



*UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO*

*Facultad de Ingeniería*

*Diseño de cimentaciones profundas  
para plataformas marinas en  
la Sonda de Campeche*

*TESIS*

*Que para obtener el Título  
de Ingeniero Civil*

*presenta:*

*Blanca Estela García Guerrero*

*Director de Tesis:*

*M. I. Reginaldo Hernández Romero*

*México, D. F., Mayo de 2007*





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**AGRADECIMIENTOS.**

- ❖ A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por toda la formación que recibí desde el nivel bachillerato.
- ❖ A toda la planta de estupendos profesores que forman parte de Facultad de Ingeniería por cada uno de los conocimientos brindados.
- ❖ A Dios por darme lo mas preciado del mundo, la vida y mi **FAMILIA**

A mama *GONY*, por acompañarme durante toda mi vida de estudiante en las desveladas y contar con su apoyo incondicional en cada momento.

A papa *GOYO*, por brindarme todo lo necesario para concluir mis estudios, este es el fruto de tu esfuerzo, *GRACIAS*.

A cada uno de mis hermanos por su apoyo y cariño, *Manuel, Mauri, Mago, Joaqui y Grego*.

- ❖ A mi esposo, *Salvador*, por su apoyo, compañía, paciencia y sobre todo por su cariño, gracias corazón.
- ❖ A cada uno de mis amigos por hacer inolvidable mi estancia en la Facultad de Ingeniería:

*Blanca Estela Barragan Rosas*, por todas nuestras experiencias y por tus sabios consejos.

*Myriam Almazan*, por conservar nuestra amistad desde el *CCH*.

*Soledad García*, por llenar con tu ternura nuestro grupo.

*María Guadalupe Gonzalez Vieyra*. Por tu apoyo y consejos.

*Alejandra Donaji*, por las buenas reuniones en su casa.

*Raquel Mastache* por deleitarnos con tu voz cuando llegabas a cantar.

*Eugenia y Angélica*, por su alegría contagiosa y su gran personalidad.

*Javierín*, por nuestra hermosa amistad desde hace quince años, eres una excelente persona amigo.

*Salvador Jara Gonzáles*, por tu nobleza y tu perseverancia.

Erick Ponce Patlan, niño te gracias por tus consejos y por aquellos lunch que nos compartías y que nos recargaban las pilas.

Roberto Carlos Ordoñez Cervantes, por esas canciones que siempre te pedíamos y nunca nos cantaste, pero eso si, cuando se trataba de bailar a todas complacías con tu estilo.

Gerardo Lugo, por compartir tus bellas lecturas con nosotros.

Leonardo Ramos, Josué Contreras, Chagoya, Jorge Robles y el compadre Osvaldo por su amistad.

- ❖ A mi director de tesis, M. I. Reginaldo Hernández Romero, por su tiempo y apoyo.
- ❖ A todas las personas del Instituto Mexicano del Petroleo que me apoyaron en la realización de este trabajo.

Ing. Procoro Barrera Nabor, por su asesoría en el desarrollo de este trabajo.

Ing. Eduardo Rojas Martínez, por compartir sus valiosos conocimientos conmigo.

Ing. Alejandro Bahena Pita, por la información proporcionada.

Ing. José Luis Gutiérrez, por la información proporcionada.

Ing. Reynaldo Ibañez Luria, por la información proporcionada.

Finalmente y en especial agradezco al **Ing. Victor Manuel Valdes** por brindar la oportunidad a los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de conocer y encaminarse a un área apasionante como lo es la ingeniería civil costa fuera, le agradezco de antemano y espero que esta oportunidad siga brindándose a las futuras generaciones.

---



---

# ÍNDICE

Introducción.....	4
I. Antecedentes.....	7
I.1. Objetivo.....	8
I.2. Alcances.....	8
I.3. Desarrollo.....	8
II. Estudios Preliminares.....	18
II.1. Equipos utilizados.....	20
II.1.1 Embarcación geofísica.....	20
II.1.2 Sistema de Posicionamiento GPS diferencial.....	21
II.1.3 Software de navegación y posicionamiento.....	23
II.1.4 Sistema medidor de la velocidad del sonido en el agua.....	24
II.1.5 Sistema medidor de profundidad.....	25
II.1.6 Sistema sonar de barrido lateral.....	26
II.1.7 Sistema perfilador acústico somero.....	27
II.1.8 Sistema perfilador acústico profundo.....	28
II.1.9 Sistema muestreador de gravedad.....	29
II.2. Retícula de recorrido.....	30
II.3. Levantamiento Geofísico.....	31
II.4. Muestreo del lecho marino.....	33
II.5. Eventos sobre el lecho marino.....	33
II.6. Geología estructural.....	37
II.6.1 Características litológicas de la Sonda de Campeche.....	38
II.6.2 Características dinámicas del suelo.....	40
II.6.3 Riesgo sísmico en la Sonda de Campeche.....	42
II.7. Riesgos Potenciales.....	44
III. Estudios definitivos.....	47
III.1. Estudios geotécnicos.....	48
III.1.1 Sistema de posicionamiento.....	49
III.1.2 Medición del tirante de agua.....	49
III.1.3 Sistema de perforación.....	49
III.2. Pruebas in situ.....	51
III.2.1 Muestreo y manejo de muestras.....	53
III.2.1.1 Muestreador de percusión.....	53
III.2.1.2 Muestreador de presión.....	54

INDICE

III.2.1.3 Muestreador de pistón.....	55
III.2.2 Cono penetrómetro.....	56
III.2.2.1 Calibración.....	59
III.2.2.2 Procedimiento de la prueba.....	59
III.2.3 Velela remota.....	61
III.2.3.1 Calibración.....	62
III.2.3.2 Procedimiento de la prueba.....	62
III.3. Pruebas en laboratorio.....	63
III.3.1 Características físicas.....	66
III.3.2 Propiedades índice.....	67
III.3.3 Propiedades mecánicas.....	68
III.4. Reporte final geotécnico.....	68
IV. Análisis estructural del pilote.....	70
IV.1. Características de los pilotes en cada tipo de plataforma fija.....	71
IV.1.1 Predimensionamiento del pilote.....	71
IV.1.2 Modelo analítico de la interacción suelo estructura .....	83
IV.1.2.1 Capacidad axial última del pilote.....	83
IV.1.2.2 Datos de transferencia de carga axial.....	92
IV.1.2.3 Datos de transferencia de carga lateral versus deflexión (P-y).....	96
IV.2. Acciones mecánicas de los pilotes sobre y debajo de la línea de lodos: deflexión, cortante, flexión axial, interacción.....	103
IV.2.1 Acciones mecánicas de los pilotes sobre y debajo de la línea de lodos .....	103
IV.2.2 Análisis de esfuerzos del pilote sobre y debajo de la línea de lodos.....	105
IV.2.2.1 Análisis de esfuerzos del pilote sobre la línea de lodos.....	106
IV.2.2.2 Análisis de esfuerzos del pilote debajo de la línea de lodos.....	109
IV.3 Análisis de hincado estático.....	123
IV.4 Análisis de hincado dinámico.....	131
IV.5 Factor de seguridad.....	133
IV.6 Análisis por izaje.....	135
IV.7 Generación de ingeniería de detalle.....	139
IV.7.1 Topes de aseguramiento temporal.....	139
IV.7.2 Zapata de hincado.....	139
IV.7.3 Guías de acoplamiento.....	141
IV.7.4 Agujero de izaje.....	142
IV.7.5 Longitud de corte para cada sección de pilote.....	142
V. Proceso Constructivo de pilotes.....	144
V.1. Proceso constructivo de pilotes, material y fabricación.....	149
V.1.1 Material.....	150
V.1.2 Construcción de pilotes en patio de fabricación.....	153
V.2. Pruebas no destructivas.....	157
V.2.1 Inspección visual.....	157

INDICE

---

V.2.2 Radiografía.....	159
V.2.3 Líquidos penetrantes y partículas magnéticas, LP y PM.....	161
V.3. Transportación de pilotes.....	163
V.4. Instalación de pilotes.....	166
V.4.1 Izaje, instalación e hincado de primeras secciones.....	167
V.4.2 Izaje de las siguientes secciones.....	171
V.4.3 Aplicación de soldadura.....	173
V.4.4 Pruebas de ultrasonido.....	174
V.4.5 Hincado de secciones.....	174
V.4.6 Nivelación de la subestructura.....	176
V.4.7 Instalación de coronas.....	177
VI. Conclusiones.....	178
Bibliografía.....	181

# INTRODUCCIÓN.



## INTRODUCCIÓN.

Una de las industrias más importantes que fortalece la economía mexicana, es la industria petrolera, a tal grado que en los últimos años, el alza del crudo a motivado que Petróleos Mexicanos implemente nuevos proyectos de extracción de crudo y gas fuera de la costa, lo que exige el desarrollo de estructuras especiales para llevar a cabo su explotación, tal es el caso de las plataformas marinas. Los principales retos que se tienen que vencer para la explotación de los yacimientos fuera de la costa, son los tirantes de agua y el transporte de las estructuras desde el patio de fabricación hasta el sitio de instalación.

En México la primera perforación bajo el mar se llevó a cabo en 1959, sobre el campo de Santa Ana junto a la Laguna de la Machona. En 1966 se descubrió el campo llamado Atun frente a la desembocadura del río Cazonos y en 1967, frente a las costas de Tampico, se descubrió el campo Arenque. A mediados de ese mismo año se iniciaron los trabajos de exploración frente a las costas de Campeche, determinando un estrato productor de hidrocarburos en esa zona. Actualmente las principales zonas de la República Mexicana, donde se explotan los hidrocarburos se encuentran en el Golfo de México, las plataformas que se localizan en él son de diversos tipos, predominando las plataformas marinas fijas o tipo Jacket las cuales se encuentran formando un complejo de plataformas unidas por medio de puentes y/o plataformas de enlace; son poco profundas, construidas de secciones tubulares de acero y cada una de ellas esta diseñada para determinada función.

El diseño de pilotes que se presenta en este trabajo, corresponde al tipo de cimentación que se utiliza en las plataformas marinas fijas o Jacket, estas plataformas están soportadas por pilotes de acero de sección tubular y punta abierta con un diámetro moderado que varía entre 0.914 m. - 1.829 m. (36 a 72 in.), los cuales son hincados en el terreno mediante el impacto de martillos hidráulicos o de vapor, a una profundidad que varía entre los 70 y 120 m. dependiendo de la profundidad donde se alcance la capacidad de carga requerida. Los espesores de la pared del pilote deben ser apropiados para resistir fuerzas axiales y momentos flexionantes, producto de las cargas de operación y tormenta, así como las generadas durante el transporte, el hincado y maniobras de instalación del pilote.

En el presente trabajo se desarrolla una metodología de diseño estructural para los pilotes de cimentación utilizados en las plataformas marinas fijas de la Sonda de Campeche, esta metodología se basa en las especificaciones emitidas por el American Petroleum Institute, "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design", práctica recomendada 2A-WSD (RP 2A -WSD). El trabajo se ha dividido en cinco partes, la primera de ellas corresponde a los antecedentes; la segunda parte corresponde al capítulo dos, donde se describen los estudios preliminares o geofísicos necesarios para verificar que no exista ningún tipo de riesgo geológico que afecte la instalación de la plataforma marina; además de proporcionar comentarios generales de la homogeneidad o variabilidad del suelo, con la finalidad de determinar que el sitio de exploración geotécnica sea seguro. Previo a la ejecución de los trabajos geofísicos, se deberá consultar toda la información existente de estudios anteriores en zonas aledañas a la de interés, con el fin de conocer las condiciones y rasgos imperantes en la región, tales

como fallas geológicas, emanaciones de gas, o cualquier otro riesgo que deba ser complementado; así como para organizar las actividades a desarrollar durante la realización de la investigación.

En el capítulo tres se describen los estudios geotécnicos que se realizan con la finalidad de obtener las propiedades índice y mecánicas del subsuelo marino a partir de ensayos sofisticados de campo y laboratorio, propiedades que se requieren para determinar los parámetros de diseño, construcción e instalación de los diferentes elementos estructurales utilizados en la cimentación de las plataformas marinas costa fuera.

De esta forma, los estudios geofísicos analizan geológicamente la zona propuesta para las estructuras costa fuera y los estudios geotécnicos proporcionan los parámetros necesarios en el diseño de la cimentación; por tal razón, se considera al estudio geofísico como la base para definir o aprobar el sitio donde se deba realizar el estudio geotécnico, este criterio muestra la importancia de estas dos disciplinas en la ingeniería costa fuera.

En el capítulo cuatro, se describe el análisis estructural del pilote, donde se presentan las acciones mecánicas a las que se somete el pilote sobre y debajo de la línea de lodos, los análisis que se realizan ante estas acciones mecánicas, así como aquellos que se realizan ante las sollicitaciones inducidas al pilote durante su instalación. En este capítulo se presentan los criterios y recomendaciones que establece el API-RP-2A-WSD-2000, para el diseño de pilotes, tales como, factores de seguridad recomendados, materiales y espesores para el diseño, criterios para los diferentes análisis, etc.

En el capítulo cinco se presenta el proceso constructivo por el que pasa el pilote antes de llegar al patio de fabricación y durante su construcción como pilote de cimentación en el patio de fabricación, las pruebas no destructivas que se practican durante este proceso así como el material recomendado. Una vez construidos, los pilotes son transportados al sitio de instalación de la plataforma, los procedimientos de transportación e instalación del pilote, también se incluyen en este capítulo.

Es importante señalar que durante el desarrollo de este trabajo, **se manejan unidades en sistema ingles y unidades en sistema métrico**, siendo estas las más importantes en el desarrollo de todo el trabajo. En la práctica se acostumbra manejar unidades en sistema ingles, por tal razón los programas utilizados para los análisis correspondientes, arrojan los resultados en este sistema.

Finalmente se presentan las conclusiones en donde se hace una recopilación de los aspectos más importantes del presente trabajo y se emiten algunas recomendaciones.

# ANTECEDENTES

## I. ANTECEDENTES.

### I.1 OBJETIVO.

Describir una metodología utilizada en el diseño de cimentaciones profundas desplantadas bajo el lecho marino, incluyendo las técnicas de muestreo de los materiales que sirven de soporte para las plataformas marinas fijas.

### I.2. ALCANCES.

Presentar los estudios que se realizan con la finalidad de determinar los parámetros a emplear en el diseño de los pilotes para una plataforma marina fija en la Sonda de Campeche.

Describir la metodología utilizada, factores de seguridad, criterios de análisis y normatividad que se considera en el diseño de cimentaciones profundas para plataformas marinas fijas.

Describir el proceso constructivo de los pilotes de cimentación, las pruebas no destructivas durante este proceso y describir en términos generales la transportación e instalación de los pilotes.

### I.3. DESARROLLO.

Desde su descubrimiento, el petróleo ha sido de suma importancia para satisfacer algunas necesidades del hombre. Se tiene referencia de que en otro tiempo, los árabes y los hebreos empleaban el petróleo con fines medicinales. En México, los antiguos pobladores tenían conocimiento de esta sustancia, pues fue empleada de diversas formas entre las cuales se cuenta la reparación de embarcaciones para la navegación por los ríos haciendo uso de sus propiedades impermeabilizantes.

En su estado natural se le atribuye un valor mineral, sin embargo, con el paso del tiempo no sólo en México sino en el mundo, se descubrió que el petróleo puede generar, a través de procesos de transformación industrial, productos de alto valor como son los combustibles, lubricantes, ceras, solventes y derivados petroquímicos.

El petróleo es una mezcla que se presenta en la naturaleza compuesta predominantemente de hidrocarburos en fase sólida, líquida o gaseosa. La formación de hidrocarburos esta asociada al desarrollo de rocas sedimentarias, depositadas en ambientes marinos o próximos al mar y que es el resultado de procesos de descomposición de organismos de origen vegetal y animal que en tiempos remotos quedaron incorporados en esos depósitos. Al conjunto de procesos que dan origen a los hidrocarburos se le conoce como *sistema de producción de hidrocarburos*. En este sistema se deben de presentar las siguientes condiciones básicas que garanticen la acumulación del hidrocarburo:

- ✓ **Roca generadora.** Debe existir material orgánico suficiente y necesario para convertirse en hidrocarburo por el efecto de la presión y temperatura que predomine en el yacimiento.

- ✓ **Roca almacenadora.** Es la trampa de rocas impermeables que forman el yacimiento, las cuales deben encontrarse dispuestas de tal forma que no existan movimientos laterales de fuga de hidrocarburos.
- ✓ **Roca sello.** Es una roca impermeable, que evita la fuga del aceite y gas hacia la superficie.
- ✓ **Migración.** Debe existir una roca permeable de forma tal que bajo presión los hidrocarburos puedan moverse hasta la superficie, a través de los poros microscópicos de la roca.
- ✓ **Sincronía.** La sincronía debe existir entre los procesos anteriores porque de ella depende el buen funcionamiento del sistema. (Ref. 4)

El sistema de producción de hidrocarburos forma parte de la exploración y producción de la industria petrolera.

La exploración es el conjunto de tareas de campo y oficina cuyo objetivo consiste en descubrir nuevos depósitos de hidrocarburos o nuevas extensiones de los existentes.

La exploración petrolera en nuestros días puede dividirse en varias etapas:

- trabajos de reconocimiento
- trabajos de detalle
- estudios para la localización de pozos exploratorios
- análisis de los resultados obtenidos para programar la perforación de nuevos pozos.

Hoy en día en la exploración se utilizan técnicas sofisticadas, como mediciones sísmicas, de microorganismos e imágenes de satélite. Potentes computadoras asisten a los geólogos para interpretar sus descubrimientos y asegurar la existencia del crudo.

Con el papel fundamental que han desempeñado los hidrocarburos en la economía del país, el tema de las reservas petroleras de México es siempre de gran interés. Una reserva es el volumen de hidrocarburos medido en condiciones atmosféricas, que será producido económicamente con cualquiera de los métodos y sistemas de explotación aplicables a la zona. Por su categoría las reservas se clasifican en probada, probable y posible.

- **Reservas probadas.** Son volúmenes de hidrocarburos evaluados en condiciones atmosféricas y bajo condiciones económicas actuales, que se estima serán comercialmente recuperables en una fecha específica, con una certidumbre razonable, cuya extracción cumple con las normas gubernamentales establecidas y que han sido identificados por medio del análisis de información geológica y de ingeniería.
- **Reservas probables.** Son aquellas reservas no probadas en donde el análisis de la información geológica y de ingeniería sugiere que son más factibles de ser comercialmente recuperables que de no serlo. Para los métodos probabilísticos esto implica que se tendrá una probabilidad

I. ANTECEDENTES

---

- de al menos 50% de que las cantidades actualmente recuperadas serán iguales o mayores que la suma de las reservas estimadas como probadas más probables.
- Reservas posibles. Son aquellos volúmenes de hidrocarburos en donde el análisis de datos geológicos y de ingeniería sugieren que son menos probables de ser comercialmente recuperables que las reservas probables. En este contexto, cuando métodos probabilísticos utilizan el termino posible implica que se tiene una probabilidad de por lo menos 10% de que las cantidades recuperadas sean iguales o mayores que la suma de las reservas probadas mas probables más posibles.

Las reservas de hidrocarburos, en sus diferentes categorías de probadas, probables y posibles, conforman la enorme riqueza que guarda el subsuelo mexicano y proporcionan a los encargados de su explotación los elementos para su correcto y eficiente aprovechamiento.

Una vez que se determina la localización del yacimiento, es necesario determinar las características particulares de la zona donde se pretende explotar el hidrocarburo; estos estudios son conocidos como preliminares y definitivos, los primeros se realizan por medio de la geofísica que determina los eventos y riesgos que existen en la zona de interés, con base a los resultados se aprueban las coordenadas del pozo o se proponen otras. Los estudios definitivos consisten en llevar acabo la toma de muestras del sitio para la explotación del hidrocarburo, con la finalidad de determinar las características geotécnicas del suelo marino. Estos estudios se tratan con mas detalle en los capítulos II y III.

Para poder explotar los hidrocarburos es necesario contar con la infraestructura adecuada cuando estos se localizan en mantos petrolíferos cuya extensión total o parcial queda comprendida bajo el nivel del mar o el océano; de esta manera se da soporte a todos los equipos que se requieren para perforar, producir, procesar y transportar hidrocarburos. La infraestructura a la que nos referimos se conoce como plataforma marina. De acuerdo al tipo de estructuración, las plataformas se clasifican en:

1. Fijas
2. Semifijas
3. Flotantes

### 1. PLATAFORMAS FIJAS.

Estas estructuras se encuentran fijas sobre el lecho marino y se elevan sobre el nivel del mar. Los sistemas fijos desarrollados en el mundo son:

- a. Plataforma convencional de acero o tipo "Jacket".
- b. Plataforma de concreto por gravedad.

**a. Plataforma tipo Jacket.**

Son estructuras formadas por elementos tubulares que se sueldan entre sí, reciben el nombre de Jacket porque los pilotes que integran la cimentación de la estructura, se alojan en el interior de las piernas. Se caracterizan principalmente por la transmisión directa de las cargas de la superestructura a los pilotes.

Estas plataformas están formadas por tres componentes estructurales principales, superestructura, subestructura y pilotes. (Figura I.1).

**a. SUPERESTRUCTURA.**

Esta componente se localiza sobre el nivel medio del mar y comprende una o varias cubiertas, según el servicio para el cual se requiera la plataforma, como se verá más adelante. Los elementos estructurales que forman las cubiertas son típicamente marcos, con secciones tubulares, secciones compuestas y perfiles laminados. La función principal de la superestructura, consiste en dar apoyo al sistema de piso y a todos los equipos necesarios para el desarrollo de las actividades de la plataforma.

**b. SUBESTRUCTURA (JACKET).**

Esta sección va desde la conexión de la pierna de subestructura- pilote cerca del punto del trabajo hasta el lecho marino. Es una armadura tridimensional formada por elementos tubulares con contraventeos diagonales en X o en K, pueden ser de 3, 4, 6, 8, ó 12 piernas, todas ellas con una pendiente que proveen una mayor base en el lecho marino para resistir con mayor eficiencia los momentos de volteo producidos por las fuerzas de viento, oleaje y corriente, e incrementar la capacidad individual de los pilotes para absorber cargas laterales. La subestructura se construye con secciones tubulares porque estas presentan poca resistencia al flujo de agua, reduciendo las cargas laterales. También constituye un soporte para algunos accesorios necesarios para la operación de la plataforma, tales como: ductos ascendentes, conductores, camisas para bombas y drenajes, embarcaderos, defensas, pasillos de acceso, etc.

**c. CIMENTACIÓN (PILOTES DE ACERO Y PUNTA ABIERTA)**

La cimentación a partir de los pilotes de acero de sección tubular y punta abierta, se colocan concéntricamente en el interior de las piernas de la subestructura. Sus extremos superiores están localizados en el punto de trabajo, es decir, donde el pilote se conecta con las columnas de la superestructura, la longitud de penetración que pueden alcanzar es del orden de 60 a 120 metros bajo el lecho marino dependiendo de las cargas y de las condiciones geotécnicas locales.

Cada uno de estos elementos estructurales, pilotes, debe ser capaz de:

- ✓ Soportar todas las cargas y deformaciones que se presentan durante la construcción, transporte e instalación, con la máxima seguridad.

I. ANTECEDENTES

- ✓ Tener la durabilidad de diseño durante toda la vida útil de la estructura, para soportar el equipo para la perforación y/o producción.
- ✓ Soportar con seguridad todas las cargas accidentales y permanentes que se presenten por la acción de sismos de máxima intensidad, oleajes, corrientes y vientos, acciones en los cuales se basa el diseño de la plataforma.

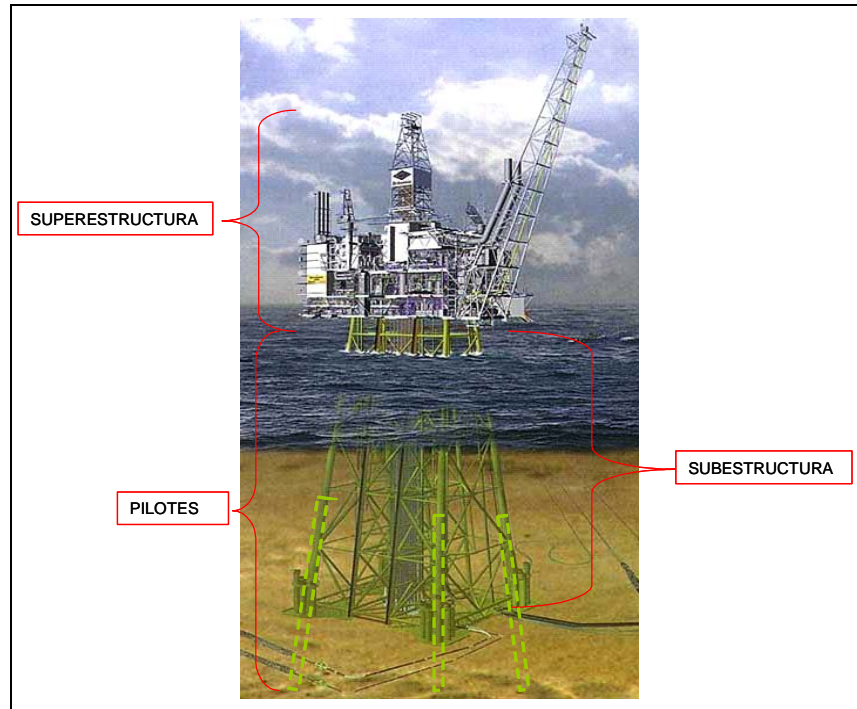


Figura I.1. Componentes estructurales de la plataforma marina fija ó Jacket.

Las plataformas tipo Jacket se diseñan dependiendo de los servicios que se requieran para la explotación del petróleo, de acuerdo a esto se pueden clasificar en:

- **Plataformas de perforación.** Estas plataformas son utilizadas para la perforación de pozos y la extracción de crudo de los yacimientos marinos. Las plataformas de perforación son las más importantes dentro del esquema de explotación, porque a partir de ellas se generan las restantes para el procesamiento del crudo.
- **Plataformas de producción.** En estas plataformas se soportan los equipos e instalaciones para separar la mezcla del petróleo, gas, agua y sedimentos que constituye al crudo recién extraído, darle un tratamiento preliminar para después poder transportarlo (petróleo o gas) o reinyectarlo al suelo (agua o sedimentos), *figura 2*. Existen plataformas de producción temprana y producción permanente, la diferencia está en la capacidad de los equipos de proceso empleados.
- **Plataformas de enlace.** Como su nombre lo indica, estas plataformas sirven de enlace entre las diferentes plataformas perforadoras y productoras. Su función es recibir el crudo vía



ductos y enviarlo por el mismo a las plataformas de producción para la separación y transporte subsecuente a terminales en tierra o en mar.

