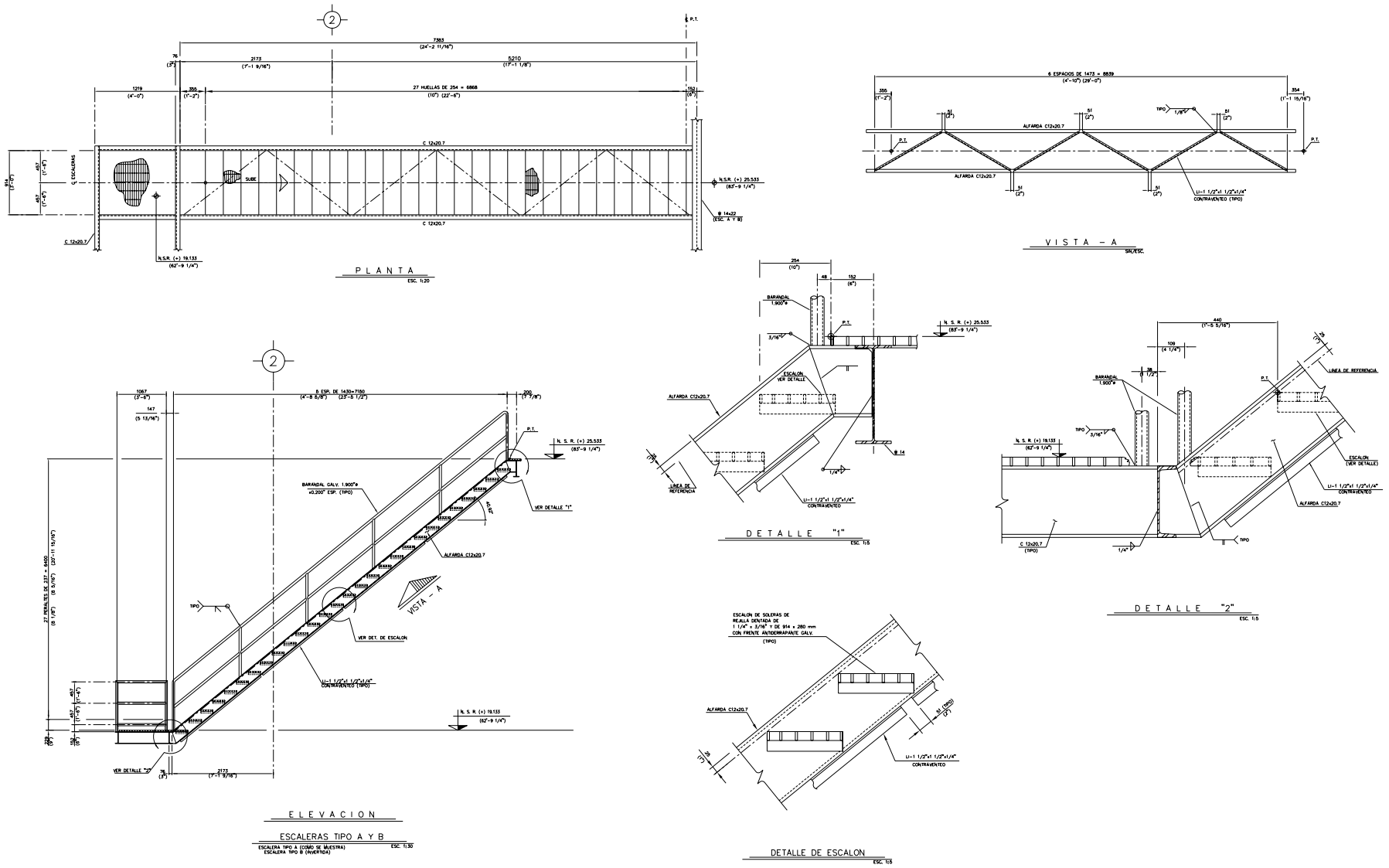


Figura 44. Escalera fija.

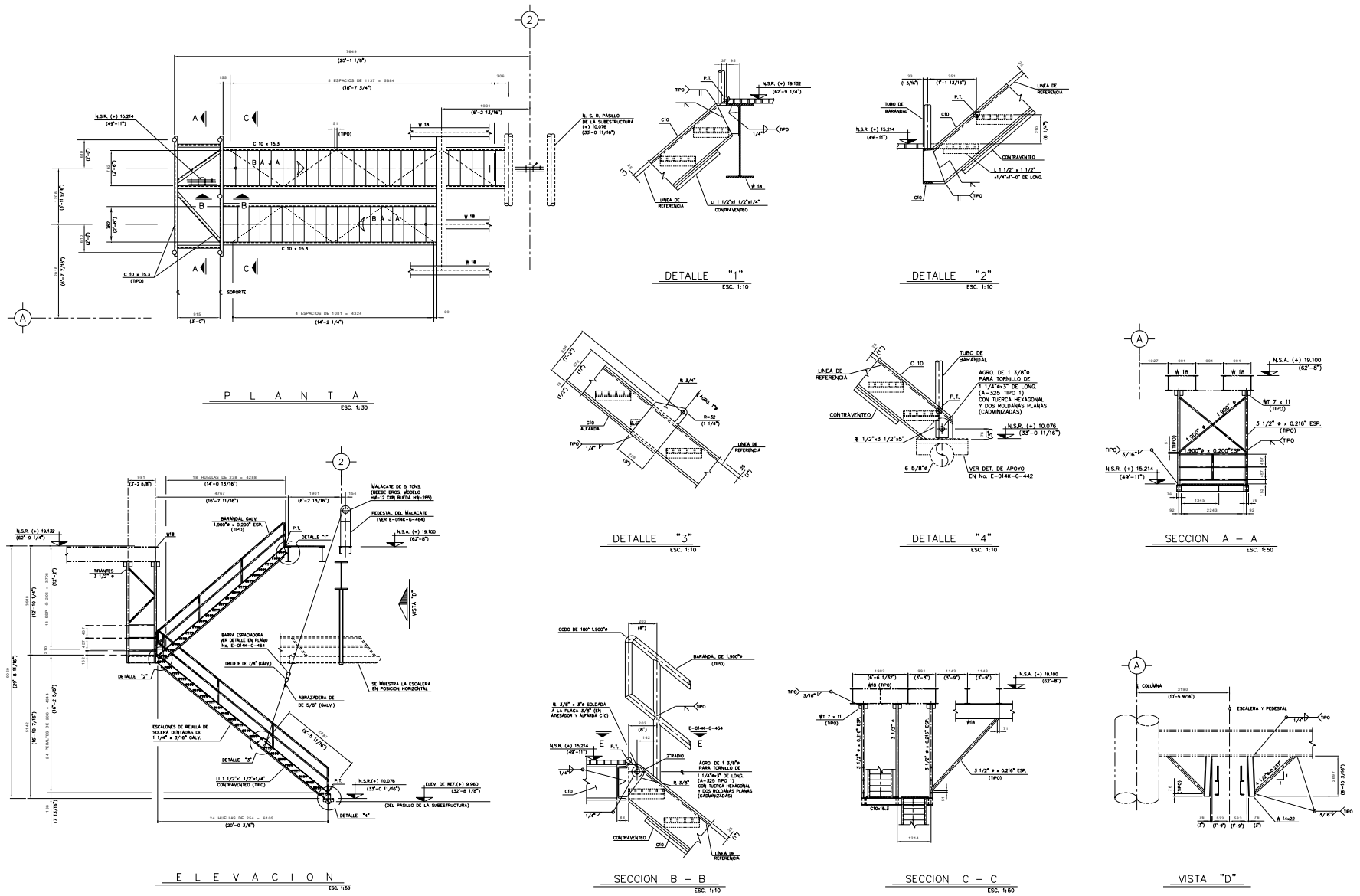


Figura 45. Escalera retráctil.

3. El pilote se integra de varios segmentos con diferentes 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 inmediaciones del lecho marino, donde los elementos mecánicos son máximos.
4. Las secciones que se requieren para estos elementos, cuyo diámetro regular es de 48" (1.22 m), corresponden a espesores que oscilan entre 1¼" (3.18 cm) y 2¼" (5.72 cm), requiriéndose también por lo regular el empleo de aceros especiales (ASTM A-537 ó ASTM A-633) en la zona de elementos mecánicos máximos. Para no recurrir a espesores excesivamente grandes con acero normal (ASTM A-36).
5. Los segmentos que conforman al pilote se conectan con soldaduras de penetración completa de acuerdo con los requerimientos del 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 (zapata de hincado) facilitando la penetración.

### **II.3.1. Sistema suelo - pilote**

El sistema integrado por el suelo y los pilotes constituye el sistema de apoyos de la plataforma, con la cual interactúa a través del sistema Subestructura-pilotes.

El trabajo conjunto del suelo y el pilote es no lineal, lo que origina que la determinación de su comportamiento resulte compleja y se requiera normalmente el empleo de programas de computadora para su rápida solución. Las características del sistema se determinan con base en un proceso iterativo, en

donde las variables son el conjunto de cargas sobre los pilotes y la respuesta del sistema suelo-pilote; por lo que debe partirse de una configuración inicial del pilote, basada en un sistema de cargas supuesto.

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 ésta puede ser fabricada en estratos arenosos resistentes. Cabe mencionar que solamente en condiciones de cargas 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.

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 último, 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, hasta que éstos dejan de ser importantes a una penetración aproximada de 60' - 0" (18.3 m).

La Subestructura ejerce sobre 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 frontera la interrelación entre los dos sistemas en que se ha dividido al pilote.

### **II.3.2. Sistema Subestructura - Pilote**

Los pilotes sobresalen del suelo marino, llegando hasta la elevación (+) 34' - 8" (10.57 m) a través de las piernas o columnas de la Subestructura, las cuales cuentan con elementos denominados espaciadores que reducen la holgura entre el diámetro exterior del pilote y el diámetro interior de la pierna, restringiendo su longitud libre de pandeo. En la elevación (+) 33' - 2" (10.11 m) se verifica la conexión rígida entre ambos elementos constituyendo de esta manera el sistema en el que la Subestructura se halla suspendida de los pilotes, transmitiendo sus cargas en dicha conexión, así como a través de los espaciadores.

El conjunto de pilotes y Subestructura debe resistir las cargas que afectan a 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 contenidos en las piernas o apoyos de la 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 Superestructura en un modelo tridimensional. Los efectos de flexión más importantes se registran en las proximidades del lecho marino y en la zona donde 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, así como la rotación, desplazamientos laterales.

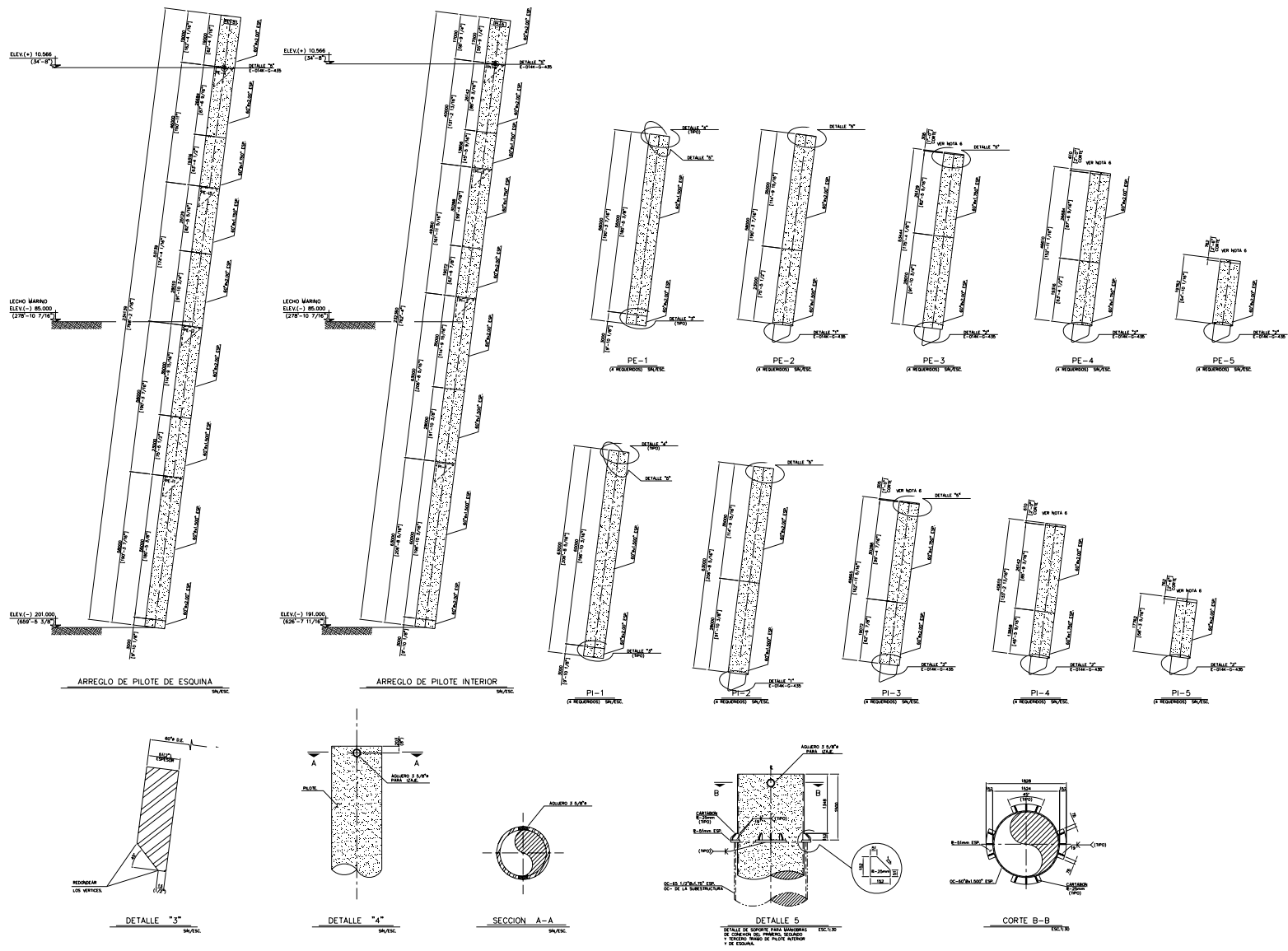


Figura 46. Cimentación.

## **II.4. Apéndices.**

Ya anteriormente se hizo mención de los apéndices, que si bien forman parte integral de una Subestructura, no contribuyen necesariamente a su rigidez estructural; sino por el contrario, en algunos casos representan cargas adicionales importantes.

### **II.4.1. Ductos ascendentes.**

Estos ductos constituyen el modo de transporte de crudo, gas o agua entre plataformas o entre una plataforma y tierra. Se denominan ascendentes porque suben a las cubiertas paralelamente a las patas y columnas. Sus diámetros varían entre 18" y 36" y su número en una plataforma puede alcanzar hasta 12, dependiendo de la función de ésta. Los ductos se fijan a las patas o columnas mediante abrazaderas atornillables.

La magnitud de las fuerzas de oleaje generadas por los ductos sobre la Subestructura puede resultar decisiva en el diseño de una plataforma.

### **II.4.2. Conductores (ver figura 47).**

Los conductores son elementos verticales de 30"Ø requeridos para la protección contra el oleaje de los tubos utilizados para la perforación de pozos, extendiéndose desde la cubierta inferior hasta una penetración aproximada de 60 m (200') bajo e lecho marino.

Las Subestructuras de toda plataforma de perforación están provistas 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.

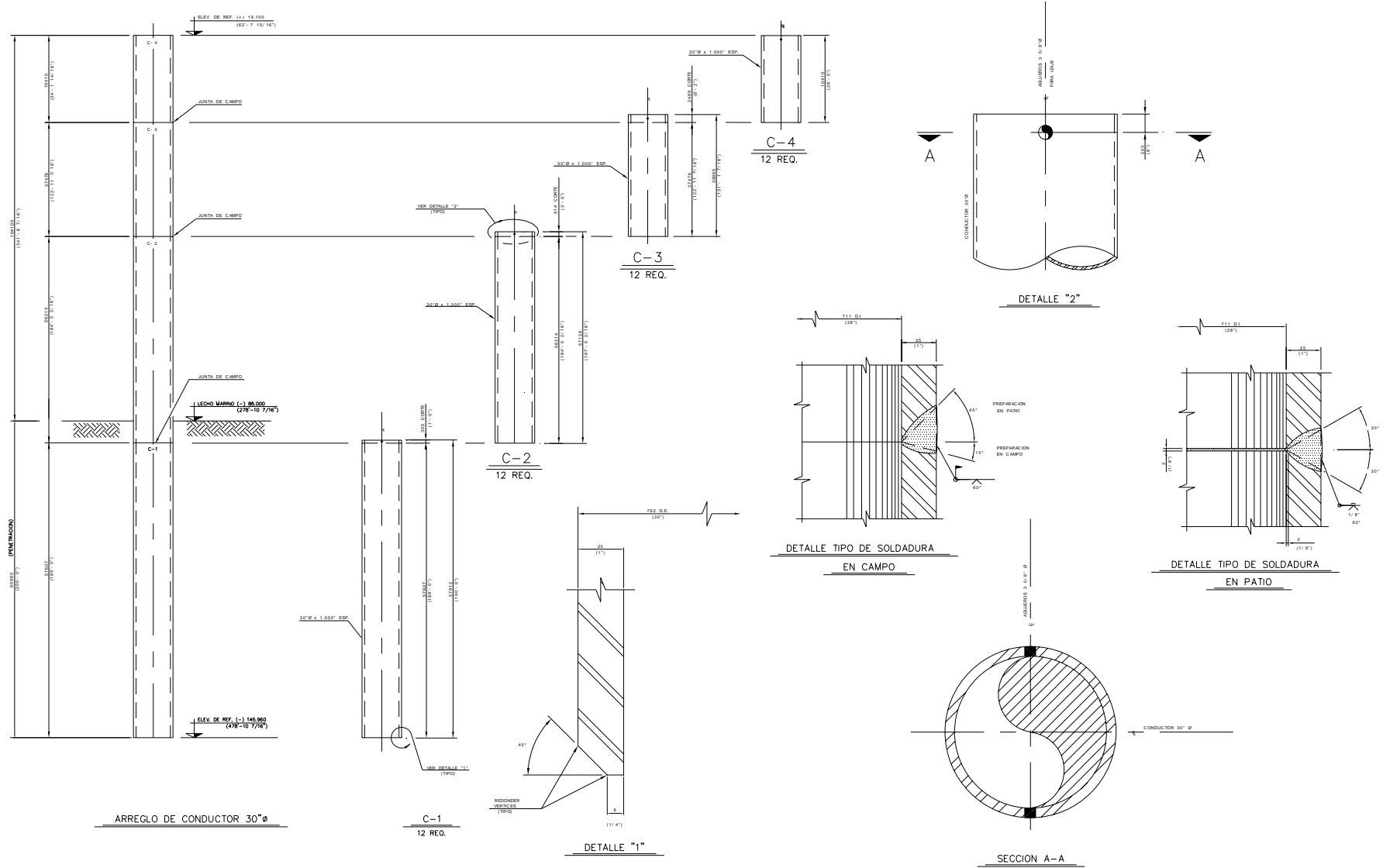


Figura 47. Conductores.

## **CAPÍTULO III**

### **MODELACIÓN ESTRUCTURAL.**

Las plataformas se idealizan mediante nodos, elementos barra y soportes elásticos.

En las figuras de este capítulo se muestra la simulación de la estructura y que resulta de una graficación automática de los nodos y elementos para fines de reconfirmación geométrica visual.

El modelo debe representar con exactitud el comportamiento estructural de la topología en consideración. Se deben incluir todos los elementos principales y la mayoría de los secundarios para modelar a la estructura lo más real posible. Estas modelaciones sujetas a las combinaciones de carga de diseño se resuelven mediante sistemas computarizados desarrollados específicamente para el análisis y diseño de estructuras marinas.

#### **III.1. Modelo estructural de Superestructura y Subestructura.**

Los modelos estructurales básicos de la Superestructura y la Subestructura de estos análisis fueron desarrollados en base a los dibujos listados en el capítulo II. Estos deben cumplir los requerimientos del tirante de agua y de esta forma proporcionar resistencia para soportar los esfuerzos correspondientes en el análisis en sitio de la plataforma.

La estructura se modelo en forma espacial, tomando en cuenta la variación de espesores y excentricidades así como los puntos teóricos de diseño.

El sistema global es tal que el eje Z tiene su origen en el nivel del agua señalando hacia arriba, mientras que los ejes X-Y son paralelos a los elementos horizontales principales de la plataforma.

El sistema de coordenadas local de cada miembro se define de tal forma que el eje X contiene el eje del miembro como es usual y el eje Z por omisión hacia arriba. En el caso particular de que el eje X es vertical, el eje Z se orienta hacia el eje global Y.

Los pilotes están en el interior de las piernas sin cementar, produciendo de esta forma un miembro tubular concéntrico, el cual es libre de sufrir desplazamientos axiales, pero ese movimiento es junto con la pierna en la dirección perpendicular a su eje. Con la finalidad de realizar este tipo de conexión el sistema proporciona los accesorios de modelado específicos, conocidos como articulaciones.

Las propiedades del acero considerado en el modelo son las definidas a continuación.

- Tubulares en general - API-5L-Gr. B o ASTM A106-Gr. B ( $F_y = 2430 \text{ kg/cm}^2$ );
- Tubulares en carretes y donde se especifique - API-2H-Gr.50 ( $F_y = 3492.0 \text{ kg/cm}^2$ );
- Placas y vigas de tres placas en general - ASTM A36 ( $F_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ ), API-2H-Gr. 50 y ASTM A572 ( $F_y = 3492 \text{ kg/cm}^2$ ).

Las gráficas de Subestructura y Superestructura, indicando los números de nodos, se presentan en este capítulo.

Las gráficas que muestran la incidencia y las propiedades asociadas con sus grupos se presentan en este capítulo.

Los grupos de los miembros tubulares contienen todas las propiedades en el sistema, pero requieren de una tarjeta adicional denominada SECT, la cual define la sección transversal de los miembros no tubulares.

### **III.2. Modelo de la cimentación.**

La interacción suelo-estructura es tomada en cuenta para las condiciones de análisis en sitio tanto de operación como de tormenta, realizando un análisis no lineal. En este análisis, los pilotes se empotran en el suelo y se modelan como vigas en una cimentación no elástica, cuyas propiedades se describen en las curvas P-Y (fuerza lateral X desplazamiento lateral), las curvas T-Z (fuerza axial a lo largo del eje X desplazamiento axial en la punta).

Para los análisis de: fatiga, dinámico debido a oleaje y resistencia por sismo, los pilotes fueron reemplazados por resortes (super-elementos conectados a la Subestructura en la parte superior de los pilotes) con una rigidez equivalente, como se describió anteriormente.

### **III.3. Elementos no estructurales y accesorios.**

#### **III.3.1. Protección contra la corrosión.**

Todos los miembros arriba de la elevación + 4.6 deben protegerse únicamente con pintura, y cuyo peso se toma en cuenta con un 5% de tolerancia en los análisis estructurales en la determinación de peso.

Todos los miembros localizados en la zona de mareas (-3.1 a +4.6 m) serán protegidos adicionando 9.5 mm de tolerancia contra la corrosión en el espesor de los miembros en los análisis estructurales. El peso adicional del acero se tomo en cuenta alterando la densidad del acero de estos miembros. Por lo tanto los elementos fueron modelados con 9.5 mm de espesor adicional a lo indicado en los planos estructurales.

Todos los miembros localizados bajo la elevación -3.1 m serán protegidos mediante ánodos de sacrificio, cuyo peso se tomo en cuenta incrementando el

peso de la Subestructura en forma general. Las cargas ambientales adicionales ocasionadas debido a la obstrucción originada por los ánodos, se tomo en cuenta por medio de áreas ficticias concentradas en los nodos más próximos de las piernas.

### III.3.2. Modelado de defensas, embarcaderos, risers, camisas, etc.

Las defensas, risers y embarcaderos se modelaron como pesos (como masas en el análisis dinámico) y como áreas de obstrucción en cargas ambientales, pero sin contribuir a la rigidez de la plataforma. La tabla 1 proporciona las áreas sumergidas y los pesos incluidos en el modelo, mientras que las figuras de la 48 hasta la 54 indican los nodos donde se aplican las fuerzas.

CONCEPTO	TIPO DE ÁREA	DIRECCIÓN			PESO (kN)	DETALLE
		X (m <sup>2</sup> )	Y (m <sup>2</sup> )	Z (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )		
Defensas - Eje B	Sumergida	6.83	6.83	-	240.0	Figura 48
Defensas - Eje A	Sumergida	6.83	6.83	-	280.0	Figura 49
Riser 8" – B1 y B2 en p.	Sumergida	19.3	19.3	-	5.688	Figura 50
Riser 20" - A1 pierna	Sumergida	44.7	44.7	-	16.139	Figura 51
Riser 24" - B1 pierna	Sumergida	53.6	53.6	-	20.457	Figura 52
Ánodos <sup>(1)</sup>	Sumergida	188.0	188.0	-	0.450	Figuras 53/54

Nota (1): El peso del ánodo se aplicó como un incremento al peso de la Subestructura

Tabla 1. Áreas sumergidas y pesos.

Los embarcaderos, camisas de bombas y conductores se incluyeron en el modelo como elementos no estructurales, solo con la finalidad de tomar en cuenta el peso y las áreas de obstrucción. La tabla 2 presenta las densidades equivalentes para corregir y tomar en cuenta los pesos estructurales.



ESTRUCTURA	PESO MODELO (ton ó ton/m)	PESO REAL (ton ó ton/m)	$\gamma$ EQUIV. <sup>(1)</sup> (ton/m <sup>3</sup> )
Embarcadero (2x)	17.750	20.993	9.283
Camisa de bomba 8" (2x)	2.472	3.552	11.28
Camisa de bomba 20" (2x)	6.629	7.943	9.405
Camisa de bomba 24" (2x)	8.200	9.511	9.104
Conductores (12)	0.455	1.27	21.982
Guías de conductores	4.504	16.750	29.196
Ánodos <sup>(2)</sup>	19076.5	20374.4	8.383

Notas: (1) Las densidades equivalentes se expresan con la siguiente expresión:  
 $\gamma_{EQUIV} = (\text{peso real} / \text{peso modelado}) \times 7.85 \text{ ton/m}^3$ ; (2) El peso presentado se refiere a la Subestructura principal, el cual se modifico considerando el peso total de los ánodos.

Tabla 2. Densidades equivalentes.

Cabe aclarar que el sistema telescópico de los conductores, localizado en el interior de los conductores se tomo en cuenta alterando las masas en el análisis dinámico.