- **Plataformas de compresión.** Su función es aumentar la presión del gas para hacerlo llegar a tierra, además en ellas se realizan procesos de deshidratación y endulzamiento para evitar la corrosión en las tuberías.
- **Plataformas de rebombeo.** Esta estructura soporta turbo-bombas para impulsar el crudo a través de los oleogasoductos submarinos y hacerlo llegar a las terminales de destino.
- **Plataformas de inyección.** La función de estas plataformas es la de inyectar agua tratada o gas a un estrato del yacimiento de hidrocarburo cuando está perdiendo su presión por la gran extracción del crudo y así recuperar la presión.
- **Plataformas recuperadoras.** Estas estructuras también llamadas protectoras de pozos, tienen como función la de proteger a un pozo que se ha perforado con fines exploratorios, en caso de resultar productivo dicho pozo, se procede a la instalación permanente de la plataforma, de lo contrario se taponan y se deja abandonado.
- **Plataformas habitacionales.** Se encargan de soportar módulos de vivienda para dar albergue al personal que elabora dentro del complejo.
- **Plataformas de apoyo intermedio.** Cuando los claros a librar con los puentes son muy grandes, resulta necesario contar con un apoyo intermedio a dicho claro, esta es la única función de estas plataformas.
- **Plataformas para antenas de telecomunicaciones.** Estas tienen como objetivo el soportar la torre de telecomunicaciones, el módulo de telecomunicaciones, módulo de radares y , en algunos casos, módulo habitacional y helipuerto.
- **Plataforma para quemador.** En estas plataformas sólo se soportan un puente para quemador, un puente de comunicación que lleva una línea hacia el quemador, una torre para quemador y el quemador del gas excedentes que no puede ser aprovechado, producto de la separación de este con el crudo.



Figura I. 2. Plataforma de producción, localizada en la Sonda de Campeche.

**b. Plataformas de concreto por gravedad.**

Son estructuras de concreto postensado formada por dos partes: la base, construida de concreto y, la superestructura hecha de acero, (Figura I.3).



Figura I.3. Plataforma Troll A, con 430 metros de alto, y sólo 142 m de altura sobresalieron durante su traslado al sitio.

## 2. PLATAFORMAS SEMIFIJAS.

Estas plataformas son estructuras esbeltas en las cuales la estabilidad se logra por medio de cables anclados en el fondo marino, ó mediante tanques de flotación colocados en la parte superior. Los principales tipos de plataformas fijas son:

- **Plataforma tipo atirantada.** Estructura de acero semejantes a la Jackets con la diferencia de que sus piernas no tienen pendiente. Cuentan con un sistema de cables en catenaria en la parte superior de la torre, los cuales se anclan en el lecho marino, además de que la torre se encuentra piloteada. (Figura I.4).

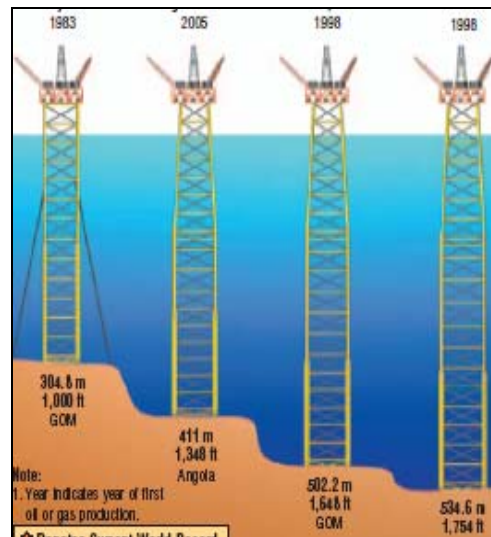


Figura I.4. Plataforma tipo atirantada.

## 3. PLATAFORMAS FLOTANTES.

La característica principal de estas estructuras consiste en que las cubiertas de operación se ven soportadas por 3 o 4 columnas de grandes dimensiones las cuales se conectan a tanques de flotación (pontones). Estos sistemas fueron creados debido a la necesidad de sustituir a las estructuras fijas sobre todo en los campos petroleros con reservas pequeñas o localizadas en sitios de grandes profundidades. Sus desventajas son su limitada capacidad de carga y la susceptibilidad de detener las operaciones cuando las condiciones ambientales sean críticas.

Los tipos de plataforma con este sistema son:

- **Plataformas semisumergibles.** Pueden clasificarse en dos grupos principales: a). con columnas conectadas a zapatas o pontones separadas y b) con pontones gemelos. Estas columnas soportan a una sola cubierta la cual aloja el equipo e instalaciones necesarias para realizar su función. Estas plataformas son autopropulsables ya que cuentan con sistemas de propulsión propios en los pontones, (Figura I.5).



Figura I.5. Plataforma semisumergible.

- **Plataformas de piernas tensionadas (TLP).** La TLP (Tension Leg Platform) o plataformas de piernas pensionadas son estructuras ancladas al fondo marino por medio de elementos verticales, los cuales se encuentran a tensión independiente de las condiciones de carga u oleaje debido a que la flotación propia excede siempre la masa, *figura 6*; los elementos verticales se anclan al fondo marino por medio de una estructura fabricada a partir de acero estructural y cimentada mediante pilotes. Una de las característica más importantes de la TLP, son las juntas flexibles, estas juntas (llamadas Flex-Joints), fabricadas con acero y material elastomérico, permiten a la estructura desplazarse horizontalmente sin provocar flexión en los tensores.

Finalmente se puede mencionar un tipo especial de plataformas que son:

- **Plataformas autoelevables (Jack-up).** Este tipo de plataformas se emplea para perforación y reparación de pozos y tienen la capacidad de poder moverse por medio de autopropulsión o por medio de remolcadores, de un lugar a otro, una vez que la perforación de un pozo es efectiva. (Figura I. 6).

A grandes rasgos, el mecanismo de estas plataformas es el siguiente: una vez que se encuentra en la posición deseada, las piernas son bajadas hasta alcanzar el fondo marino cuando estas se encuentran en el lecho marino, la cubierta es elevada más allá del nivel de agua, hasta la posición deseada. Esta cubierta se encuentra soportada por tres columnas de sección triangular o circular que tienen en su extremo inferior un sistema de zapatas aisladas o losas de cimentación para apoyarse en el lecho marino. Una característica importante que tienen estas plataformas es que cuentan con una torre de perforación ubicada en un cantiliver móvil, permitiéndole a la torre dar servicio a varios pozos sin necesidad de mover toda la plataforma.



Figura I.6. Plataforma Jack-up.

En el presente trabajo se desarrolla el diseño de la cimentación de plataformas marinas fijas tipo Jacket, es decir, de los pilotes de sección tubular y punta abierta que son empleados en la cimentación de este tipo de plataformas.

# ESTUDIOS PRELIMINARES.

## II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

Para el estudio del subsuelo se han utilizado los métodos magnéticos, gravimétricos y sísmicos principalmente. Los estratos someros, se exploran con métodos sísmicos de reflexión de alta resolución también llamados de perfilación, tal es el caso de la exploración geofísica para los suelos marinos. Estos estudios geofísicos son conocidos como estudios preliminares para el análisis y diseño de estructuras marinas.

Los programas de exploración geofísica generalmente consisten en la descripción morfológica de las condiciones generales del suelo y las condiciones geológicas someras que pudieran afectar la exploración geotécnica o, la ubicación y diseño de una estructura propuesta en el sitio de interés. Además incorpora los resultados de líneas de datos geofísicos de alta resolución que forman el área del levantamiento geofísico de 2 km x 2 km., incluyendo información general de suelos del sondeo en la recopilación de información geológica, y en la estratigrafía del sitio. Los estudios geofísicos se llevan a cabo de manera integral con el sistema acústico multisensor que incluye los dispositivos empleados en la exploración del suelo marino y los que permitan explorar y medir el tirante de agua.

La finalidad de los estudios geofísicos marinos es obtener dimensiones y características físicas de: fallas geológicas, formaciones o cuerpos geológicos superficiales y detectar los peligros y riesgos causados por la naturaleza y el hombre. Con esta información, se propone el sitio más adecuado para la ejecución de la exploración geotécnica requerida para el diseño e instalación de plataformas y tendido de tuberías en lugares seguros o bien anticipar posibles problemas y toma de medidas correctivas, así mismo permite detallar el alcance de la exploración geotécnica para el tipo de estructuras marinas en proyecto.

Con la finalidad de desplantar plataformas y tendido de ductos en la Sonda de Campeche, el estudio geofísico se ha orientado a los siguientes objetivos:

- Explorar la columna de agua y medir su altura. Este objetivo se fija no solo para obtener la medida directa del tirante de agua sino también para la detección de burbujas de gas.
- Delinear la fisiografía y anomalías del piso marino, es decir, definir las tendencias en pendiente y la configuración de la superficie del piso marino permitiendo localizar y delinear las anomalías naturales como cráteres, protuberancias coralinas, canales y zonas de erosión; así como las artificiales o provocadas por el hombre como: barcos hundidos, anclas, tuberías, brocales de pozos, etc.
- Conocer las características estratigráficas y litológicas de los suelos someros, además de los accidentes estructurales como paleocanales, corales enterrados y discordancias al interpretar la concentración e intensidad de la señal en los registros sísmicos.
- Definir la estratigrafía del suelo marino, identificando los eventos que representen riesgos para las estructuras. La información se complementa hasta más allá de la interface suelo-roca o hasta los estratos resistentes que interaccionan con la cimentación de plataformas ,

II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

---

tales como, fallas, plegamientos, fugas de gas, etc. y calificando litológicamente los diferentes estratos por la correlación de la intensidad del reflejo con la información obtenida mediante la exploración geotécnica.

Para obtener datos confiables se emplean métodos geofísicos de alta frecuencia, conocidos también como métodos acústicos, utilizando para esto equipos sofisticados entre los cuales se encuentran la ecosonda, el sonar de barrido lateral, perfilador profundo o pistola de aire. Existen también métodos de baja frecuencia, entre ellos el perfilador somero y el sistema de mapeo.

**II.1. Equipos utilizados.**

En el levantamiento geofísico se utilizan: un ecosonda de precisión para determinar la medida del tirante de agua, un sonar de barrido lateral (side scan sonar) para investigar la morfología del lecho marino, un perfilador somero para determinar las características del subsuelo y sedimentos no consolidados, y el perfilador profundo que permite definir la estratigrafía a mayor profundidad, estos equipos proporcionan datos son interpretados en conjunto y correlacionados entre si con las muestras obtenidas por medio de un equipo conocido como muestreador por gravedad y con la estratigrafía obtenida del sondeo geotécnico, para determinar las propiedades de los suelos y peligros que pudieran estar presentes en el área de estudio. En los siguientes incisos se describen con más detalle los equipos utilizados en la exploración geofísica.

**II.1.1. Embarcación geofísica.**

Para los trabajos de exploración en la Sonda de Campeche es muy común utilizar barcos adaptados al tipo de estudio a realizar. Para este fin, también se puede emplear una plataforma autoelevable apoyada en tres o cuatro columnas de sustentación llamadas Jack-up, esta estructura navega al sitio donde se realizará el estudio correspondiente. En el caso de una embarcación, esta debe contar con las dimensiones y características siguientes: una manga de 6 a 12 m., eslora de 30 a 60 m. como mínimo, velocidad de crucero de 12 nudos, capacidad de desplazamiento aproximada de 900 Ton., instalaciones mínimas de 20 personas, sala de equipo generador de electricidad de una potencia mayor a 700 Kw y un equipo de navegación electrónico que una vez posicionado en la red de líneas de recorrido, debe navegar en un tirante mínimo de agua que le permita maniobrar libremente a una velocidad media de 3 nudos, misma que si se disminuye permite obtener mayor detalle del área, (Figura II.1.1).





Figura II.1.1. Embarcación geofísica

Las unidades de transmisión y recepción de todos los equipos son remolcadas por el barco, el cual no se detiene durante el levantamiento geofísico. La distribución de los equipos empleados se muestra en la figura II.1.2.

#### **II.1.2. Sistema de Posicionamiento GPS diferencial.**

El sistema de posicionamiento global diferencial utilizado para realizar los trabajos, esta basado en el uso de una constelación de 24 satélites, que fue desarrollado por el sistema de Defensa del Gobierno de los Estados Unidos.

El sistema basa su funcionamiento en el siguiente principio, la posición de un punto sobre la superficie terrestre se puede determinar midiendo simultáneamente los tiempos de viaje de las señales de algunos de los satélites que forman actualmente la constelación, los cuales están situados en órbitas conocidas, a una altitud de 20,200 Km (12552 mi), en planos orbitales con 60° de inclinación sobre el plano ecuatorial terrestre; de acuerdo a lo anterior se requieren al menos 3 satélites, para determinar la posición de un punto sobre la superficie terrestre en dos dimensiones (Latitud y Longitud) y 4 satélites como mínimo, para determinar la misma posición en tres dimensiones (Latitud, Longitud y Altitud).

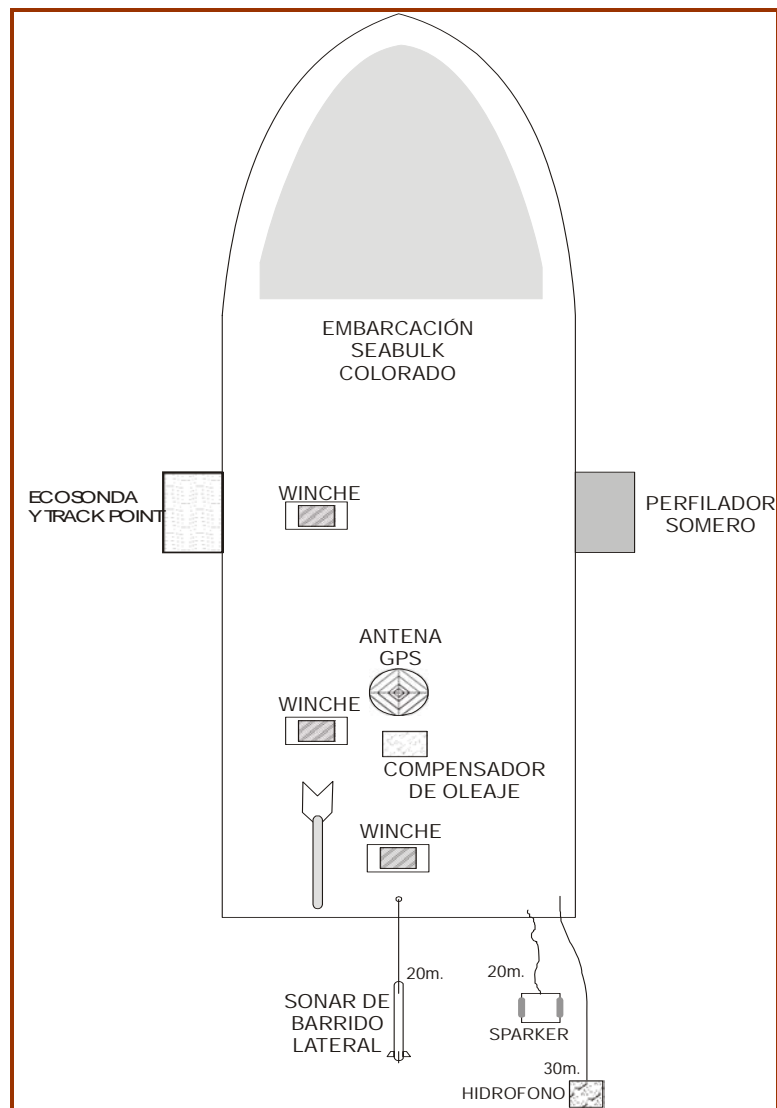


Figura II.1.2. Distribución del equipo geofísico a bordo de la embarcación.

En la actualidad, el sistema diferencial de referencia múltiple (G.P.S) es el más utilizado en la navegación, con él se obtiene la localización de la embarcación con un rango de precisión de  $\pm 2\text{m}$ . Existe un concepto totalmente nuevo en posicionamiento que proporciona una precisión de  $\pm 0.35\text{ m}$  globalmente. Se trata del sistema G.P.S. C-Nav el cual utiliza estaciones de monitoreo estratégicamente localizadas alrededor del mundo, (Figura II.3). C-Nav es la culminación de 10 años de Investigación y desarrollo por parte del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA. Los científicos de JPL realizaron esta investigación para proporcionar una precisión de centímetros a las aplicaciones espaciales. Esta tecnología ha sido ahora asimilada y puesta al servicio de la Industria Marina. (Ref. 2).



Figura II.1.3. Sistema de posicionamiento GPS C-NAV

El sistema de posicionamiento incluye tres monitores de vídeo, los cuales muestran la retícula formada por las líneas programadas para la investigación y la posición de la embarcación en relación a una línea de navegación de la retícula mencionada; el primer monitor ayuda al timonero o capitán a guiar el curso del barco sobre las líneas de navegación programadas, el segundo monitor se localiza en el cuarto de graficadores para mostrar al personal geofísico la ruta y la línea en exploración y así correlacionar las gráficas obtenidas con la ruta del barco; el tercer monitor se localiza en la sala de navegación, cuyo operador define la ruta a seguir y verifica la precisión de la trayectoria del barco. El sistema de navegación es capaz de proporcionar datos impresos (velocidad de la embarcación, distancia del barco a la línea principal, distancia recorrida y por recorrer sobre la línea en exploración, líneas exploradas y por explorar y tirante de agua).

### II.1.3 Software de navegación y posicionamiento.

La embarcación cuenta con un software que le permite realizar los movimientos de navegación necesarios durante los levantamientos geofísicos. Las características más importantes con que cuenta dicho software son:

- Controla pantallas con información (fecha, hora, N°. de línea, coordenadas geográficas y UTM de la embarcación, nombre de la localización, nombre del operador y de la embarcación, profundidad del agua, velocidad de las embarcación, etc.) en tiempo real, sin necesidad de interrumpir la navegación, de acuerdo a las necesidades del proyecto. Además permite grabar e imprimir cualquier evento o información desplegada en pantalla.
- Trazar líneas de navegación para conocer la posición del barco con relación a cualquier objeto, (líneas de conducción, plataformas cercanas, embarcaciones, etc.), (Figura II.1.4).
- Permite proyectar la futura posición de la embarcación y la de sus anclas (en caso ser necesarias) sin necesidad de que la embarcación se encuentre en dicho lugar. Además se puede obtener información de cualquier posición deseada.

II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

- Mediante alarmas acústicas y visuales permite alertar cuando una embarcación se encuentre a cierta distancia de alguna infraestructura o tubería en el área.
- Maneja en tiempo real cartas electrónicas del área de trabajo con datos como: profundidades, zonas de anclaje, rutas marítimas, puertos, faros, etc.

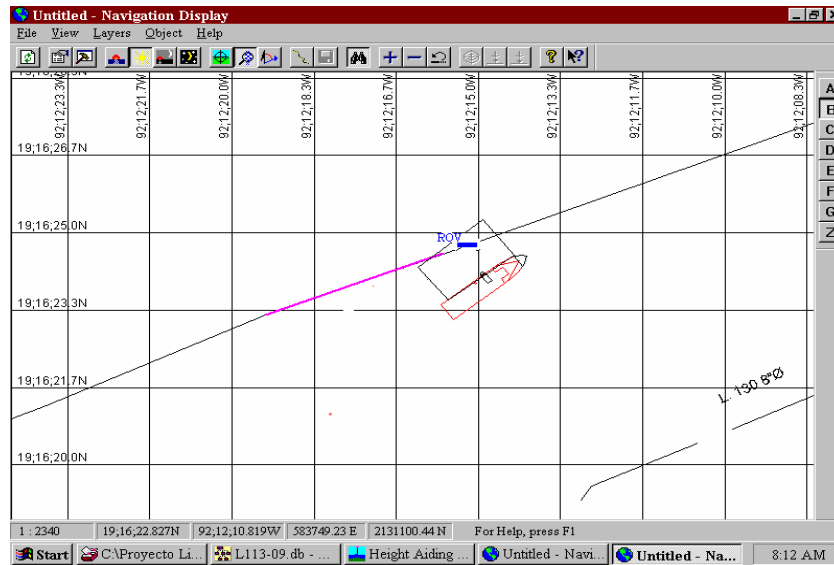


Figura II.1.4. Software de navegación.

**II.1.4 Sistema medidor de la velocidad del sonido en el agua.**

Para medir la velocidad del sonido en la columna de agua, se emplea un velocímetro que funciona con un registro de estado sólido y un sensor para adquirir un perfil acústico de velocidad dentro de la columna de agua. Sin importar el estado del tiempo o corrientes, la sonda es introducida al agua para registrar velocidad del sonido y profundidad por tiempo o intervalos, conforme la sonda va descendiendo. Automáticamente se compensa por las influencias de salinidad y temperatura, (Figura II.1.5). El sistema medidor de la velocidad del sonido en el agua ofrece un método fácil y seguro para calibrar los equipos de sistemas acústicos empleados en los estudios preliminares. (Ref. 2)



Figura II.1.5. Sistema medidor de la velocidad del sonido en el agua

### II.1.5 Sistema Medidor de Profundidad (Ecosonda).

La ecosonda es el equipo básico para medir el tirante de agua. El sistema consiste en un transmisor y receptor, que emite una señal sonora la cual se refleja en la interfase de dos medios de diferente densidad, siendo entonces captada por el receptor y con base al tiempo que tarda la señal en regresar se determina el tirante de agua, (Figura II.1.6). Para este levantamiento, el transductor se monta en el casco especialmente diseñado, y se extiende aproximadamente 3.0 metros debajo de la superficie del agua durante las operaciones. Se reciben señales reflejadas por el mismo transductor acústico usado en la transmisión. La longitud de tiempo entre el disparo del pulso acústico y la recepción de la energía reflejada se registra en un gráfico. La Ecosonda registra digitalmente los valores análogos determinados por el transductor Y corrige los errores posibles debidos a los movimientos transversal y vertical de la embarcación. Una carta de registro análogo del perfil del fondo marino se registra junto con las profundidades digitalizadas que posteriormente son corregidas por efectos de marea y aumentadas a los datos de navegación para crear un plano batimétrico digital. (Ref. 2.)



Figura II.1.6. Sistema Medidor de Profundidad (Ecosonda).

### II.1.6 Sistema sonar de barrido lateral.

Este sistema consiste en el envío de señales acústicas hacia el fondo del mar, a través de un sensor hidrodinámico remolcado desde la popa del barco, las cuales se reflejan en los eventos existentes en el fondo marino, siendo captadas por el mismo sensor que trasmite estos datos a un graficador de alta resolución. El sistema consta de un vehículo de arrastre remolcado con un cable "Umbilical" de 600 m. Alimentado en un winche eléctrico, que permite la operación con tirantes de 300 a 400 m. de profundidad. El sistema puede trabajar a diferentes escalas (1:25 hasta 1:500), por canal, es programable, permite la anotación automática de datos y puede ser interconectado con sensores de rumbo TRACKPOINT. El software permite la representación en pantalla de los registros de alta resolución que pueden ser impresos opcionalmente en papel térmico con claridad, usando filtros en las señales para evitar los ruidos y cuenta con almacenamiento en discos compactos. Con esta información se elabora un ecograma muy semejante a un mosaico del área, con el cual se interpreta la morfología y se realiza la detección de cualquier objeto.

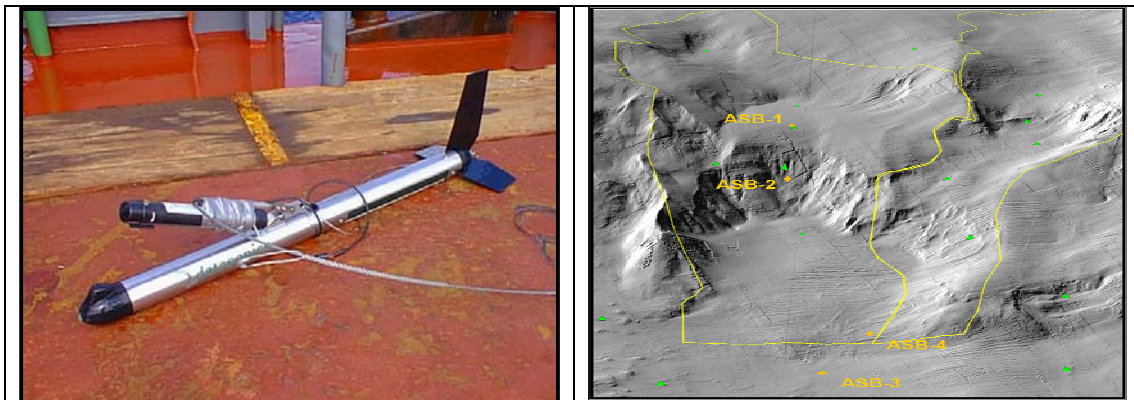


Figura II.1.7. Sistema Sonar de Barrido Lateral.

**II.1.7. Sistema perfilador acústico somero.**

El perfilador somero determina la distribución y características de los sedimentos no consolidados, la presencia de emanaciones de gas en los sedimentos y la presencia de arrecifes coralinos y tuberías enterradas, todo esto por medio del registro acústico continuo,(Figura II.1.8). La penetración de este tipo de registro es de 0.00 m. hasta 30.0 m., según permitan las características acústicas de los sedimentos. Los registros se graban con una frecuencia de 3.5 kHz., a una escala de 15 m. por división. Con esta información se generan planos como el de Peligros Potenciales y el plano de espesor de los estratos o Isopacas. En la figura II.1.9, se presenta un ejemplo de la información que se recaba con este equipo.

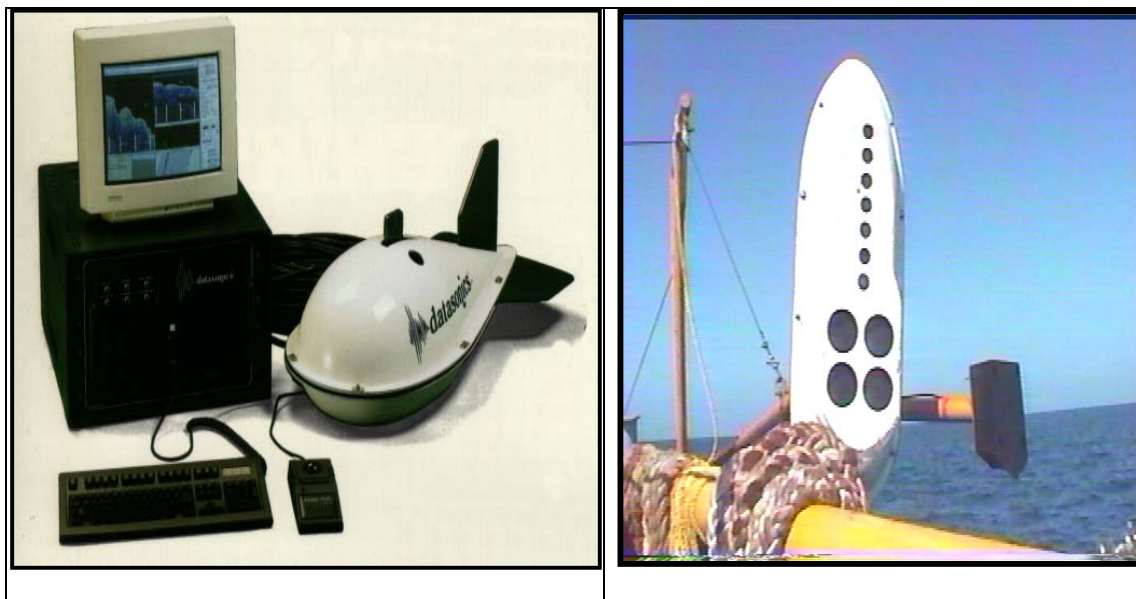


Figura. II.1.8 Sistema de Perfilador Acústico Somero.

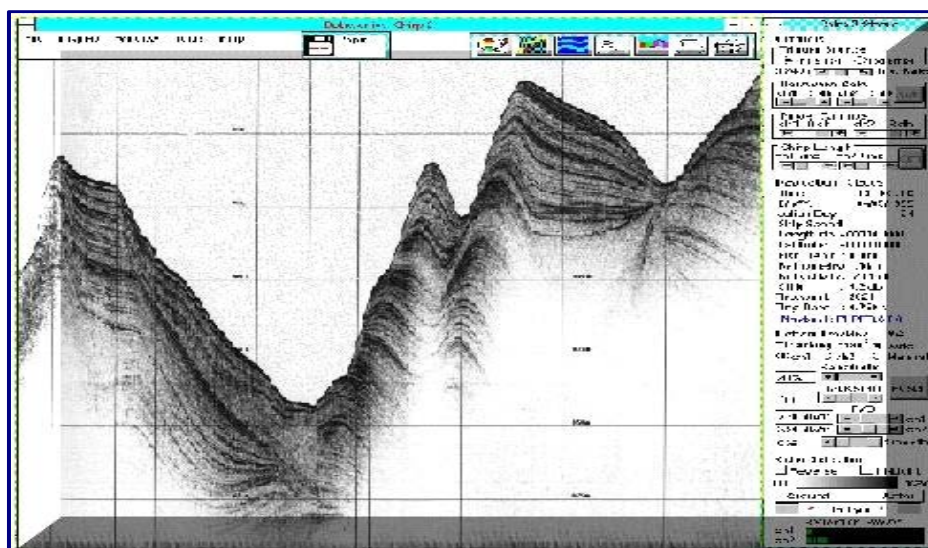


Figura II.1.9. Imagen obtenida del perfilador acústico somero.

**II.1.8. Sistema perfilador acústico profundo.**

Este tipo de registro acústico continuo, permite definir la geología estructural y estratigráfica del área, define las bolsas de gas y la actividad relativa de las fallas geológicas. La penetración es variable según el tirante de agua, la presencia de gas y la energía de la fuente sísmica; pudiendo alcanzar un segundo u 800 m. de información aproximadamente. Los registros se efectúan con el sistema de APPLIED ACOUSTIC en escala de tiempo, se logra graficar hasta 400 milisegundos y se registran en formato digital hasta un segundo. (Figura II.1.10).



Figura II.1.10. Equipo del Sistema Perfilador Acústico Profundo.

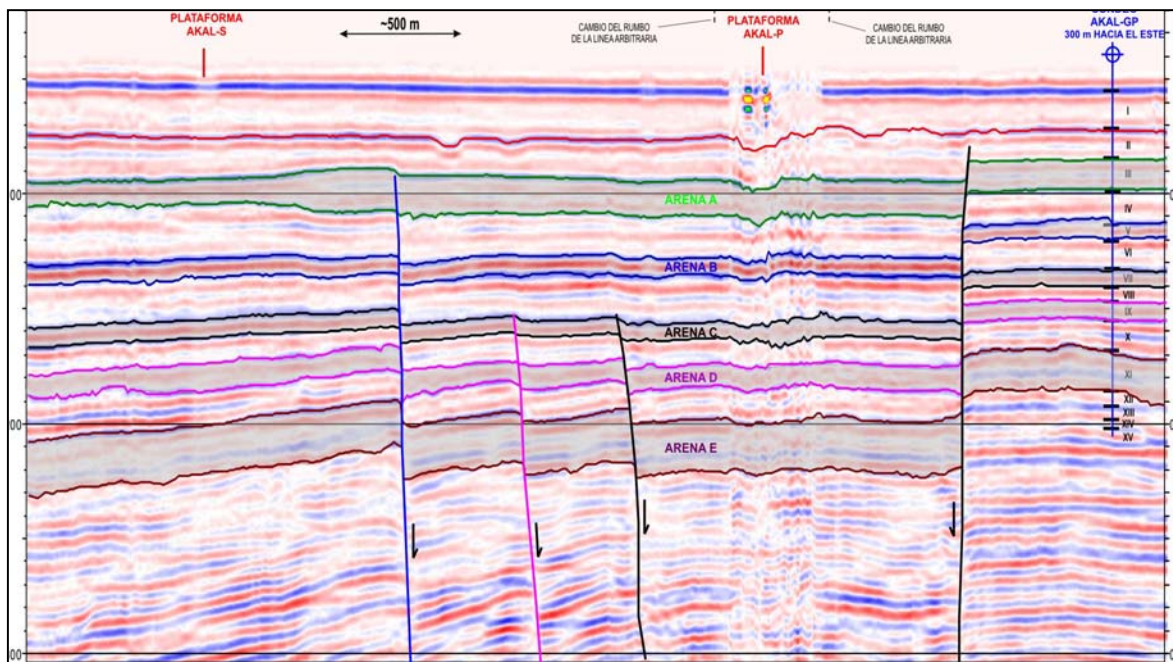


Figura II. 1.11. Registros obtenidos con perfilador profundo.



**II.1.9 Sistema muestreador de gravedad.**

Una vez concluida la exploración geofísica y terminada la interpretación y procesado de datos en campo para determinar los riesgos potenciales, se continúa con la toma de muestras del lecho marino.

Para la extracción de muestras del fondo marino se utilizan muestreadores de 3 y 6 m. de longitud tipo BENTHOS con revestimiento, la longitud de muestreo dependerá de las condiciones del suelo, para sedimentos cohesivos 4 m. y 3 m. en sedimentos no-cohesivos. Esta herramienta permite obtener muestras de suelo de alta calidad para caracterizar los sedimentos someros. El muestreador lleva un peso de 375 kg., en el interior del tubo de acero se introduce otro tubo de plástico transparente o de banquelita, con un pistón que provoca vacío, además presenta un sistema de gatillo activado por una pesa, el cual al llegar al lecho marino dispara el muestreador, (Figura II.1.12). Las muestras respectivas son selladas y transportadas al laboratorio en tierra. Cada sección es indicada con el área de levantamiento, el número de la muestra y la profundidad de la misma.

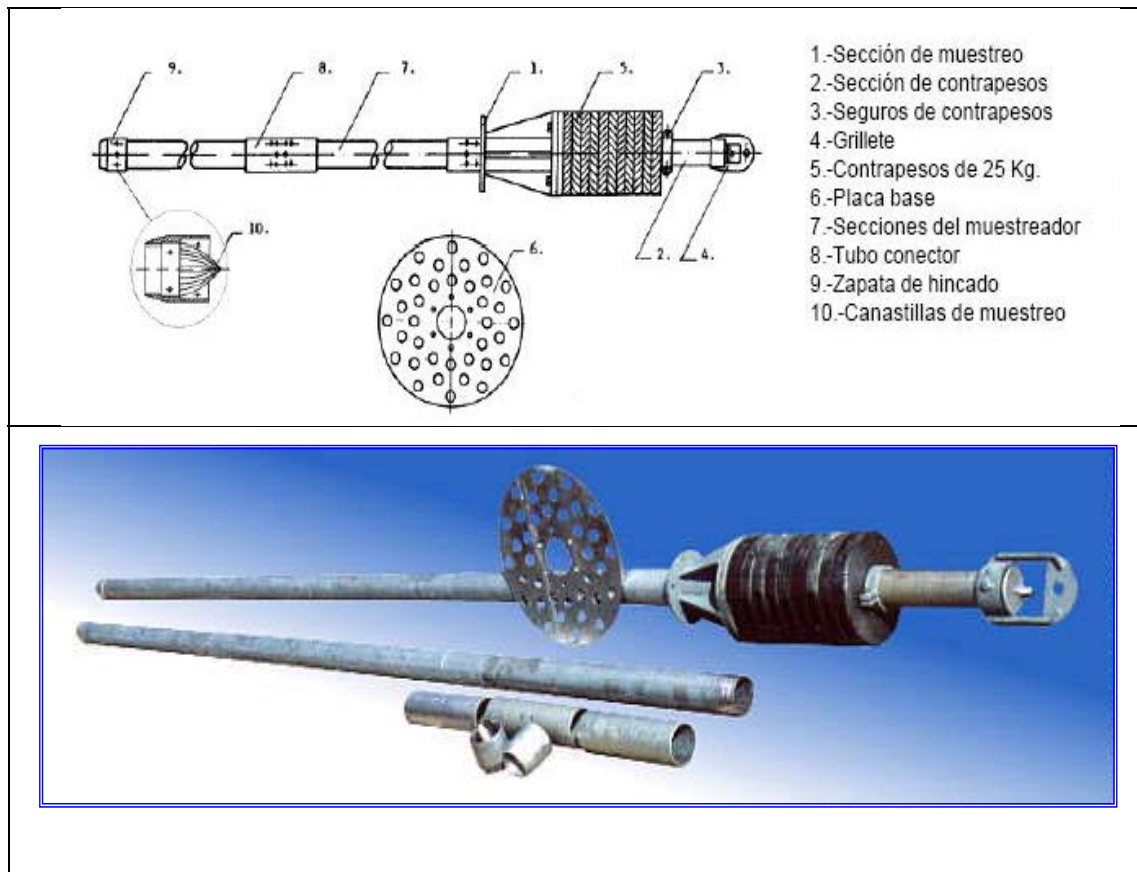


Figura II.1.12 Muestreo por gravedad.

## II.2. Retícula de recorrido.

Un levantamiento típico geofísico en aguas no muy profundas, se lleva a cabo en un área de 2.1 X 2.1 km. teniendo como centro la posible localización de la estructura marina. Las lecturas se realizan a lo largo de líneas primarias paralelas entre sí a 150 m orientadas en el sentido Norte - Sur o bien, en el sentido que marquen estudios anteriores cercanos a esa zona. Las líneas secundarias son ortogonales a las primarias y generalmente se encuentran espaciadas a cada 525 m. ( Figura II.2.1).

El recorrido de las áreas en estudio generalmente se lleva a cabo como se describe a continuación:

Se inicia en una de las líneas primarias del extremo de la cuadrícula en una dirección, terminando ésta, el barco recorre una distancia suficiente para no afectar el equipo y después vira para retornar y recorrer otra línea primaria en dirección opuesta, dejando una o dos líneas sin recorrer entre ellas, así sucesivamente hasta el otro extremo de la retícula, terminado este paso se continúa de la misma forma con las líneas faltantes. El recorrido se hace a una velocidad que varía entre los tres o cuatro nudos. Para las líneas secundarias se realiza el mismo procedimiento (Figura II.2.2).

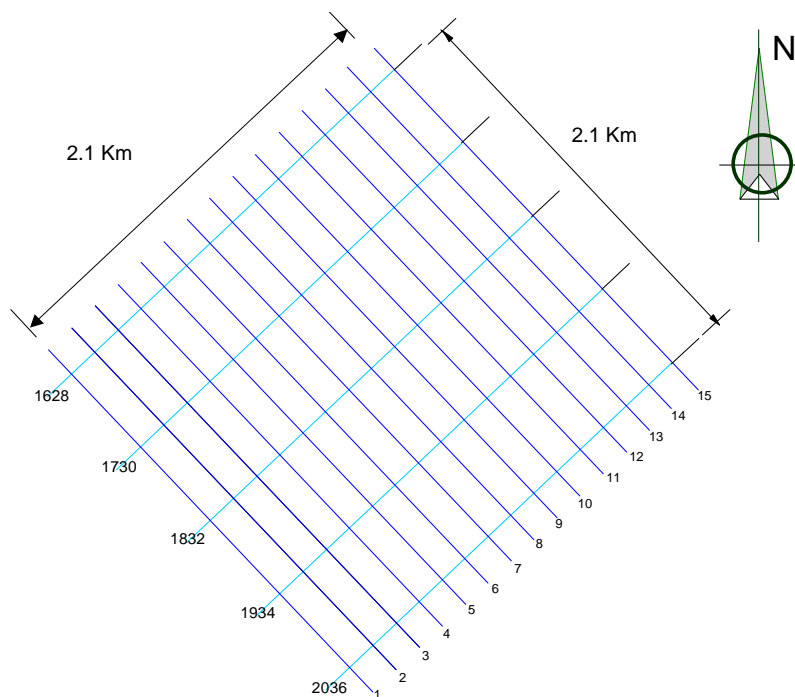


Figura II.2.1. Retícula de recorrido.

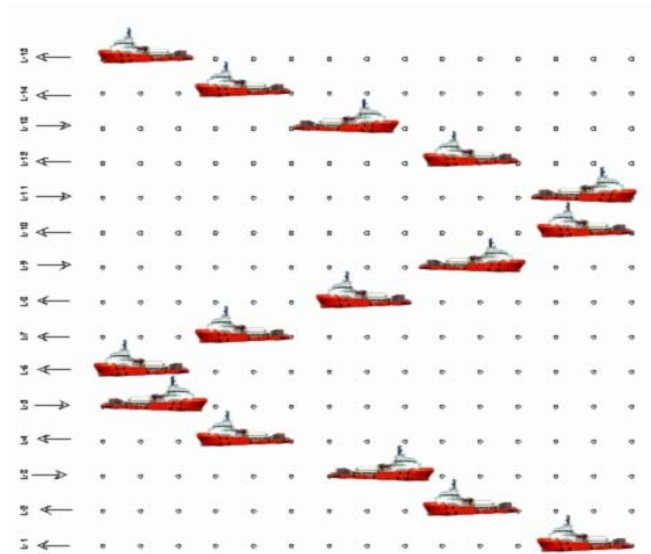


Figura II.2.2. Recorrido del Barco en la Cuadrícula

### II. 3 Levantamiento Geofísico.

El levantamiento geofísico consiste en una serie de actividades realizadas con los equipos antes mencionados. Se llevan a cabo dos tipos de exploración geofísica, la somera y la profunda:

- **Geofísica Profunda:** Parte de la Geofísica que auxilia a la geología en la detección de yacimientos, y riesgos geológicos profundos. Los resultados de la geofísica profunda dan evidencia de un posible manto petrolero, identifican los riesgos potenciales y el sitio más conveniente para la geofísica superficial; estos resultados se confirman posteriormente con un pozo exploratorio. (Figura II.3.1).
- **Geofísica Somera:** o de ingeniería; permite la detección de riesgos someros que podrían afectar la instalación de las estructuras; también permite obtener la estratigrafía y estimar las características físicas y morfológicas del fondo marino.

Ambos estudios se realizan simultáneamente desde el barco geofísico de la siguiente manera.

Con el sistema Sea Bird operando, se toman lecturas de conductividad, temperatura y presión en coordenadas específicas que permitan la determinación de la velocidad de sonido en el agua. Posteriormente, durante aproximadamente dos horas, con los datos obtenidos del velocímetro, se calibran los equipos: ecosonda, sonar de barrido lateral así como los perfiladores somero y profundo. En cuanto al perfilador profundo, se ajustan los equipos y periféricos que integran el sistema así como la intercomunicación entre ambos, se procede al tendido de aproximadamente 600 m. de hidrófonos y arreglo de dos pistolas de aire, de las cuales una es de respaldo, controlando su profundidad de operación bajo la superficie del mar con sistemas de flotación independientes.

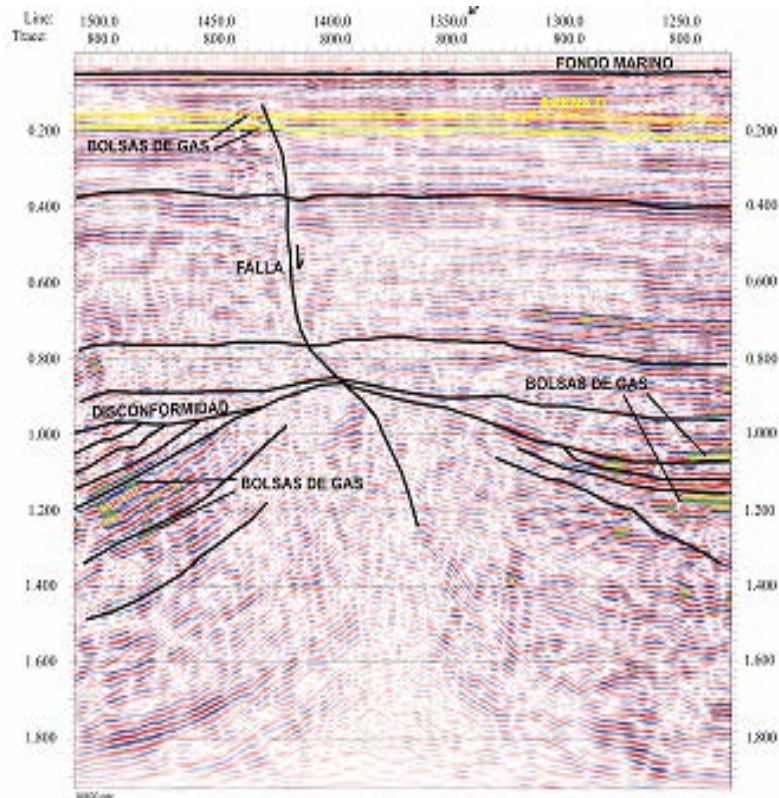


Figura II.3.1. Datos obtenidos de la Geofísica profunda.

Para evitar la interferencia de ruidos entre los diferentes equipos utilizados, se realizan dos recorridos en todas las líneas de la retícula: el primero operando de manera simultánea los sistemas medidor de profundidad, sonar de barrido lateral y perfilador somero, el segundo recorrido se lleva a cabo con los sistemas perfilador profundo y medidor de profundidad, marcando en todos los recorridos el número de línea, azimuth y puntos que marca el evento a cada 100 m y 12.5 m, para las líneas primarias y secundarias respectivamente. En ambos casos, se tiene control geográfico del sistema de posicionamiento GPS diferencial, controlado a través del programa de navegación y posicionamiento. De esta manera, se obtienen registros sísmico-acústicos o datos analógicos de los sistemas medidor de profundidad, sonar de barrido lateral y perfiladores somero y profundo. Adicionalmente, en el caso del perfilador profundo, los datos se procesan digitalmente para obtener registros de alta calidad que permiten identificar los eventos geológicos profundos relevantes que puedan representar un riesgo para la instalación de plataformas marinas fijas piloteadas.

#### II. 4. Muestreo del lecho marino.

Una vez concluida la exploración geofísica y terminada la interpretación y procesado de datos en campo para determinar los riesgos potenciales, se continúa con la toma de muestras del lecho marino por medio del muestreador por gravedad anteriormente descrito.

Para realizar el muestreo del lecho marino, el barco se posiciona en un punto predeterminado para tomar la muestra y se inician los preparativos para la operación del sistema de muestreo. A través de una estructura de acero instalada en la borda del barco, mediante un malacate se baja el muestreador de gravedad hasta una altura determinada del fondo marino. Posteriormente, se deja caer, alcanzando penetraciones que varían de 0.85 a 3.00 m. en suelos arenosos y de 4.00 m. en suelos arcillosos. Las muestras se recuperan en un tubo de plástico transparente, localizado dentro del barril de muestreo, evitando la salida de la muestra mediante canastillas colocadas en la punta de la zapata de hincado, que se cierran una vez que el espécimen es atrapado. Una vez que se obtiene la muestra, el equipo de muestreo se recupera hasta la cubierta del barco, colocándola en posición horizontal para poder extraer el tubo de plástico, (Figura II.4.1). A bordo del barco, a las muestras se les practica ensayos de torcómetro, veleta de bolsillo, penetrómetro de bolsillo, descripción visual y al tacto, y estimado de carbonato. Posteriormente en el laboratorio en tierra se determina el contenido de humedad y porcentaje de carbonatos en todas y cada una de las muestras obtenidas.

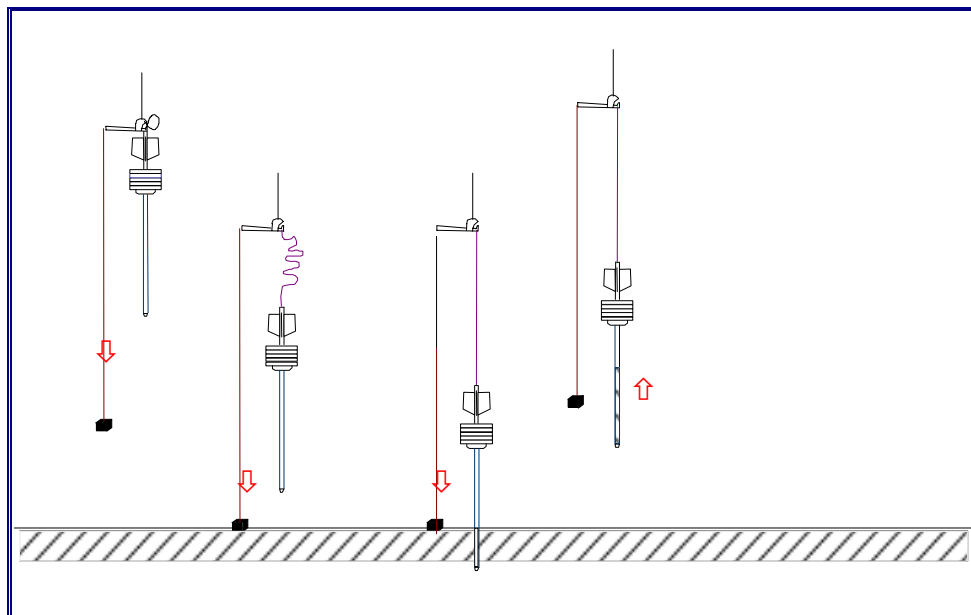


Figura II.4.1. Procedimiento del muestreo del lecho marino.

#### II.5. Eventos sobre el lecho marino.

Con el sistema sonar de barrido lateral (mapeo del lecho marino), se determinan los eventos o anomalías que presenta el lecho marino, entre los cuales se encuentran:

II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

---

- Fallas geológicas,
- Formaciones coralíferas,
- Erosiones,
- Depresiones,
- Montículos,
- Canales enterrados,
- Manifestaciones superficiales de gas,
- Cambios litológicos,
- Eventos artificiales (condiciones causadas por el hombre, etc.

Para determinar los eventos que se encuentran en el área de estudio, el supervisor geofísico de la empresa que realiza los trabajos de campo, a bordo del barco revisa los datos geofísicos y efectúa una interpretación inicial que le permite elaborar mapas preliminares, incluyendo las características más importantes de estos eventos en el sitio.

En el análisis de la información que proporcionan los equipos, se considera de suma importancia la elección de las frecuencias en cada uno de ellos, la longitud de onda y la energía de la señal para determinar la relación existente entre el objetivo (evento en el lecho marino) y el medio de estudio. Cuando la onda se refleja una sola vez, se trata de una reflexión primaria, en cambio, si después de reflejarse una o varias veces apareciendo con la misma forma, se dice que es una reflexión múltiple. Este fenómeno de repetición es provocado por la interfase de medios de diferente densidad, como lo son: fronteras agua-aire, agua-suelo, suelo suelto con lecho rocoso, etc.

Las fallas, formaciones coralíferas, erosiones, depresiones, montículos, y canales enterrados, son identificados por la forma de la señal y la discontinuidad o pérdida mínima dentro del registro; por ejemplo, algunas veces las formaciones coralinas pueden detectarse por su alta transparencia acústica o por las señales múltiples que producen y que se presentan en las capas que subyacen de estas formaciones, (Figura II.5.1).

El gas metano es comúnmente encontrado en el subsuelo de la Sonda de Campeche, esta asociado con fallas, fracturas y disperso en el área sedimentaria, o bien, se encuentra localizado en lentes de arena. El efecto que la presencia de gas tiene en los registros sísmicos, es el incremento de la atenuación acústica debido a la absorción de energía por las burbujas de gas, o bien, la dispersión de la señal sísmica debido al movimiento de las mismas burbujas. El gas disperso afecta las bajas frecuencias causando reflexiones borrosas o inconsistentes; las zonas aisladas de gas se manifiestan en los registros por áreas de reflexión de gran amplitud llamadas "puntos brillantes" (*Ref. 2*), estas áreas están sujetas a un exceso de presión por los suelos circundantes lo cual es causado por la expansión de las burbujas de gas dentro de los sedimentos contenedores de gas, (Figura II.5.2).

En cuanto a la determinación de los cambios litológicos, el mismo tipo de señal sonora va delimitando las diferentes unidades estratigráficas. Para identificar con certeza las características litológicas es necesario auxiliarse de la información geológica y geotécnica disponible del área en estudio o de áreas cercanas y calibrar los datos obtenidos del equipo geofísico con los resultados de la exploración geotécnica. Como resultado del análisis litológico, se genera el plano de isopacas, donde

II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

se presentan la distribución de los estratos encontrados en el sitio, (Figura II.5.3). Se conocen como isopacas a las líneas que unen a los puntos de igual espesor de cada unidad estratigráfica. Finalmente los eventos artificiales se observan en los registros del perfilador somero y del sonar de barrido lateral, en donde se logran apreciar tuberías, embarcaciones hundidas, plataformas, etc.

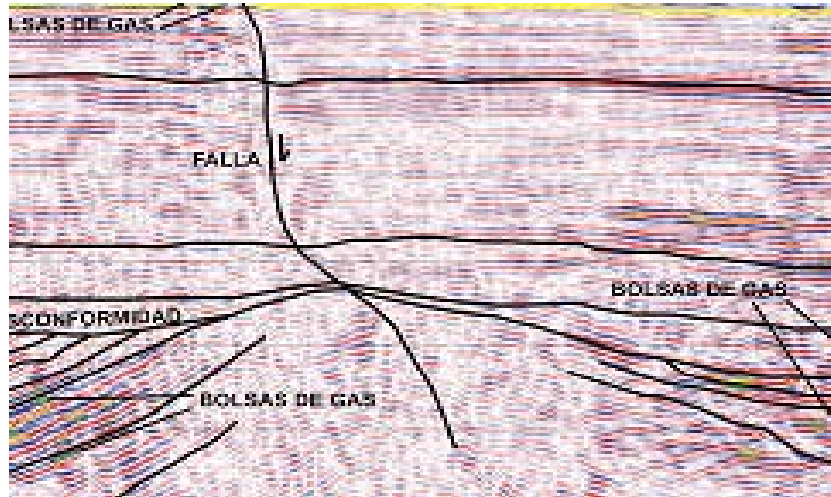


Figura II.5.1. Fallas Geológicas.