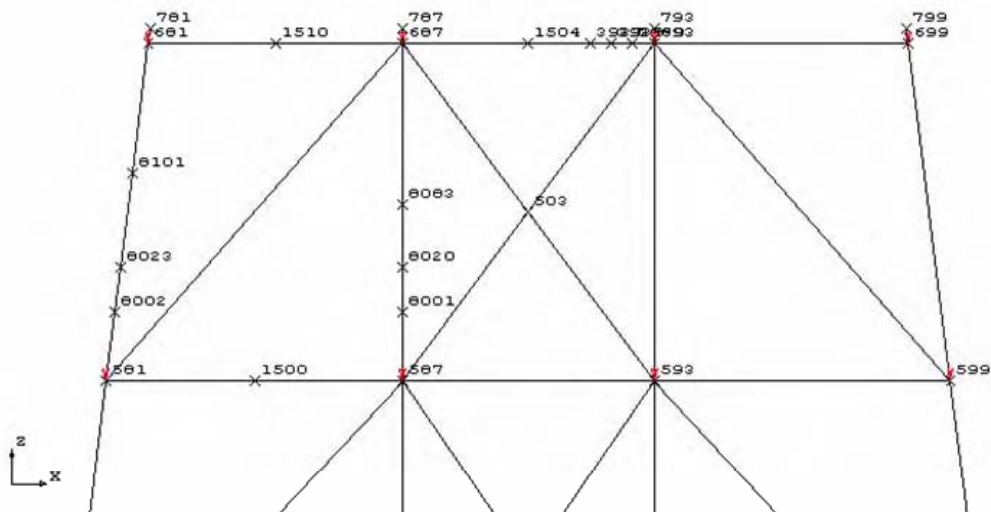


Figura 48. Defensas – Pesos y áreas sumergidas – Nodos de aplicación – Eje B.

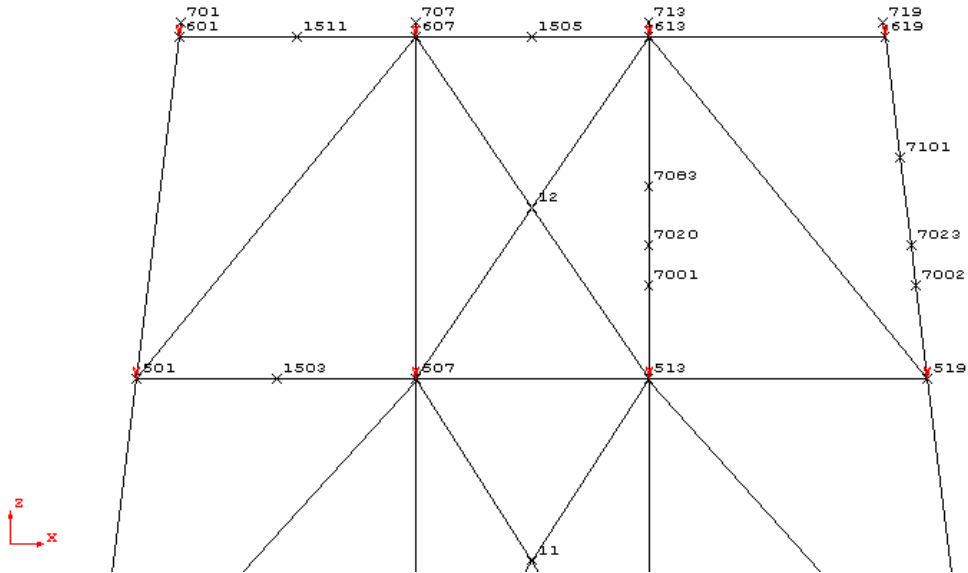


Figura 49. Defensas – Pesos y áreas sumergidas – Nodos de aplicación – Eje A.

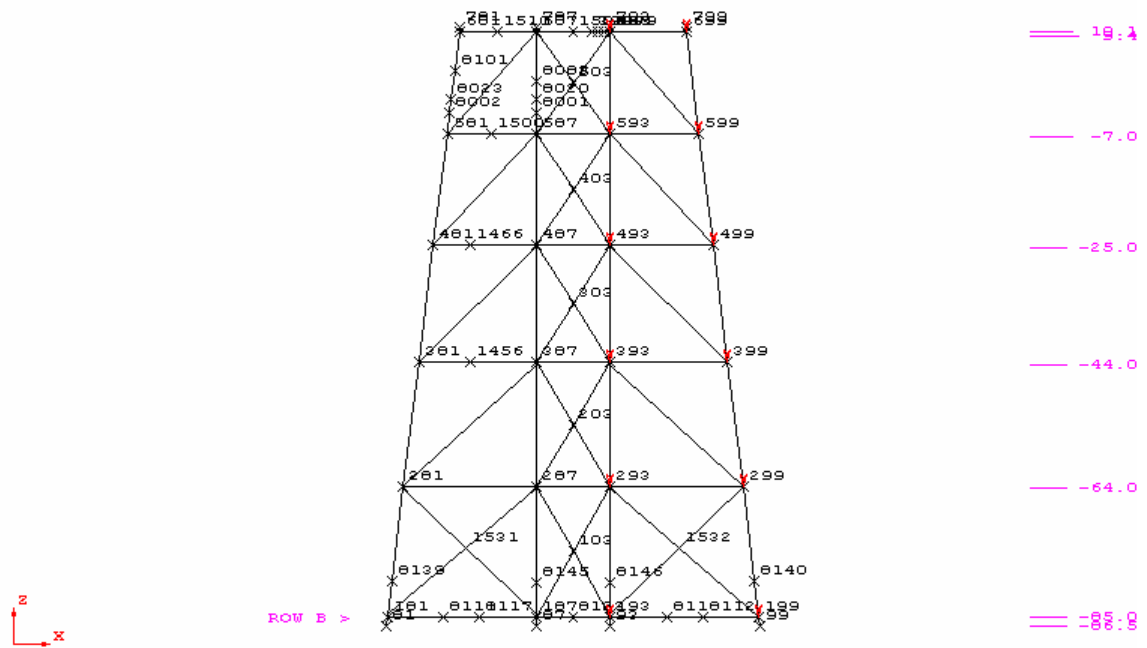


Figura 50. Riser 8" – Pesos y áreas sumergidas – Nodos de aplicación.

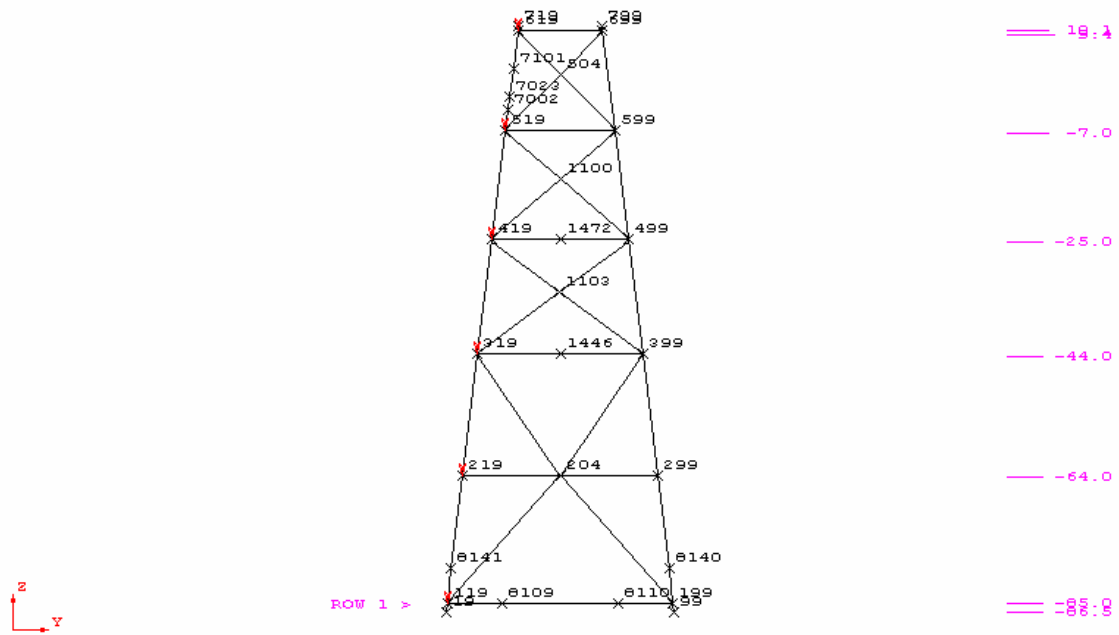


Figura 51. Riser 20" – Pesos y áreas sumergidas – Nodos de aplicación.

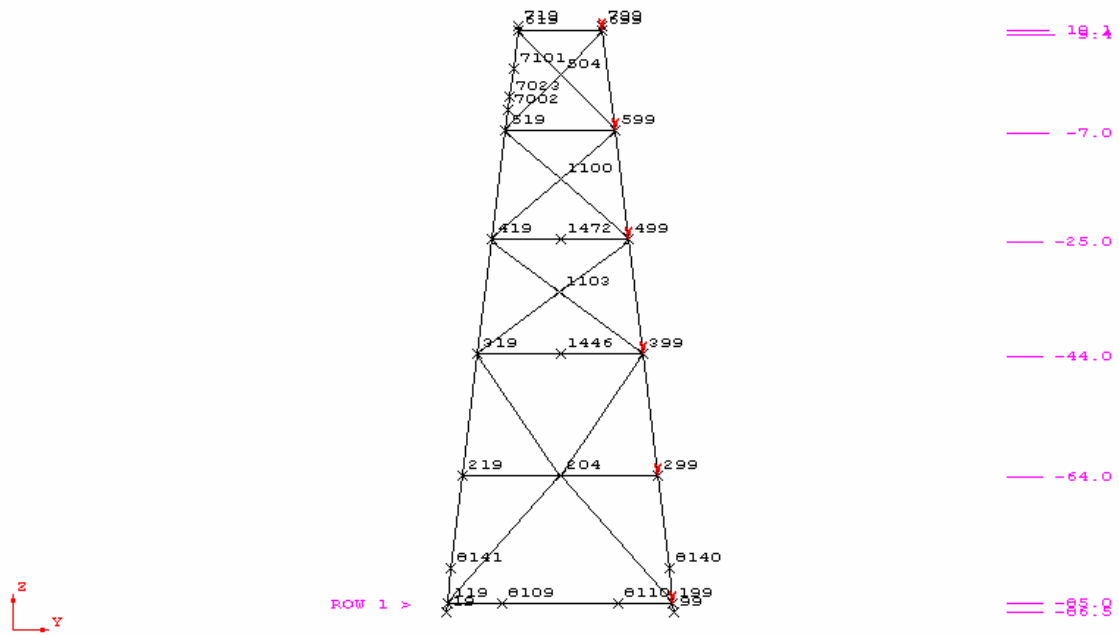


Figura 52. Riser 24" – Pesos y áreas sumergidas – Nodos de aplicación.

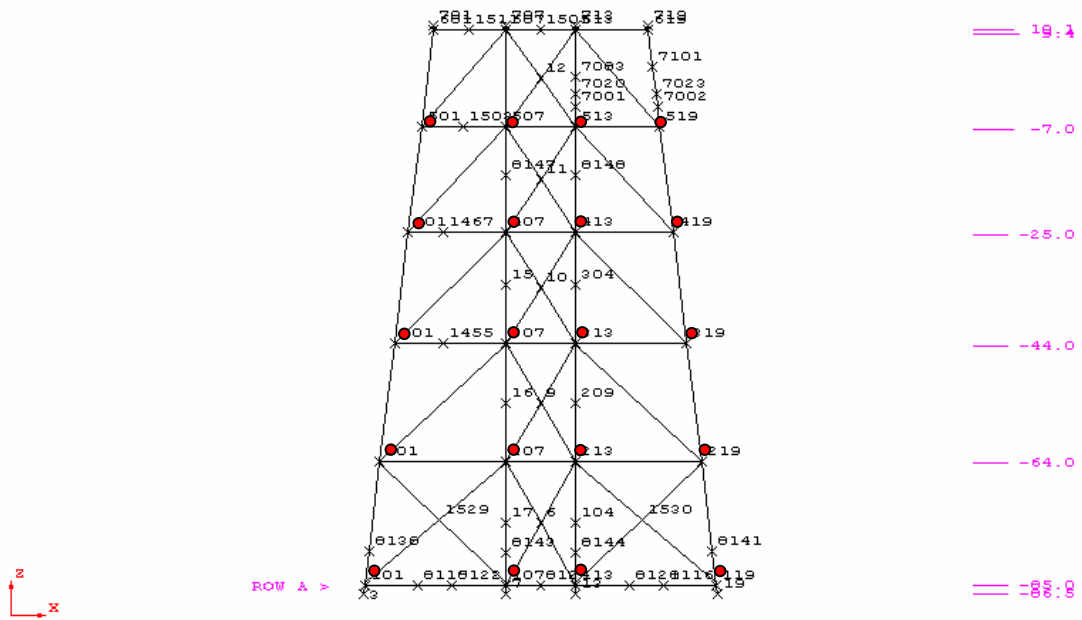


Figura 53. Ánodos – Áreas sumergidas – Nodos de aplicación – Eje A.

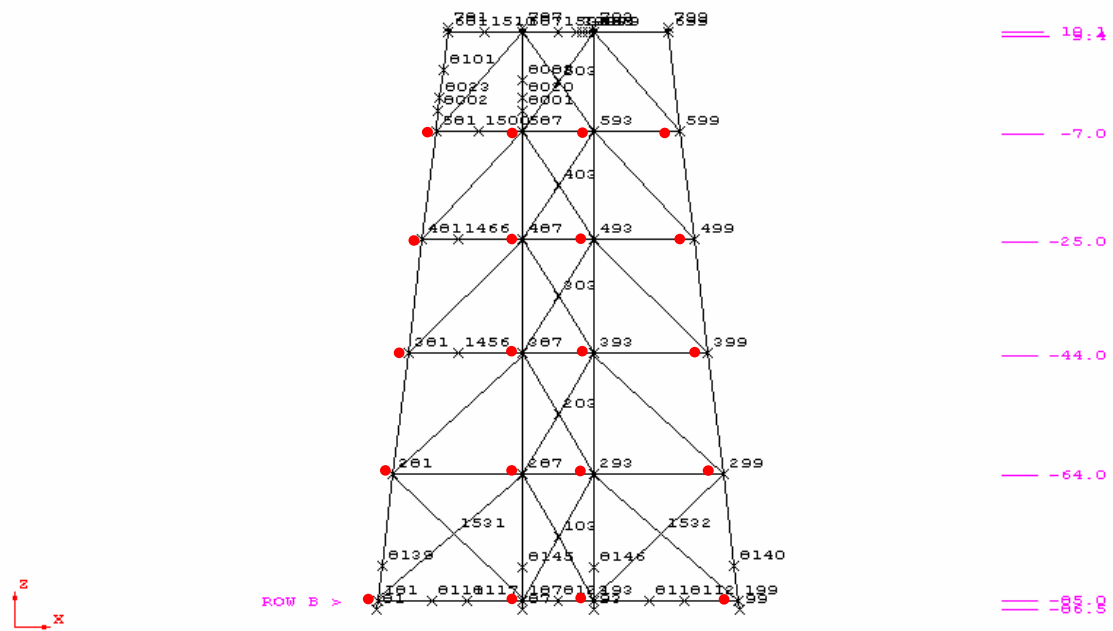


Figura 54. Ánodos – Áreas sumergidas – Nodos de aplicación – Eje B.

### III.3.3. Descripción del área de viento

Las áreas expuestas al viento consideradas en el modelo se describen a continuación y los nodos de aplicación se muestran en las figuras 55 hasta 63.

#### Cubierta principal

a) Paquete de almacenamiento, bombas y máquinas (ver figura 55)

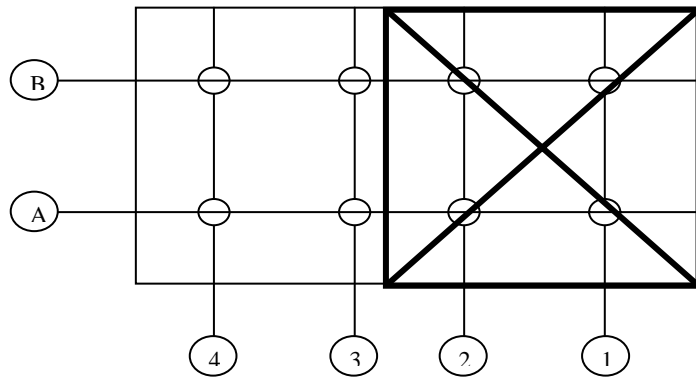
$$A_y = 172.3 \text{ m}^2$$

$$A_x = 140.8 \text{ m}^2$$

$$\text{C.G. } x = 8.453 \text{ m}$$

$$y = 0.000 \text{ m}$$

$$z = 28.224 \text{ m}$$



b) Módulo habitacional / Helipuerto (ver figura 56)

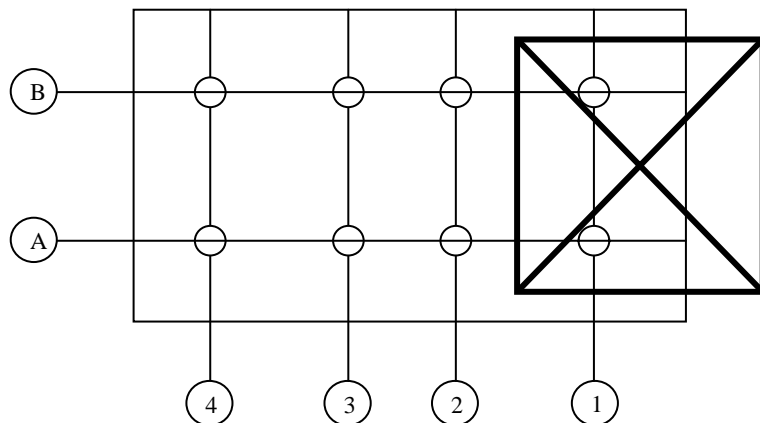
$$A_y = 142.2 \text{ m}^2$$

$$A_x = 142.2 \text{ m}^2$$

$$\text{C.G. } x = 21.80 \text{ m}$$

$$y = 0.000 \text{ m}$$

$$z = 38.709 \text{ m}$$



c) Tanque de agua y lodos (ver figura 57)

$$A_y = 7.93 \text{ m}^2$$

$$A_x = 43.10 \text{ m}^2$$

$$\text{C.G.1 } x = -14.02 \text{ m}$$

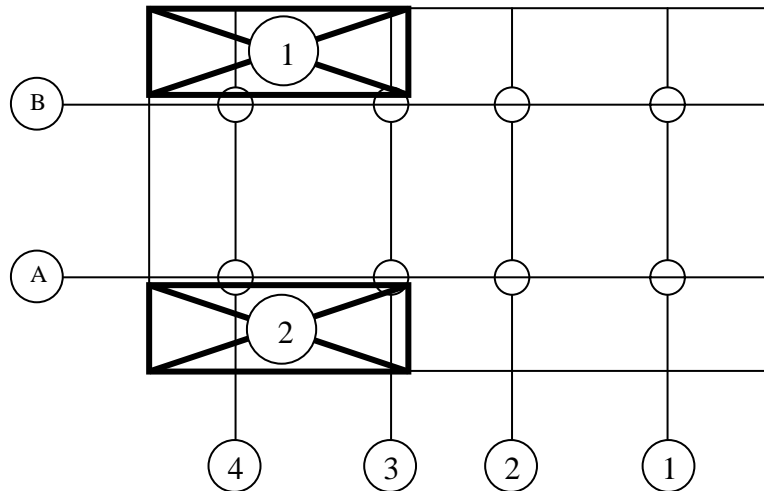
$$y = 9.200 \text{ m}$$

$$z = 26.11 \text{ m}$$

$$\text{C.G.2 } x = -14.02 \text{ m}$$

$$y = -9.200 \text{ m}$$

$$z = 26.11 \text{ m}$$



d) Torre de perforación en planta (ver figura 58)

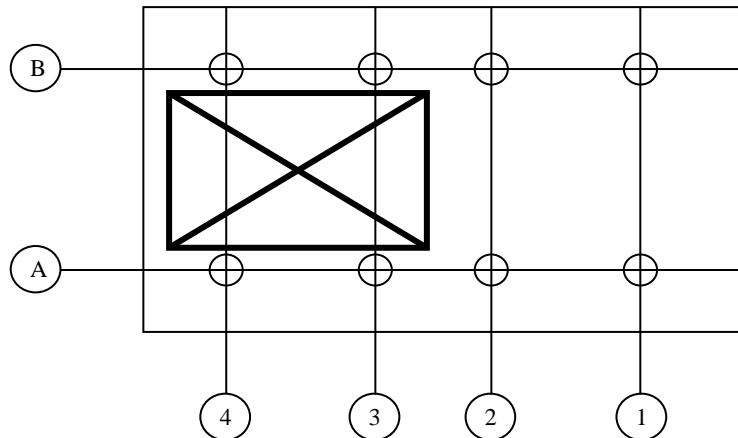
$$A_y = 280 \text{ m}^2$$

$$A_x = 280 \text{ m}^2$$

$$\text{C.G.1 } x = -12.192 \text{ m}$$

$$y = 0.000 \text{ m}$$

$$z = 53.75 \text{ m}$$



e) Superestructura (ver figuras 59 y 60)

$$A_y = 205 \text{ m}^2$$

$$A_x = 338 \text{ m}^2$$

$$\text{C.G. } x = 0.000 \text{ m}$$

$$y = 0.000 \text{ m}$$

$$z = 21.20 \text{ m}$$

f) Pedestal de grúa (ver figura 61)

$$A_y = 29.0 \text{ m}^2$$

$$A_x = 29.0 \text{ m}^2$$

$$\text{C.G. } x = -7.14 \text{ m}$$

$$y = \pm 10.70 \text{ m}$$

$$z = 42.30 \text{ m}$$

g) Quemador (figuras 62 y 63)

$$A_x = A_y = 67.8 \text{ m}^2$$

$$\text{C.G. } x = -33.0 \text{ m}$$

$$y = 22.50 \text{ m}$$

$$z = 37.50 \text{ m}$$

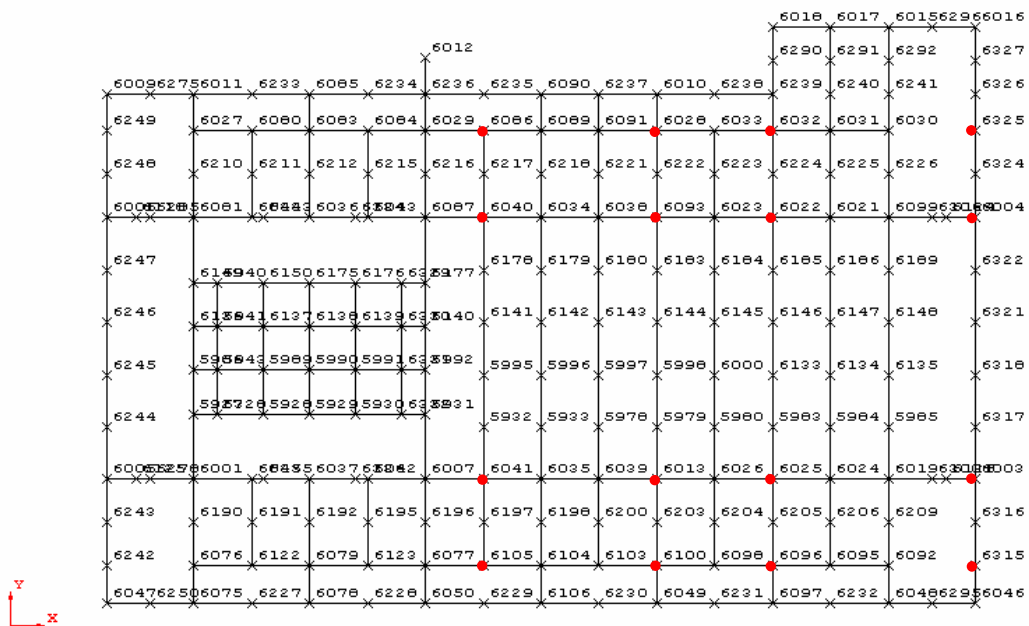


Figura 55. Áreas al viento – Nodos de aplicación – Paquete de almacenamiento, máquinas y bombas.

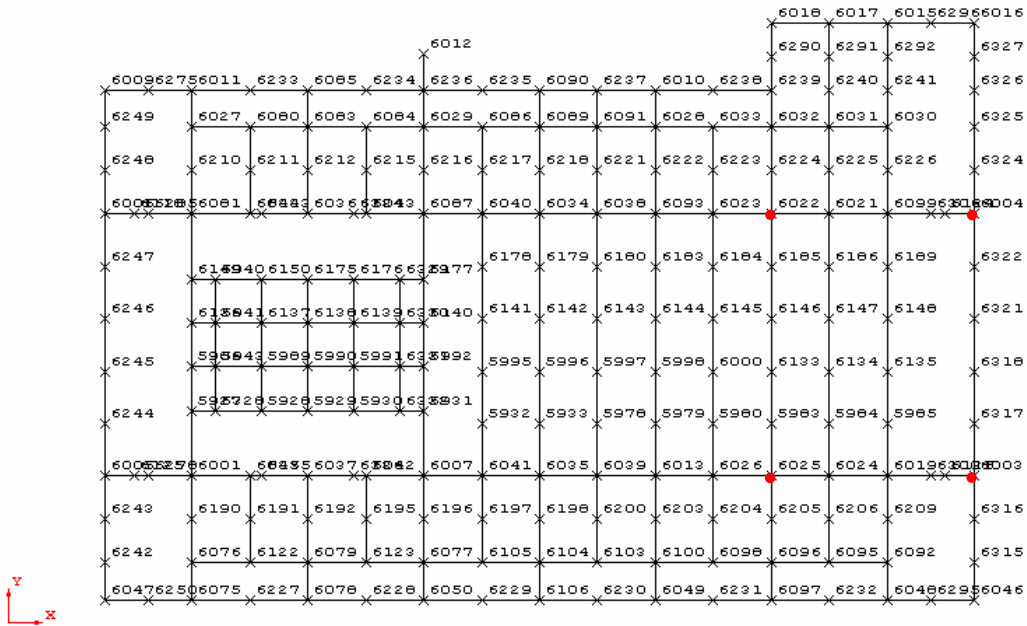


Figura 56. Áreas al viento – Nodos de aplicación – Módulo habitacional y helipuerto.