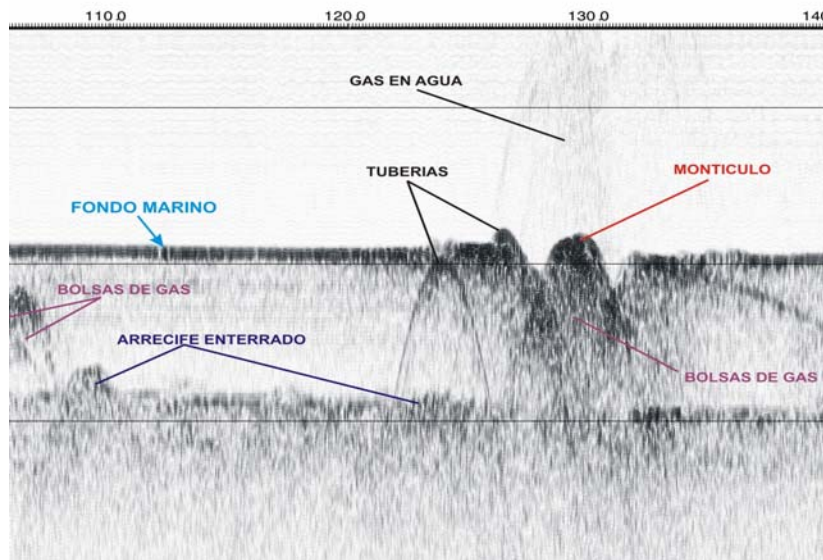


Figura II.5.2. Bolsas de gas y montículos.

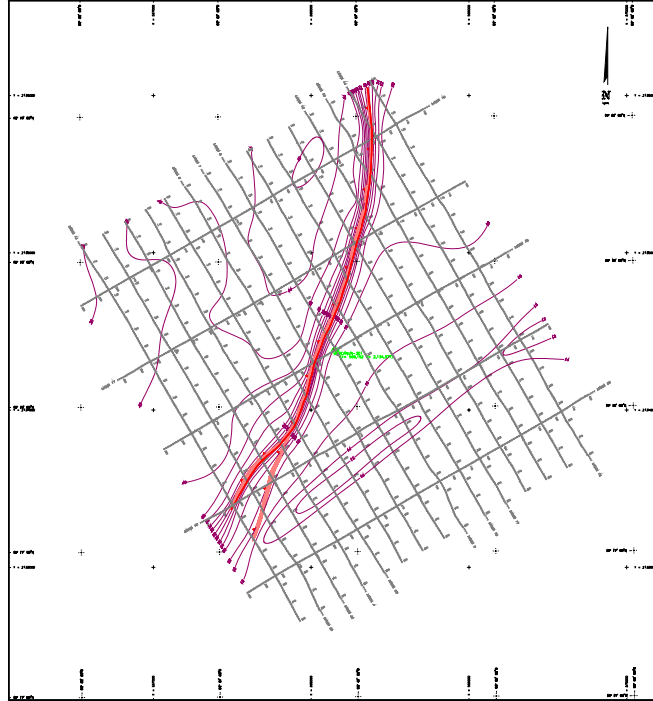


Figura II.5.3. Plano de Isopacas.



### II.6. Geología estructural.

La Bahía de Campeche es la extensión marina que corresponde a una porción de Sedimentación del Sureste de México, formada por una región de domos salinos que son una prolongación de mar adentro de la Cuenca Salina del Golfo de México. Esta zona salina emerge hacia el noreste con domos y lomeríos en la Cuenca profunda de la parte central del Golfo de México.

La geología estructural de la Sonda se ubica en el marco geológico regional cuyos elementos tectónicos son principalmente la Plataforma Yucatán y el Macizo de Chiapas y en segundo término la Cuenca de Comalcalco y el Cinturón Calcáreo plegado de Reforma - Akal.

La Plataforma de Yucatán está compuesta de rocas calcáreas mesozoicas y terciarias que parecen haber permanecido estables desde el Cretácico. Su relieve actual es casi horizontal y exhibe el fenómeno de erosión cárstica. Las cuencas de Macuspana y Comalcalco están compuestas por gruesos apilamientos de sedimentos terciarios. Estas se separan del Cinturón Calcáreo de Reforma- Akal por sendas fallas normales contemporáneas a la sedimentación.

La columna estratigráfica que se muestra en la Figura II.6.1 es el resumen de la información recabada en la Sonda de Campeche mediante perforaciones directas hasta el jurásico, más allá de los 4 100 m. el complemento de esta columna se dibujo de la información de perforaciones de pozos en el continente. (Ref. 1)

- Paleozoico. En esta era se desarrollaron importantes plataformas calcáreas. Las rocas penetradas en los pozos de la Península de Yucatán y son rocas metamórficas, particularmente esquistos.
- Mesozoico. Estas rocas son muy importantes ya que son las principales productoras y generadoras de hidrocarburos, principalmente las jurásicas.
  - Triásico. Este periodo está representado por una secuencia de capas compuesta por limolitas y areniscas rojas de grano fino a muy fino, que ocasionalmente contienen algunas gravas de cuarzo y granos gruesos de arena cuarzosa.
  - Jurásico. En este periodo se depositaron terrígenos en las fajas litorales, calizas y dolomías en las plataformas marinas y sedimentos arcillosos en las cuencas. En la Sonda, el Jurásico Superior Oxfordiano está constituido por lutitas y escasas calizas en su parte superior y por areniscas de ambiente litoral impregnadas de aceite en su parte inferior. El Kimmeridgiano por rocas calcáreas particularmente dolomías, calizas y limolitas.
  - Cretácico. Se ha encontrado que las rocas de esa época se depositaron en un ambiente de plataforma y estuvieron sujetas a proceso de dolomitización. Actualmente constituyen importantes yacimientos ya que están impregnadas de aceite ligero.
- Cenozoico Terciario. Esta constituido de brechas compuestas de fragmentos de rocas calcáreas derivadas de calizas cretácicas y en menor proporción de rocas calcáreas del

II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

Paleozoico que fueron depositadas en un ambiente poco profundo. Esta brecha constituye también un yacimiento importante de hidrocarburos en la Sonda de Campeche.



Figura II.6.1. Columna estratigráfica de la Sonda de Campeche

**II.6.1 Características litológicas de la Sonda de Campeche.**

La litología del piso marino en la Sonda de Campeche abarca desde el río Grijalva, hasta el río Champotón, con sedimentos terrígenos, arcillas y limos producto de la descarga de sedimentos de los ríos y de la Laguna de Términos, el porcentaje de carbonatos en la zona es variable, desde 0 a 50% en la zona Suroeste hasta más de 75 % en la zona Norte en los límites orientales de la Sonda de Campeche. (Figura II.6.2).

Al Norte del río Champotón, en la zona conocida como Banco de Campeche, el tirante de agua en la plataforma tiene un promedio de 40 m (131.23 ft), mostrando una suave pendiente, básicamente está cubierta de sedimentos carbonatados, y en algunos lugares encontramos desarrollos de arrecifes calcáreos.

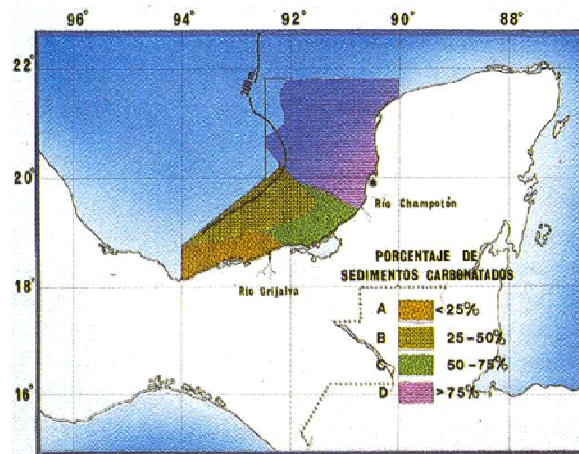


Figura II.6.2. Distribución porcentual de sedimentos carbonatados en la Sonda de Campeche.

En la Sonda de Campeche se han realizado exploraciones geofísicas y geotécnicas que permitan definir tanto los eventos sobre el lecho marino como la estratigrafía existente. La mayoría de los sitios explorados se localizan frente a la costa de Ciudad del Carmen, en ellos los sedimentos están formados por aproximadamente 10.0 m. de arenas densas que sobreyacen a suelos arcillosos de consistencia firme a dura. Mar adentro, los sedimentos superficiales se componen de arcillas con alto contenido de agua y cuya consistencia varía de muy blanda a blanda. Hacia el Norte de la localización Zinic 1, (Figura II.6.1), estas arcillas sobreyacen a una arena carbonatada fina a media, de compacidad densa. El espesor de las arcillas superficiales es de más de 25.0 m. en la parte suroeste y se reduce hacia en Norte y Este. Algunos sondeos han mostrado la presencia de aproximadamente 10.0 m. de material carbonatado cementado, asociado aparentemente con los crecimientos de coral. Hacia el Norte del área Ku y CEEH-1, donde las arcillas reducen su espesor, se encontraron remanentes de estos arrecifes de coral expuestos sobre el lecho marino. A continuación de la arena carbonatada se tiene una secuencia alternada de unidades de arena y arcilla.

Por otra lado, el fondo marino presenta una granulometría representada por arenas carbonatadas de grano fino, medio y grueso, con grados de clasificación que van desde bien graduadas hasta uniformes o mal graduadas

Las exploraciones geofísicas que se han realizado a lo largo de la Bahía de Campeche han demostrado la presencia de las siguientes formaciones:

- Arrecifes de coral. Los arrecifes de coral han sido observados a lo largo del estrato de arena carbonatada a través de la mayor parte del área explorada. Se encuentran distribuidos aleatoriamente y forman bancos y montículos de 3.0 a 5.0 m de elevación sobre el estrato de

II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

---

arena carbonatada. El desarrollo normal de los arrecifes coralinos es en una temperatura no menor a 20°C, en profundidades variables de 40 a 50 m.; con salinidad normal de 35% y en aguas claras donde exista un fondo rocoso para su desplante. Por todas estas razones, las formaciones coralinas generalmente están localizadas en la franja ecuatorial de la Tierra y excepcionalmente en aguas que propicien estas condiciones mediante la alimentación de alguna corriente, como es el caso del golfo de México y en particular de la Bahía de Campeche. De la habilidad para limitar estas anomalías se hace posible la efectividad para determinar las rutas mas adecuadas para el tendido de tuberías así como la localización definitiva de las plataformas.

- Fallas y plegamientos. En la Sonda de Campeche existe un sistema de fallas normales escalonadas y plegamientos con orientación NE-SO, producto de la compactación de los sedimentos que se han ido depositando desde el Terciario y Cuaternario hasta el presente. Los desplazamientos totales ocasionados por estas fallas varían de menos de 1.0 m. hasta aproximadamente 50.0 m. hacia la costa, las fallas se hacen progresivamente mas profundas afectando pocas veces a los estratos que se localizan en los primeros 75.0 m. debajo de la superficie. La mayoría de estas fallas no han presentado actividad alguna en épocas geológicas recientes.
- Acumulaciones de gas. Como ya se menciona con anterioridad, por métodos de exploración sísmica es posible delinear en un registro geofísico, las anomalías ocasionadas por acumulaciones de gas, tanto superficiales como relativamente profundas. El origen de la mayor parte del gas concentrado en la Sonda es aparentemente del tipo biológico, es decir, formado por la descomposición de materia orgánica dentro de los sedimentos superficiales no consolidados. La importancia de las acumulaciones someras de gas se debe a la disminución de que estas ocasionan en la resistencia al corte de los sedimentos, originada por la existencia de burbujas de gas en los espacios de agua intersticial. Las anomalías relacionadas con acumulaciones profundas de gas pueden presentar zonas con una mayor presión hidrostática, por ello, en las operaciones de perforación a través de este tipo de anomalías profundas requiere de lodos de mayor densidad.
- Paleocanales y superficies erosionadas. En el Pleistoceno ocurrió un descenso del nivel del mar que dio lugar a que corrientes y ríos atravesaran las zonas que hoy en día constituyen las plataformas continentales de la Tierra. Los remanentes de estos antiguos sistemas de drenaje son estructuras de corte y relleno denominados paleocanales, los cuales se localizan en la parte sureste de la Sonda. Las superficies erosionadas se localizan a 1,500 m mar adentro del puerto de Dos Bocas y se han producido por fenómenos de oleaje o bien por el efecto de arrastre de las corrientes profundas.

### II.6.2 Características dinámicas del suelo.

El comportamiento de los suelos al recibir cargas estáticas es siempre complejo, ya que las leyes que rigen las relaciones de esfuerzo-deformación no son lineales. Además de que los suelos constituyen un medio heterogéneo, cuyo comportamiento esta normado por una ley matemática, dependiente de un gran número de parámetros.

Ahora bien, cuando se trata de cargas dinámicas, que además de ser función del tiempo son cargas cíclicas reversibles, se generan diagramas de esfuerzo-deformación de carácter no lineal, para las cuales se han buscado representaciones diversas, utilizando expresiones matemáticas que se aproximen a las curvas obtenidas en series de pruebas de diversos suelos, pruebas que en la mayoría de los casos se refieren a deformaciones producidas por esfuerzo cortante, dado que este tipo de esfuerzos es el que mas se aproxima a los esfuerzos que se inducen en la masa de los suelos por un terremoto. Se conoce que un terremoto induce esfuerzos de cortante simple, caracterizado por una serie de esfuerzos con variantes en cuanto a frecuencia y amplitud se refiere.

- *Amortiguamiento.* El amortiguamiento proporciona una medida de las características disipadoras de la energía del suelo. Bajo carga sísmica el amortiguamiento resulta principalmente de efectos friccionantes no lineales, conocidos como histéresis, al deslizar entre si las partículas mineralógicas. El amortiguamiento crece rápidamente con la deformación, pero para deformaciones mayores el crecimiento se desacelera. Se puede concluir que a mayor desplazamiento (deformación) en el suelo (sin alcanzar la falla), mas alto el amortiguamiento.
- *Respuesta Dinámica del Subsuelo.* La respuesta sísmica del subsuelo así como sus propiedades dinámicas son importantes para el cálculo de la interacción de la superficie de apoyo de la estructura de cimentación con el suelo. La respuesta dinámica del subsuelo esta gobernada por su geometría, es decir el espesor del subsuelo y el de sus diferentes estratos y por sus propiedades mecánicas, concretamente el módulo dinámico de cortante y las propiedades de propagación, que están sintetizadas en el número de onda que relaciona la frecuencia con la velocidad de onda.
- *Velocidad de Onda.* Se puede decir que la velocidad de onda depende de la rigidez del medio; la rigidez del medio puede estar decisivamente afectada por la deformación y por lo tanto para sismos muy intensos, la velocidad ondulatoria en la zona epicentral deberá variar de manera apreciable.
- *Cambios de Volumen.* Cuando una masa de suelo se ve afectada por la acción de un sismo intenso sus partículas sufren deformaciones que implican cambios de volumen. Como el módulo volumétrico del agua es elevado, el cambio de volumen no puede ocurrir en el agua, sino que debe de ocurrir en el esqueleto mecánico que resulta más compresible y más susceptible a acomodarse.
- *Amplificación en Subsuelos.* El efecto de la amplificación es un problema más claramente establecido en subsuelos blandos de gran espesor y con características de esfuerzo contra deformación bastante particulares, complementadas por una baja capacidad de amortiguamiento específico. En aquellos subsuelos duros y de menor espesor, la amplificación y modificación frecuencial se observa menos.

### II.6.3 Riesgo sísmico en la Sonda de Campeche

Un sismo es el movimiento de la corteza terrestre y puede ser a causa de múltiples fenómenos como tectonismo, volcanismo, una explosión nuclear, etc. Interesan los sismos de origen tectónico por su magnitud, intensidad y frecuencia; el proceso de generación de este tipo de sismos originados por las grandes presiones y temperaturas que hay a gran profundidad en el subsuelo que originan el flujo del material. Dichos movimientos originan ondas de energía las cuales se propagan, se refractan y se reflejan causando el movimiento de la corteza.

En la Sonda de Campeche fue hasta 1978 cuando se realizó el primer estudio de riesgo sísmico en el trabajo "Espectros de Diseño en Paraíso Tabasco y Cd. del Carmen Campeche", realizado por el Dr. Luis Esteva y el Ing. Rubén Guerra. En esa época no se tenía mucha información sobre las estadísticas geotécnicas de la zona, así que se basaron en datos estadísticos de registros instrumentales de magnitudes y coordenadas focales de eventos reportados en catálogos como el de Figueroa (1970), Rothe (1955) y Sandoval (1975).

Los aspectos más importantes en este primer estudio son:

- La selección del periodo de recurrencia de diseño en base a estudios costo-beneficio.
- Para los tipos usuales de estructura triangulada de acero ó concreto se recomienda tomar el factor de comportamiento sísmico  $Q = 2$ .

Se consideraron 2 espectros de diseño sísmico para periodos de recurrencia de 50 y 100 años con porcentajes de amortiguamiento de 2% y 5%.

El segundo estudio de riesgo sísmico se hizo para incorporar al primero dos sitios de la zona marina: Cayo Arcas y el campo petrolero Akal, y fue realizado por R. Guzmán y J. Sandoval. El efecto dominante en el estudio fue el sismo cuyo espectro resultó demasiado severo, lo cual condujo a una estructura de gran peso y costo, por esta razón se llevo a cabo otro estudio.

De esta forma se realizó un tercer estudio por el Dr. Mario Chávez, llamado "Análisis de Riesgo sísmico en varios sitios de la Bahía de Campeche" en 1989. Estudio que tuvo el propósito de actualizar los estudios anteriormente mencionados, así como el de tomar en cuenta las condiciones locales del sitio, lo cual es muy importante ya que dichas condiciones del suelo pueden amplificar un evento sísmico.

Con esta información y de acuerdo a que no existe información sismológica de los sitios de interés, se supuso que los acelerogramas obtenidos en Minatitlán Veracruz modificados por efectos locales y distancias, representan en forma aproximada los efectos de actividad, duración del movimiento del terreno, y amplitud de dichos movimientos de los acelerogramas que se esperan en la Sonda de Campeche. Las hipótesis anteriores se tomaron debido a lo siguiente:

- Que desde el punto de vista geológico la Sonda de Campeche y la zona donde se localiza Minatitlán pertenecen a la misma estructura geológica.

II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

- En el aspecto sismo-tectónico ambas regiones se ven afectadas por las mismas fuentes sísmicas aunque a diferentes distancias entre el sitio y la fuente.

La realización de los espectros de diseño para la Sonda de Campeche concluyó en dos espectros, con un periodo de retorno de 100 años y con probabilidad de excedencia de 23% y una vida útil de 25 años, el otro espectro es para un periodo de retorno de 3,980 años con una probabilidad de excedencia de 1% y una vida útil de 40 años. Las condiciones locales se incluyen con modelos de propagación que permiten incorporar las propiedades dinámicas de los suelos. Para el análisis sísmico que se realiza en las plataformas marinas fijas de la Sonda de Campeche, la Norma NRF-003 de PEMEX ultima versión, establece el siguiente espectro de diseño:

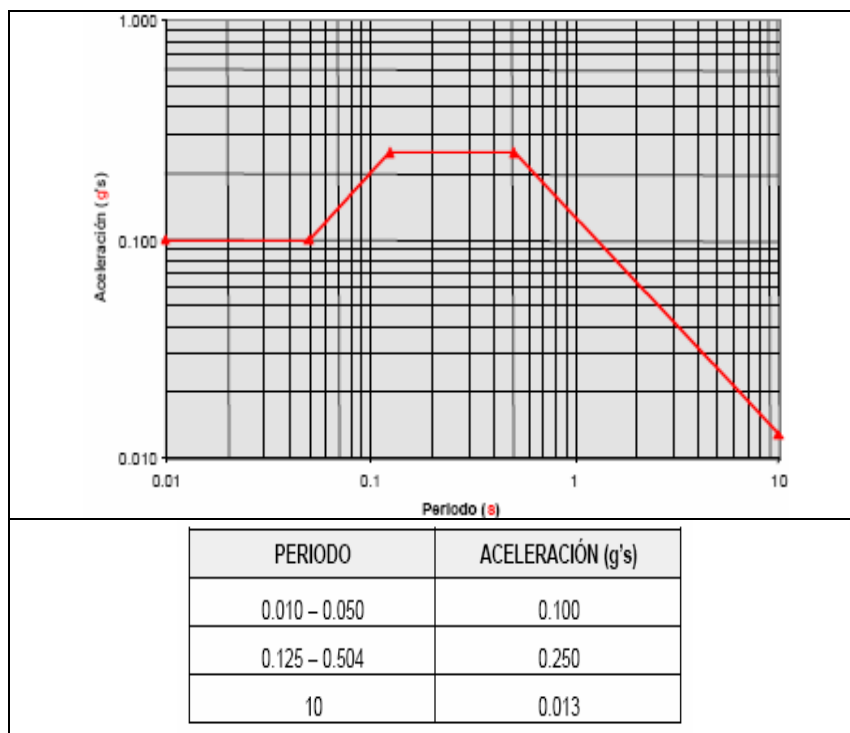


Figura II.6.3. Espectro de diseño a nivel de resistencia (100 años de periodo de retorno)

Como se observa en la Sonda de Campeche se han realizado pocos estudios de riesgo sísmico de donde se ha determinado que la acción de diseño predominante ha sido oleaje y viento. Es por ello que actualmente se intentan realizar más trabajos al respecto, con la idea de instrumentar estructuras de la zona.

### II.7. Riesgos potenciales.

Un riesgo potencial puede definirse como un "rasgo geológico" el cual tiene el potencial para desarrollar un daño incontrolado a cualquier tipo de instalación costa afuera.

Los eventos naturales y artificiales que presentan un riesgo para las instalaciones nuevas y/o existentes, mencionados con anterioridad (*Sección II.5*), se representan al usuario en un plano de riesgos potenciales, sin importar que estos eventos se registren sobre el lecho marino o por debajo de él. Este plano es de gran importancia para la ingeniería porque permite discriminar o clasificar zonas del tendido de líneas nuevas, perforación de pozos y cimentación de plataformas determinando la localización más segura para su operación.

Por ejemplo, para un sitio estudiado de la Sonda de Campeche, se encontraron los siguientes riesgos geológicos:

- Barras de Arena Se identificaron barras de arena en el sector central y sureste del área (Figura II.7.1). Estos depósitos de arena presentan rumbo noreste-suroeste y alcanzan anchos de hasta 200 m, y se encuentran enterrados entre 9 m y 15 m.
- Bolsas de Gas. Se identificaron varias anomalías de amplitud en los datos sísmicos que se interpretan como posibles bolsas de gas (Figuras II.7.2). Las posibles bolsas de gas se encuentran en cuatro niveles: en el intervalo entre 45.0 m. y 80.0 m., entre 120.0 m. y 250.0 m., entre 260.0 y 335.0 m., y entre 420.0 m. y 560.0 m. debajo del fondo marino. Todas las bolsas de gas que se encuentran en el sector central norte y sur, y en el oeste del área de levantamiento. Estas están atrapadas dentro de depósitos arenosos y asociadas a las fallas enterradas. Se estima que el gas podría ser de origen termogénico que ha migrado hacia arriba a lo largo de las fallas. La bolsa de gas más cercana al sitio propuesto se encuentra a una distancia de aproximadamente 485 m hacia el oeste y enterrada a aproximadamente 50.0 m. debajo del fondo marino.
- Fallas Enterradas. Se identificaron fallas geológicas en el área de levantamiento (Figura II.7.2). Estas fallas tienen tendencia general del norte hacia el sur, y sus desplazamientos descendentes son hacia el oeste. Las fallas se encuentran enterradas entre 4.5 m. y 55.0 m. debajo del fondo marino. No se identificaron desplazamientos del fondo marino asociados con las fallas. Se infiere que las fallas son inactivas y creemos que no son riesgosas para la perforación de pozos o la instalación de plataformas en el sitio propuesto. Las fallas probablemente son rutas para la migración de gas de los suelos profundos hacia los suelos más someros. (Ref. 3)



II. ESTUDIOS PRELIMINARES.

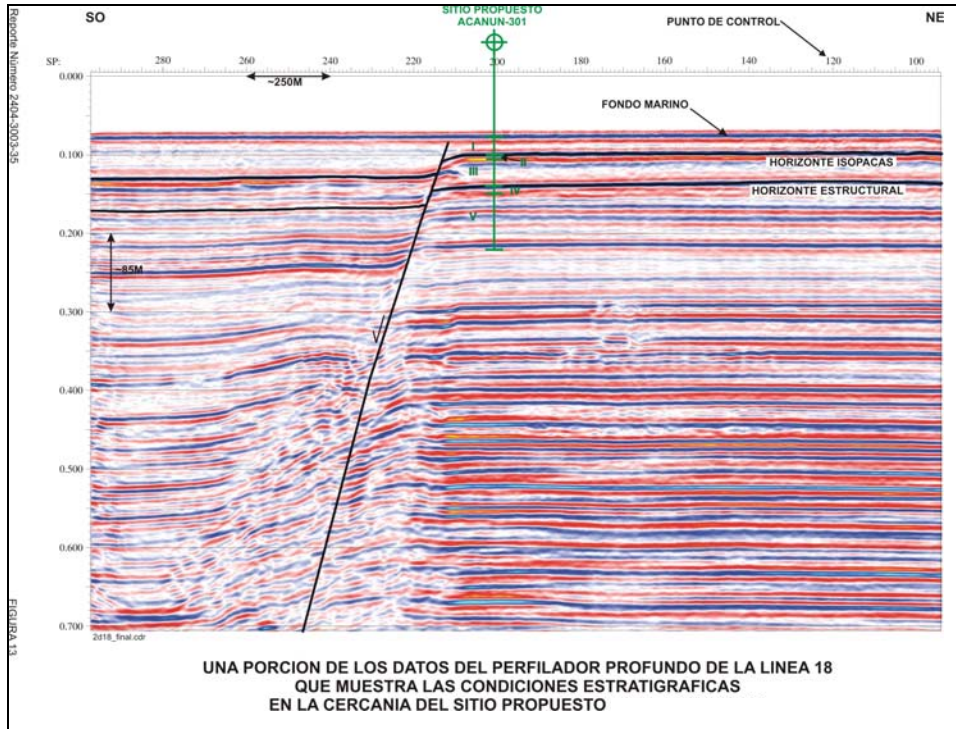


Figura II.7.1. Capa de arena encontrada en sitio

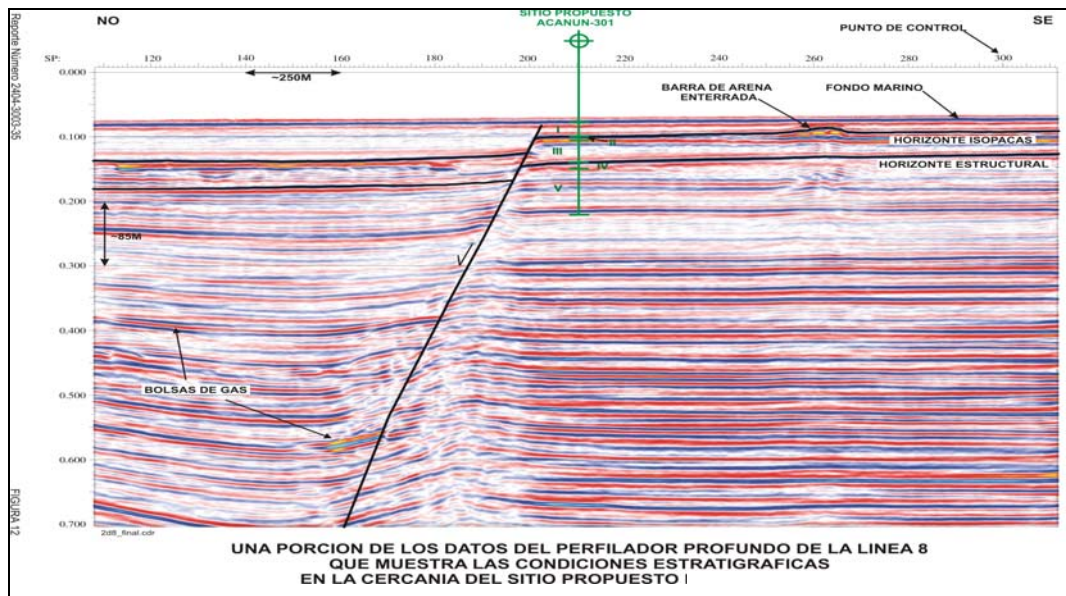


Figura II.7.2. Bolsas de gas y falla geológica.



# ESTUDIOS DEFINITIVOS.

### III. ESTUDIOS DEFINITIVOS.

Una vez finalizados los estudios geofísicos y analizar los riesgos potenciales que se encontraron, se determina el sitio exacto donde se realizaran los estudios definitivos conocidos también como estudios geotécnicos. Para realizar tanto la exploración geofísica como geotécnica, se debe seguir una normatividad, la norma que rige estos estudios y en general el diseño de las estructuras fuera de la costa es el American Petroleum Institute, API- RP-2A-WSD en su última edición.

#### III.1. Estudios Geotécnicos.

El objetivo básico de los estudios geotécnicos, es proporcionar al diseño de las cimentaciones los parámetros de resistencia y deformabilidad que los suelos presentan cuando se sujetan a cargas permanentes o transitorias. La mayoría de las actividades se realizaron sobre una embarcación equipada con un sistema de estabilidad adecuado, instalaciones para la estancia del personal a bordo, equipo de perforación, herramientas para muestrear, equipos para realizar pruebas en el sitio y un laboratorio de Mecánica de Suelos para la obtención de parámetros preliminares in situ. (Figura III.1.1).

La exploración geotécnica, consiste en la ejecución de sondeos en cada sitio definido hasta una profundidad promedio de 120 m. (393.70 ft.) bajo el lecho marino. La localización de los sitios seleccionados es proporcionada por PEMEX en coordenadas UTM.

En la sección del API- RP-2A-WSD-2000 referente a planeación, diseño y construcción de plataformas fijas fuera de la costa, se especifica que la exploración del subsuelo marino debe incluir una perforación con muestreo y ensaye de los suelos en el estado menos alterado posible. En particular, los estudios geotécnicos para estructuras cimentadas mediante pilotes, deben proporcionar la información necesaria para trazar las curvas carga-desplazamiento (p-y), correspondientes a la resistencia lateral y para determinar la capacidad axial a la compresión y a la tensión de los pilotes.



Figura III.1.1 Embarcación Geotécnica.

**III.1.1 Sistema de posicionamiento.**

La embarcación geotécnica, cuenta con un sistema automatizado de posicionamiento dinámico que le permite mantener su posición sobre la localización de perforación sin requerir la utilización de anclas. El posicionamiento se llevó a cabo usando el Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) y un programa sofisticado de navegación para interpretar los datos de posicionamiento.

**III.1.2 Medición del tirante de agua.**

En la práctica, es recomendable medir el tirante de agua por varios métodos, esto debido a que el movimiento del barco y la topografía irregular del lecho marino provocan que algunas veces se registren puntos de mayor o menor elevación arrojando un dato erróneo del tirante. A continuación se explican algunos métodos utilizados en la práctica:

1. Un peso de sonda. En este método se emplea un peso de sonda el cual consiste en una masa sólida de 59.0 Kg. aproximadamente atada a un cable guía, cuenta con un cortador Canvis que se conecta al cable; el peso se baja a través de la escotilla de perforación hasta que haga contacto con el lecho marino. Con este procedimiento se tiene una medida inicial del tirante de agua.
2. Un sensor eléctrico de fondo. Para lograr una medida más precisa del tirante de agua se emplea un sensor de fondo, este sensor es un aparato eléctrico que se opera con un cable eléctrico y que encaja en la barren. En este método la sarta de la tubería se baja al lecho marino basado en el tirante de agua inicial medido con el peso de la sonda, cuando el sensor de fondo toca el fondo marino, una señal eléctrica se recibe en la cubierta de perforación y el tirante de agua se registra como la longitud de la sarta debajo del agua. Los tirantes obtenidos con el sensor se corrigen por la variación de mareas al nivel medio del mar (NMM) y posteriormente se registran en el reporte.
3. Los tirantes obtenidos con estos dos métodos se verifican con la primera muestra recuperada del sondeo donde el contador del cable-guía se utiliza en conjunto con el muestreador de doble tubo para obtener la primera muestra. Antes de reiniciar el sondeo para la toma de la segunda muestra se mide el tirante de agua usando el sensor de fondo.

**III.1.3 Sistema de perforación.**

El principal sistema de perforación utilizado en la exploración es el denominado cable-guía, éste emplea barras y brocas huecas que permiten el paso del barril muestreador, de las veletas o cualquier aparato de medición en su interior, sin mover el resto del equipo (Figura III.2). Cuando este equipo se opera en el mar, el lodo de perforación no se recircula, se pierde en el momento que sale de la tubería. El lodo debe tener las características adecuadas de peso y consistencia para estabilizar las paredes de la perforación sobre todo en suelos granulares. Los lodos o lechadas típicas para este propósito se preparan con barita y atapulgita.

El equipo de perforación cuenta con un sistema completo de nivelación para la compensación total por movimiento vertical, con una unión giratoria de impulso tipo, complementada por una sarta de

III. ESTUDIOS DEFINITIVOS.

perforación bajo las especificaciones API de 5.0 in. de diámetro equipada con una broca de aletas de centro abierto. Cuando se alcanza la profundidad para tomar la muestra de suelo, se detiene la circulación del fluido de perforación y se remueve el vástago de conexión de las barras y la tubería de perforación se soporta mediante elevadores con la broca suspendida a una cierta distancia del fondo del pozo; se introduce el muestrador hasta el fondo de la perforación, se hinca a la profundidad señalada y finalmente se extrae la muestra a través de las barras cilíndricas tirando de un cable flexible que se desplaza en el interior de la tubería.

Para realizar la perforación, se utiliza una masa de reacción cuyas características dependen del equipo empleado por la contratista, por mencionar uno, se ha utilizado un templete de aproximadamente 4.40 m<sup>2</sup> de área efectiva de apoyo sobre el lecho marino, con un peso de 1,400.0 Kg., el templete proporciona la reacción necesaria para el muestreo y las pruebas "in situ".



Figura III.2. Sistema de perforación.

**III.2. Pruebas in situ.**

Las características y las propiedades del suelo se definen a partir de los trabajos de campo, de laboratorio y de gabinete; los resultados se integran en un reporte definitivo, proporcionando los parámetros estáticos, dinámicos y las recomendaciones para la cimentación.

Una vez obtenida la muestra de suelo, todavía dentro del tubo, se le realizan pruebas in situ tales como, veleta miniatura, torcómetro y penetrómetro de bolsillo, posteriormente se extraen las muestras del tubo mediante un pistón accionado hidráulicamente, (Figura III.2.1); se identifican visual y manualmente, se separan los diferentes tipos de suelo que la muestra pueda contener; se anotan las características físicas relevantes de cada parte; se protegen contra pérdida de agua en bolsas o recipientes herméticos y se envían a laboratorios en tierra.



Figura III.2.1 Extracción de las Muestras Inalteradas del Tubo Muestreador

El conjunto de equipos y herramientas para llevar a cabo las pruebas in situ así como las operaciones de muestreo costa afuera ha sido denominado Sistema Dolphin, (Figura III.2.2). Los componentes principales de este sistema son:

- Sistema de adquisición de datos Dolphin.
- Herramienta Dolphin tipo downhole.
- Malacate/sistema hidráulico umbilical.
- Compensador de movimiento vertical entre la sarta de perforación y el barco.

III. ESTUDIOS DEFINITIVOS.

- Ensamblaje de la sarta de perforación e impulsador
- Masa de reacción.
- Tubo muestreador por presión de pared delgada (Shelby) de 0.76 m. (3.0 in).
- Tubo muestreador por percusión de pared delgada (Shelby) de 0.57 m. (2.24 in).

El muestreador por presión Dolphin obtiene muestras cohesivas y granulares de alta calidad mediante presión hacia la formación del suelo con el peso de la sarta de perforación (masa de reacción), (Figura III.2.2).

Los sondeos realizados en la exploración geotécnica combinan la recuperación de muestras inalteradas del suelo con el uso de la penetración estándar por medio de la veleta remota y el cono penetrómetro.

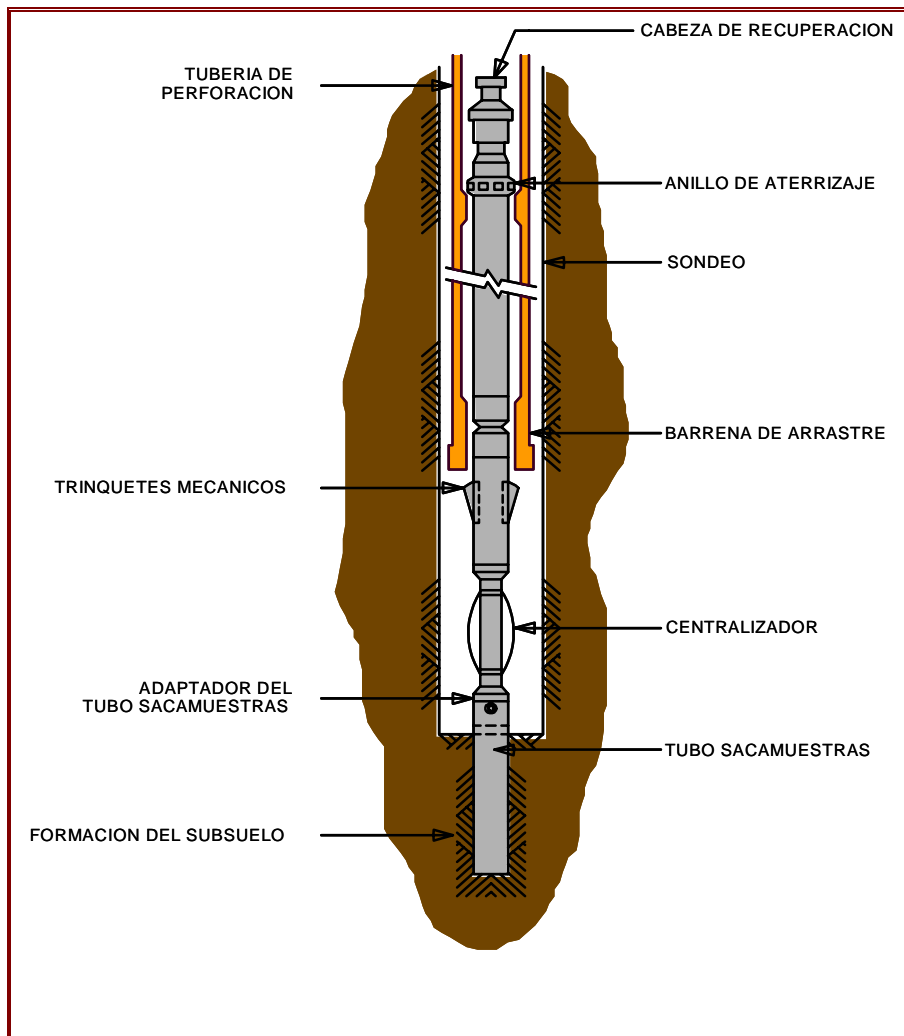


Figura III.2.2. Muestreador por Presión Tipo Dolphin



### III.2.1 Muestreo y manejo de muestras.

El método de exploración geotécnica, combina el uso de la penetración estándar con la recuperación de muestras alteradas en suelos granulares y el muestreo de suelos arcillosos por medio de tubos especiales de pared delgada.

El American Petroleum Institute recomienda que se deben obtener muestras continuas en los primeros 12.0 m. de profundidad, a cada 1.50 m de 12 a 24 m. de profundidad y a cada 3.0 m de los 24.0 m de profundidad en adelante. La profundidad mínima de cada sondeo es 120.0 m. (393.70 ft.) La profundidad máxima deberá ser tal que permita a los pilotes (de punta abierta de 48 in. de diámetro) desarrollar su capacidad de carga axial en tensión y compresión, aplicando factores de seguridad acordes a cada condición de carga y conforme a las recomendaciones del API RP-2A en su última edición.

El muestreo de suelos puede realizarse ya sea hincando un muestreador con un martillo fijo, es decir por percusión, o mediante la aplicación de una presión continua, según las características que el suelo presente durante el sondeo.

Los sondeos realizados en la exploración geotécnica combinan la recuperación de muestras inalteradas del suelo con el uso de la penetración estándar por medio de la veleta remota y el cono penetrómetro.

#### III.2.1.1 Muestreador de percusión

El muestreador hincado por percusión denominado SISTEMA WIRE-LINE, incluye una sección de martillo en la parte superior con un peso de 79.379 Kg. (175 lb), una sección telescópica central de 3.0 m (10 ft) de longitud, y un adaptador para el tubo muestreador en su parte inferior, este mecanismo garantiza que no exista conexión alguna entre la tubería de perforación y el muestreador.

Para suelos granulares las muestras se obtienen con este tipo de muestreador por percusión ya sea usando tubos shelby de pared delgada de 0.572 m (2.25 in) de diámetro exterior y 0.54 m (2.125 in) de diámetro interior, o un tubo de media caña de 0.508 m (2.0 in) de diámetro exterior y 34.93 m. (1.37 in) de diámetro interior; el muestreo por percusión consiste en bajar el montaje del martillo a través de la tubería de perforación a la profundidad del muestreo deseada, posteriormente el martillo es activado por medio de cable guía dejándolo caer de una altura aproximada de 1.5 m (5 ft) hasta lograr una penetración máxima de 0.60 m (2.0 ft) o un máximo de 30 golpes; en suelos granulares muy compactos, algunas veces se requieren más de 30 golpes para hincar el muestreador en el suelo y obtener una cantidad de muestra adecuada para las pruebas de laboratorio, el número de golpes junto con la penetración del muestreador correspondiente se anota en el registro del sondeo; la sección telescópica restante se dispone para proporcionar compensación al movimiento vertical del barco.

Una de las características más importantes del muestreador por percusión es la alteración de la muestra causada por el impacto dinámico del martillo, esta alteración en la muestra causa una reducción de la resistencia la esfuerzo cortante del suelo, dando como resultando un cierto grado de incertidumbre cuando se interpretan los datos de las pruebas de laboratorio.

### III.2.3 Muestreador de presión

En la práctica, el muestreo de los suelos cohesivos no se realiza con la técnica de percusión si no con la técnica de presión que es más adecuada para estos sedimentos, presionando un tubo muestreador dentro del suelo de forma constante y continua se garantiza la obtención de una muestra de alta calidad, este sistema confiable y de costo accesible es utilizado para obtener muestras de diferentes diámetros desde la embarcación geotécnica, tanto las dimensiones del tubo muestreador como el mecanismo de hincado por presión de éste, se seleccionan de acuerdo a las características de los sedimentos marinos; por ejemplo, para el muestreo de sedimentos cohesivos se utiliza un tubo shelby de pared delgada de 0.762 m (3.0 in) de diámetro exterior, 0.719 m (2.83 in) de diámetro interior y para el muestreo de sedimentos cohesivos muy blandos, se utiliza un muestreador especial de doble tubo de 0.64 m (2.52 in) de diámetro exterior y 0.57 m (2.24 in) de diámetro interior, cuya tubería interior consiste en tubos de baquelita, que a su vez puede ser utilizada como empaque de las muestras, (Figura III.2.3).

En arcillas normalmente consolidadas la fuerza requerida para empujar o presionar el muestreador, puede ser simplemente con el peso de la sarta de perforación, posiblemente complementado con el zuncho o collar de perforación; a ésta técnica de muestreo se le denomina SISTEMA DOLPHIN, (Figura III.2.2), un esquema más detallado del muestreador y de las operaciones del sistema se describe en los siguientes párrafos:

1. La barrena es levantada del fondo del sondeo una vez alcanzada la profundidad del muestreo deseada en el mismo.
2. Se permite la caída libre del muestreador a través de la tubería hasta que este llega al anillo de aterrizaje en el montaje del fondo, con los trinquetes mecánicos, tubo de muestreo, y adaptador del tubo localizados en la parte exterior de la barrena.
3. Se baja la sarta de perforación para conectarla con los trinquetes mecánicos, el peso de la sarta se usa para presionar el tubo muestreador hasta que sea completamente empotrado este en el terreno.
4. Se procede entonces a levantar la sarta de perforación para recuperar el tubo muestreador.
5. El muestreador se recupera y se levanta hasta la cubierta de perforación del sondeo usando un aparato recuperador de enchufe conectado a un cable guía.
6. Una vez recuperado el muestreador, se continúa el sondeo utilizando el mismo procedimiento.

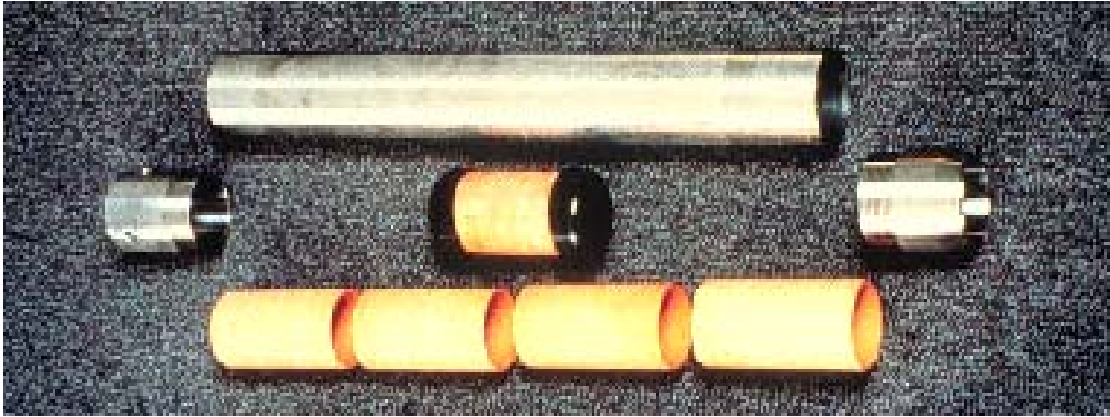


Figura III.2.3. Muestreador de Doble Tubo para Suelos Blandos.

### III.2.1.3 Muestreador de pistón

Uno de los sistemas más novedosos de muestreo de suelos marino representa el muestreador de pistón, el cual consta de un tubo muestreador de pared delgada, un sistema de extensión y un cilindro de medición con una carrera de 0.60 a 1.0 m. de longitud; está es una técnica más del SISTEMA DOLPHIN, en la cual las operaciones de muestreo son las siguientes:

1. Se baja el montaje de reacción (masa-abrazadera o la estructura Stingray) al fondo marino antes de iniciar las operaciones de muestreo.
2. Se permite entonces la caída libre del equipo muestreador de pistón a través de la tubería de perforación hasta el montaje del fondo, donde se ajusta por peso propio.
3. Se baja la barrena al fondo del sondeo y la unidad de agarre del montaje de reacción es activada hidráulicamente para sujetar a la sarta de perforación.
4. Se incrementa la presión del lodo de perforación usando una bomba auxiliar de alta presión, con la finalidad de empujar el muestreador en la formación a una velocidad controlada de penetración, la reacción es suministrada por el peso de la sarta de perforación y el montaje de reacción.
5. Una vez que se completa el muestreo, se recupera la herramienta con el cable guía.

La presión para el empuje del muestreador de pistón es suministrada mediante una bomba auxiliar del sistema de lodos; dependiendo de la presión deseada, la presión del fluido de perforación está en un rango de 600 a 1000 PSI (4000 a 7000 KPa).

La experiencia costa fuera indica que el muestreador de pistón causa la mínima alteración de la muestra y por lo tanto se obtienen muestras de alta calidad; sin embargo, una comparación de la medida el esfuerzo cortante de muestras obtenidas con un muestreador de pistón y muestras obtenidas con cualquier otro método de presión, indican pequeñas diferencias en la calidad de la muestra.

### III.2.2 Cono Penetrómetro.

El cono utilizado en campo, es de tipo piezocono de  $10\text{cm}^2$  y constituido por una punta cónica de 3.6 cm de diámetro, para la medición, en forma separada y continua, de la resistencia por punta, por fricción y presión de poro, a través de celdas de carga con dos unidades sensibles instrumentadas con deformímetros eléctricos, (Figura III.2.4).

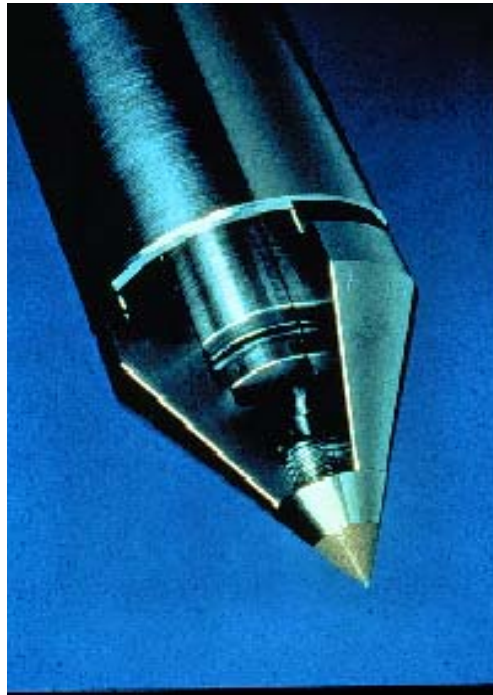


Figura III.2.4. Punta del Piezocono Penetrómetro.

El sistema PCPT empuja en el suelo el cono activado por instrumentos eléctricos a una velocidad constante de dos centímetros por segundo, el cual registra y almacena continuamente la resistencia de la punta, la fricción sobre la camisa y la presión de poro del agua, (Figura III.2.5).

Los registros generados durante la prueba son transmitidos a un microprocesador que almacena todas las mediciones en memoria, este microprocesador forma parte integral del cuerpo del cono de penetración por lo que no se requieren cables desde la superficie para hacer el registro de lecturas, éstas se toman en la superficie donde es conectada a una interfase que envía los resultados a una computadora. En la computadora se cuenta con el software que genera las gráficas en tiempo real y en unidades de ingeniería, de la señal registrada durante una prueba PCPT.

Los datos CPT no filtrados se proporcionaron usando un programa sofisticado, el cual convierte los datos sin procesar, a unidades de ingeniería y posteriormente generar las gráficas de resistencia de punta, fricción de fuste, presión de poro o varias combinaciones normalizadas de los datos tales

III. ESTUDIOS DEFINITIVOS.

como la relación entre la fricción de manga y la resistencia de punta. En la Figura III.2.6 se muestra esquemáticamente el equipo del Piezocono Penetrómetro.