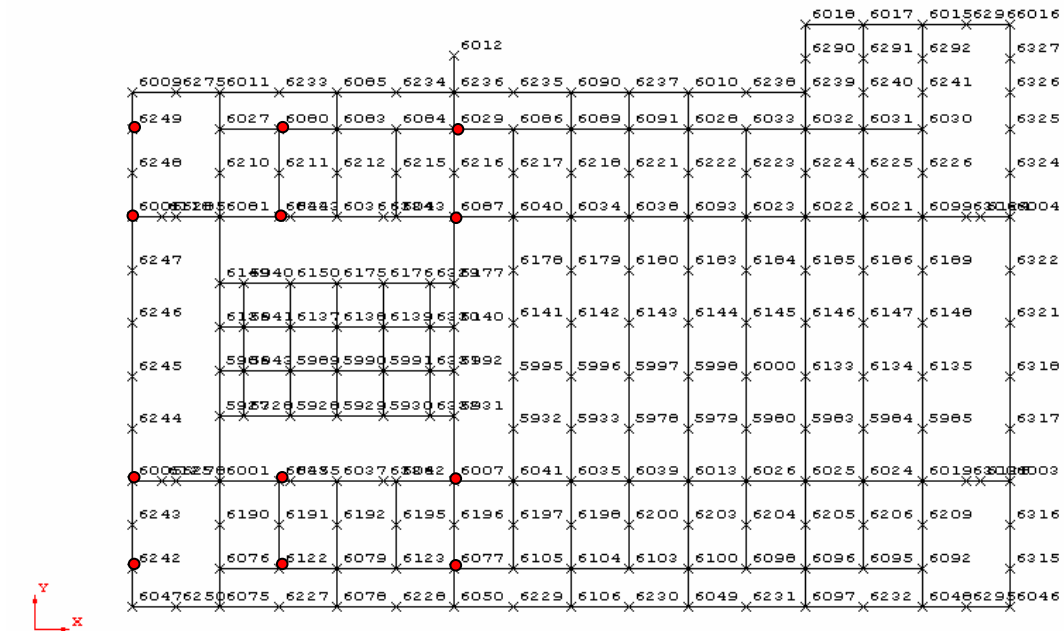


Figura 57. Áreas al viento – Nodos de aplicación – Tanque de agua y lodos.





Figura 58. Áreas al viento – Nodos de aplicación – Torre de perforación.

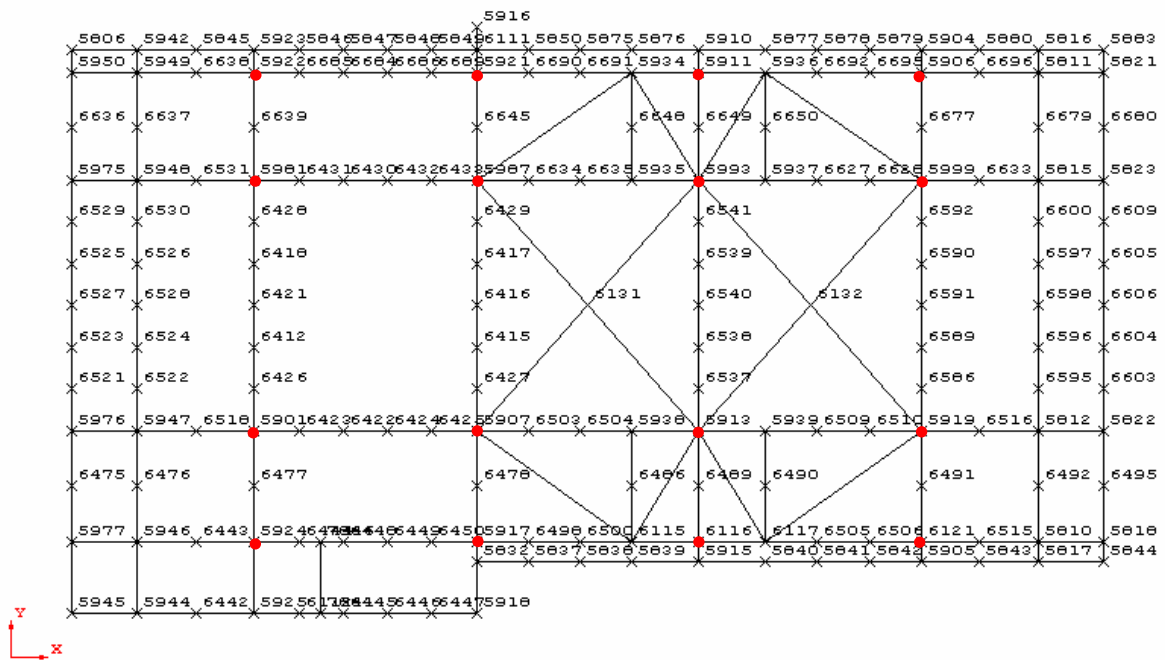


Figura 59. Áreas al viento – Nodos de aplicación – Cubierta inferior.

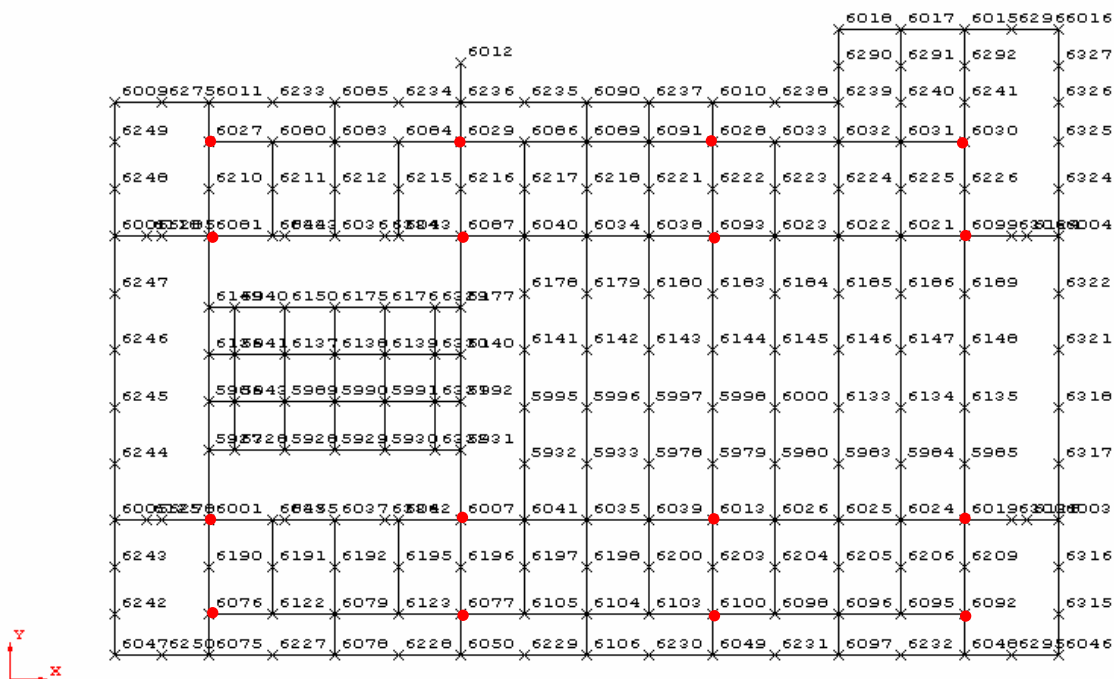


Figura 60. Áreas al viento – Nodos de aplicación – Cubierta superior.

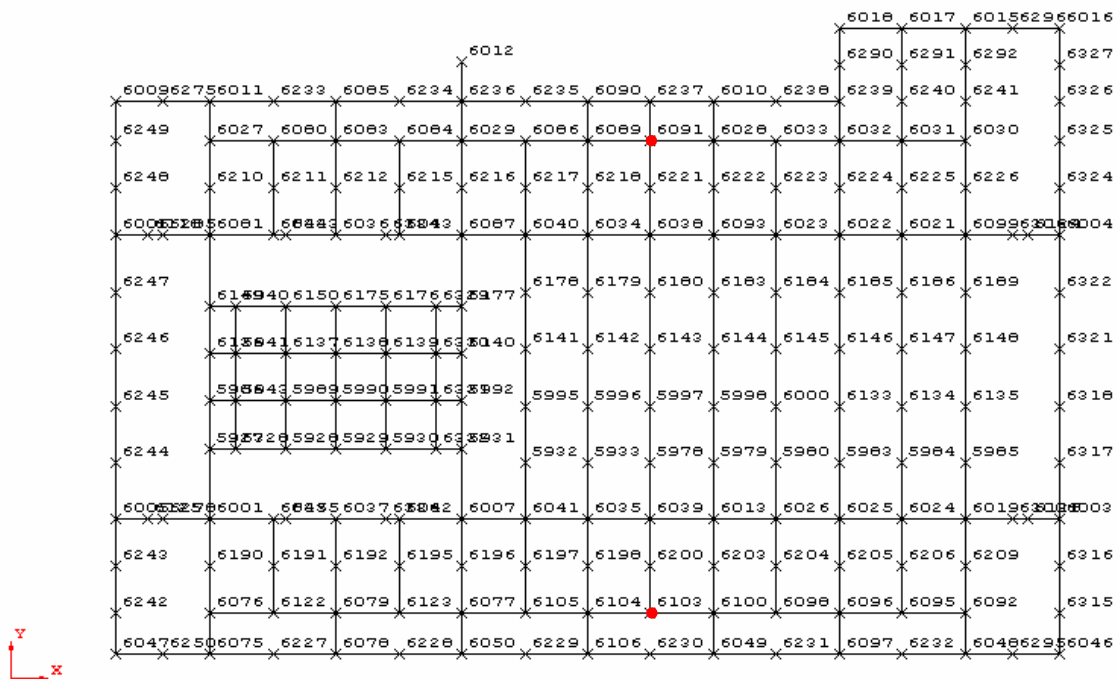


Figura 61. Áreas de viento – Nodos de aplicación – Pedestal de grúa.

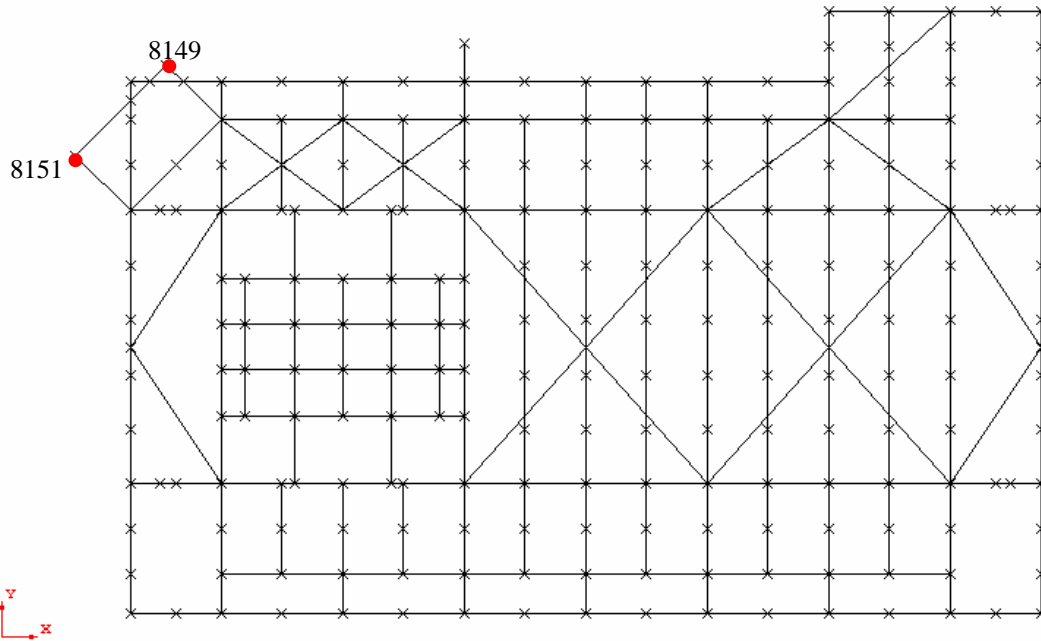


Figura 62. Áreas de viento – Nodos de aplicación - Quemador – Cubierta principal.

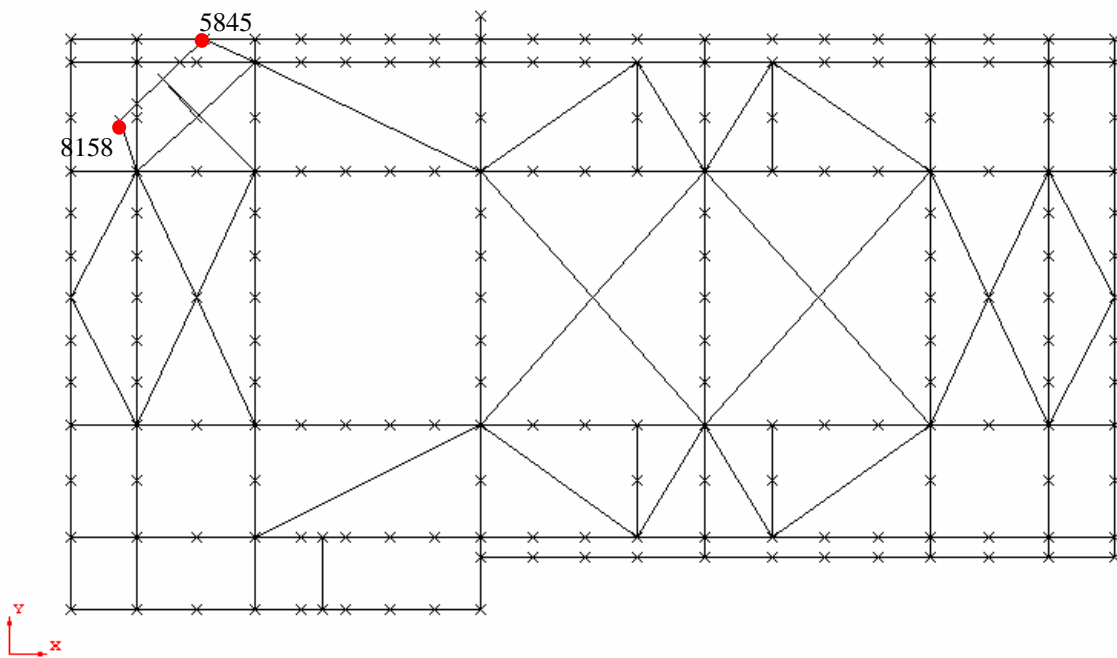


Figura 63. Áreas de viento – Nodos de aplicación – Cubierta inferior.

### III.3.4. Placas base.

La placa base fue modelada con densidades modificadas, de tal forma de considerar el peso adecuado.

$$\gamma_{\text{equiv}} = (\text{Peso real} / \text{Peso modelado}) \times 7,85 \text{ ton/m}$$

$$\gamma_{\text{equiv}} = (29.53/19.469) \times 7.85 = 11.905 \text{ ton/m}^3$$

### III.3.5. Otros accesorios.

Los accesorios, tales como los mostrados en la tabla 3 que a continuación se muestran, se tomaron en cuenta para el peso y la obstrucción de áreas.

DESCRIPCIÓN	PESO	DETALLE
Quemador	34.504 ton	Figuras 64 y 65
Orejas de izaje y arrastre	0.739 ton	Figura 66
Cama de arrastre	0.42 ton/m	Figura 67
Tubería para inundación	5.416 ton	Figuras 68 y 69
Pasillos	51.453 ton	Figura 70
Barandales	7.190 ton	Figuras 71 y 72
Orejas de izaje	0.7433 ton (Subestructura) 0.478 ton (Superestructura)	Figuras 73 y 74
Escaleras A/B	7.083 ton	Figuras 75 y 76
Escaleras retráctiles	8.545 ton	Figura 77
Piso de madera	30.961 ton	Figura 78
Rejilla	116.84 ton	Figuras 79 y 80

Tabla 3. Pesos considerados en el modelo.

LOAD CONDITION 2

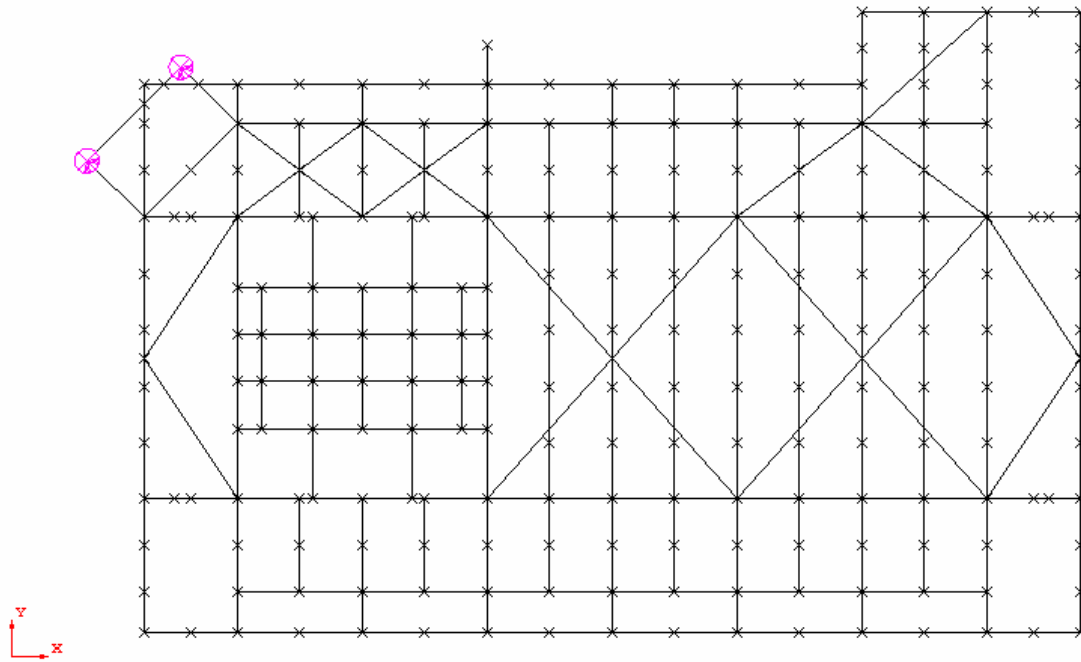


Figura 64. Peso del quemador – Nodos de aplicación – Cubierta superior.

LOAD CONDITION 2

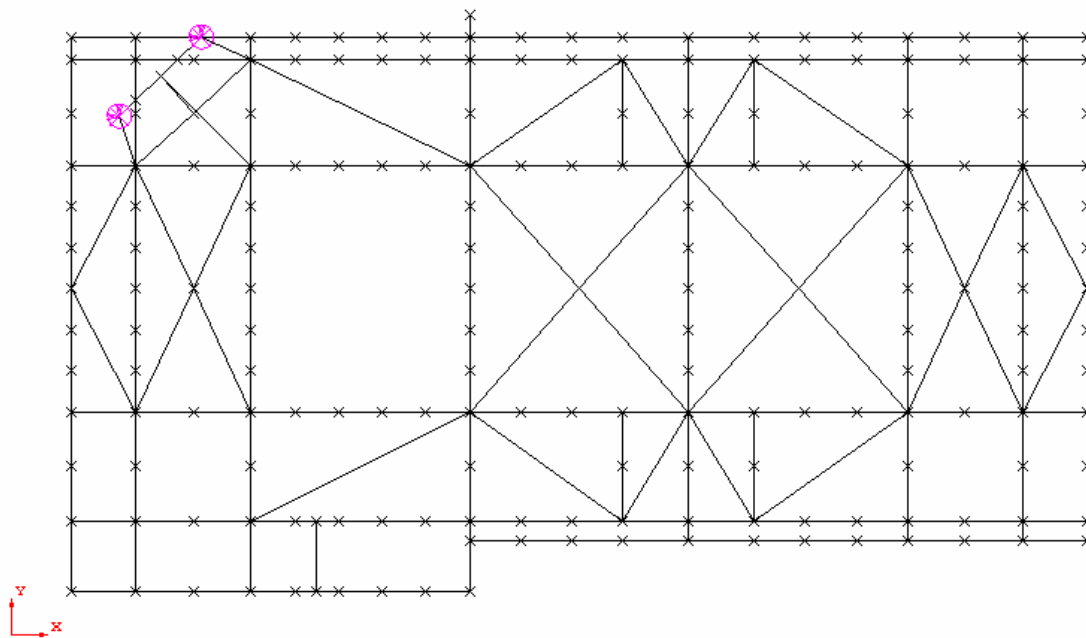


Figura 65. Peso del quemador – Nodos de aplicación – Cubierta inferior.

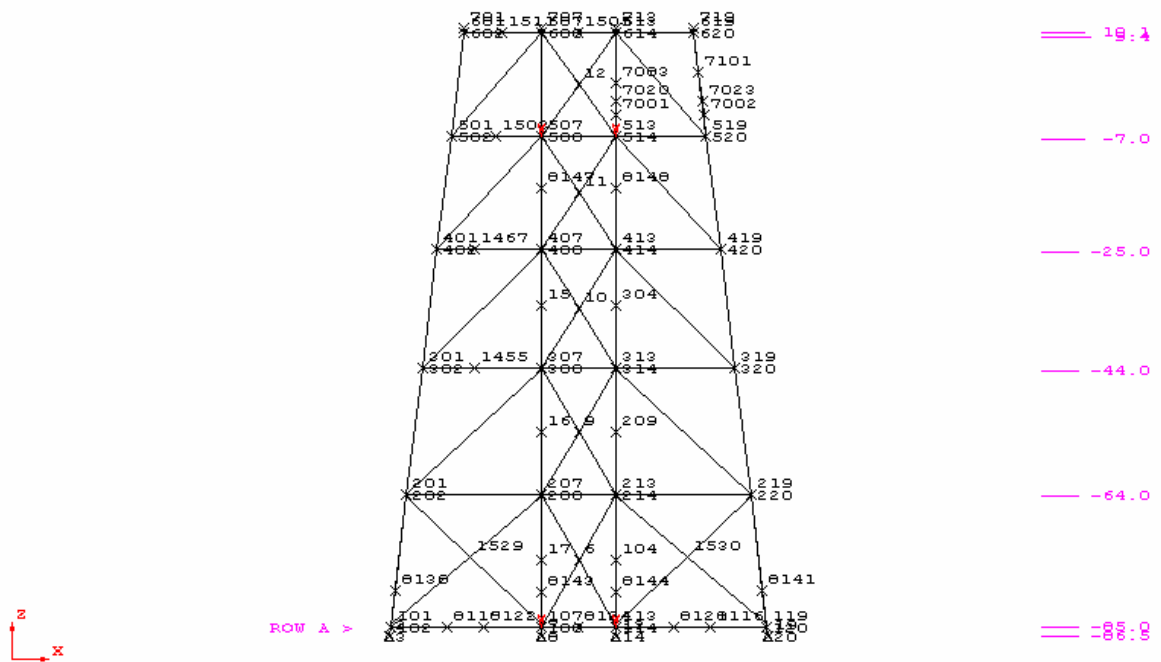


Figura 66. Peso orejas de izaje y arrastre – Nodos de aplicación.

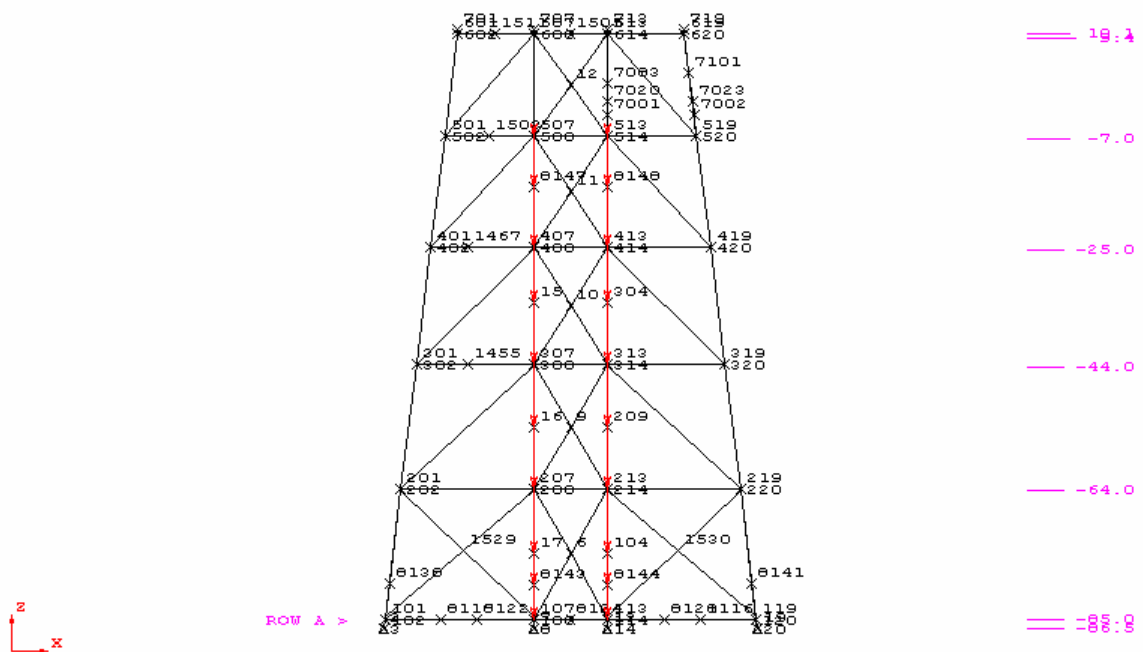


Figura 67. Vigas de arrastre – Nodos de aplicación.