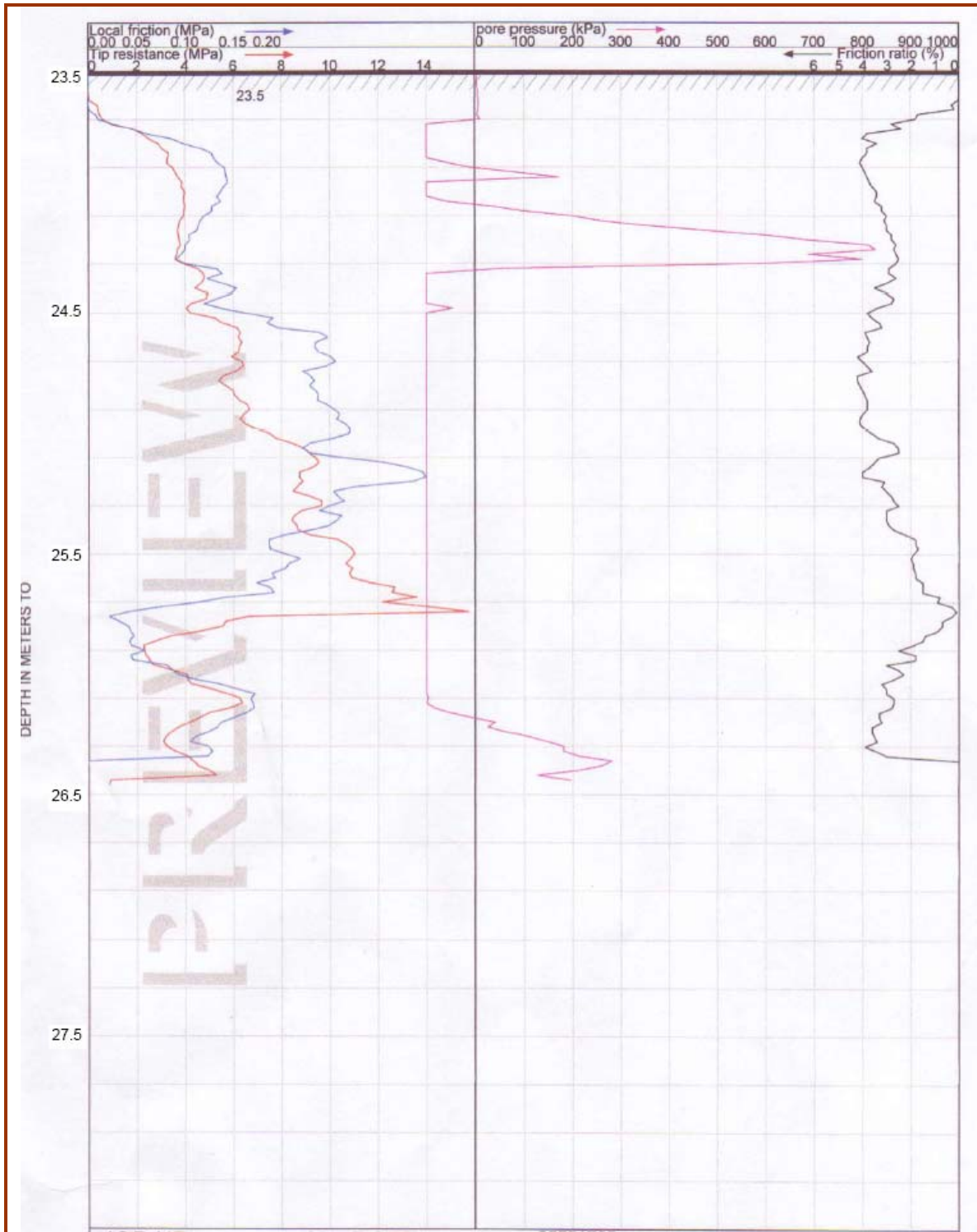


Figura III.2.5. Registro en campo del sistema PCPT

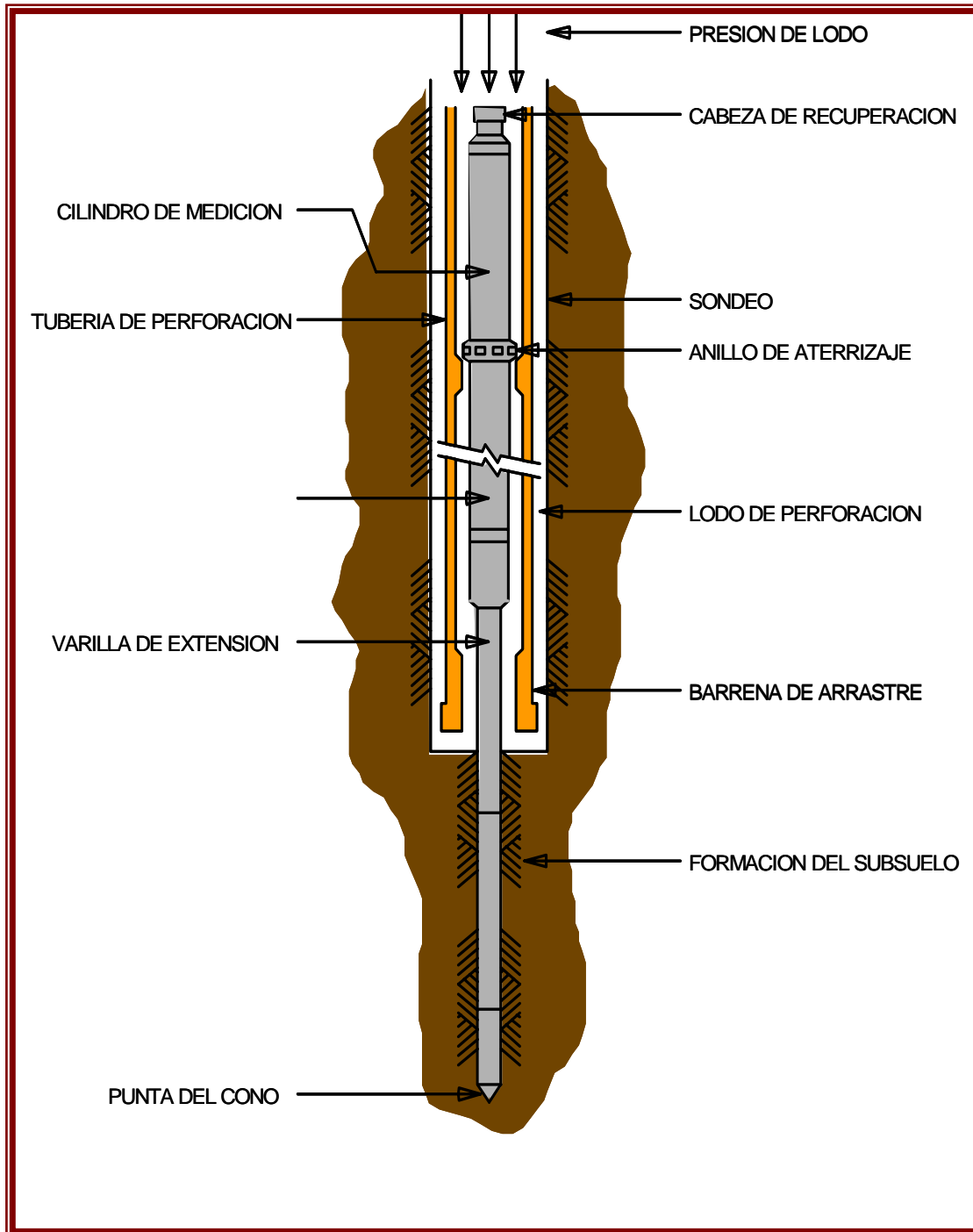


Figura III.2.6. Procedimiento de ensaye del Cono Penetrómetro

### III.2.2.1 Calibración.

De manera previa a la realización de las pruebas, cada uno de los conos es calibrado e identificado en el laboratorio, (Figura III.2.8). Los conos a bordo del barco tienen su número de identificación y sus constantes de calibración están almacenadas en una computadora, la cual registra los datos obtenidos en los ensayos in-situ. Al tomar los datos de cada ensaye la computadora los correlaciona automáticamente con los datos de calibración del equipo y proporciona los resultados.



Figura III.2.8. Calibración del CPT

### III.2.2.2 Procedimiento de la prueba.

El cono se deja caer dentro de la sarta de perforación, hasta el extremo inferior de la tubería, donde es obligado a penetrar en el suelo a velocidad constante por medio del incremento de presión del lodo de perforación (Figura III.2.9).

La velocidad de hincado del cono es usualmente de 0.02 m/seg. Es muy importante que durante la prueba, la velocidad de penetración se mantenga constante ya que es inevitable que en las capas duras el cono pierda velocidad de penetración y al pasarlas se acelere, pero esto es controlado por la pequeña computadora que lleva el equipo en su propio cuerpo.



Figura III.2.9. Cono Penetrómetro.

El problema de mantener la velocidad de hincado se debe a que no se tiene un marco de carga fijo en una embarcación, lo que obliga a dejar suelta la sarta de perforación y hacer bajar el cono con la presión hidráulica.

Para impedir que durante la prueba en los estratos duros la reacción del cono sobrepase el peso de la sarta de perforación se le sujeta a un incremento de peso a la tubería al nivel del fondo marino llamado Masa de Reacción. Esta es una condicionante para la realización de la prueba, pues el suelo debe tener una capacidad de carga suficiente para soportar tanto el peso de la sarta de perforación y la masa de reacción.

Las pruebas del cono se ven limitadas a los espacios que se van dejando entre la toma de muestras que estipula el contrato y el espacio que se requiere para la realización de la prueba.

Los registros del cono durante la prueba son continuos, esto es debido a que el microprocesador siempre está tomando lecturas de las condiciones del suelo, (Figura III.2.5).

Terminada la prueba el cono es llevado a la superficie y conectado a una interfase que envía las mediciones registradas a la computadora.

➤ Las mediciones que registra el cono Penetrómetro son: la fuerza que se desarrolla en la punta cónica y la fuerza que se desarrolla en la funda de fricción, así como la presión de poro, lo que



permite definir con precisión cambios en las condiciones estratigráficas del sitio, estimar la resistencia al corte de los suelos y medir la presión de poro. Todos los resultados son almacenados en archivos que contienen tanto las lecturas registradas así como la localización del sondeo, nombre del sondeo, fecha y hora de la prueba, profundidad de realización de la prueba.

### III.2.3 Veleta Remota.

Las pruebas de veleta remota se emplean para ensayos in-situ de suelos profundos cohesivos preconsolidados, el equipo consta de una punta con aspas cuyo tamaño varía con la resistencia del suelo (puede ser de tres tamaños) y de una barra de acero en posición longitudinal que va conectada al sistema Dolhin, la punta se sujeta al sistema motriz a través de un perno para su fácil cambio (Figura III.2.10).

En el interior de las barras van alojados los cables del sistema electrónico de medición. Cuando se hinca la veleta en el fondo de la perforación, se aplica en la parte superior de las barras un par de torsión que se incrementa hasta que el suelo llega a la falla.

Las pruebas de veleta remota, se realizaron usando el mismo método de avance que en el cono, mediante la sarta de perforación, posteriormente se lleva a la superficie donde se conecta a una interfase que envía los resultados a una computadora, la cual genera finalmente, las gráficas esfuerzo deformación del suelo ensayado.

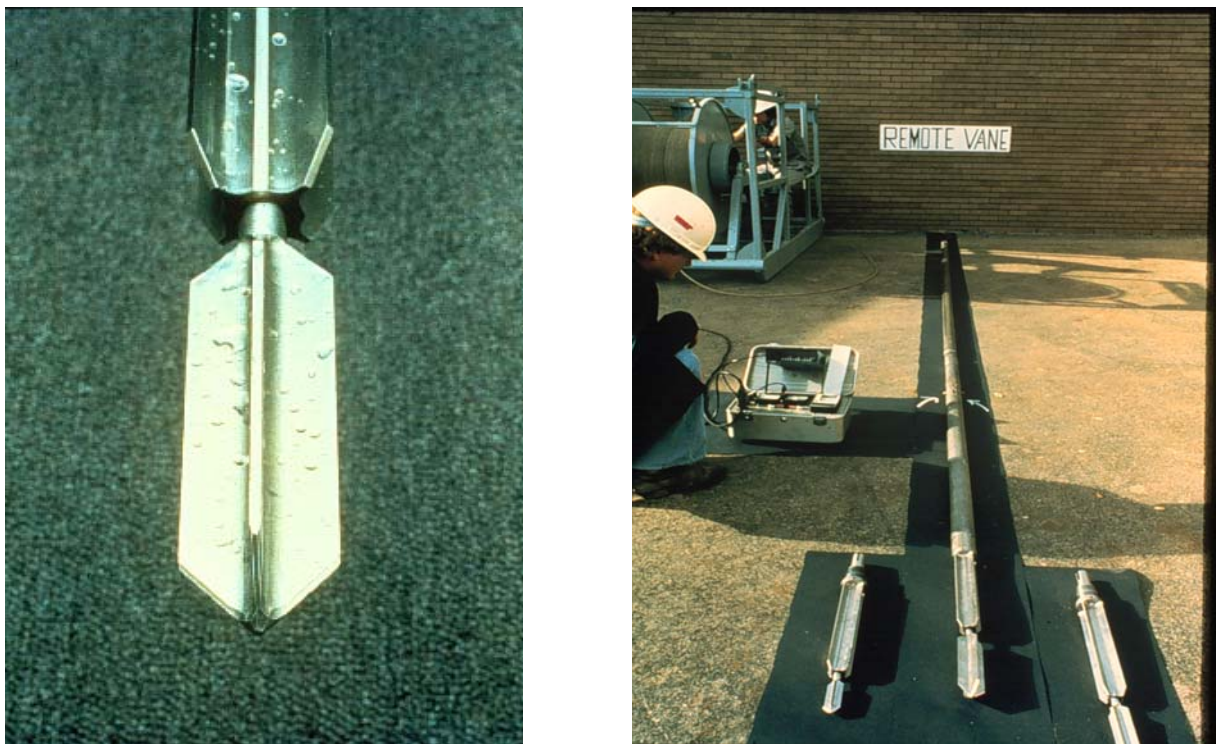


Figura III.2.10. Veletas Remotas.

### III.2.3.1 Calibración.

La calibración se hace a través de un torcómetro que mide el torque o par aplicado por la veleta durante un lapso de tiempo. La magnitud del torque es almacenado en el microprocesador y enviado después a la computadora para poderse graficar. De la relación entre el torque registrado por el microprocesador y el obtenido del torcómetro se determina la constante de relación para las distintas pruebas que se desarrollaran con ese equipo. La computadora almacena el tipo y número de veleta empleada en cada registro, por lo que los resultados obtenidos serán corregidos por la constante de cada una de las veletas.

### III.2.3.2 Procedimiento de la prueba.

La prueba tiene la ventaja de realizarse directamente sobre suelos "in situ", es decir sobre muestras que no han sido alteradas. La alteración de los suelos sujetos a la prueba dista de ser nula, pues la veleta ha de hincarse en el estrato en el cual vayan a realizarse las determinaciones y esta operación ejerce siempre influencia negativa. El principio de registro de medición es muy similar al del cono de penetración debido a que la veleta remota es totalmente automática.

La veleta lleva acoplado un mecanismo que hace girar a una barra con aspas y un microprocesador que le permite ir tomando las lecturas de esfuerzo-deformación del estrato ensayado. La veleta gira de 12 a 18 grados por minuto y produce un torque máximo de 400 MN. Al igual que el cono no se requiere cables que vayan del fondo a la superficie. La veleta esta calibrada para no sobrepasar su capacidad de medición ya que si encuentra estratos muy consolidados en los cuales se pueda dañar, ésta suspende la ejecución de la prueba.

Terminada la prueba, la veleta es llevada a la superficie y conectada a una interfase que envía los registros a una computadora, donde posteriormente se gráfica la curva correspondiente a la resistencia al esfuerzo cortante del estrato ensayado.

El procedimiento es más sencillo que la del cono penetrómetro, esto es debido a que solo se requiere llegar al tramo de sondeo inalterado a la profundidad en que se vaya a desarrollar la prueba. La veleta es enviada al fondo a través de la sarta de perforación y acoplada en la parte más baja de la tubería y al bajar la sarta la veleta es penetrada en el estrato a ensayar, efectuando la prueba mínimo a dos profundidades contiguas.

El tiempo que se deja la veleta en cada profundidad en el interior del estrato a ensayar es de aproximadamente 3 minutos, después de los cuales se recupera la veleta haciéndola subir a la superficie. La toma de lecturas se hace de una manera similar a la del cono, esto es conectando la grabadora a una interfase que envía los datos registrados a una computadora para su almacenamiento y procesamiento. (Figura III.2.11)

Las pruebas de veleta remota se alternan con las del cono penetrómetro en función del grado de consolidación del suelo por ensayar, estableciendo como límite la aplicación de la prueba de veleta en suelos normalmente consolidados.

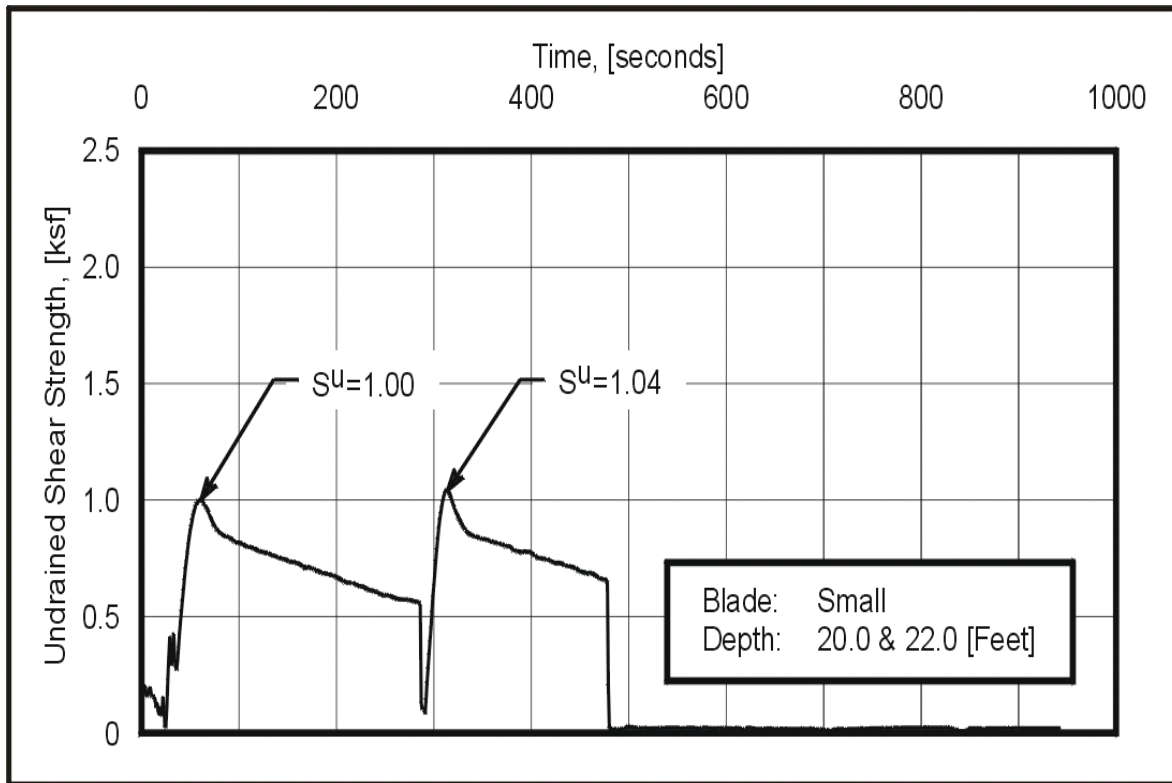


Figura III.2.11. Gráficas esfuerzo de deformación obtenidas mediante la veleta remota

### III. 3. Pruebas en laboratorio.

Esta etapa de la exploración geotécnica consta de dos partes, en la primera parte las pruebas que se le realizan a las muestras extraídas son en el laboratorio de la embarcación, (Figura III.2.12); y la segunda consiste en las pruebas realizadas en el laboratorio en tierra.

El laboratorio de Mecánica de Suelos de la embarcación debe contar mínimo con el siguiente equipo:

- Balanza y Horno
- Equipo para empaquetar muestras que se compone de papel envoltura, papel aluminio, cilindros de polipropileno.
- Pisón para extracción de muestras.
- Molde para preparar probetas remoldeadas.
- Veleta miniatura constituida por: una base con motor donde se colocan veletas con aspas de 3 diferentes tamaños de lámina para ensayos de resistencia al corte de suelos finos.
- Penetrómetro de Bolsillo, instrumento manual que consta de una pieza tubular que aloja en su interior una barra móvil en forma de pistón utilizado para ensayos de resistencias al corte en suelos compactados.

III. ESTUDIOS DEFINITIVOS.

---

- Torcómetro, es una veleta pequeña (3 cm de diámetro) portátil provista con 6 u 8 laminas de acero para medir resistencia al corte en suelos blandos.
- Cámara triaxial con equipo para deformación controlada y equipo de computo para un registro simultáneo de los valores de esfuerzo y deformación, que se muestran en forma gráfica para medir resistencia al corte en muestras inalteradas.



Figura III.2.12. Laboratorio de la embarcación.

Las pruebas realizadas abordo con el equipo anteriormente descrito, incluyendo los accesorios complementarios fueron las siguientes:

- Clasificación de los suelos visual y al tacto.
- Determinación del peso volumétrico natural.
- Contenido de humedad.
- Contenido de carbonatos.
- Penetrómetro de bolsillo.
- Torcómetro, (Figura III.2.13).
- Veleta miniatura, (Figura III.2.14).
- Pruebas triaxiales sin consolidación ni drenaje, (Figura III.2.15).



Figura III.2.13. Prueba de Torcómetro



Figura III.2.14. Prueba de Veleta Miniatura.

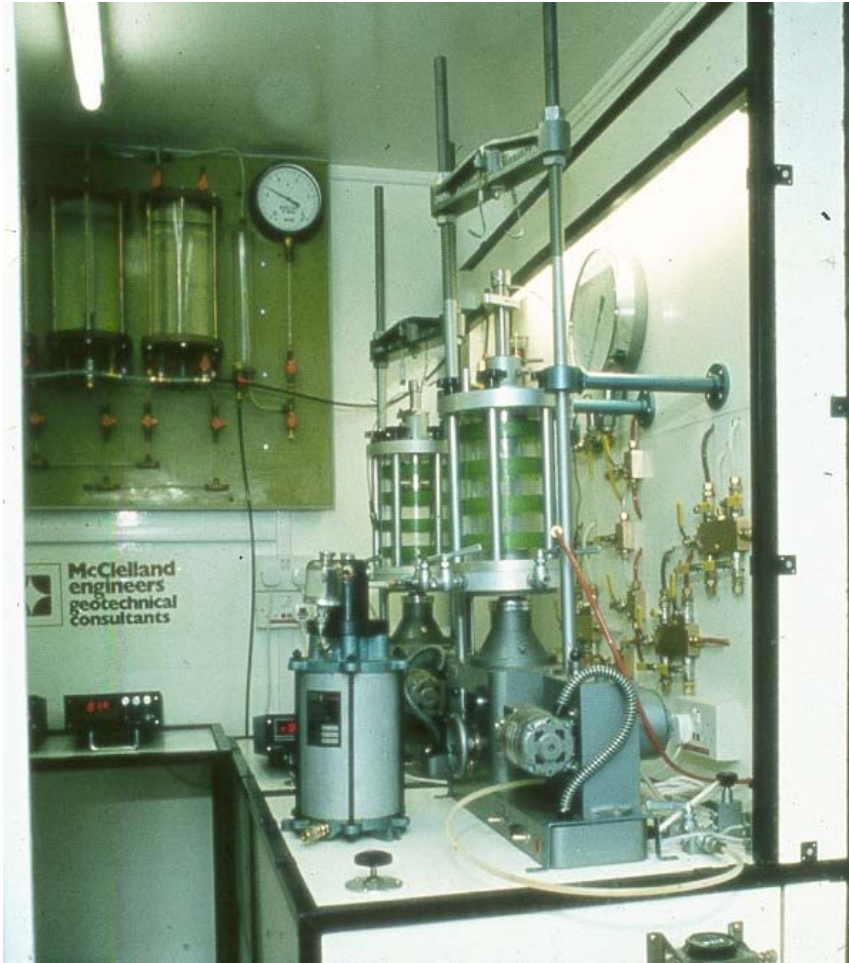


Figura III.2.15. Equipo para las pruebas triaxiales abordo de la embarcación

### III.3.1 Características físicas.

Se realiza la clasificación visual y al tacto del tipo de suelo, haciendo su descripción en cuanto color, olor y tipo de partículas que contiene (fragmentos de conchas, corales), además se revisa el tipo de reacción ante el ácido clorhídrico para determinar en forma cualitativa el contenido de carbonatos, la reacción ante el ácido se describe como baja, media o alta, a más alta reacción mayor contenido de carbonatos, (Figura III.2.16).



Figura III.2.16. Equipo para obtener el contenido de carbonatos abordo de la embarcación

### III.3.2 Propiedades Índice.

Mediante la balanza y el horno se obtienen el peso volumétrico y contenido de humedad natural. El peso volumétrico se obtiene pesando una parte de la muestra de dimensiones conocidas (volumen). El contenido natural de humedad o agua se obtiene mediante la diferencia entre el peso de una parte de la muestra húmeda y el peso seco (secado en el horno), (Figura III.2.17).



Figura III.2.17. Balanza del laboratorio en barco.

### III.3.3 Propiedades Mecánicas.

Fundamentalmente la característica mecánica de mayor interés a determinar es resistencia al esfuerzo cortante, debiéndose obtener para ello, muestras lo más inalteradas posible de suelo cohesivo:

La prueba de veleta miniatura se realiza cuando la muestra aun se encuentra en el tubo muestreador, aplicando torsión a la muestra a través de una barra con aspas. Una vez que el suelo llega a la falla es posible definir el valor de su resistencia al esfuerzo cortante.

La prueba con el Torcómetro se realiza al hincar las aspas del equipo en la muestra de suelo; se aplica una torsión manualmente y se define su resistencia al esfuerzo cortante.

La prueba con el Penetrómetro de bolsillo se realiza mediante la penetración de una barra sobre la superficie inalterada del suelo y de cuya resistencia se define el esfuerzo cortante resistente del suelo.

Se realizan pruebas de compresión triaxial del tipo UU (No consolidado-No drenado), con muestras inalteradas de suelo; las pruebas se realizan aplicando en la primera etapa de la prueba una presión confinante, la cual está en función de la profundidad a la cual se extrajo la muestra, en la segunda etapa se aplica el esfuerzo desviador hasta llevar a la probeta a la falla, posteriormente se define la resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Durante la prueba triaxial, simultáneamente se gráfica la curva esfuerzo-deformación del suelo y de esa forma es posible definir el momento y el tipo de falla que ocurre en el suelo.

En el mismo barco, con el fin de medir la sensibilidad de los estudios explorados se realizan también pruebas triaxiales UU con muestras remoldeadas. Vigilando únicamente que la muestra remoldeada obtenga el mismo peso volumétrico y contenido de humedad que la muestra inalterada, posteriormente se define su resistencia al esfuerzo cortante.

### III.4. Reporte final geotécnico.

Una vez concluida la etapa de exploración y muestreo geotécnico, los resultados se integran en un reporte final que incluye la siguiente información.

- Plano general del área, mostrando la localización definitiva de los sondeos efectuados, en coordenadas UTM.
- Medición del tirante de agua en el lugar propuesto para la exploración, corregido por variación de marea.
- Gráficas de capacidad de carga última y de diseño para los diferentes diámetros solicitados, siendo los mas comunes de 36, 42, 48, 54, 60, 66, y 72 in.



III. ESTUDIOS DEFINITIVOS.

---

- Expresiones para el cálculo de la capacidad de carga para el diseño de las placas de apoyo temporal de la subestructura siguiendo los lineamientos del API-RP-2A-WSD-2000.
- Representación gráfica de la estratigrafía, mostrando los parámetros índice y mecánicos obtenidos en las pruebas de campo y laboratorio.
- Representación gráfica de los parámetros interpretados para el diseño axial y lateral de la cimentación.
- curvas resistencia-deformación lateral del pilote (curvas p-y) para oleaje de operación y tormenta, hasta una profundidad que permita simular la interacción lateral suelo-estructura.
- curvas resistencia-deformación lateral del pilote (curvas p-y) para sismo, hasta una profundidad que permita simular la interacción lateral suelo-estructura.
- curvas resistencia desplazamiento axial del pilote (curvas t-z) para oleaje y sismo.
- valores de los parámetros del suelo que intervienen en el cálculo de las curvas p-y; módulo de deformación inicial de las arenas y deformación del 50 por ciento de las arcillas con la carga máxima.
- Evaluación breve de los riesgos geológicos potenciales.
- Representación gráfica que muestre la capacidad axial y/o lateral de la cimentación.
- Desarrollar recomendaciones de criterios para diseño sísmico y datos de interacción suelo-cimiento, gráficas de los parámetros dinámicos del sitio, como módulo de rigidez al corte, variación de la relación de esfuerzo cíclico y esfuerzo vertical efectivo con el número de ciclos, gráficas de variación del porcentaje de amortiguamiento con la deformación angular unitaria en cada una de las profundidades ensayadas, espectros de respuesta sísmica de sitio y espectros de diseño sísmico, etc.
- Conclusiones y recomendaciones generales para el diseño e instalación de la cimentación, considerando los siguientes aspectos, longitud de penetración, medios preventivos para el diseño en caso de encontrarse suelos susceptibles a la licuación, entre otros. Se incluyen los parámetros de resistencia para el diseño de las plataformas así como conclusiones y recomendaciones durante el diseño y la instalación.
- Bibliografía.