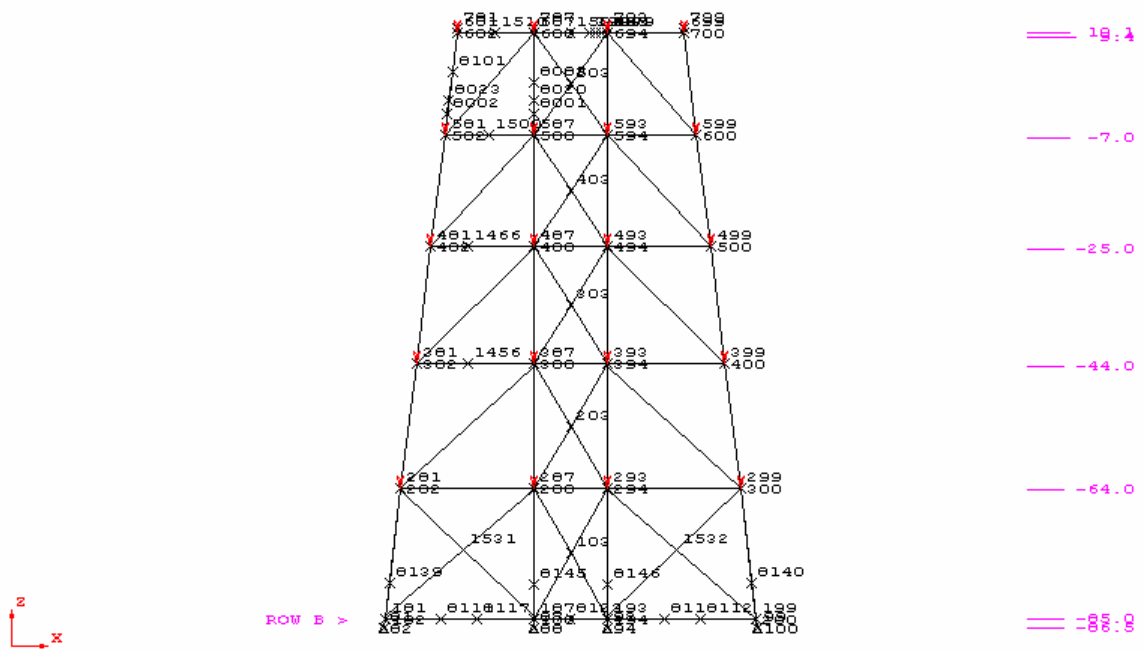


Figura 68. Tubería de inundación – Nodos de aplicación - Eje B.

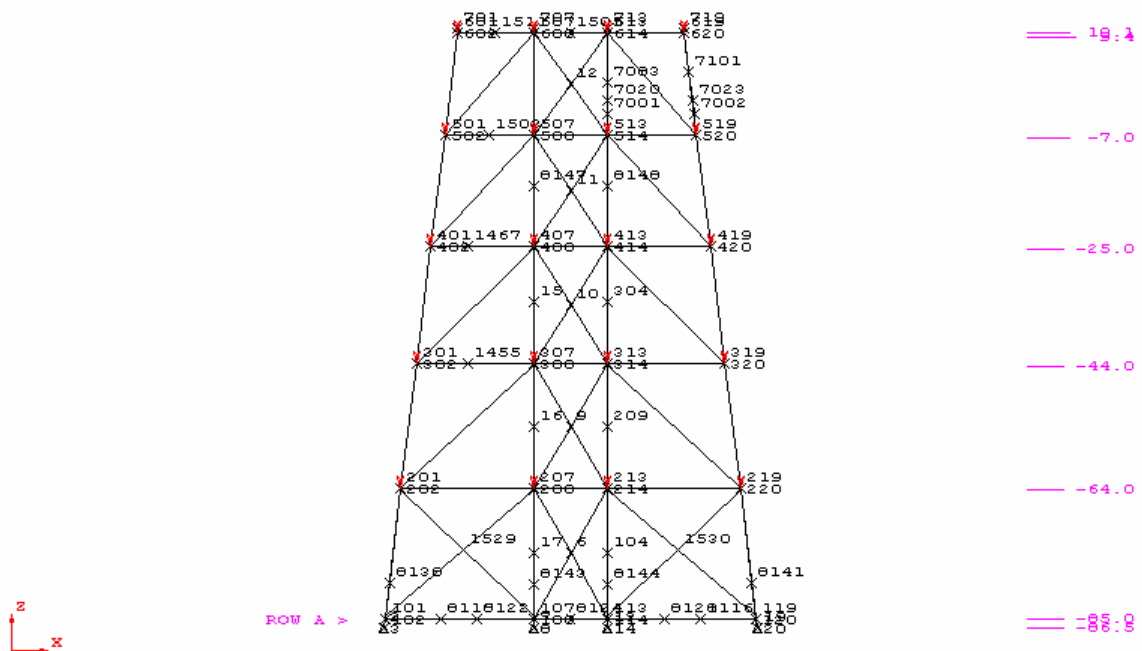


Figura 69. Tubería de inundación – Nodos de aplicación – Eje A.

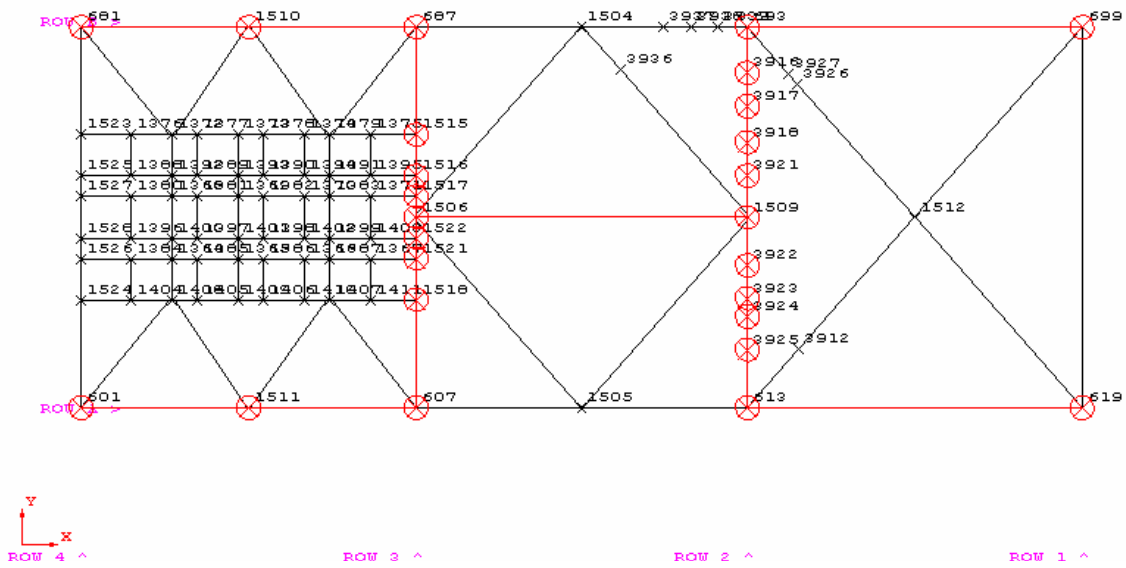


Figura 70. Pasillos – Miembros cargados.

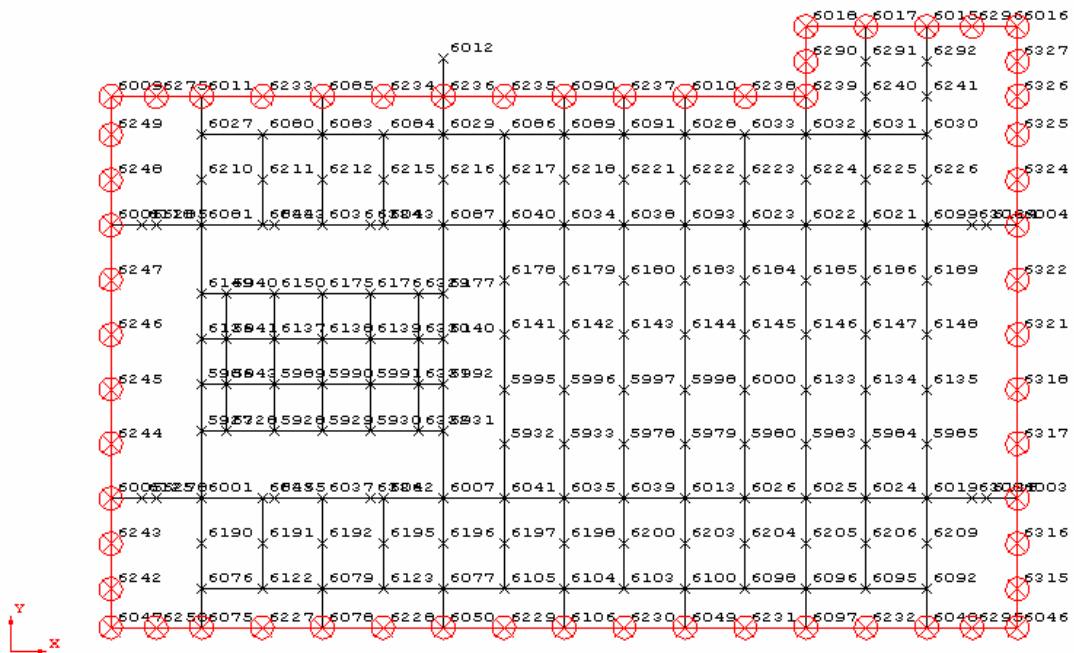


Figura 71. Barandales – Miembros cargados – Cubierta principal.



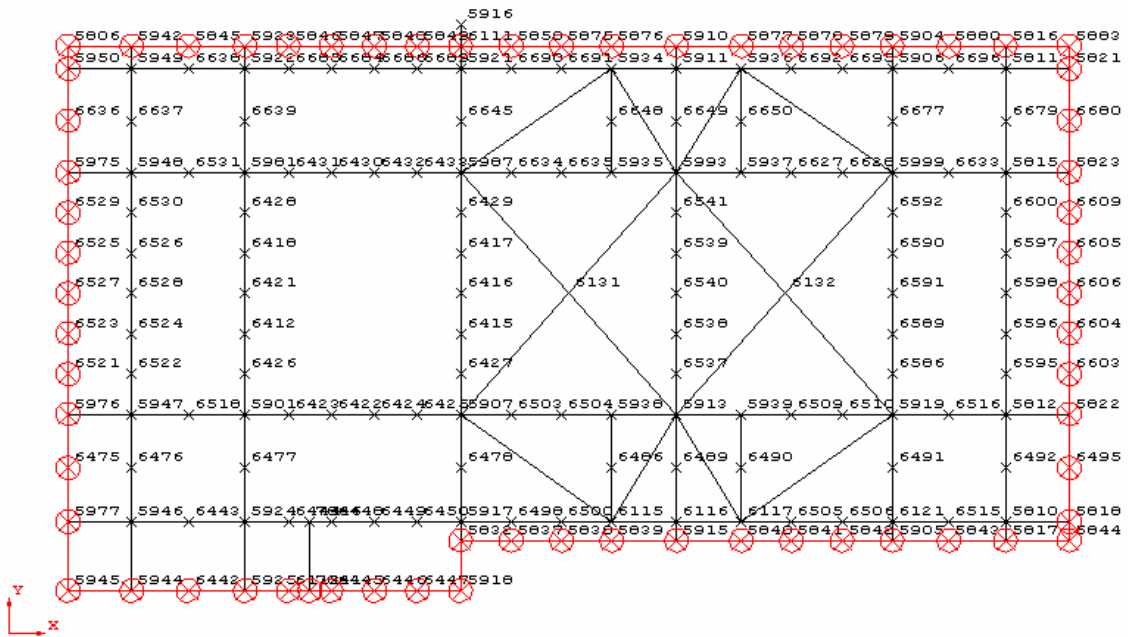


Figura 72. Barandales – Miembros de aplicación – Cubierta inferior.



Figura 73. Orejas de izaje – Nodos cargados – Cubierta.

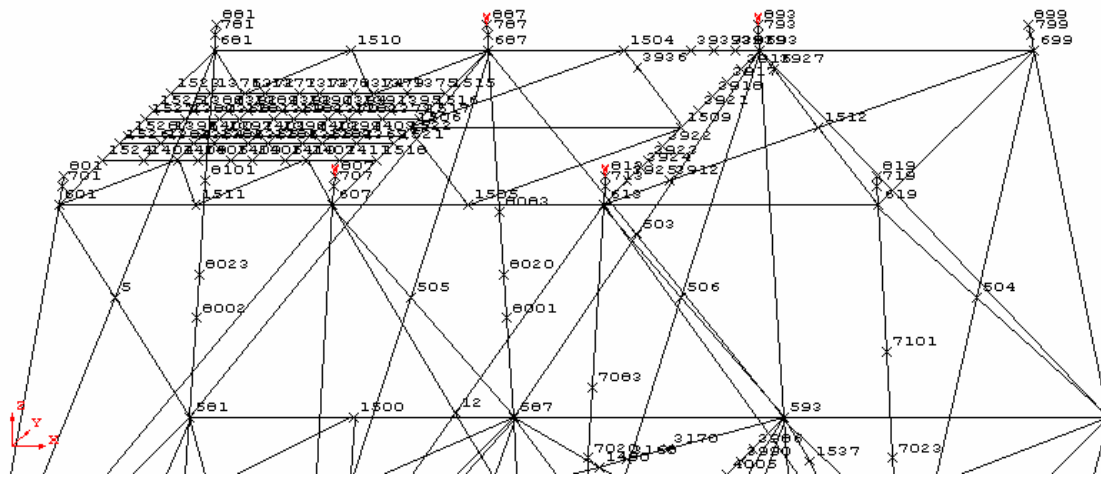


Figura 74. Orejas de izaje – Nodos cargados – Subestructura.

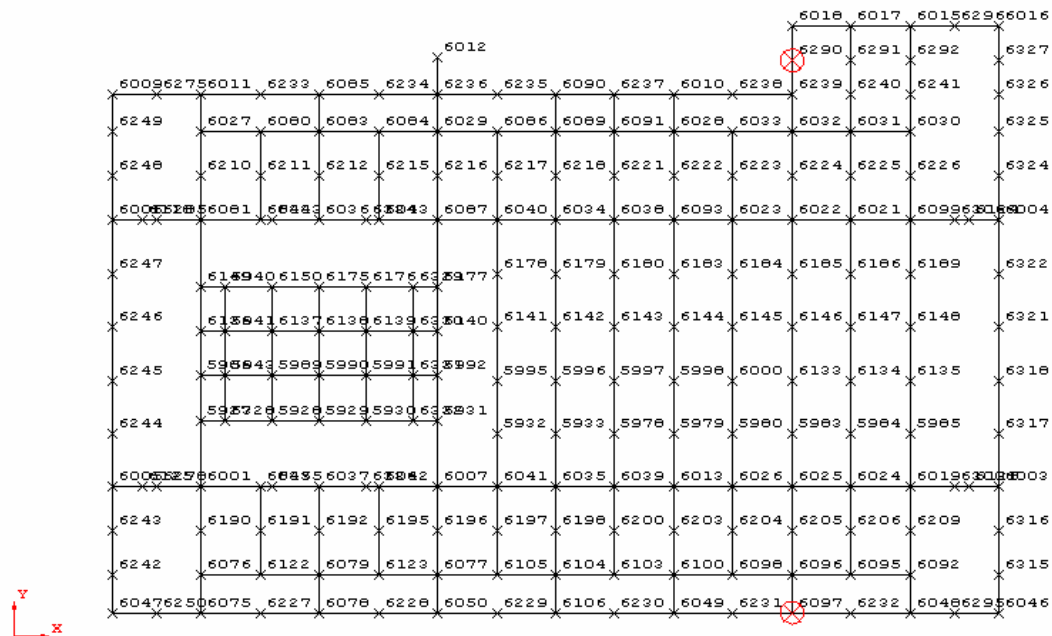


Figura 75. Escaleras – Nodos cargados – Cubierta principal.

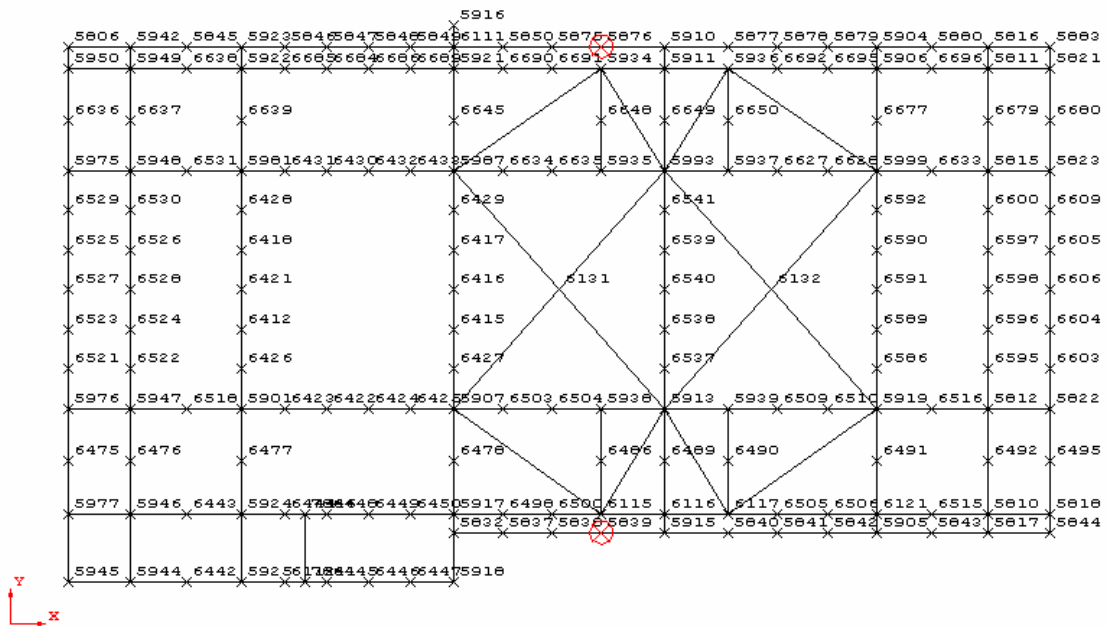


Figura 76. Escaleras – Nodos cargados – Cubierta inferior.

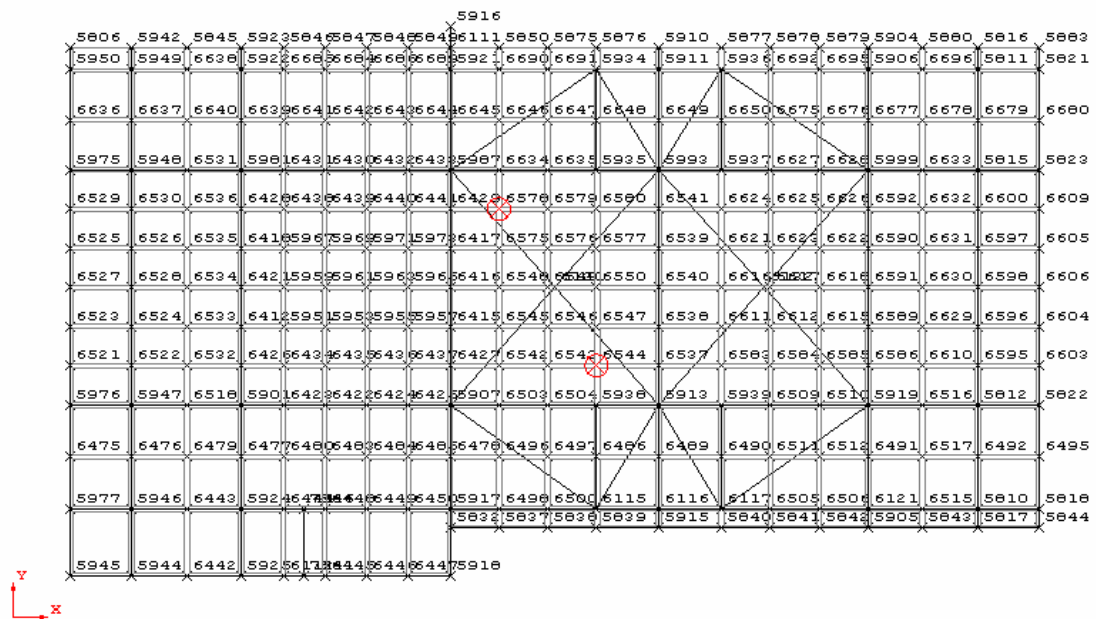


Figura 77. Escaleras retractiles – Nodos cargados – Cubierta inferior.

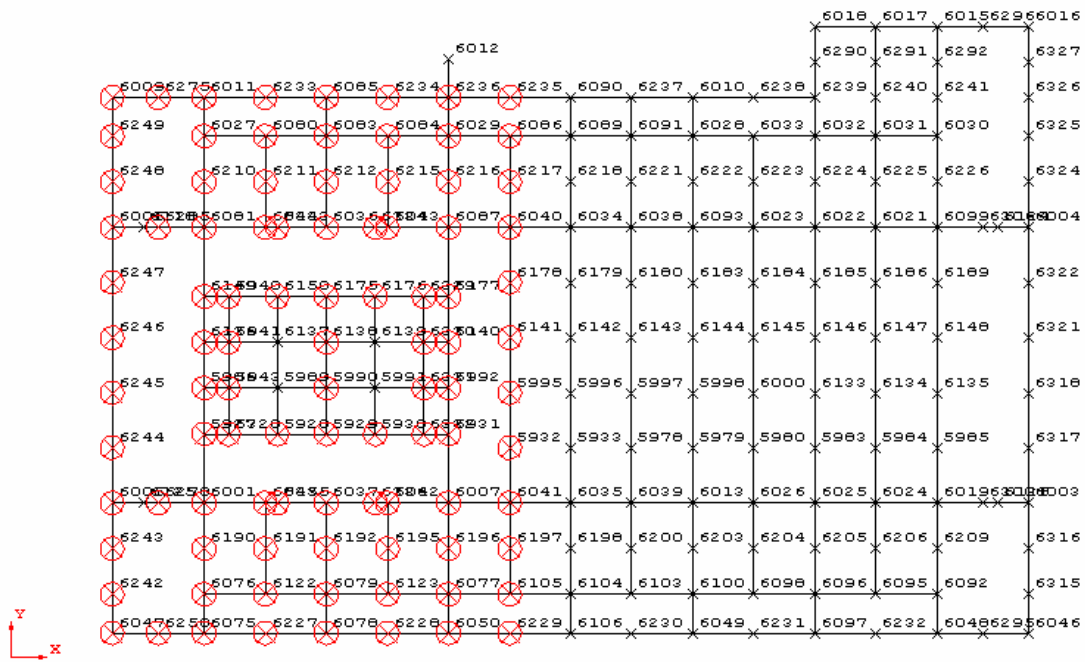


Figura 78. Piso de madera.

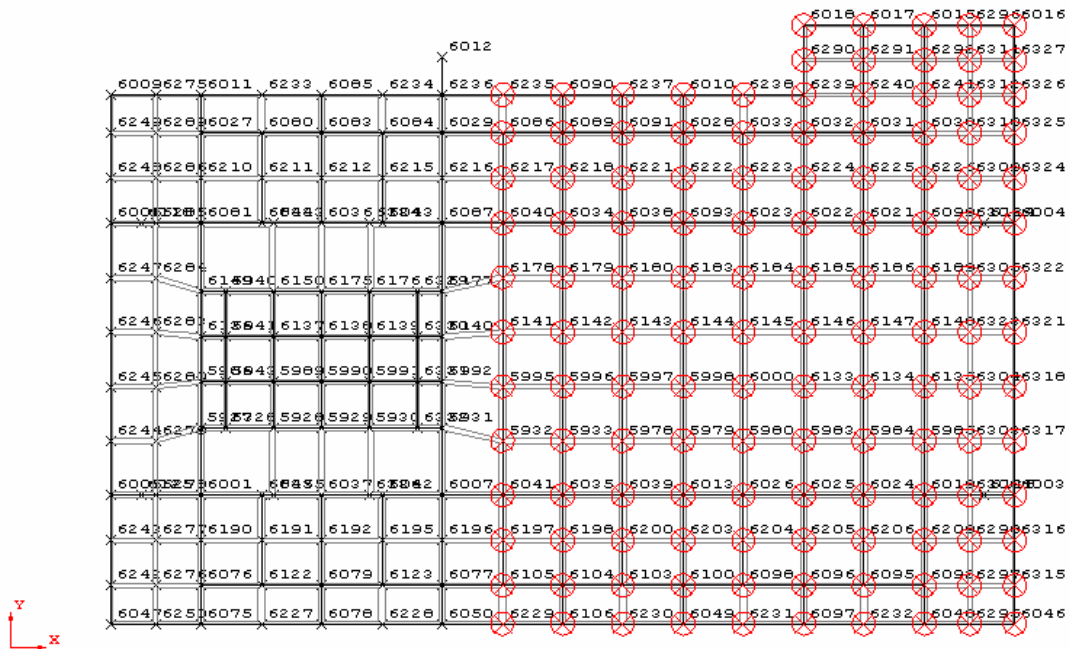


Figura 79. Rejilla – Cubierta principal.

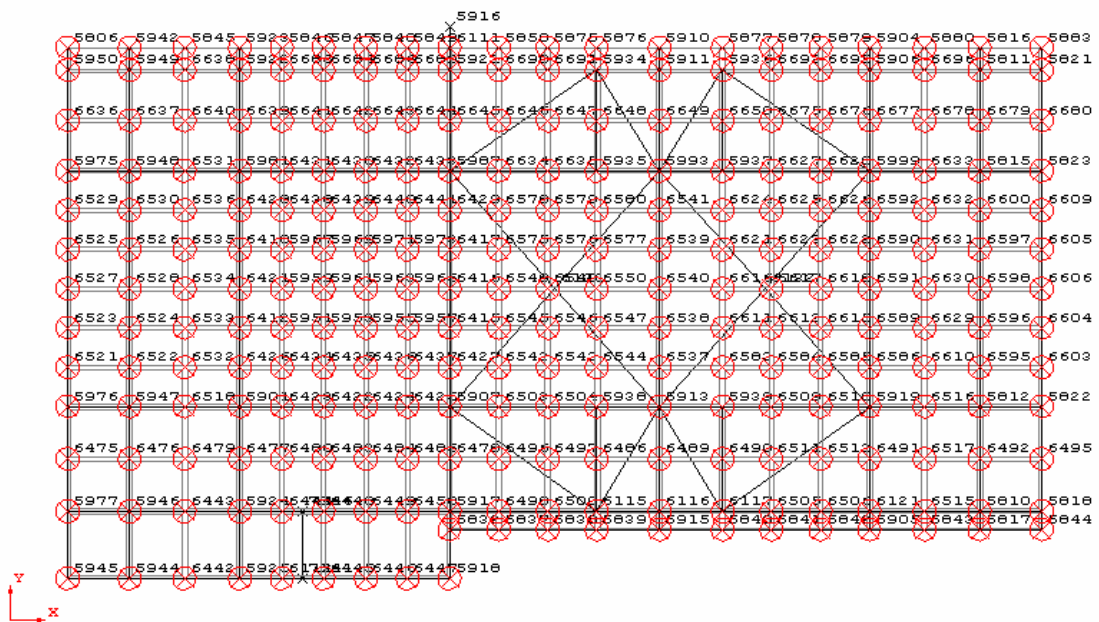


Figura 80. Rejilla – Cubierta Inferior.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESCRIPCIÓN DE LAS CARGAS**

Las cargas de diseño consideradas en el análisis y diseño de los componentes de una plataforma marina fija de ocho patas, se dividen en dos ramas principales: cargas verticales y cargas ambientales.

#### **IV.1. Cargas verticales.**

Son las cargas gravitacionales que actúan en sentido vertical según la atracción de la gravedad y se pueden clasificar dependiendo de su permanencia, en cargas vivas y cargas muertas.

- Las cargas vivas son las relativas a las personas, herramienta, equipo menor, etc., que se encuentran ubicadas en las plataformas en un momento determinado. Quedan incluidos dentro del concepto de carga viva, los líquidos contenidos en recipientes y los materiales almacenados en lugares a propósito. Se deben considerar para cada caso, cual es el valor que permanece actuando cuando se suspende su operación por mal tiempo.

- El peso muerto, constituido por cargas de tipo permanente, abarca el peso propio de la estructura, incluyendo Pilotes, Superestructura, Subestructura, tuberías, ánodos, estructurales, accesorios, equipo fijo, materiales almacenados y paquetería.

El peso de la torre de perforación puede actuar en diferentes posiciones dependiendo del pozo en que se está trabajando. Se deben analizar diferentes posiciones, de manera que se determinen el momento flexionante máximo y el cortante máximo a las traveses longitudinales principales de la cubierta superior, así como la compresión máxima en las columnas y pilotes.

## Cargas en Superestructura.

La estructura se considero diseñada para resistir las siguientes cargas:

La cubierta principal se cargo con el equipo de perforación, más las cargas vivas expresadas a continuación:

- Cargas vivas (cubierta inferior y superior, ver figuras 81 y 82)

Áreas libres: 976.5 kgf/m<sup>2</sup>      Pasillos, Escaleras, Accesos, etc.: 366.2 kgf/m<sup>2</sup>

- Tuberías de proceso y de servicio

Carga de tuberías en cubierta inferior: 732.4 kgf/m<sup>2</sup>

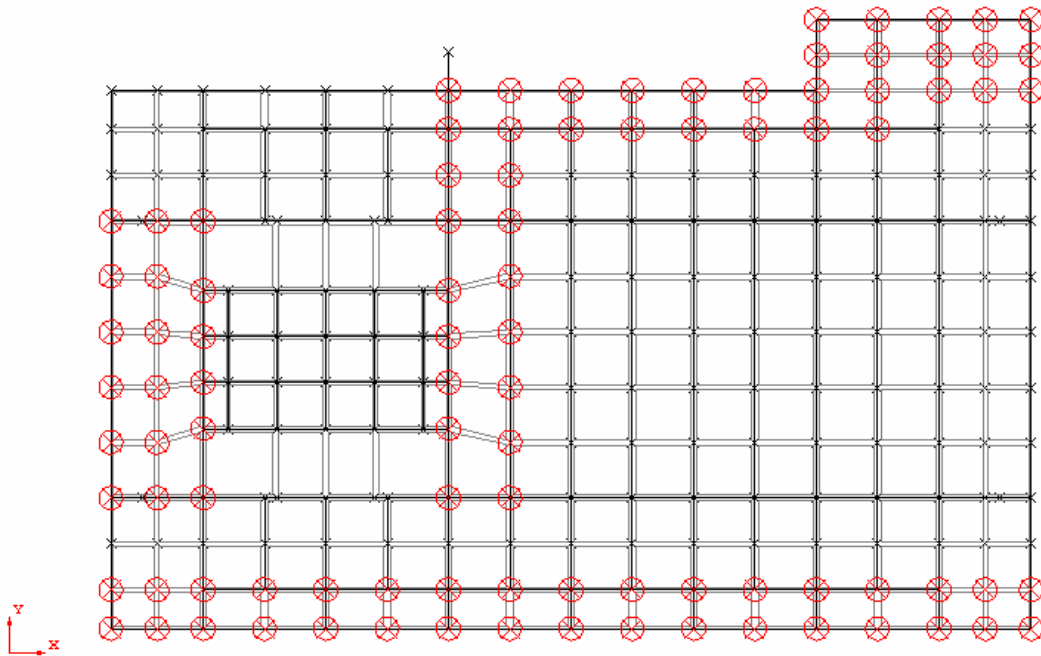


Figura 81. Cargas vivas en cubierta superior.

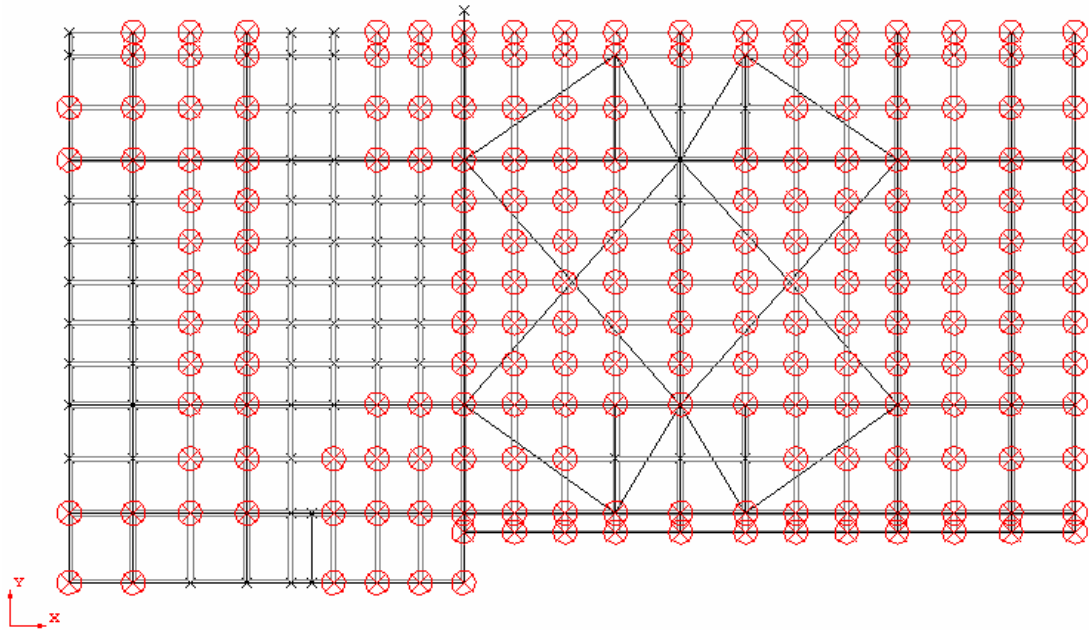


Figura 82. Cargas vivas en cubierta inferior.

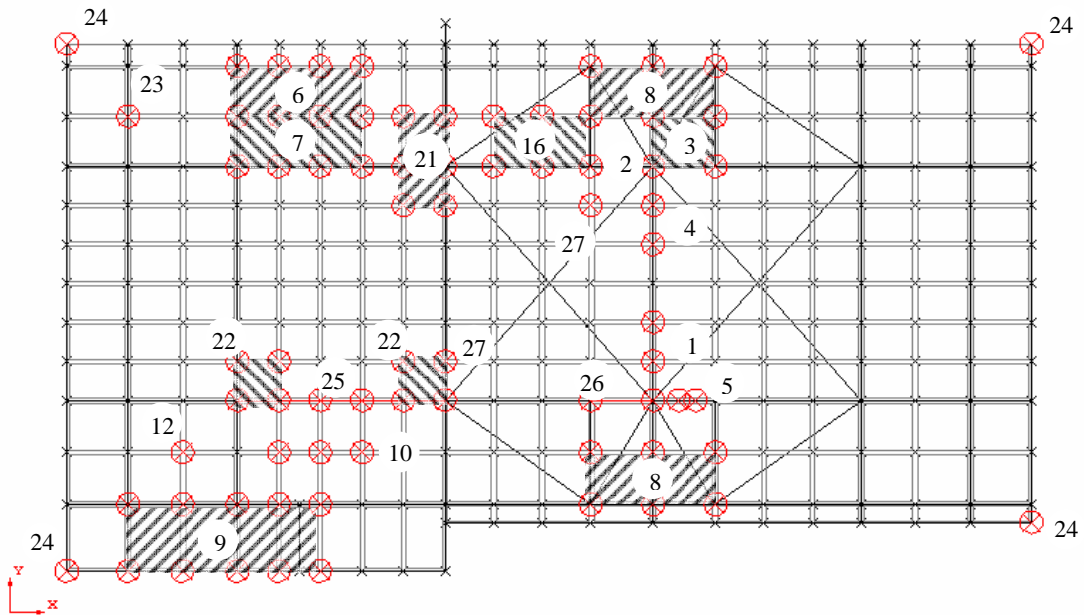


Figura 83. Cubierta inferior – Nodos y miembros cargados.



Descripción detallada de las cargas de diseño en la cubierta inferior (ver figura 83).

CUBIERTA INF.

1a ETAPA:

No	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (mm)	PESO VACÍO (ton)
1	GA-1301/R	Bombas de pozo profundo (2)	850 x 850	1.10
2	GA-1302/R	Bombas de pozo profundo (2)	-	0.44
3	GA-1351-A/B	Bombas de agua salada (2)	-	0.22
4	GA-1001-A/B	Bombas de agua contra incendio (2)	3200 x 1676	4.40
5	B-001/R	Bombas Jockey (2)	-	0.44
6	N-001	Lanzados de diablos 30 x 24"	7458 x 2722	15.95
7	N-002	Lanzador de diablos 24 x 20"	7458 x 2722	15.95
8	FB-1352-A/B	Tanques de agua fresca (2)	9144 x 2438	7.50
9	Q-001	Separador remoto	-	36.3
10	Q-002	Separador de prueba	4876 x 1524	18.70
11	Q-003	Tanque de drenaje	-	(*)
12	Q-004	Depurador	φ 914	4.40
13	Q-005	Tanque de inhibidor de corrosión	-	(*)
14	Q-006	Tanque de inhibidor de corrosión	-	(*)
15	Q-007	Tanque de antiespumante	-	(*)
16	CC-001	Cuarto de control	5100 x 3500	8.80
17	X-001	Quemador	-	34.50
18	B-003/R	Bombas de iny. de inhibidor de corrosión	-	(*)
19	B-004/R	Bombas de iny. de inhibidor de corrosión	-	(*)
20	B-005/R	Bombas de iny. de antiespumante	-	(*)
21	BT-1902	Rack de transmisiones.	3400 x 1403	1.00
22	BT-1903/4	Rack de transmisiones (2)	1600 x 1400	1.00
23	P-001	Central hidráulica	1700 x 1400	1.00
24	LA1901A/B/C/D	Luces de ayuda a la navegación (4)	-	0.05
25		Bombas neumáticas	-	4.18
26		Consola Baker.	-	4.40
27		Pedestal de malacate (2)	-	1.00

Tabla 4. Cargas de diseño en cubierta inferior.

El arreglo de equipo se muestra en la figura 84.

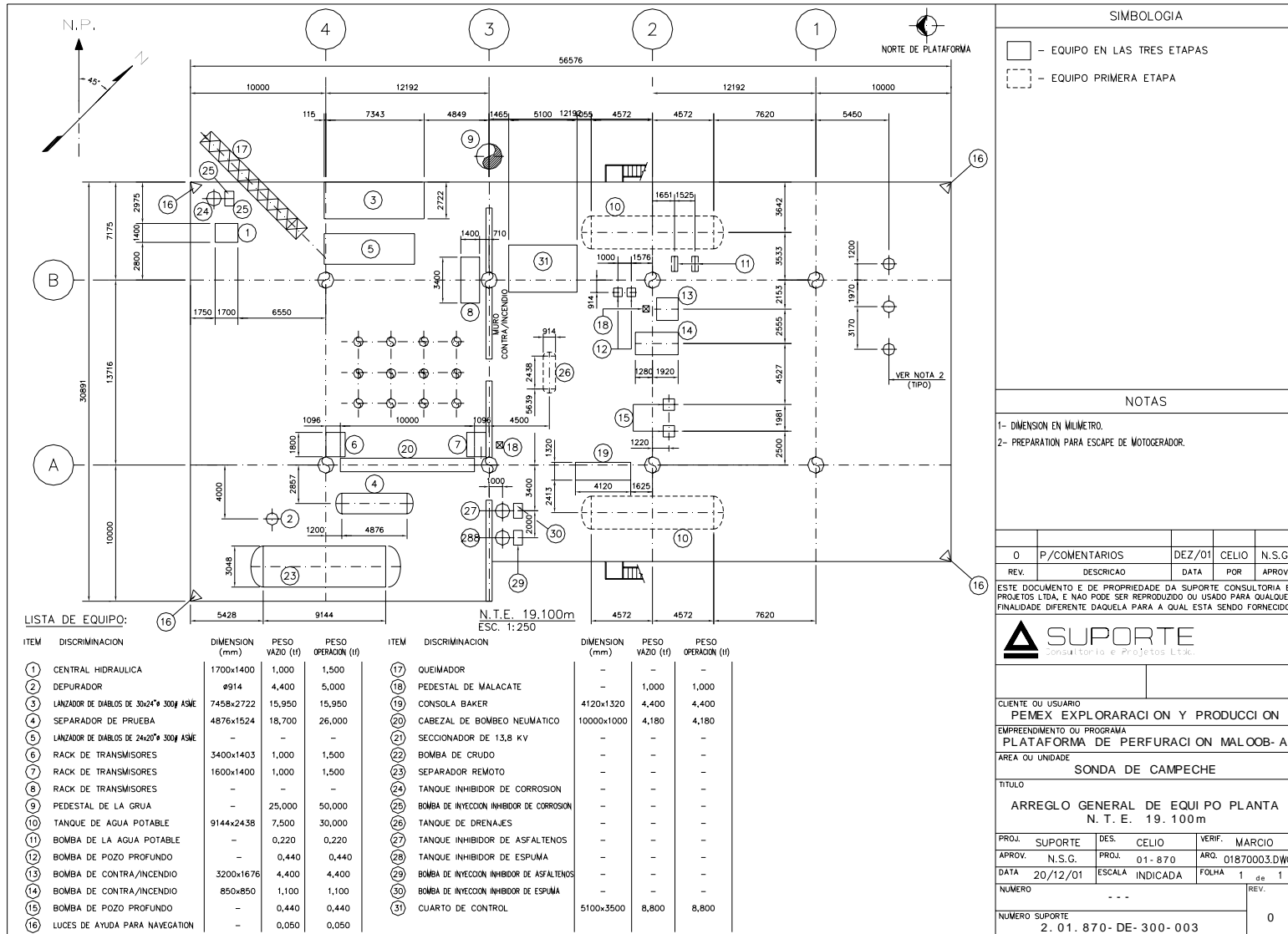


Figura 84. Arreglo de equipo en la cubierta inferior.

Para descripción detallada de las cargas de diseño de la cubierta principal ver figuras 85 hasta 97.

No.	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES (mm)	PESO VACÍO (ton)	PESO LLENO (ton)	DETALLE
	Paquete de maquinas	21336 x 10363	468.00	468.00	Figura 85
	Módulo habitacional / helipuerto <sup>(1)</sup>	18897 x 19278	290.00	458.00	Figura 86
	Paquete de almacenamiento	21336 x 7315	150.00	490.00	Figura 87
	Paquete de bombas <sup>(2)</sup>	21336 x 7925	365.00	365.00	Figura 88
	Paquete de lodos	17678 x 3200	100.00	500.00	Figura 89
	Paquete de líquidos	18288 x 3200	80.00	426.00	Figura 90
	Torre de perforación		768.00	1065.00	Figuras 91 a la 95
	Pedestal de grúa <sup>(3)</sup>		31.25	82.3	Figuras 96
PA-1001/2	Grúa de pedestal sobre paquete de bombas (x2) <sup>(4)</sup>		34.00	74.00	Figura 97
	Carga máxima de barrena <sup>(5)</sup>		-	500.00	Figuras 91 a la 95
	Carga máxima de tubería de perforación. <sup>(5)</sup>		200.00	-	Figura 91

**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:

FA-1503 – Tanque de recuperación de cemento;

FA1504 – Tanque de recuperación de barita;

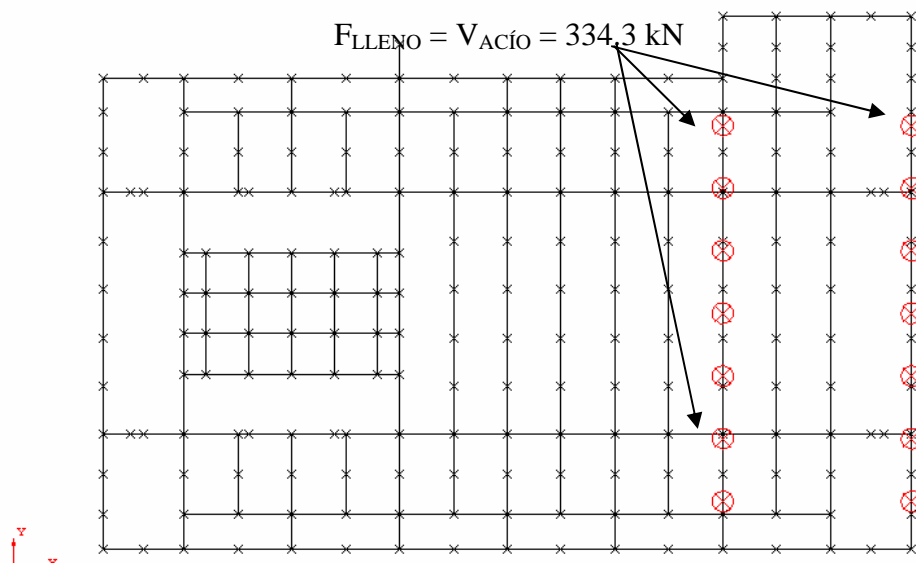
(3) – Considerando las cargas de Titan en 6800B: Peso propio = 306.6 kN; Momento máximo = 7582 kNm; Carga vertical asociada = 500,71 kN

(4) Las cargas de la grúa colocada sobre el paquete de bombas se distribuyeron en los mismos puntos de las reacciones del paquete de bombas

(5) 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).

**Tabla 5. Cargas de diseño de la cubierta principal.**

El arreglo de equipo se muestra en la figura 98.



**Figura 85. Paquete de máquinas – Aplicación de cargas.**

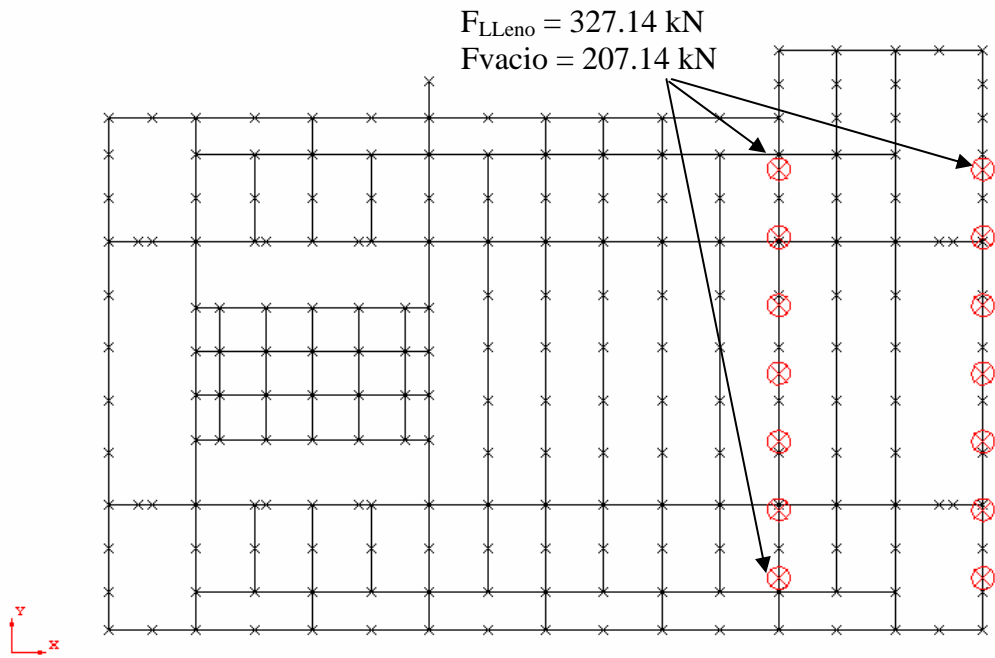


Figura 86. Módulo habitacional / Helipuerto – Aplicación de cargas.

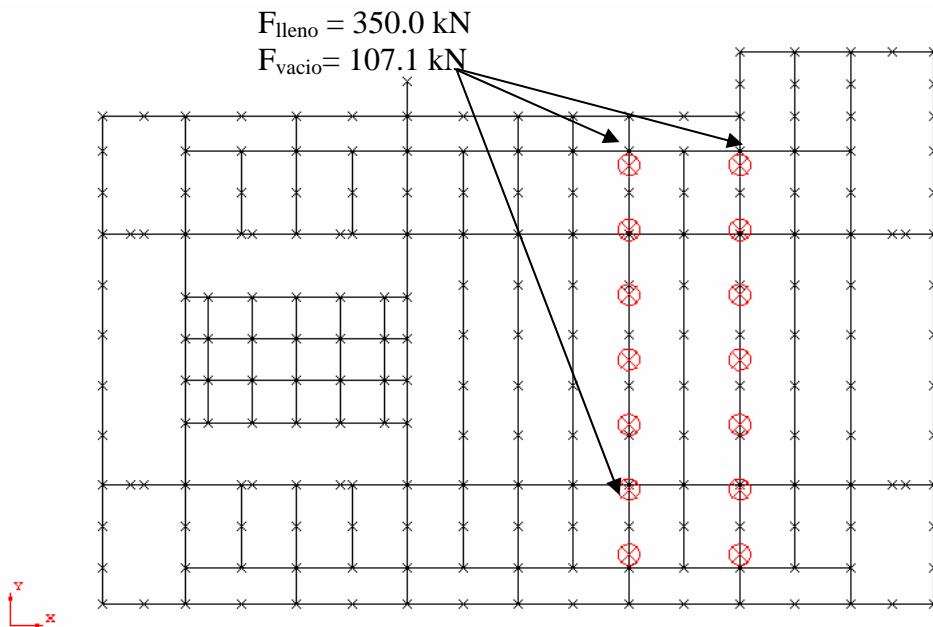


Figura 87. Paquete de almacenamiento – Aplicación de cargas.

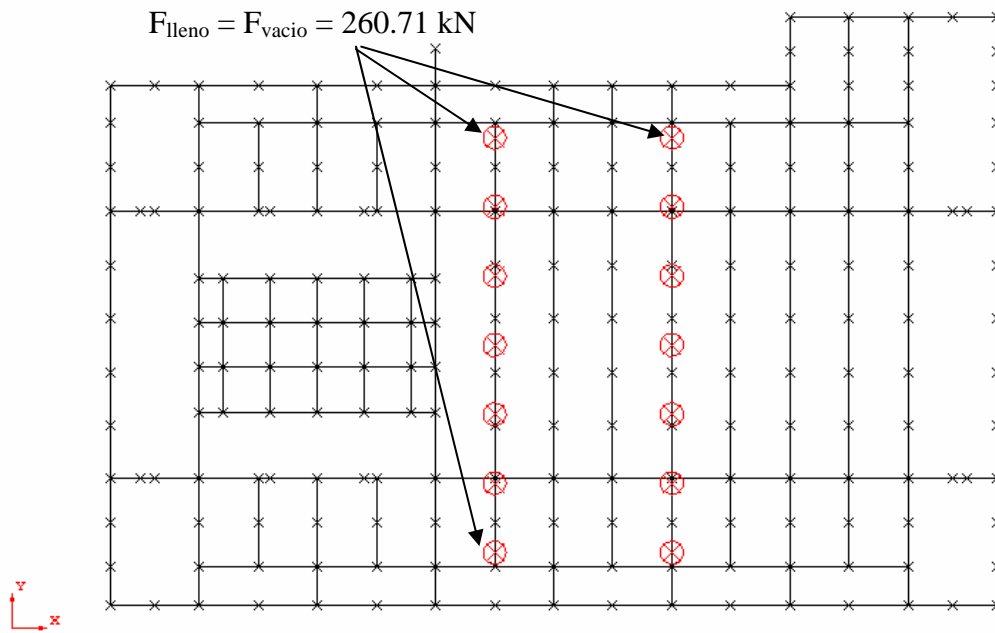


Figura 88. Paquete de bombas – Aplicación de cargas.

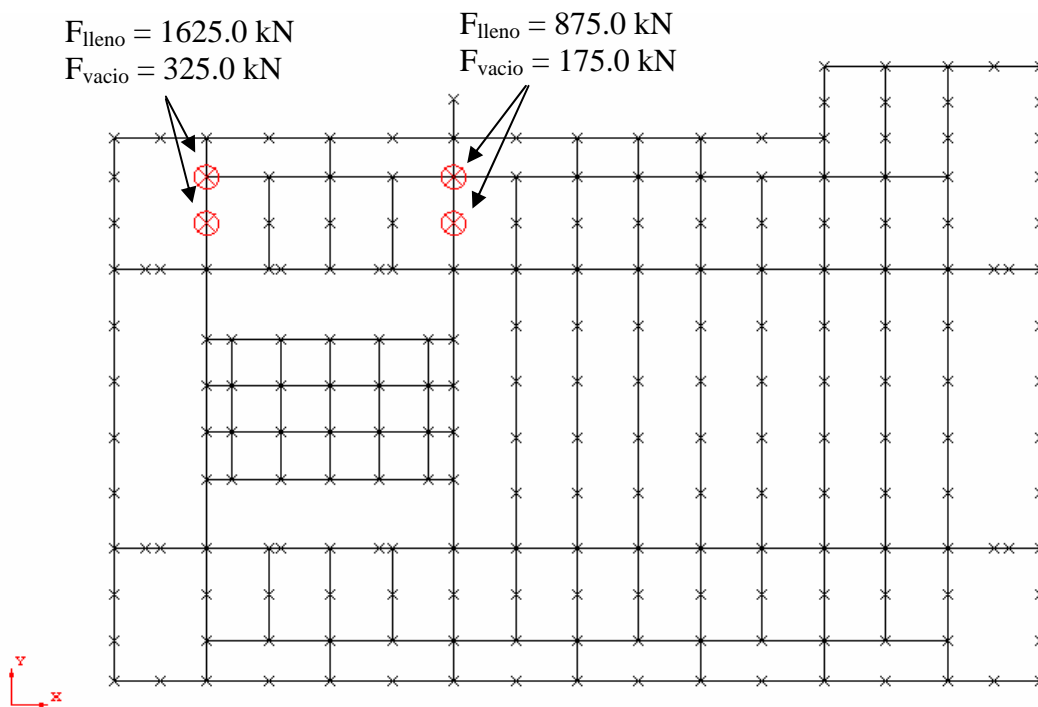


Figura 89. Paquete de lodos – Aplicación de cargas.

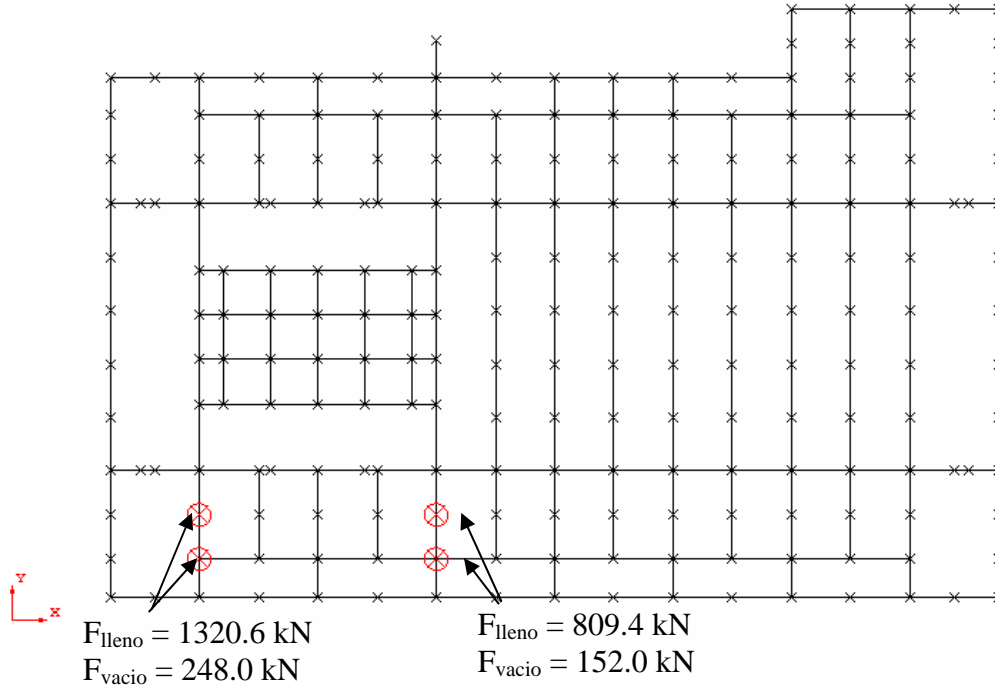


Figura 90. Tanques de agua – Aplicación de cargas.

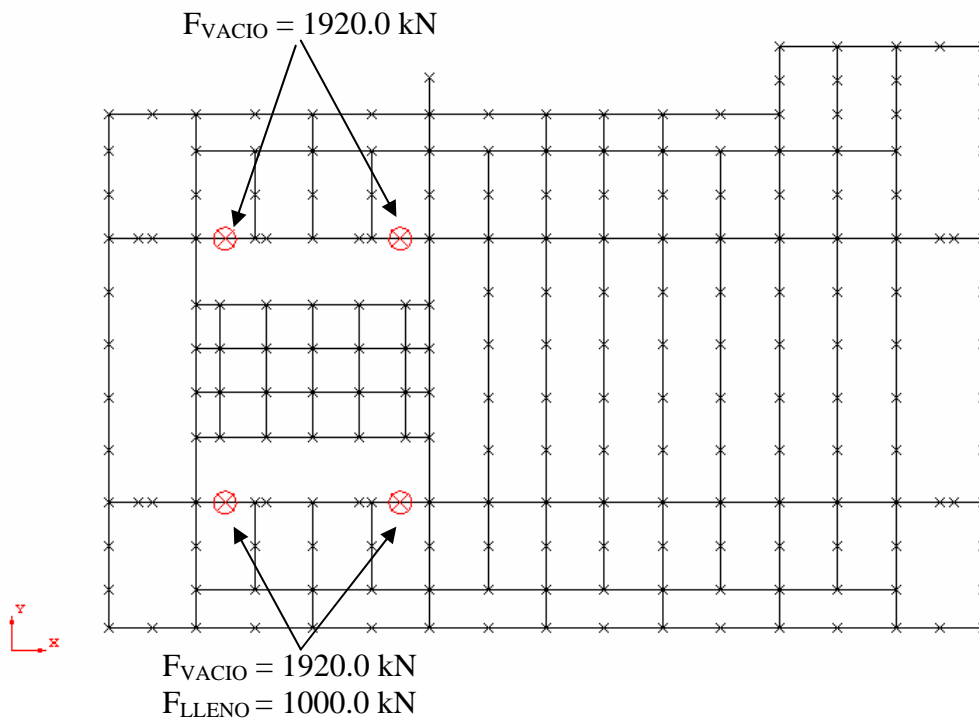


Figura 91. Torre de perforación – Tuberías – Aplicación de cargas.

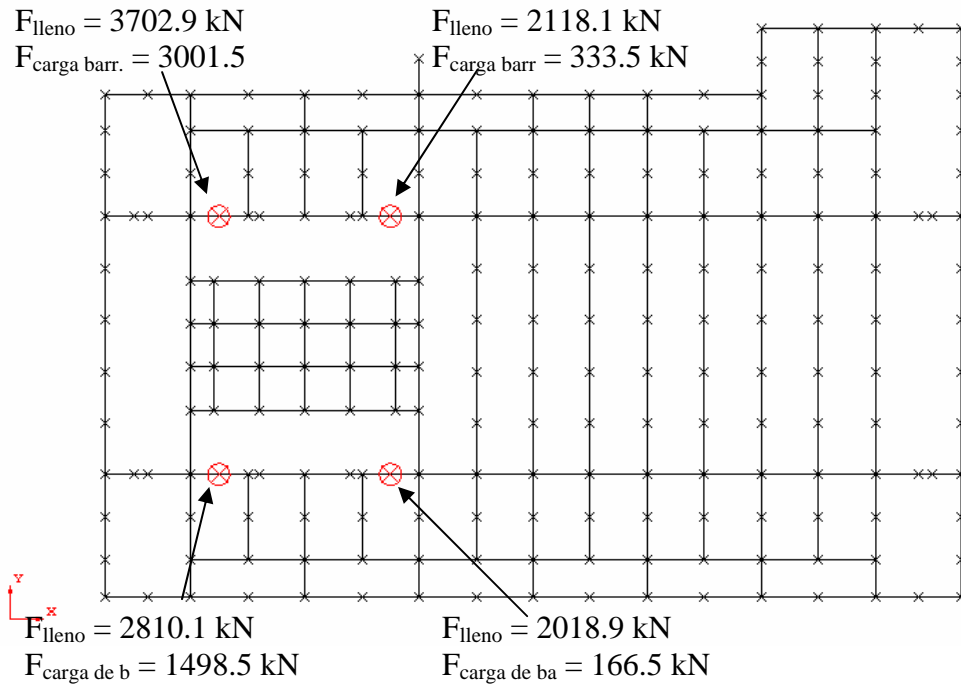


Figura 92. Torre de perforación – Carga de barrena – Aplicación de cargas.

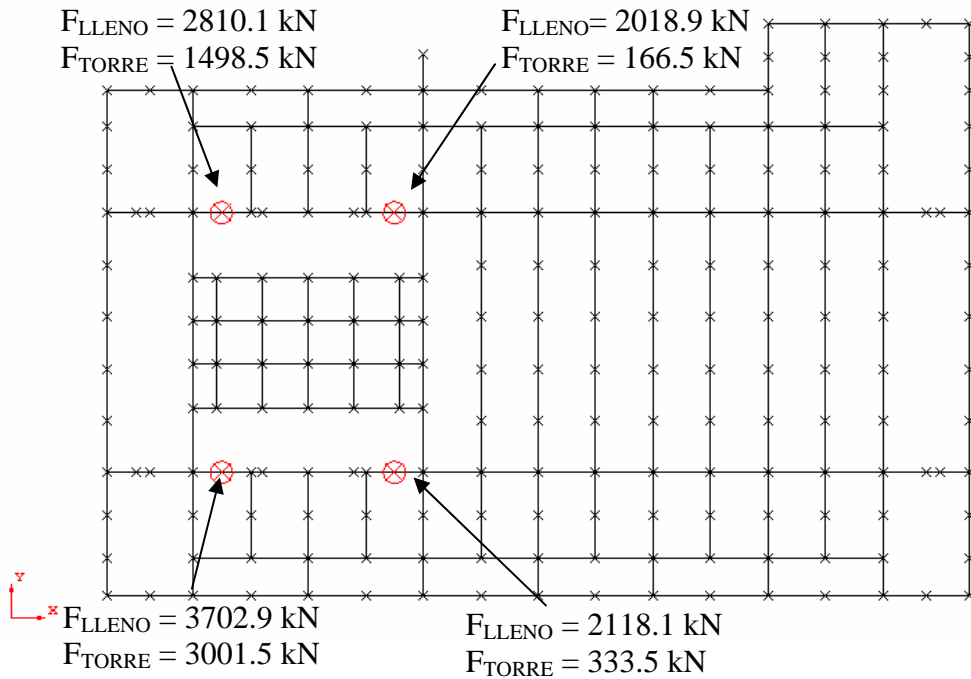


Figura 93. Torre de perforación – Posición de carga 2 – Aplicación de cargas.

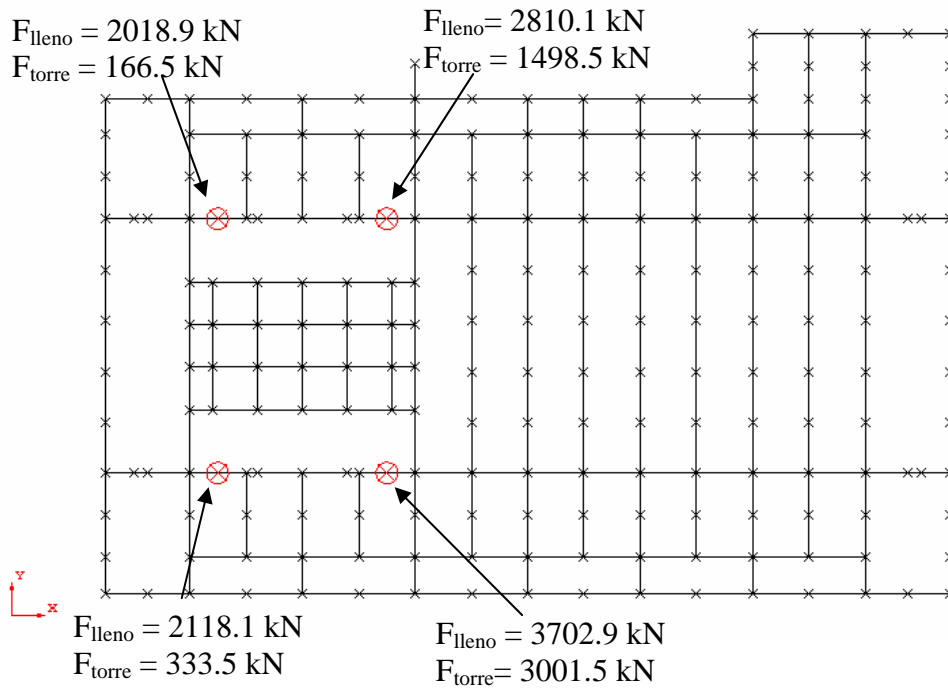


Figura 94. Torre de perforación – Posición de cargas 3 – Aplicación de cargas.

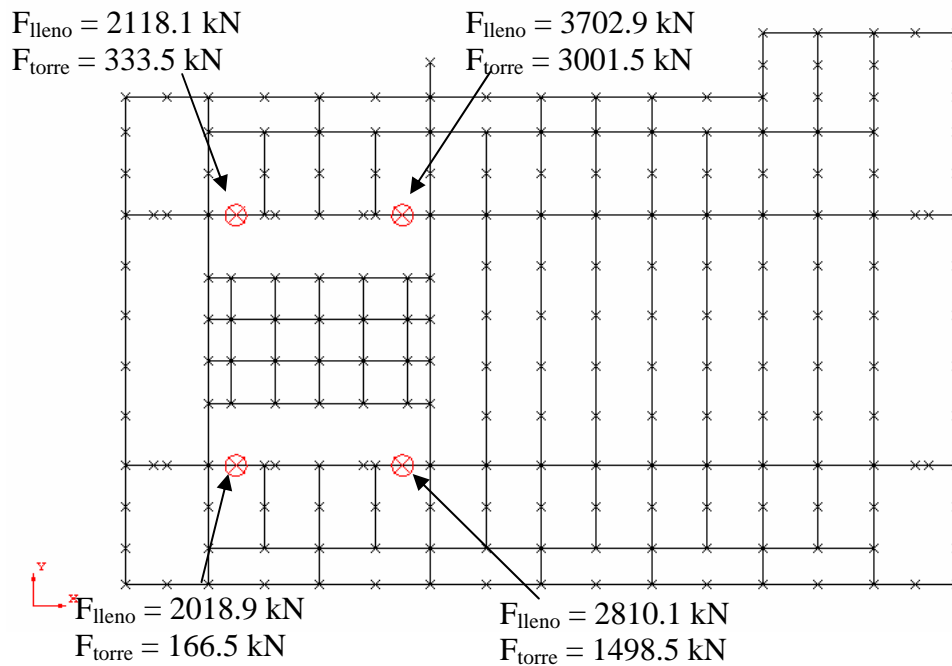


Figura 95. Torre de perforación – Posición de cargas 4 – Aplicación de cargas.



LOAD CONDITION 2

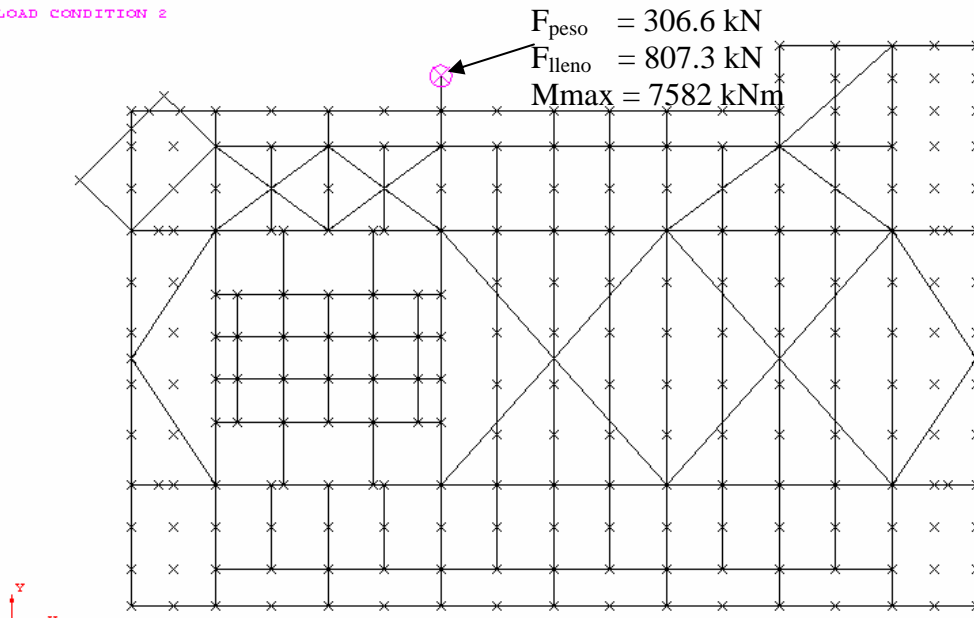


Figura 96. Grúa de pedestal – Aplicación de cargas.

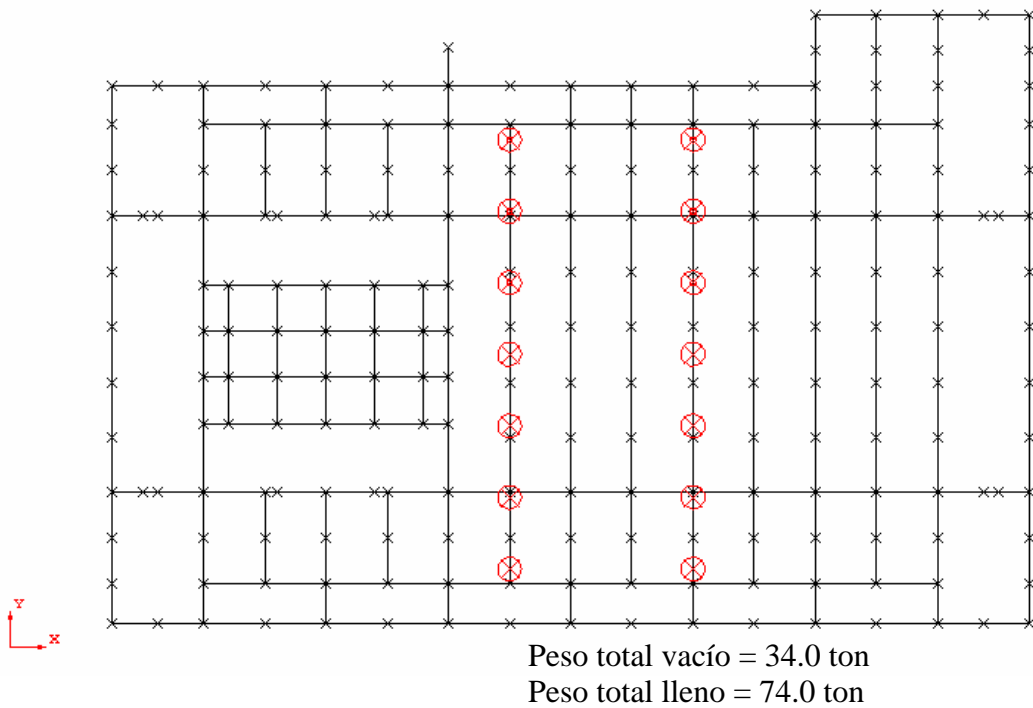


Figura 97. Grúa de pedestal sobre el paquete – Aplicación de cargas.

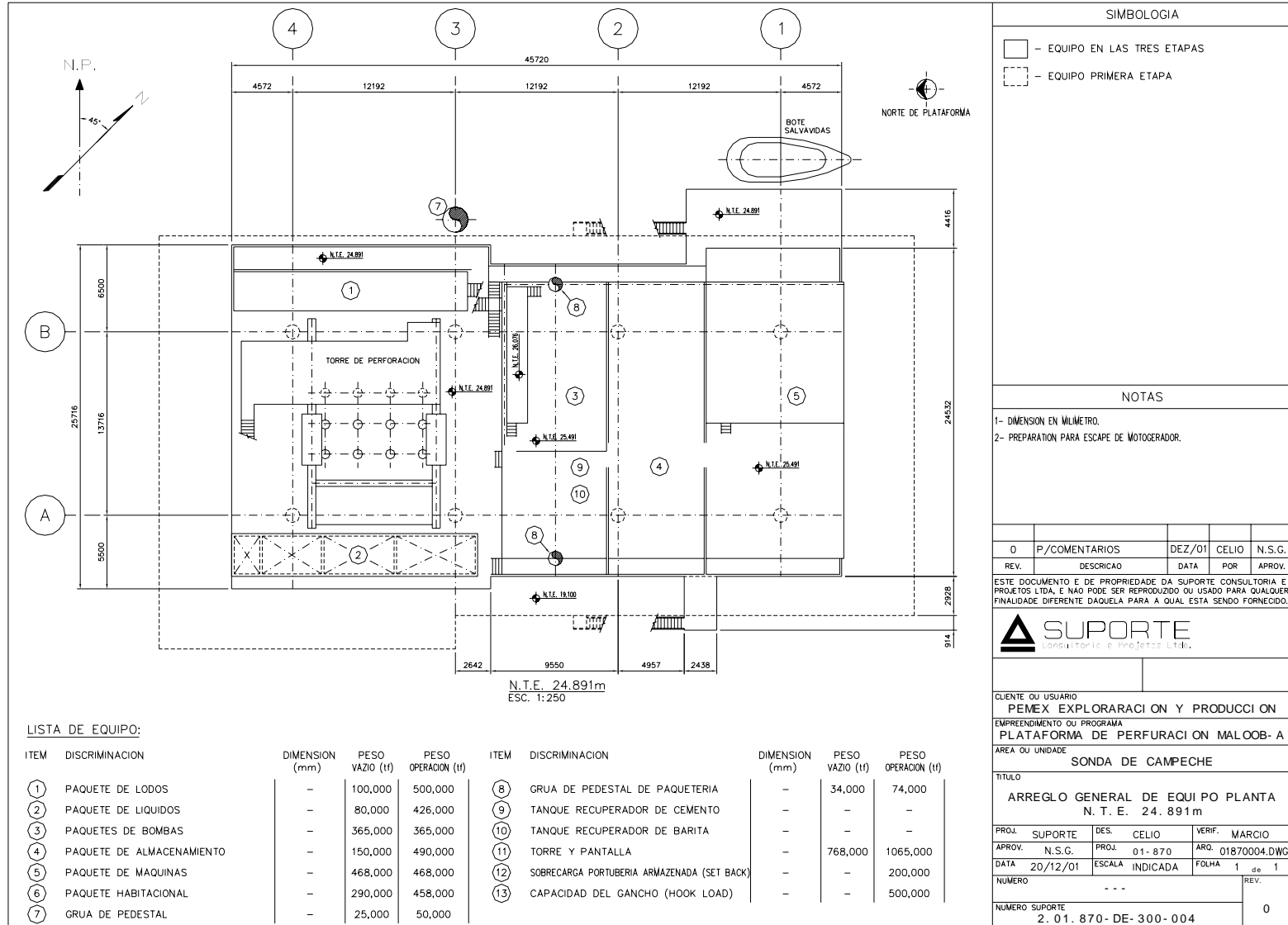


Figura 98. Arreglo de equipo cubierta inferior.

## IV.2. Cargas 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 aun 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 la norma NRF-003-PEMEX-2000, Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche.

### Cargas de oleaje.

Todo cuerpo sumergido en un líquido en movimiento experimenta fuerzas hidrodinámicas que se pueden determinar por medio de la ecuación de Morison.

$$F = \frac{1}{2} p C_d A u / u + C_m V du / dt$$

En donde:

$F$  = Fuerza hidrodinámica (lb).

$P$  = Densidad del agua (lb . seg<sup>2</sup>/pie<sup>2</sup>).

$A$  = Área expuesta proyectada por el elemento en la dirección del movimiento

del agua ( $m^2$ ).

$Cd$  = Coeficiente de arrastre.

$Cm$  = Coeficiente de masa o inercia.

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

$V$  = Volumen desplazado por el elemento ( $m^3$ ).

$du / dt$  = Componente del vector de aceleración del agua, perpendicular al eje del elemento ( $m/seg^2$ )

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 (ver figura 99).

Las teorías de oleaje comúnmente usadas son Airy, Stokes 5<sup>o</sup> y función corriente; siendo Stokes 5<sup>o</sup> la seleccionada con mayor frecuencia. Todo elemento o porción de éste que se localice abajo del perfil de la ola en cuestión recibe carga por oleaje y corriente. No se considera escudeo entre elementos cercanos.

El perfil de la ola, su velocidad, aceleraciones y las presiones sobre los elementos expuestos se obtienen mediante métodos computarizados.

Para cada dirección de oleaje se requiere hacer un ataque de olas ubicado a diferentes distancias de la posición de la cresta (ver figura 101), de tal manera que permita conocer la posición crítica de la ola, que al actuar sobre la plataforma le provoque el momento de volteo máximo.

Para el cálculo de las fuerzas de oleaje que actúan sobre los elementos de la Subestructura se considera 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.

### **Mareas.**

Existen dos tipos de mareas, las astronómicas y las de tormenta.

Las mareas astronómicas dependen de las atracciones que ejercen la luna y el sol, principalmente sobre los océanos.

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

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

### **Corrientes marinas.**

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

En los puntos situados en la cresta de la ola, esto es, por arriba del tirante medio, se considera que la velocidad de la corriente permanece constante e igual al valor correspondiente a la elección del tirante medio.

### **Viento.**

Se aplican empujes por viento en direcciones correspondientes con el 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 viento se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$F = KV^2CsA$$

En donde:

- $F$  = Empuje del viento (N, lb).
- $Cs$  = Coeficiente de forma.
- $A$  = Área expuesta (m<sup>2</sup>, pie<sup>2</sup>).
- $V$  = Velocidad del viento (kph, mph).
- $K$  = 0.0473 para sistema métrico.  
= 0.00256 para sistema ingles.

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 6).

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

Tabla 6. Coeficiente de forma.

## Condiciones ambientales.

### a) Datos ambientales de operación.

#### Mareas:

Altura máxima de marea	0.76 m
Marea de oleaje	0.35 m
Marea total	1.11 m

#### Oleaje:

Altura de ola en operación	8.70 m
Periodo	11.08 m
Teoría de ola	5° orden de Stokes (ver figura 99)

#### Corriente:

Perfil de corriente	Prof. (%)	Vel. (m/s)
	0	0.43
	50	0.36
	95	0.11

#### Viento:

Velocidad de viento (H = 10 m) - para 1 hr - 15.8 m/s (valor extrapolado para 5 s - 22.76 m/s)

Elevación mínima de la cubierta inferior al nivel de la rejilla: 19.10 m.

### b) Datos ambientales de tormenta.

#### Mareas:

Altura máxima de marea	0.76 m
Marea de oleaje	1.01 m

Marea total 1.77 m

**Oleaje:**

Altura de ola en tormenta 16.70 m

Periodo 11.74 m

Teoría de ola 5° orden de Stokes (ver figura 99)

**Corriente:**

Perfil de corriente	Prof. (%)	Vel. (m/s)
	0	1.31
	50	1.00
	95	0.46

**Viento:**

Velocidad de viento (H = 10m) - para 3 s - 58.08 m/s para 1 min - 46.63 m/s  
para 5 s - 56.13 m/s para 1 hr - 38.96 m/s  
para 15 s - 51.93 m/s

Las fuerzas debido a viento, oleaje y corriente serán determinadas en base a las recomendaciones dadas en API-RP2A, considerando los siguientes coeficientes:

Coeficiente dragado Cd = 1.05

Coeficiente inercia Cm = 1.20

Crecimiento marino	Elevación (m)	Incremento radial (cm)
	+1 hasta -20	7.50
	-20 hasta -50.000	5.50
	abajo de -50.000	3.50

Ninguna ola que se extienda será tomada en cuenta.



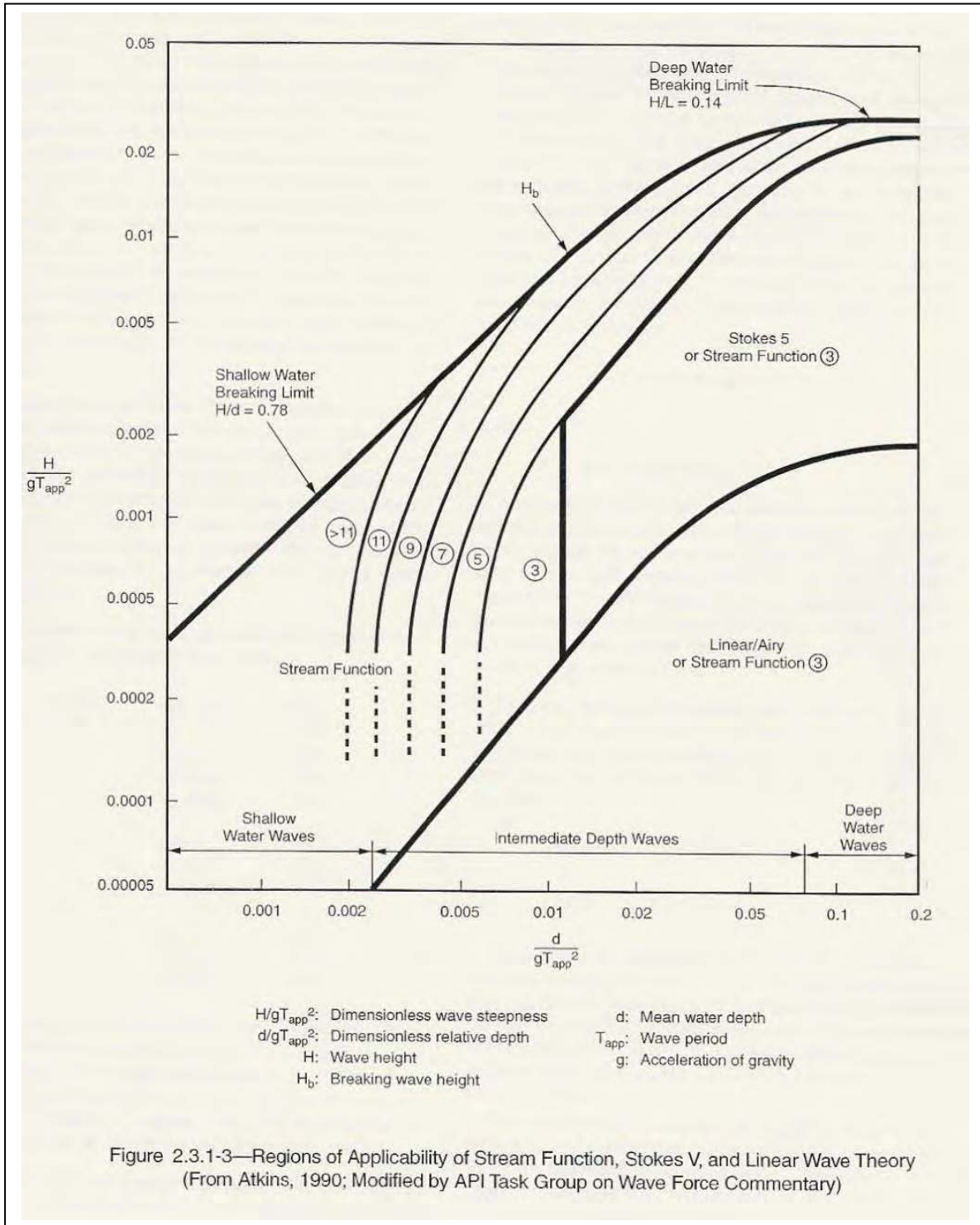


Figura 99. Validez de las teorías de ola – Gráfica obtenida del API-RP-2 A, 21 edición.

### c) Datos sísmicos.

PEMEX ha especificado dos tipos diferentes de análisis, uno para el nivel de resistencia y otro para sismo de intensidad desconocida. Para el 1er análisis espectral de respuesta debe realizarse en base al espectro indicado en la norma NRF-003-PEMEX-2000, Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche (ver figura 100).

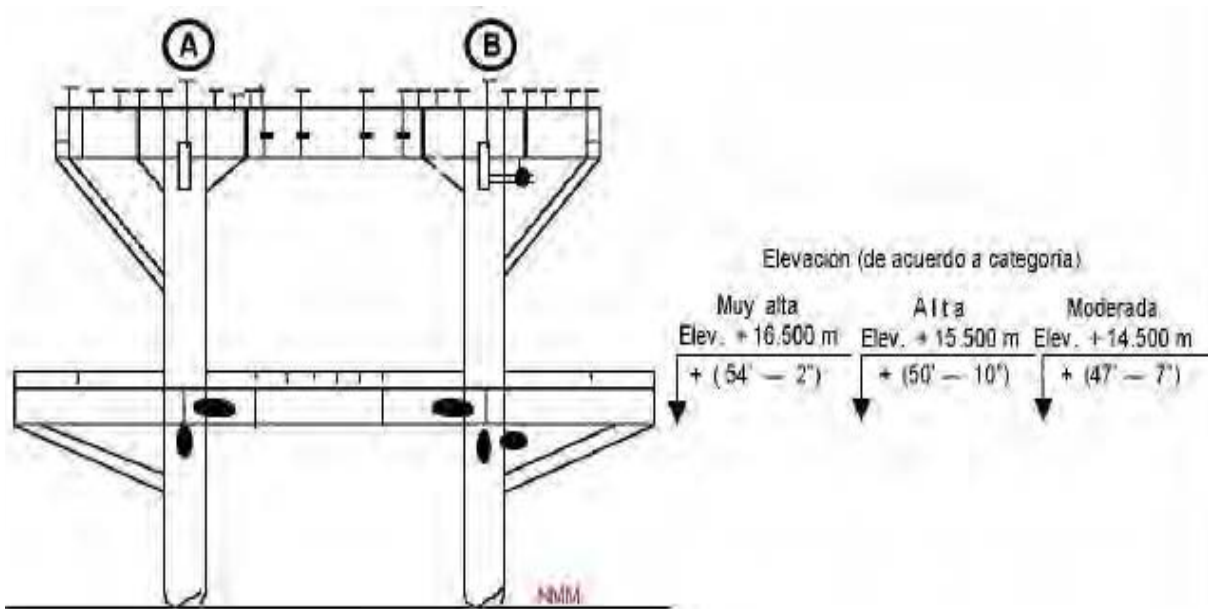


Figura 100. Elevación mínima de cubierta inferior.

En vez de especificar un espectro equivalente para un sismo de intensidad desconocida, PEMEX ha decidido solicitar un análisis de colapso no lineal, cuyo principal requerimiento será alcanzar una carga equivalente horizontal de 1.6 veces la resistencia indicada en el análisis sísmico por nivel de resistencia (ver tabla 7).

PARÁMETROS PARA EVALUACIÓN	CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN		
	MODERADA	ALTA	MUY ALTA
Altura de ola de referencia (m).	15.00	15.00	15.00
Factor de reducción de carga (LRF), ocho piernas o más.	0.70	0.80	0.90
Factor de reducción de carga (LRF), seis piernas o menos.	0.80	0.90	1.00
Elevación mínima de la cubierta inferior <sup>1</sup> (m) (ver figura 100).	14.50	15.50	16.60
Altura de ola para análisis de resistencia última (m).	21.0	21.5	23.0
Factor de reserva de resistencia (RSR) mínimo requerido.	1.30 <sup>2</sup>	1.40 <sup>2</sup>	1.60 <sup>2</sup>
	1.50 <sup>3</sup>	1.60 <sup>3</sup>	1.90 <sup>3</sup>
Parámetros asociados a la altura de ola.	Tomar datos del anexo A.		
Parámetros hidrodinámicos adicionales.	Usar API-RP-2A (WSD), 20 <sup>a</sup> Edición.		

**Notas:**

1 Esta elevación corresponde a la elevación del paño inferior de la trabe más peraltada de la cubierta inferior de la plataforma.

2 Sin considerar carga de oleaje en cubierta.

3 Considerando carga de oleaje en cubierta.

Tabla 7. Parámetros de evaluación.

### IV.3. Condiciones de carga.

Esta sección contiene una descripción de las condiciones básicas de carga consideradas para los análisis.

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°

Tabla 8. Condiciones de carga.

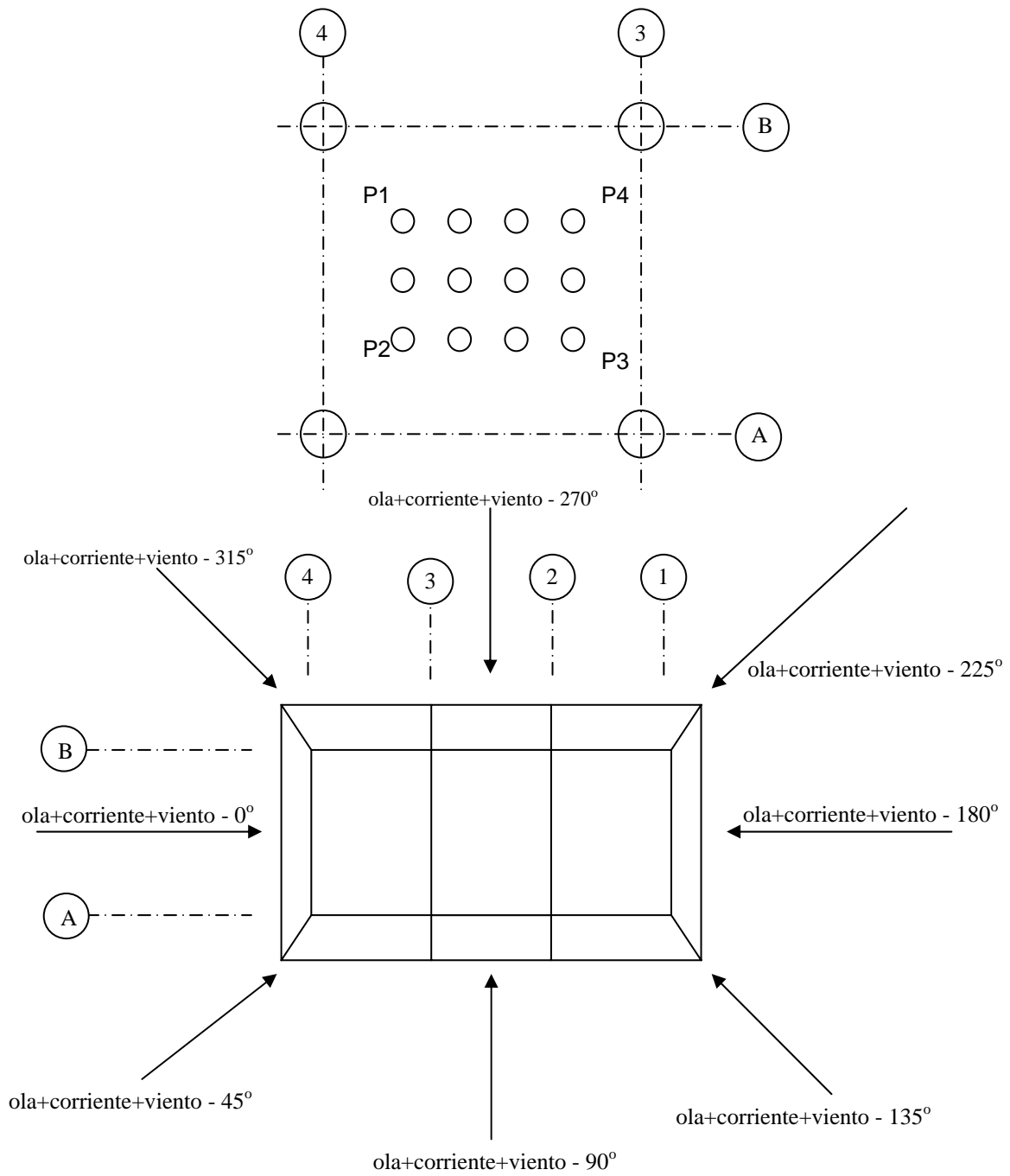


Figura 101. Dirección de las cargas ambientales.

#### **IV.4. Combinaciones de carga.**

El comportamiento de las plataformas marinas fijas de ocho patas bajo las diferentes condiciones de carga (ver tabla 8), 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 en cuenta las diversas direcciones de incidencia del oleaje.

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

Se consideran 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 1.33.
4. Solicitaciones ambientales de tormenta en combinación con pesos muertos y cargas vivas mínimas acordes a condiciones extremas, usando un factor de incremento de esfuerzos permisibles de 1.33.

Esta sección contiene una tabla de las combinaciones de cargas consideradas en el análisis (ver tabla 9).

BASIC	Carga de barrena								Tubería almacenada								Tensión 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
	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	-	-70,7	-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	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 9. Combinaciones de carga.

## **CAPÍTULO V**

### **DESCRIPCIÓN DE LOS ANÁLISIS**

El diseño integral de una estructura marina implica una serie de análisis relacionados y dependientes entre si, bajo las condiciones implícitas en cada una de las fases que se desarrollan hasta su puesta en operación.

Las fases que se desarrollan son las siguientes:

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

En el presente capitulo se describen las consideraciones que se tendrán que tomar en cuenta para la elaboración de la fase del análisis en sitio.

#### **V.1. Análisis y diseño 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 establecidas para la operación de la plataforma, como en condiciones excepcionales consideradas como accidentales, dada la magnitud de los elementos que intervienen en ellas, así como los períodos de ocurrencia de éstos.

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 toman en cuenta aspectos probabilísticos, apoyados en



mediciones hechas en sitio, modelos físicos y matemáticos.

El lapso de vida útil que se pretende para la estructura, así como los márgenes de seguridad con que ésta debe operar, dan lugar al establecimiento de las características básicas de las cargas ambientales, basadas en el período de retorno de las tormentas. Petróleos Mexicanos ha establecido el empleo de las características de una tormenta con período 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 período de retorno de "cien años ", como condición accidental.

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 en que se encuentra, 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, período natural de vibración, conexiones entre elementos, etc.

## **V.2. Análisis de Operación y de Tormenta.**

### **V.2.1. Descripción del análisis.**

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

a) Realiza una condensación estática de la estructura definida en el capítulo III y las condiciones de carga derivadas del capítulo IV, en los nodos inferiores de la interfase Subestructura-cimentación. En este caso, el análisis dinámico completo de oleaje se realiza en el capítulo VI, aunque ya es conocido por la experiencia que la amplificación dinámica debido a oleaje es despreciable (en base al periodo fundamental de la estructura).

b) Se realiza un análisis iterativo 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 se definieron en este capítulo. La información con respecto al perfil de un suelo tipo, se presenta en la figura 102.

c) Verificación de esfuerzos en el pilote; verificación de esfuerzos a flexo-compresión axial.

d) Sustituyendo los desplazamientos, con la finalidad de determinar acciones en la Subestructura y Superestructura. Esto se realiza 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.

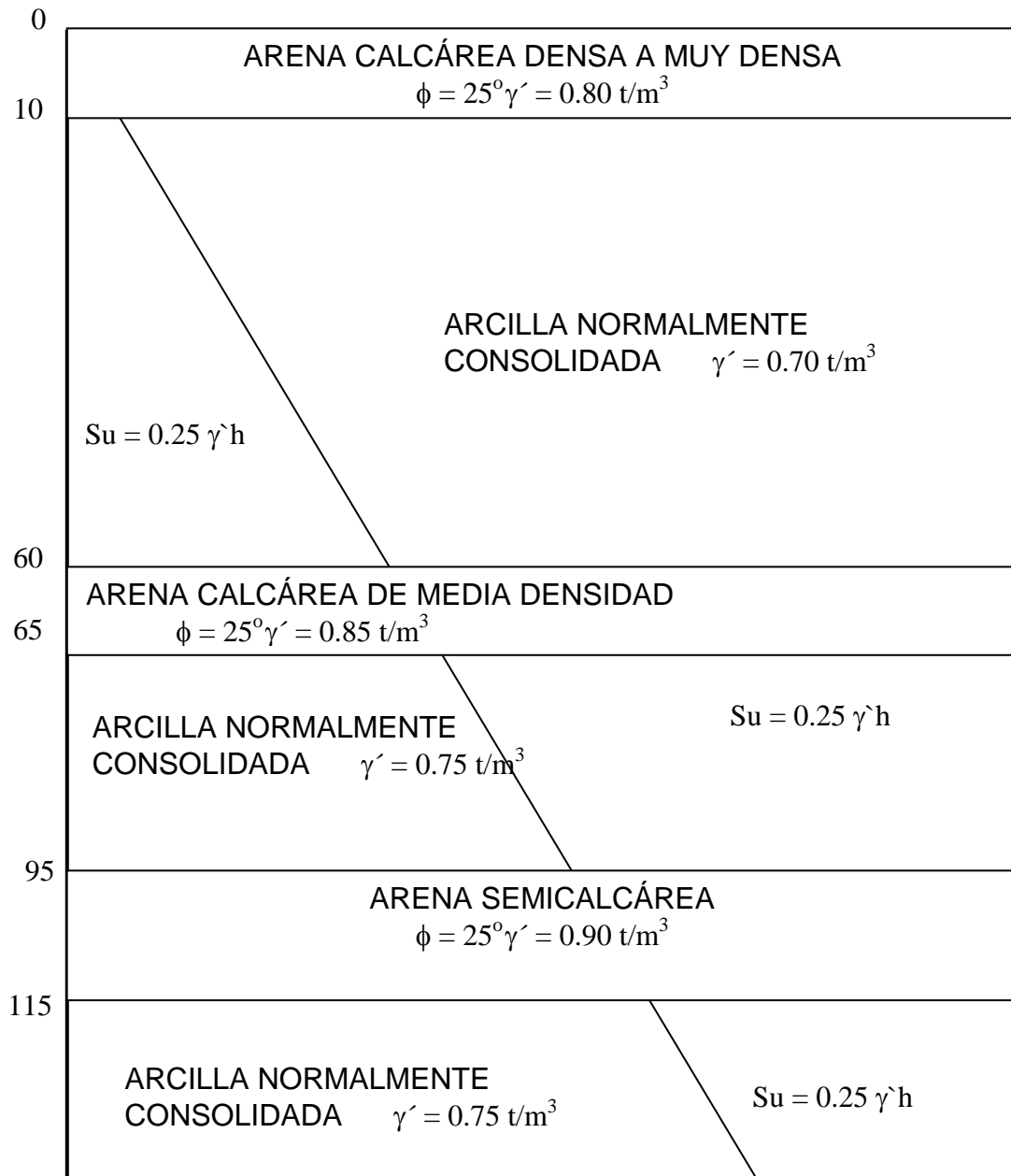


Figura 102. Perfil del suelo tipo.

La capacidad axial de los estratos superiores e inferiores contra las curvas de penetración obtenidas para los pilotes, están en base a los parámetros presentados en las figuras 103 y 104.

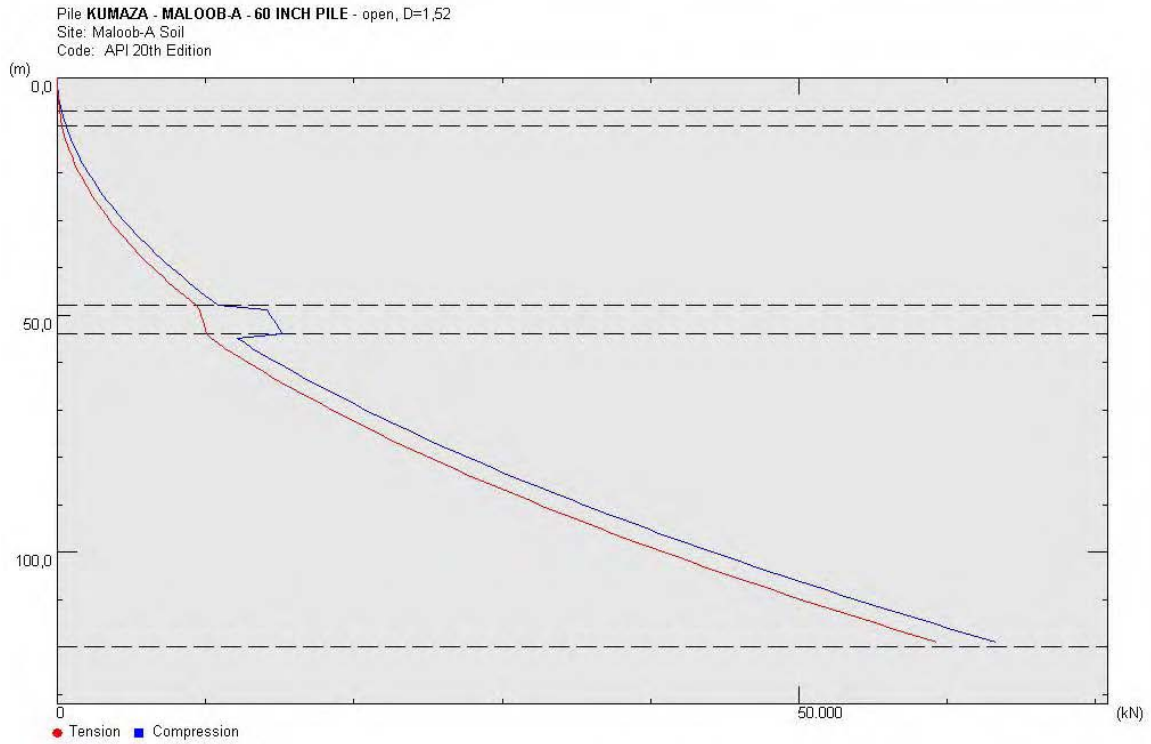


Figura 103. Capacidad axial del pilote en estrato superior.

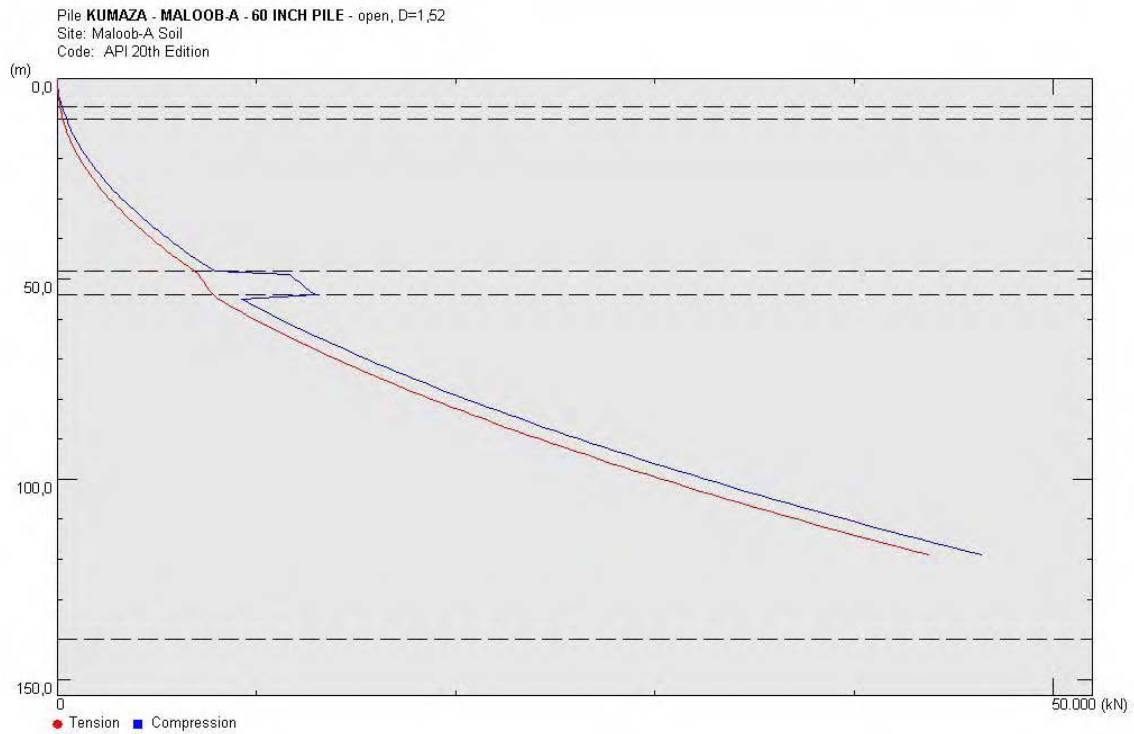


Figura 104. Capacidad axial del suelo en estrato inferior.

El resumen de las cargas de los pilotes indica que la carga máxima en los pilotes exteriores es de 37,364, mientras que en los pilotes interiores es 31,322 kN.

Debido a la enorme diferencia entre las olas de tormenta y de operación, todas las longitudes de los pilotes se determinarán 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 a las cargas anteriormente descritas, el peso de los pilotes listados en la tabla 10.

PILOTE	SUELO	COMPRESIÓN (kN)	TENSIÓN (kN)	LONGITUD REQUERIDA (m)
Exterior	Estrato superior	37364	25562	116
Exterior	Estrato inferior	37364	25562	135
Interior	Estrato superior	30999	17507	106
Interior	Estrato inferior	30999	17507	123

Tabla 10. Resumen de cargas criticas en los pilotes y penetraciones requeridas.

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

### **V.3. Análisis dinámico debido a oleaje.**

#### **V.3.1. Descripción de la secuencia de análisis.**

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

Las etapas consideradas para este análisis se describen a continuación.

- a) Lo 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 el API).
- b) Cálculo de la rigidez equivalente del pilote, relacionada con el promedio del análisis en sitio para las condiciones de tormenta. Esto se realiza automáticamente durante el análisis de la cimentación con módulo PSI de SACS. Los pilotes resultantes se denominan super elementos para usos posteriores.
- c) La extracción modal es empleando el módulo Dynpac de 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 de oleaje.

### **V.3.2. Rigidez equivalente del pilote.**

El sistema SACS permite al usuario especificar las condiciones de carga para el cual las matrices están condensadas en los nodos de los pilotes como el promedio de las rigideces. Esto se realizará para las condiciones de tormenta considerando las cuatro condiciones críticas (aquellas condiciones que generan las cargas más grandes en los pilotes).

Las matrices resultantes tanto para los pilotes como para los conductores se considerarán como super elementos en los análisis modales y los análisis de respuesta.

### **V.3.3. Cálculo de masas.**

El cálculo de masas se realizará utilizando el SACS como se indica a continuación:

- Las masas estructurales se determinarán en base a las dimensiones de los miembros y a las densidades de masa.
- Las masas añadidas, se determinarán 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.

### **V.3.4. 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, además algunos nodos adicionales en la cubierta.

La extracción modal se realizará con el módulo Dynpac de SACS.

Las cinco primeras gráficas típicas de los modos de vibración se presentan en las figuras de la 105 a la 109.

MODE 1 FREQ. 0.317 HZ PERIOD 3.154 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 6075 WITH DX,DY,DZ= 2.540 -0.013 0.050

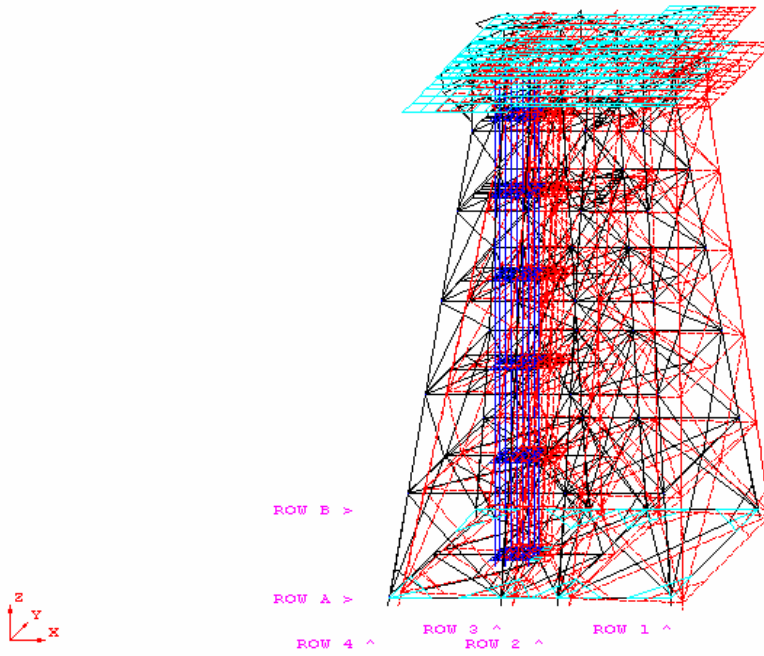


Figura 105. Modo 1.

MODE 2 FREQ. 0.997 HZ PERIOD 2.965 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 6151 WITH DX,DY,DZ= 0.045 2.552 0.059

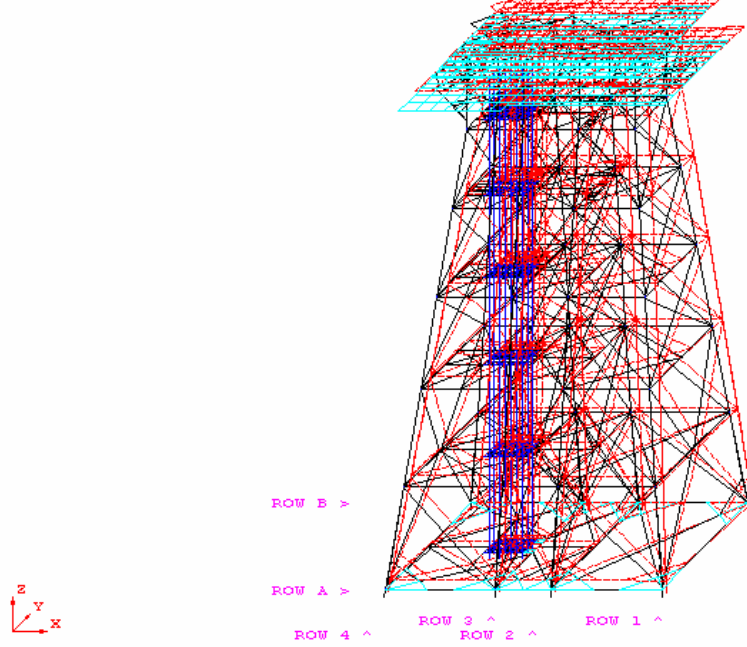


Figura 106. Modo 2.



MODE 3 FREQ. 0.469 HZ PERIOD 2.044 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 6016 WITH DX,DY,DZ= -1.586 2.257 -0.094

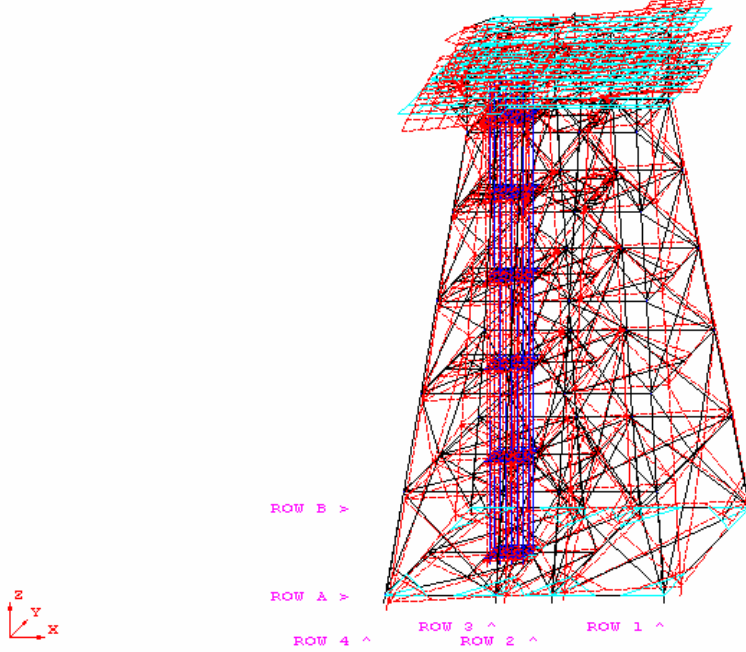


Figura 107. Modo 3.

MODE 4 FREQ. 0.769 HZ PERIOD 1.311 SECS  
MAX. VIEW DEFL. AT 6136 WITH DX,DY,DZ= -0.089 2.572 -0.395

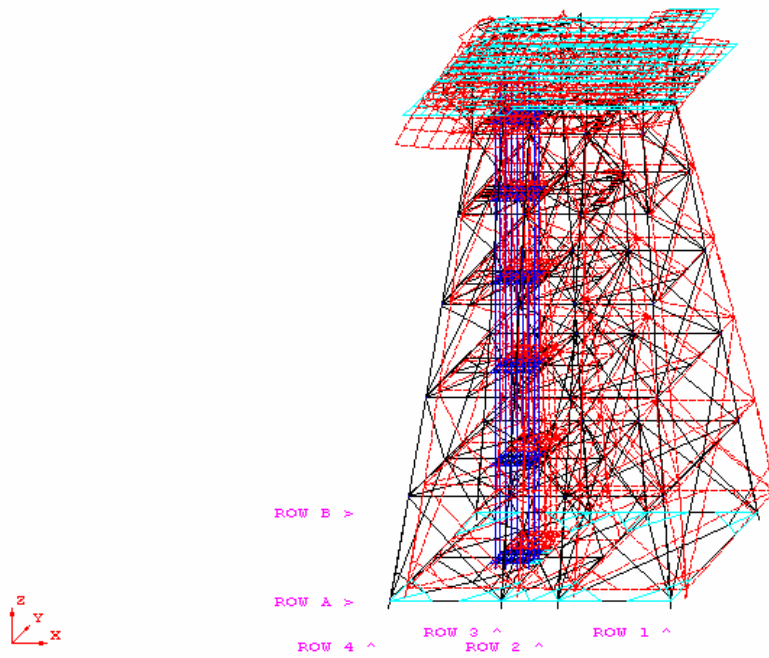


Figura 108. Modo 4.

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

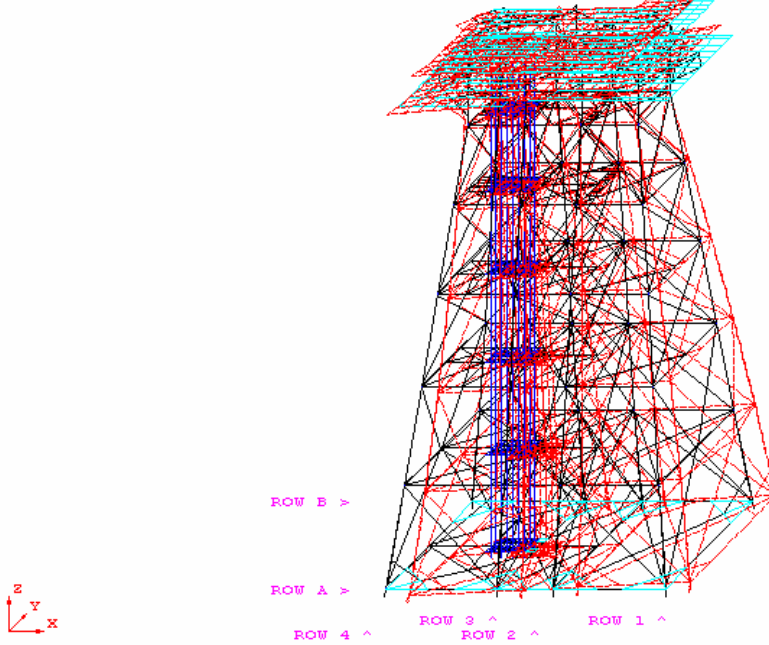


Figura 109. Modo 5.

Los resultados presentados anteriormente indican que estas plataformas tienen un periodo fundamental de vibración ligeramente arriba de los tres seg considerando la rigidez equivalente derivada de las condiciones de tormenta.

### V.3.5. Análisis de respuesta al oleaje.

La respuesta dinámica al oleaje se obtendrá empleando el módulo Wave Response de SACS, el cual determina la respuesta dinámica de oleaje tanto para las condiciones regulares como irregulares.

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 seg (36 pasos en un solo periodo de la ola). Las fuerzas inerciales se determinarán 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 este análisis produce excelentes 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 110 y 111 para 0 y 45 grados en oleaje de tormenta.

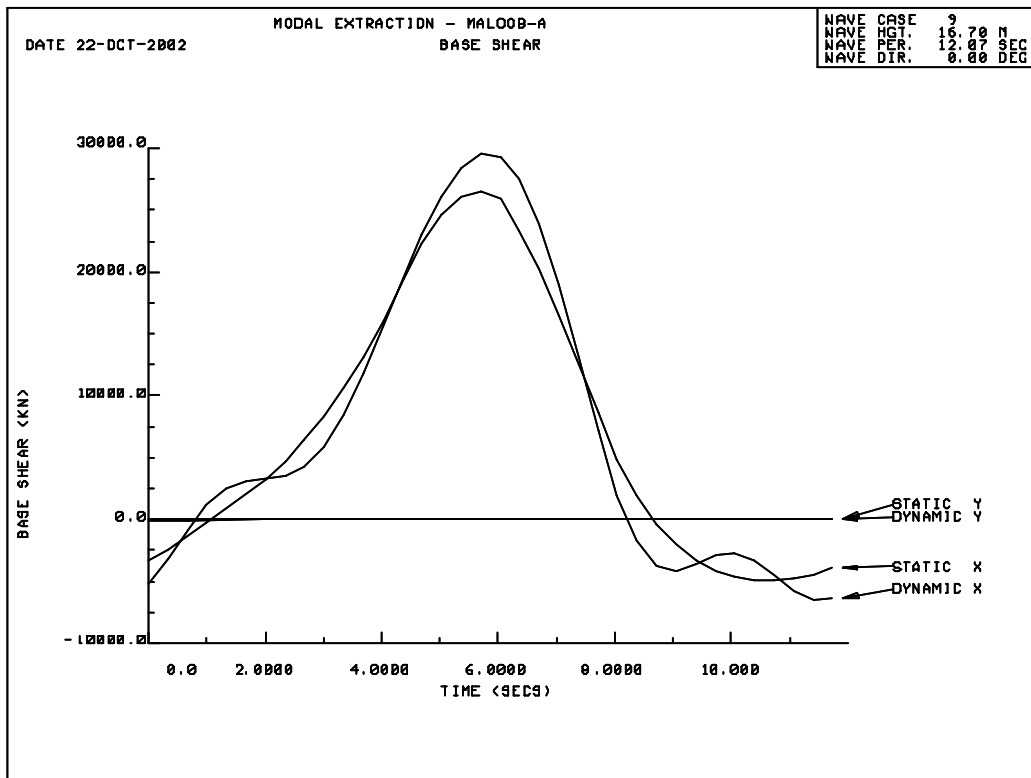


Figura 110. Comparación de las fuerzas de corte basales tanto estáticas como dinámicas para una ola de 0°.

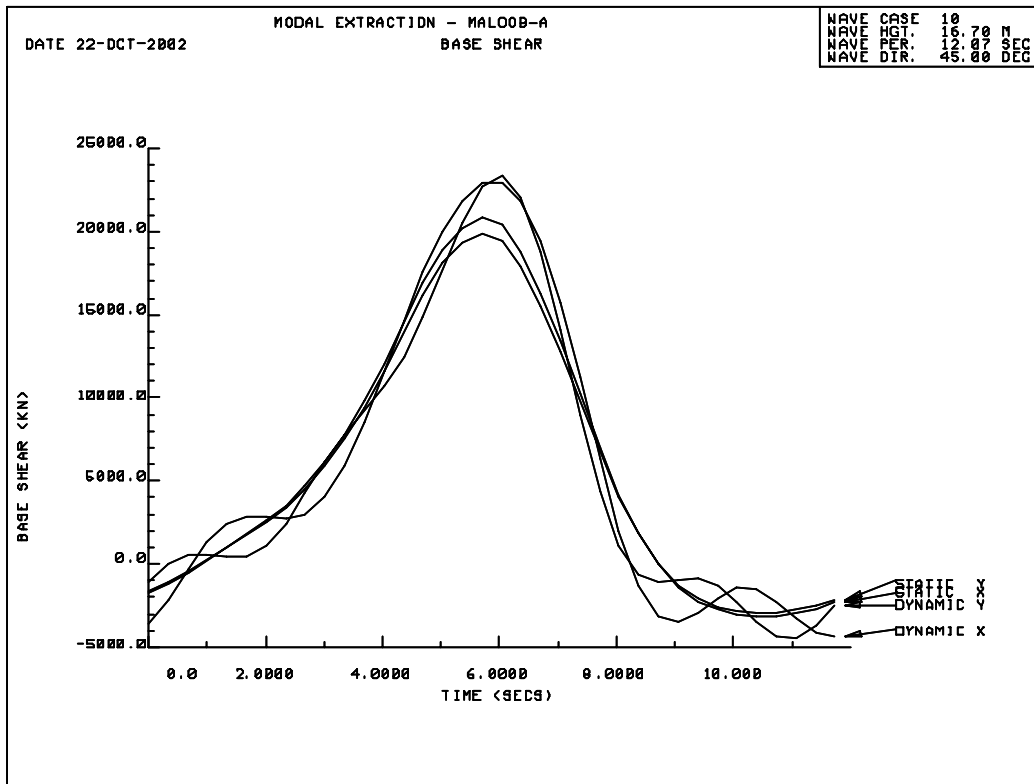


Figura 111. Comparación de las fuerzas de corte basales tanto estáticas como dinámicas para una ola de 45°.

#### V.4. Análisis de fatiga.

##### V.4.1. Descripción de la secuencia de análisis.

El análisis espectral debido a fatiga se realizará como se especifica en el API-RP2A, considerando los datos ambientales en la sección IV.1. Las etapas de los análisis son:

- Cálculo de la rigidez equivalente promedio en las cabezas de los pilotes, para las condiciones de carga de operación del análisis in situ.
- Preparación de los datos de oleaje para las cuatro direcciones, espaciadas a

cada  $45^\circ$  (en las olas que se tenga mayor porcentaje). Las olas de las otras cuatro direcciones se adicionarán a las de 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 ola consideradas.
- d) En el análisis estructural se consideraron 18 desplazamientos para cada ola con la finalidad de determinar la variación de esfuerzos correspondientes (módulo IV de SACS). Se verificará la necesidad de factores de amplificación dinámica para las fuerzas de oleaje.
- e) Resumen de daños debido a 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.

#### **V.4.2. Rigidez.**

El mismo procedimiento empleado en la sección V.3 para obtener la rigidez equivalente de los super elementos se empleo en este análisis. La diferencia en este caso es que las condiciones de carga debido a oleaje en operación se consideraron en vez de las de tormenta.

#### **V.4.3. Cálculo de masas.**

El cálculo de masas es exactamente el mismo al ya presentado en la sección V.3.

#### **V.4.4. Extracción modal.**

La extracción modal en este caso se realizó empleando la rigidez de los super

elementos determinados en base al promedio de las fuerzas de 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.

#### **V.4.5. Preparación de los datos de ola.**

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

#### **V.4.6. Funciones de transferencia.**

Los cortantes basales y momentos de volteamiento 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 a oleaje, puede desprejarse, y es suficiente emplear un número de olas que generen ligeras fuerzas debido a oleaje con sus curvas de periodo para el análisis de fatiga de la estructura.

#### **V.4.7. Análisis de esfuerzos.**

Para cada uno de los periodos de la dirección de oleaje con porcentajes mas altos, y para 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).

#### **V.4.8. Resultados del análisis de fatiga.**

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. La primera curva del API para perfiles de soldadura no controlada fue empleada en la verificación de esfuerzos.

## **V.5. Análisis sísmico.**

### **V.5.1. Descripción de la secuencia de análisis.**

El análisis sísmico especificado por la norma NRF-003-PEMEX-2000 realmente se dividió en dos análisis independientes. El primero es un análisis espectral de respuesta no lineal para sismo a nivel de resistencia, empleando el espectro, mientras que el segundo, el cual debe ser un análisis equivalente no lineal para sismo de intensidad desconocida, lo cual ha remplazado al análisis de colapso para una aceleración horizontal, el cual debe exceder a aquel que ocurriría en el primer análisis en al menos el 60%. Considerando que la estructura tiene 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 expreso. En este caso la misma cimentación empleada para el análisis de fatiga se utilizará. La experiencia nos indica que este valor es lo suficiente adecuado.
- b) La extracción modal, considerando la rigidez de la cimentación como se definió anteriormente. Las masas son las debido a la estructura + equipo + accesorios + cargas vivas (módulo Dynpac de SACS).
- c) Análisis sísmico estructural empleando el módulo Earthquake de SACS.

- d) Análisis estructural estático para cargas únicamente (cargas debido a masas definidas con anterioridad).
- e) Combinación de los dos archivos de posproceso.
- f) Verificación unitaria de esfuerzos a corte por penetración y flexocompresión axial según el API-RP2A;

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

- a) Modelado de la cimentación como en el análisis en sitio, considerando las curvas de resistencia del suelo.
- b) Análisis de la plataforma para todas las cargas muertas + un incremento 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. Este análisis se desarrollará empleando el módulo de SACS denominado Collapse.

#### **V.5.2. Rigidez equivalente del pilote.**

El pilote equivalente fue el mismo empleado para el análisis de fatiga.

#### **V.5.3. Cálculo de masas.**

El cálculo de masas es exactamente el mismo al presentado en la sección IV.3.

#### **V.5.4. Extracción modal.**

Los resultados de la extracción modal en este caso son ligeramente diferentes a



los presentados en la sección V.4, debido a las cargas vivas consideradas, mientras que aquí estos valores están reducidos un 75% del valor indicado por el API.

#### **V.5.5. Análisis sísmico por nivel de resistencia.**

El análisis sísmico por nivel de resistencia se realizará empleando el módulo Earthquake de SACS, para el espectro de respuesta definido en la norma NRF-003-PEMEX-2000 Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche. Este espectro es exactamente el mismo definido por el API-RP2A para suelos tipo B, por lo tanto en SACS se empleo el criterio del API. Este espectro se considero aplicado 100% en ambas direcciones tanto vertical como horizontal. La combinación de estos resultados se realizará empleando el nivel modal empleando el método CQC y el SQSS para las respuestas direccionales como se indica en el API.

#### **V.5.6. Verificación de esfuerzos.**

Con el fin de verificar esfuerzos, el API requiere que 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.

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

a) Para esfuerzos a flexo compresión axial.

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

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

b) Verificación de corte por 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 considero con un factor de dos.

En ambos casos a los esfuerzos permisibles, se permitirá incrementar 70% como se especifica en el API.

#### **V.5.7. Sismo de intensidad desconocida.**

En la norma NRF-003-PEMEX-2000, solicita un análisis no lineal de colapso para aceleraciones horizontales para sustituir el sismo de intensidad desconocida, con el objeto de verificar la ductilidad de la estructura. Este análisis se realiza empleando el módulo de SACS denominado Collapse.

Las siguientes condiciones de carga se consideraron:

- 1) Carga muerta estructural + todo el equipo + cargas vivas.
- 2) 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 comentar y como conclusión, es de que el diseño de la estructura está gobernada para oleaje debido a tormenta, como se especifica en la norma NRF-003-PEMEX-2000 Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en la Sonda de Campeche, y no por sismo, razón por la cual se puede omitir el análisis correspondiente por sismo.

## **CAPÍTULO VI**

### **MATERIALES UTILIZADOS Y PROTECCIÓN ANTICORROSIVA**

Para el diseño de los diferentes componentes de una plataforma se designan los materiales, en base a normas de uso mundial, con un alto grado de aplicabilidad en el mercado, fuerte calidad técnica, y el proceso justo y abierto de acuerdo con el cual se desarrollan, que, para nuestro caso son:

Normas ASTM; contiene especificaciones, métodos de prueba, definiciones y clasificaciones, relacionadas con los aceros estructurales utilizados en las plataformas marinas fijas.

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.

Normas API; son especificaciones que comprenden la fabricación de tubos para estructuras formadas a partir de placa de acero rolada, con soldadura longitudinal y circunferencial, destinados a formar parte de la estructura de una plataforma marina fija.

Establece lineamientos relativos a los procedimientos de rolado para formar los tubos, considerando que el material que constituye a la placa, cumple con las normas ASTM aplicables.

Especifica los procedimientos de soldadura aplicables, así como las pruebas de calidad a que deben sujetarse los cordones de soldadura longitudinal y circunferencial.

Marca las tolerancias aplicables en las dimensiones de los tubos fabricados a partir de la placa rolada, en lo relativo al diámetro, longitud, 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 rolada, tomando en cuenta las grandes dimensiones que deben satisfacer, observándose la importancia y extensa aplicación de estas especificaciones.

### **VI.1. Materiales utilizados; Superestructura, Subestructura, Pilotes, apéndices y accesorios.**

Para el diseño de los diferentes componentes de una plataforma se especifican usualmente los siguientes materiales.

#### **A. Superestructura**

1. ASTM A-36 regular ( $F_v = 36$  ksi ): en traveses transversales, longitudinales, puntales, pedestales de grúa, columnas interiores, etc.
2. ASTM A-537 Clase 1 ( $F_y = 50$  ksi ): en columnas de esquina en algunas ocasiones.

#### **B. Subestructura**

1. ASTM A-36 regular o API-5L-GB ( $F_y = 35$  ksi). En elementos de arriostramiento en general.
2. ASTM A-36 regular: en aproximadamente 2/3 partes de las patas.
3. ASTM A-537 Clase 1: en aproximadamente un tercio de las patas y en las

uniones de éstas con el arriostramiento.

4. ASTM A-36 s-2: en las uniones entre elementos del arriostramiento (carretes).

### **C. Pilotes**

1. ASTM A-36 regular: este acero se usa como base para el diseño de los pilotes.
2. ASTM A-537 Clase 1: en los segmentos de los pilotes situados en las inmediaciones del lecho marino.

### **D. Apéndices y accesorios.**

1. ASTM A-36 regular: este acero se usa para todos los apéndices mayores y menores como embarcaderos, orejas de izaje, placas de apoyo, etc.

## **VI.2. Protección anticorrosiva; zona de alcance del oleaje zona sumergida, zona enterrada, zona seca o atmosférica.**

En los últimos años, se ha reducido el uso de compuestos químicos orgánicos y volátiles (solventes) utilizados en la formulación de los sistemas de protección con la finalidad de controlar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles a la atmósfera, obligando a los fabricantes de pintura a innovar tecnologías en los sistemas, cumpliendo las regulaciones gubernamentales que a nivel mundial se están enfocando en la seguridad, salud y protección ambiental. De manera similar, se plantea alternativas tecnológicas que minimicen el uso de las técnicas de limpieza con arena sílica (sand blast) de los elementos metálicos en las instalaciones.

Mientras tanto, para fines de protección contra la corrosión, una plataforma marina

fija de ocho patas se divide en cuatro zonas, siendo el sistema anticorrosivo utilizado diferente en cada una de ellas.

#### **1. Zona de alcance del oleaje.**

Esta zona corresponde al del rompimiento y rocío del oleaje. Los elementos estructurales comprendidos en esta zona se protegen generalmente aumentando los espesores de pared ligeramente y/o mediante su envoltura con material sintético impermeable. Esta zona es la más propensa a la corrosión.

#### **2. Zona sumergida.**

Esta zona se localiza entre el lecho marino y la zona de alcance del oleaje. Todos los elementos localizados en esta zona se protegen mediante un sistema catódico sacrificial.

#### **3. Zona enterrada.**

La porción de los pilotes penetrada en el suelo marino se protege mediante el mismo sistema catódico sacrificial provisto por la zona sumergida. Esta zona no es muy propensa a la corrosión.

#### **4. Zona seca o atmosférica.**

Esta zona comprende a todos los elementos arriba de la zona de alcance del oleaje y se protegen con pintura anticorrosiva para ambiente marino.

Los sistemas anticorrosivos sacrificiales tienen capacidad para proteger a una plataforma por espacio de 20-25 años.

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES**

1. 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 PEMEX .
  
2. 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.
  
3. 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 de 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.
  
4. La capacidad actual de la ingeniería civil en México, encargada del diseño,

fabricación e instalación de plataformas marinas resuelve satisfactoriamente las necesidades presentes de PEMEX, 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.

5. En los últimos años no ha habido una política clara del gobierno mexicano, tanto en PEMEX, como en Instituciones 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.



## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Norma NRF-003-PEMEX-2000.

Diseño y evaluación de plataformas marinas fijas en la Sonda de Campeche.

- 2.- Instituto Americano del Petróleo, "Prácticas recomendadas para Planeación, Diseño y Construcción de Plataformas Marinas fijas", edición 21, año 2000.

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.

- 3.- Instituto Americano del Petróleo, "Prácticas recomendadas para Planeación, Diseño y Construcción de Plataformas Marinas fijas", WSD 20ª edición, suplemento, año 2000.

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).

- 4.- Instituto Americano de la Construcción del Acero, "Especificación para el Diseño, Fabricación y Construcción de Acero estructural para Edificios", marzo 09, 2005.

American Institute of Steel Construction, "Specification for the Desing, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings", marzo 09, 2005.

- 5.- Sociedad Americana de Soldadura, "Código Estructural de Soldadura", Miami Florida, AWS D1.1 última edición, año 2007.

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

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

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