El reporte final geotécnico con toda la información indicada anteriormente, es el documento que servirá al diseñador para consultar las características del suelo y los parámetros mecánicos del mismo para llevar a cabo el diseño de los pilotes de cimentación.

# ANALISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE.

#### IV. ANALISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE.

En este capítulo se describen algunos criterios de análisis y diseño de la cimentación para las plataformas marinas fijas utilizadas en la Sonda de Campeche.

Desde el principio de los 80's, la ingeniería mexicana se ha sumado al desarrollo de la ingeniería offshore en experiencia, logros y progresos, los cuales se ven reflejados hoy en día en el diseño y construcción de cimentaciones en estructuras costa afuera, especialmente en plataformas fijas tipo Jacket. Actualmente en la Sonda de Campeche se encuentran instaladas del orden de 220 plataformas fijas cimentadas a base de pilotes tubulares de acero y punta abierta.

##### IV.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PILOTES EN CADA TIPO DE PLATAFORMA FIJA.

Las características de los pilotes dependerán del tipo de plataforma a diseñar. Como se mencionó en el capítulo I, existen diversos tipos de plataformas fijas que cumplen con un servicio determinado, las plataformas de perforación son las de mayor importancia dentro del esquema de explotación porque a partir de ellas se derivan las restantes para el procesamiento del hidrocarburo y gas, estas plataformas junto con las de producción, enlace y compresión, son estructuras muy pesadas debido al equipo requerido en ellas, por lo tanto están instaladas en subestructuras simétricas que poseen dos o cuatro ejes transversales conformados a su vez por cuatro u ocho piernas que garanticen la estabilidad de la plataforma. En el caso de estructuras ligeras como los quemadores, antenas de telecom, etc. tienen la característica de ser instaladas en subestructuras de menores dimensiones que se componen de tres ejes que forman una sección transversal triangular y se soporta por tres piernas.

Considerando el número de piernas que posee la subestructura, se tiene la siguiente clasificación:

- Octápodo ( 8 piernas), Figura IV.1.1
- Tetrápodo ( 4 piernas), Figura IV.1.2
- Trípode ( 3 piernas), Figura IV.1.3

##### IV.1.1 Predimensionamiento del pilote.

Para el diseño de las cimentaciones es necesario conocer las descargas a las que estará sometida la cimentación, estos datos son generados de forma preliminar para dar un predimensionamiento de la plataforma marina fija, con el cual, se busca definir el diámetro del pilote y con ello determinar el diámetro de las piernas de la subestructura y el diámetro de la columna de la superestructura. Los diámetros de pilotes deberán mantenerse en los valores mínimos determinados por la resistencia del suelo, la capacidad del equipo de hincado debido a los esfuerzos inducidos en el pilote durante el hincado, así como los esfuerzos actuantes generados por la operación de la plataforma.

Para llevar a cabo el predimensionamiento del pilote, se deben estimar las cargas gravitacionales y accidentales actuantes en la plataforma, generadas por las diferentes direcciones de oleaje y corriente que se señalan en el API-RP-2A-WSD-2000, (Figura IV.1.4), en un análisis de operación y tormenta de toda la estructura.

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

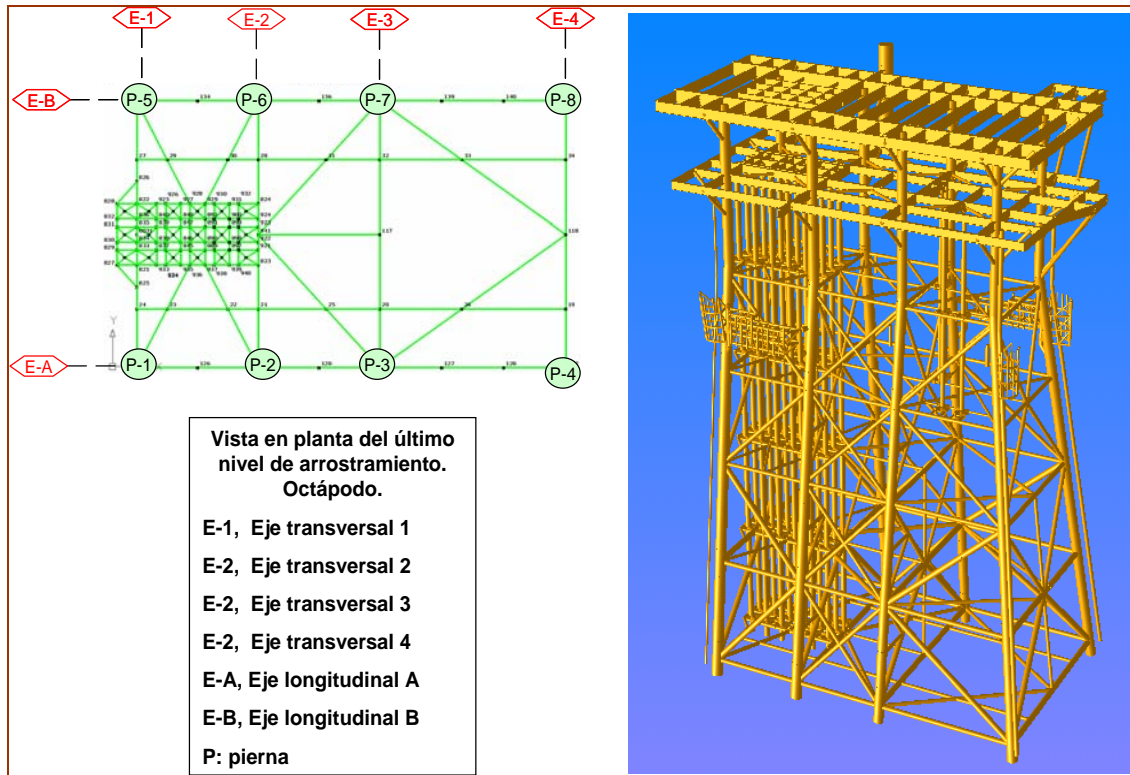


Figura IV.1.1 Esquema ilustrativo de un octápodo

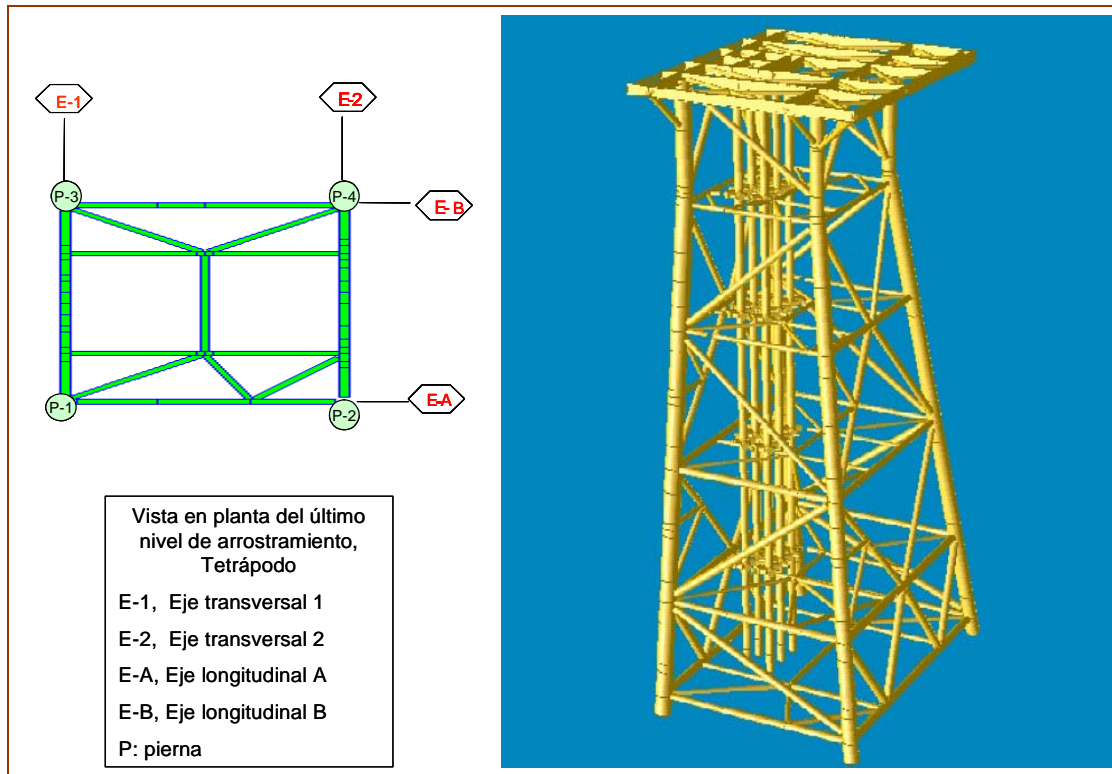


Figura IV.1.2. Esquema ilustrativo de un tetrápodo.

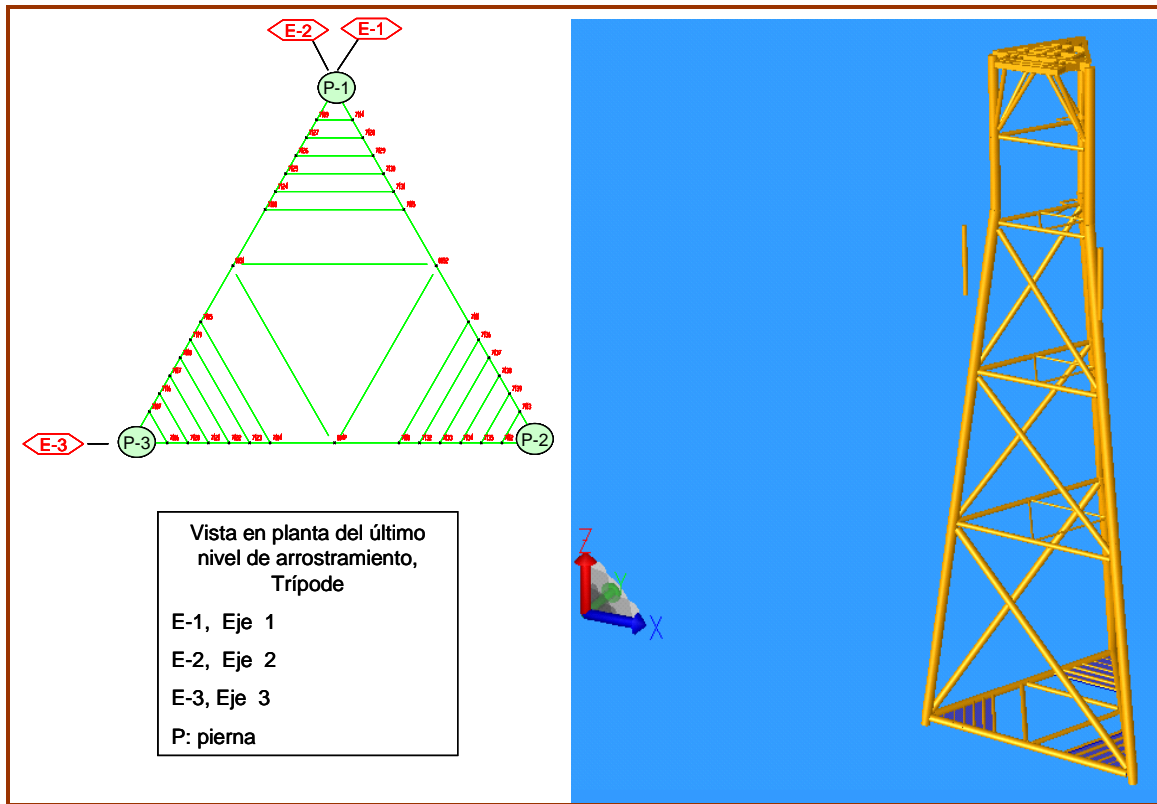


Figura IV.1.3. Esquema ilustrativo de un trípode.

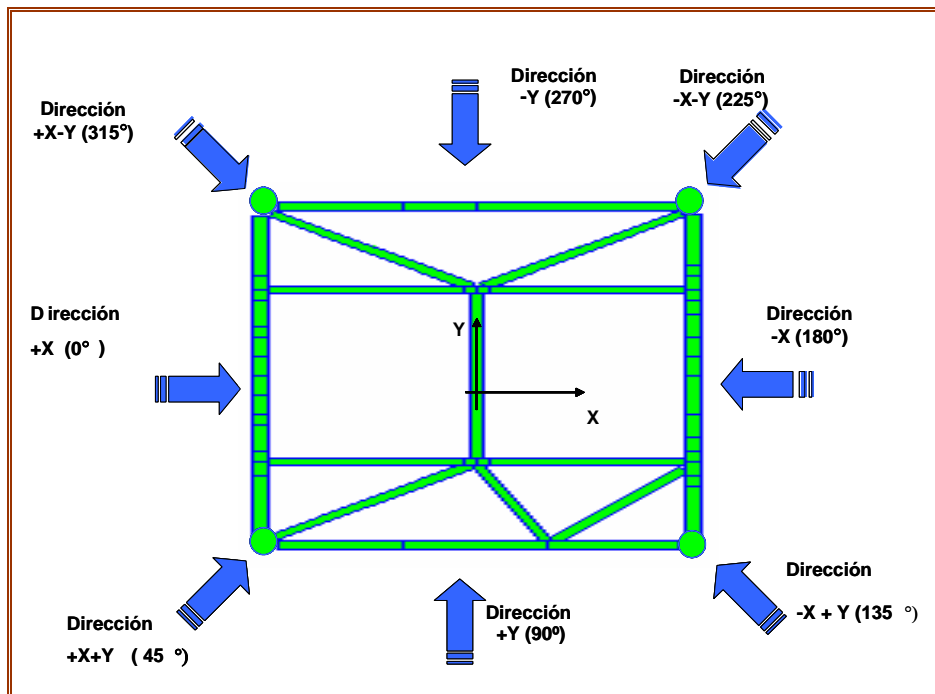


Figura IV.1.4. Esquema ilustrativo de las diferentes direcciones de oleaje y corriente para el análisis de operación y tormenta de una plataforma fija.

Con las fuerzas actuantes en la plataforma, se procede a determinar el diámetro y longitud de penetración inicial, requeridos para el dimensionamiento del pilote, utilizando para ello los datos del estudio geotécnico correspondiente. El diámetro de los pilotes se calcula de acuerdo a las condiciones de carga de la plataforma y con base a la capacidad de carga del sitio. Una vez definido el diámetro del pilote se debe conservar un espacio anular MÍNIMO entre la pierna y el pilote de 0.0508 m. (2 in.), (Figura IV.1.5). Para el ejemplo que se presenta en este trabajo, se definió un diámetro del pilote de 1.372 m (54 in).

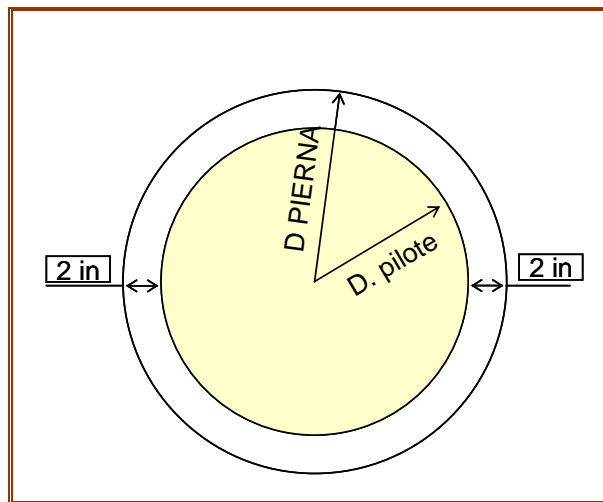


Figura IV.1.5 Esquema ilustrativo del espacio anular mínimo entre el diámetro externo de la pierna y el diámetro interno del pilote.

Por otra parte, la longitud de penetración de los pilotes se determina en función de las descargas máximas de compresión y tensión provenientes del análisis estructural de la plataforma bajo condiciones ambientales de tormenta y de operación. Se sugiere que la longitud de diseño por penetración sea la adecuada considerando los factores de seguridad que recomienda el API-RP-2A-WSD-2000, es decir, 1.50 para la condición de tormenta y 2.0 para la condición de operación, esto con el fin de evitar problemas de rechazo durante el hincado. Se debe considerar además una longitud de sub-hincado y sobre-hincado aproximadamente de 20 ft en cada uno de los pilotes.

La longitud de penetración de los pilotes dependerá de las siguientes consideraciones:

- Características geotécnicas del sitio.
- Diámetro del pilote que se propone emplear.
- Capacidad axial de cada pilote a diseñar
- Carga axial a compresión inicial sobre el pilote.

Para el cálculo de la longitud de penetración preliminar es necesario conocer los siguientes datos:

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

---

- Diámetro propuesto del pilote.
- Espesor del pilote.
- Peso del pilote.
- Carga axial a compresión crítica,(carga actuante)
- Capacidad de carga axial última en compresión del diámetro propuesto
- Pendiente del pilote.

Con base en los parámetros mecánicos indicados en el reporte final geotécnico, (Tabla IV.I.1) se obtienen las curvas de capacidad de carga axial última, en compresión y en tensión para diferentes diámetros de pilote (30, 36, 42,48, 54,60 y 72 in.) de acuerdo al diámetro propuesto por el diseño. Los parámetros mecánicos necesarios para la obtención de esta curva son:

- Perfil estratigráfico del sitio, Figuras IV.1.6,7.
- Esfuerzo cortante, Figura IV.1.8.
- Peso volumétrico, Figura IV.1.9.
- Fricción unitaria, Figura IV.1.10.
- Capacidad unitaria por punta, Figura IV.1.11.
- Deformación al 50%, Figura IV.1.12.

Una vez que se conocen los parámetros mecánicos del sitio, obtenidos del estudio geotécnico, se obtiene la curva de capacidad de carga axial última en compresión y en tensión, con la cual se determina la longitud de penetración del pilote considerando las cargas actuantes (Figura IV.1.15).

Además del diámetro y longitud de penetración, para el predimensionamiento de los pilotes, se deben de considerar los siguientes aspectos:

- a) Pendiente para cada tipo de pilote
- b) distribución de espesores
- c) número de tramos que conformaran cada pilote.

A continuación se describen estos puntos:

- a) Pendiente de cada tipo de pilote.

Para lograr una mayor estabilidad en la plataforma, los Ejes que definen las piernas de la misma, conservan una pendiente que determinara a su vez la pendiente de los pilotes, ver Figura IV.1.13.

- b) Distribución de espesores.

La distribución de los espesores en la pared del pilote, se determina con base en los análisis de esfuerzos a los que se somete el pilote sobre y de bajo de la línea de lodos, así como también a un análisis de hincado durante su instalación. Esta distribución debe ser apropiada para resistir fuerzas axiales y momentos flexionantes producto de las cargas de operación y tormenta a las que se encuentra sometida la plataforma, así como las cargas generadas durante el hincado, izaje y maniobras de instalación del pilote. El API-RP-2A-WSD-2000, recomienda que la pared del pilote debe tener como mínimo un espesor de 1.25 in. y un máximo de 2.5 in., cuidando la zona de mayor deflexión ubicada alrededor de 15 a 20 veces el diámetro del pilote a partir del lecho marino.

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

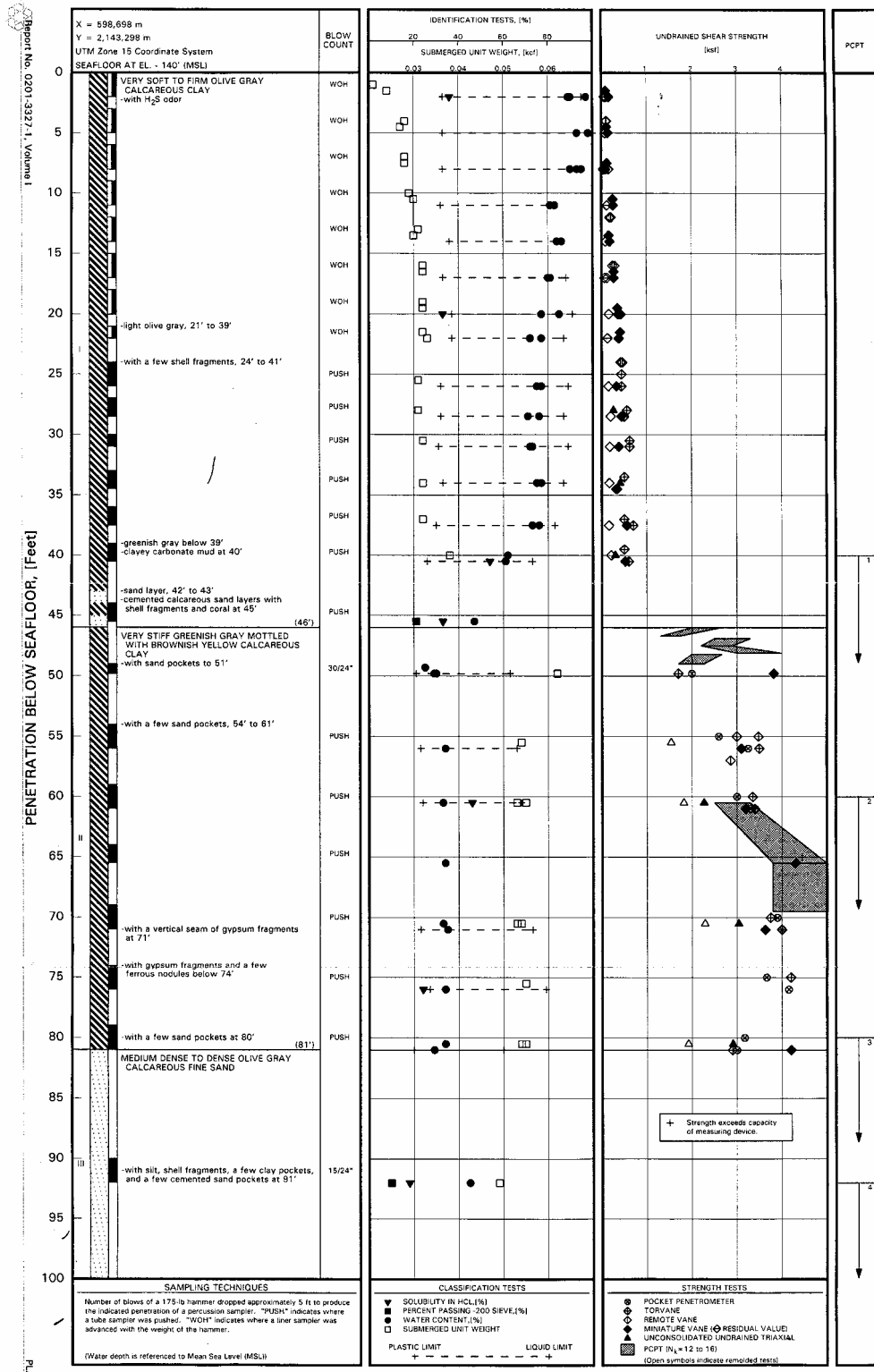


Figura IV.1.6. Primeros 14.30 m. del Perfil estratigráfico del sitio.



IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

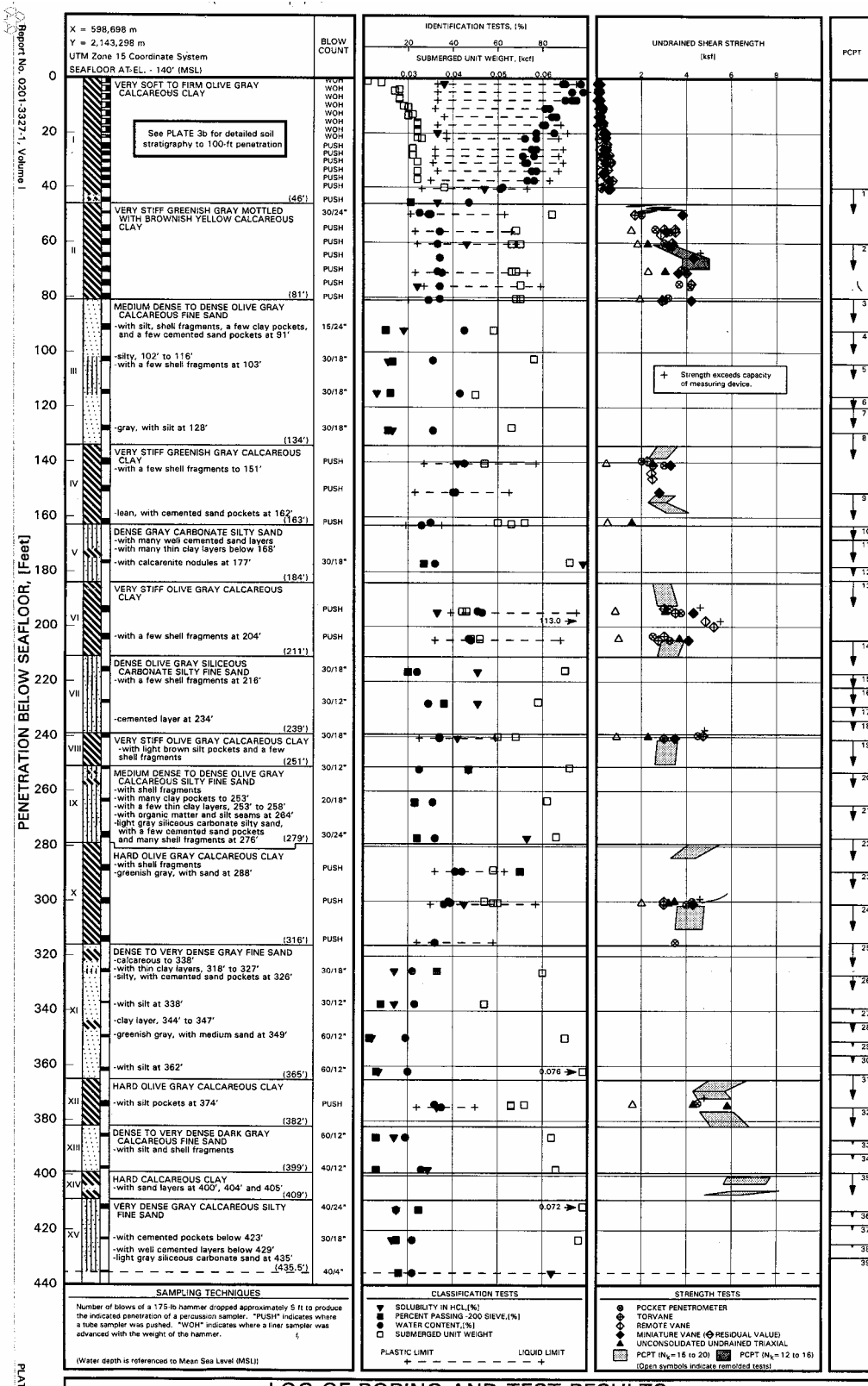
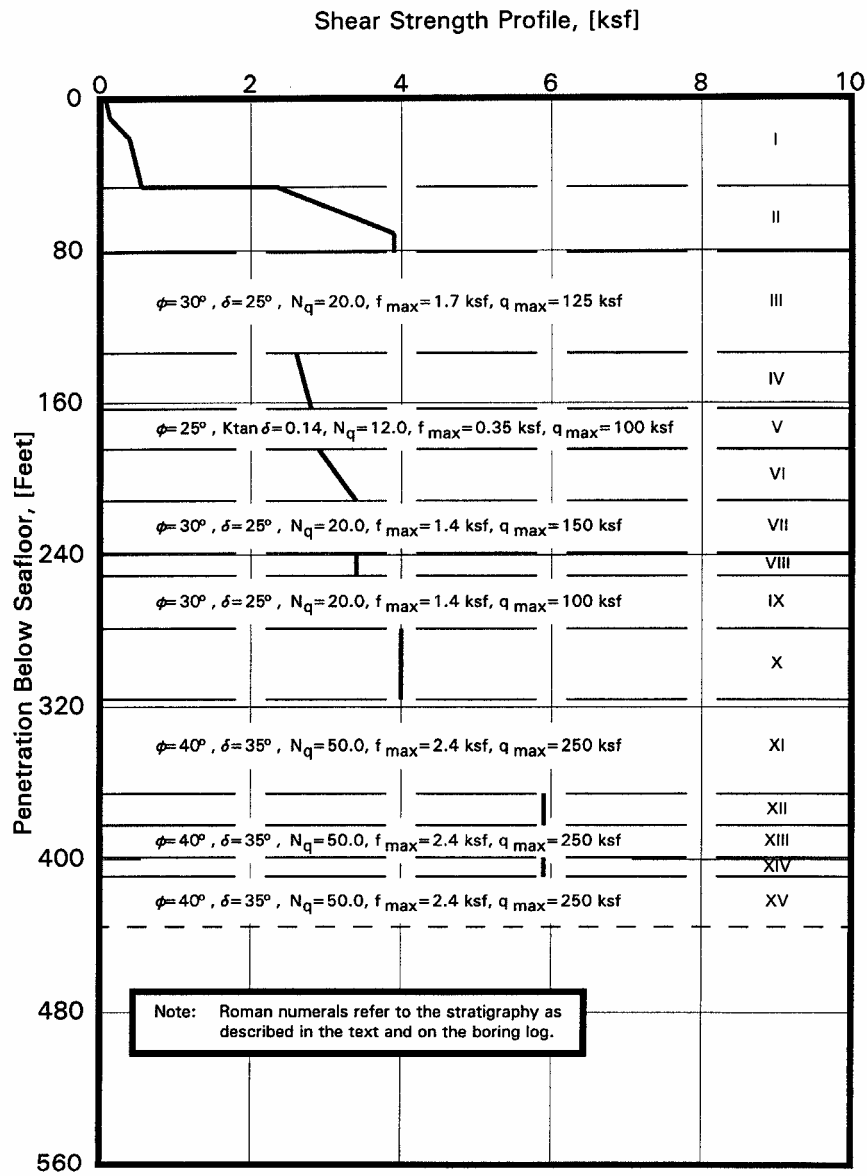


Figura IV.1.7. Perfil estratigráfico del sitio



**DESIGN STRENGTH PARAMETERS**

Figura IV.1.8. Perfil del esfuerzo cortante

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

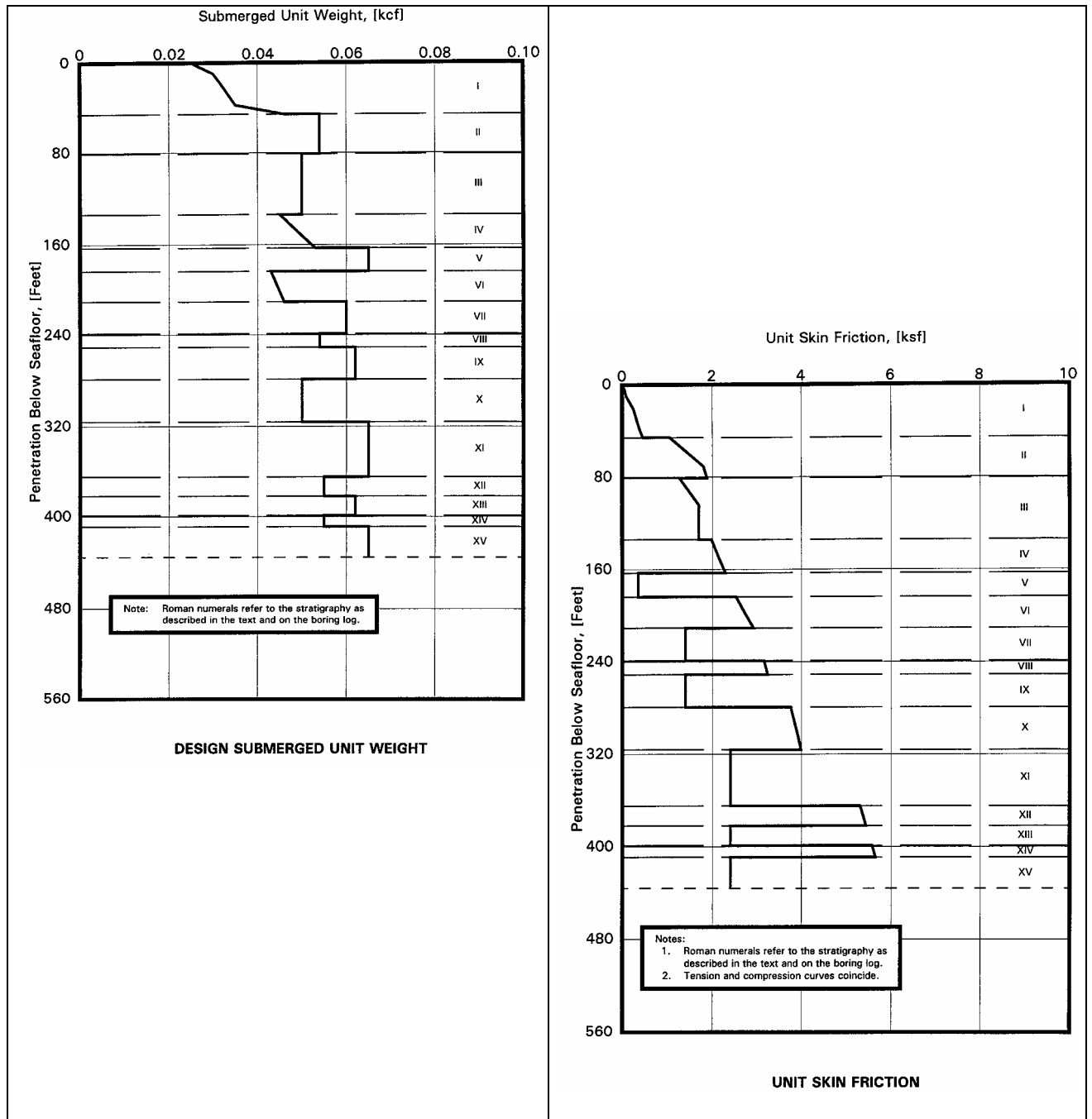


Figura IV.1.9. Parámetros mecánicos del suelo.

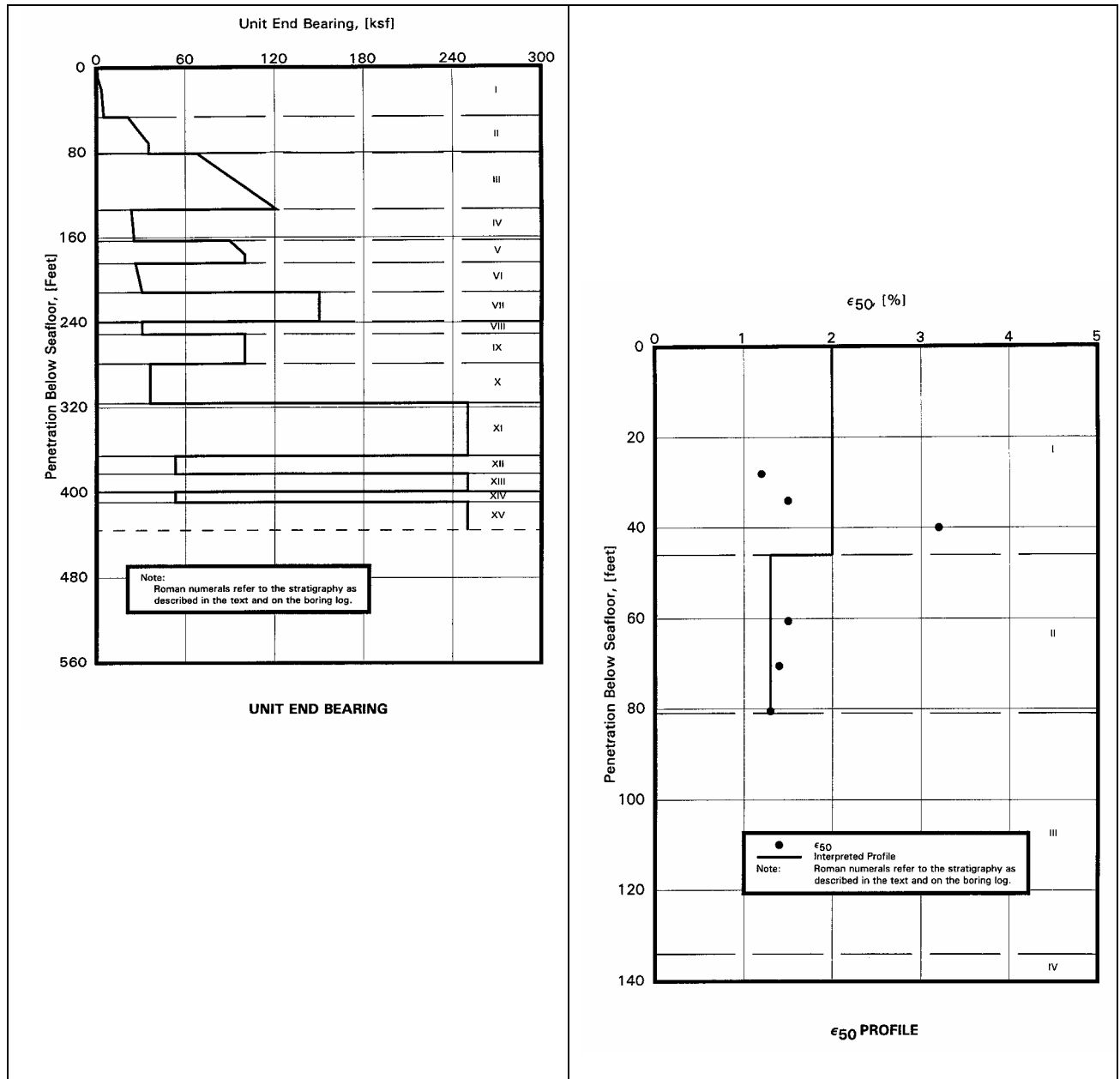


Figura IV.1.10. Parámetros mecánicos del suelo.

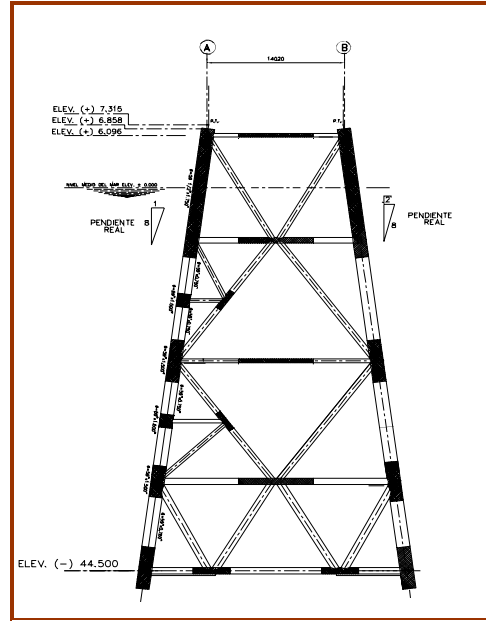


Figura IV.1.11. Pendiente real en cada pierna del jacket

c) Número de segmentos que conforman cada pilote.

Los pilotes generalmente se seccionan en tramos o segmentos que se sueldan en campo, esto se debe a que la longitud total de cada pilote es muy grande, aproximadamente de 200 m (656 ft) o más, lo que dificulta la construcción e instalación del mismo.

Para determinar la longitud de cada sección de pilote, se considera lo siguiente:

- El equipo de instalación de la compañía,
- el tirante de agua in situ,
- la estratigrafía del suelo,
- las propiedades mecánicas del estrato donde se pretenda interrumpir el hincado de una sección debido a la aplicación de soldadura de campo por la adición de otra sección.
- la capacidad del martillo para el hincado de las secciones,
- los esfuerzos desarrollados en la sección del pilote durante el izaje e hincado.

En el diseño de pilotes para plataformas marinas fijas, se recomienda que el hincado no debe interrumpirse en un suelo arenoso durante las etapas de soldadura de campo entre los segmentos, esto con el fin de evitar un posible congelamiento del pilote que provoque rechazo prematuro durante el hincado. Por tal motivo, la longitud propuesta de cada tramo debe ser adecuada para cumplir con esta recomendación. En el diseño de pilotes se manejan longitudes de segmentos que oscilan entre los 15.240 m (50 ft.) hasta 73.152 m. (240 ft.) ó mayores si el equipo de instalación lo permite. El número dependerá de la precisión requerida en el análisis, cada segmento deberá considerar su rigidez axial y lateral, incluyendo la capacidad axial y lateral del suelo, a través de curvas normalizadas con la capacidad axial y lateral última. De igual forma, cada segmento de pilote será analizado de forma

independiente por esfuerzos inducidos durante el izaje en patio de fabricación y en campo, así como su respectivo análisis de hincado estático y dinámico.

Tabla IV.1.1. Listado de los parámetros mecánicos del suelo obtenidos del estudio geotécnico.

NIVEL	PROF	COHESION P.	VOLUM e(50)	ANG FRIC	FMAX	QMAX	NQ
	(PIES)	(KSF)	(KCF)	GRADOS	(KSF)	(KSF)	
1	0.00,	0.0804,	0.0260,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
2	1.00,	0.0850,	0.0264,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
3	1.50,	0.0873,	0.0266,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
4	1.80,	0.0887,	0.0267,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
5	2.00,	0.0896,	0.0268,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
6	2.10,	0.0901,	0.0268,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
7	3.00,	0.0942,	0.0272,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
8	4.00,	0.0988,	0.0276,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
9	4.92,	0.1030,	0.0280,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
10	5.00,	0.1034,	0.0280,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
11	5.91,	0.1076,	0.0284,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
12	6.00,	0.1080,	0.0284,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
13	6.89,	0.1121,	0.0288,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
14	7.00,	0.1126,	0.0288,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
15	8.00,	0.1172,	0.0292,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
16	9.00,	0.1218,	0.0296,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
17	9.82,	0.1256,	0.0299,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
18	10.85,	0.1307,	0.0301,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
19	20.45,	0.3819,	0.0318,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
20	37.83,	0.4987,	0.0350,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
21	46.00,	0.5528,	0.0454,	0.020,	0.00,	0.00,	0.0,
22	46.07,	2.3934,	0.0541,	0.013,	0.00,	0.00,	0.0,
23	71.00,	3.9344,	0.0541,	0.013,	0.00,	0.00,	0.0,
24	81.00,	3.9344,	0.0541,	0.013,	0.00,	0.00,	0.0,
25	81.07,	0.0000,	0.0500,	0.000,	30.00,	1.70,	125.0,
26	134.00,	0.0000,	0.0500,	0.000,	30.00,	1.70,	125.0,
27	134.07,	2.6230,	0.0449,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
28	163.00,	2.8279,	0.0530,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
29	163.07,	0.0000,	0.0652,	0.000,	25.00,	0.35,	100.0,
30	184.00,	0.0000,	0.0652,	0.000,	25.00,	0.35,	100.0,
31	184.07,	2.9508,	0.0430,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
32	211.00,	3.4016,	0.0459,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
33	211.07,	0.0000,	0.0598,	0.000,	30.00,	1.40,	150.0,
34	239.00,	0.0000,	0.0598,	0.000,	30.00,	1.40,	150.0,
35	239.07,	3.4016,	0.0538,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
36	251.00,	3.4016,	0.0538,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
37	251.07,	0.0000,	0.0620,	0.000,	30.00,	1.40,	100.0,
38	279.00,	0.0000,	0.0620,	0.000,	30.00,	1.40,	100.0,
39	279.07,	4.0000,	0.0502,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
40	316.00,	4.0000,	0.0502,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
41	316.07,	0.0000,	0.0650,	0.000,	40.00,	2.40,	250.0,
42	365.00,	0.0000,	0.0650,	0.000,	40.00,	2.40,	250.0,
43	365.07,	5.9016,	0.0549,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
44	382.00,	5.9016,	0.0549,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
45	382.07,	0.0000,	0.0622,	0.000,	40.00,	2.40,	250.0,
46	399.00,	0.0000,	0.0622,	0.000,	40.00,	2.40,	250.0,
47	399.07,	5.9016,	0.0551,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
48	409.00,	5.9016,	0.0551,	0.010,	0.00,	0.00,	0.0,
49	409.07,	0.0000,	0.0650,	0.000,	40.00,	2.40,	250.0,
50	435.50,	0.0000,	0.0650,	0.000,	40.00,	2.40,	250.0,

### IV.1.2. Modelo analítico de la interacción suelo- estructura.

Con base en los parámetros mecánicos obtenidos del estudio geotécnico y que se enlistan en la Tabla IV.1.1, se reproducen los elementos mecánicos necesarios para el diseño de los pilotes, tales como capacidad axial última, capacidad lateral, capacidad por fricción y por punta. El listado se obtiene de un software especializado que genera los parámetros en sistema inglés.

Es importante destacar que durante el cálculo de los parámetros mecánicos del sitio, se siguen los criterios establecidos por el API RP 2A-WSD-2000, que a continuación se presentan.

#### IV.1.2.1 Capacidad axial última del pilote

La capacidad de carga por compresión axial de un pilote ( $Q_d$ ), se obtiene de acuerdo a las recomendaciones del API RP 2A -WSD-2000, considerando la resistencia del suelo alrededor del fuste ( $Q_{so}$ ) y en la punta, (Figuras IV.1.9 y 10). La resistencia por punta se calcula como la resultante de las contribuciones del área interior del pilote en la punta ( $Q_a$ ) más la resistencia que resulte MENOR entre el área interna del pilote en la punta ( $Q_{pi}$ ) o la resistencia interna por el fuste ( $Q_{si}$ ), por lo tanto, la capacidad de carga axial última del pilote esta dada por la siguiente ecuación:

$$Q_d = Q_{so} + Q_a + \text{el menor de los valores de } Q_{si} + Q_{pi} \quad \text{Ec. 4.1}$$

donde:

- $Q_{so}$  =  $f \times A_{so}$  = resistencia externa del fuste (kN)
- $Q_a$  =  $q \times A_a$  = Capacidad de carga anular (kN)
- $Q_{si}$  =  $f \times A_{si}$  = resistencia interna del fuste (kN)
- $Q_{pi}$  =  $q \times A_{pi}$  = la capacidad del área interna en la punta (kN)
- $f$  = resistencia unitaria en el fuste (kPa)
- $q$  = resistencia unitaria en la punta (kPa)
- $A_{so}$  = área externa del fuste ( $m^2$ )
- $A_a$  = área del anillo en la punta del pilote ( $m^2$ )
- $A_{si}$  = área interna del fuste ( $m^2$ )
- $A_{pi}$  = área definida por el diámetro interior del pilote ( $m^2$ )

La capacidad de carga axial en tensión se calcula como la suma de la fricción total externa en el fuste más el peso efectivo del pilote, sin considerar la contribución debida a la fricción interna del fuste. Las siguientes secciones describen los lineamientos recomendados por el del API RP 2A-WSD-2000 para determinar la resistencia unitaria en el fuste y la capacidad unitaria por punta en suelos cohesivos y friccionantes.

### 1) CAPACIDAD DE CARGA UNITARIA EN EL FUSTE\_

#### 1-a) Suelos cohesivos (sílicos y Carbonatados).

En suelos cohesivos el API RP 2A -WSD-2000, Sección 6.4.2, recomienda que la fricción unitaria ( $f$ ) en cualquier punto a lo largo del pilote se calcule utilizando la siguiente ecuación:

$$f = \alpha S_u \quad \text{Ec. 4.2}$$

donde:

$\alpha$  = Factor adimensional y

$S_u$  = Resistencia al corte no drenada del suelo (kPa)

El factor  $\alpha$  se puede calcular de la siguiente forma:

$$\alpha = 0.5 \psi^{-0.5} \text{ para } \psi \leq 1.0, \text{ ó}$$

$$\alpha = 0.5 \psi^{-0.25} \text{ para } \psi > 1.0 \text{ ó}$$

con la condición limitante que  $\alpha \leq 1.0$

donde:

$$\psi = S_u / \sigma'_v$$

$\sigma'_v$  = Esfuerzo vertical efectivo en el punto de interés (Kpa).

#### 1-b) Suelos granulares (Sílicos).

El procedimiento recomendado en el API RP 2A-WSD-2000, Sección 6.4.3, se utiliza para determinar la resistencia unitaria de fricción para los pilotes hincados en suelos granulares sílicos, la resistencia unitaria de fricción ( $f$ ) esta dada en función del empuje lateral de tierra contra el pilote y del ángulo de fricción entre el pilote y el suelo, con la siguiente expresión:

$$f = \sigma'_v K \tan \delta \quad \text{Ec. 4.3}$$

donde:

$K$  = Coeficiente de empuje lateral del suelo

$\sigma'_v$  = Esfuerzo vertical efectivo en el punto de interés (kPa)

$\delta$  = Ángulo de fricción entre la pared del pilote y el suelo.

El API RP 2A-WSD-2000, recomienda valores de  $K$  de **0.8** para pilotes tubulares hincados de punta abierta sin taponamiento, y **1.0** para pilotes de desplazamiento total (taponados o de punta cerrada).

El API RP 2A-WSD-2000, también presenta valores recomendados para  $\delta$ , además de especificar valores limitantes de resistencia unitaria de fricción, estos valores se presentan en la Tabla IV.1.2. Los valores de esta tabla están seleccionados en función de los resultados granulométricos y de la interpretación que se da la densidad relativa usando los datos del PCPT y del número de golpes necesarios para avanzar el muestreador dentro de los suelos.



**Tabla IV.1.2. Parámetros de diseño recomendados por el API RP 2A WSD-(2000) para suelos sílicos no cohesivos.**

DENSIDAD	DESCRIPCION DEL SUELO	ANGULO DE FRICCION SUELO-PILOTE $\delta$ (GRADOS)	IMITES PARA VALORES DE FRICCION LATERAL $f$ , kPa, (KIPS/FT <sup>2</sup> )	$N_q$	LIMITES PARA VALORES DE CAPACIDAD POR PUNTA $q$ , MPa, (KIPS/FT <sup>2</sup> )
MUY SUELTA SUELTA MEDIA	ARENA ARENA LIMOSA ** LIMO	15	47.80 (1.0)	8	1.9 (40)
SUELTA MEDIA COMPACTA	ARENA ARENA LIMOSA** LIMO	20	67.0 (1.4)	12	2.9 (60)
MEDIA COMPACTA	ARENA ARENA LIMOSA **	25	81.30 (1.7)	20	4.8 (100)
COMPACTA MUY COMPACTA	ARENA ARENA LIMOSA**	30	95.70 (2.0)	40	9.6 (200)
COMPACTA MUY COMPACTA	GRAVA ARENA	35	14.80 (2.4)	50	12 (250)

\*\* La denominación arena-limo incluye aquellos suelos que contienen porciones significativas de arena y limo. En general los valores de resistencia se incrementan con el aumento de la porción de arena y se disminuyen con el aumento de la porción de limo.

**1-c) Suelos Granulares (Carbonatados).**

Los pilotes hincados en arenas y limo carbonatados ( $\text{CaCO}_3 > 50\%$ ) tienden a desarrollar una capacidad de carga significativamente menor a aquella pronosticada por la teoría convencional, esto se debe a que los suelos carbonatados se caracterizan por valores de dureza relativamente bajos y de una gran porosidad.

Para tener en cuenta la reducción de la capacidad de carga, el valor del término  $Kt \tan \delta$  de la ecuación 4.3, se limita a **0.14** con esto se considera el bajo empuje lateral de la tierra y el bajo ángulo de fricción entre la pared del pilote y el suelo asociados con las arenas y los limos carbonatados.

Alba et al.,1999, recientemente publicaron un resumen sobre la tecnología de punta utilizada en esta área, donde revisan publicaciones de los últimos 25 años sobre **suelos carbonatados**. Johnson et al. (1999), basándose en este artículo y con los datos proporcionados por la exploración en la Sonda de Campeche, publicaron un artículo documentando la metodología para optimizar los parámetros utilizados en el cálculo de la capacidad de carga axial de los pilotes cuando existen datos sobre la penetración de cono, Tabla IV.1.3

Tabla IV.1.3. Valores de la Resistencia Unitaria Límite en el fuste para diferentes contenidos de carbonato (Johnson et al, (2000))

Tipo de Suelo	Contenido de Carbonatos (%)	Resistencia Unitaria Límite en el Fuste (kPa)
Silíceo	$\text{CaCO}_3 < 10\%$	47.8 – 114.8
Calcáreo	$10\% \leq \text{CaCO}_3 < 50\%$	47.8 – 114.8
Carbonatado	$50\% \leq \text{CaCO}_3 < 90\%$	16.8
Carbonatado	$\text{CaCO}_3 > 90\%$	8.0

## 2) CAPACIDAD DE CARGA UNITARIA POR PUNTA.

**2-a) Suelos Cohesivos (Sílicos y Carbonatados).** Se usan procedimientos recomendados por el API RP 2A-WSD-2000 para determinar la resistencia unitaria de punta en las arcillas sílicas y carbonatadas. La resistencia unitaria de punta en este tipo de suelo se puede estimar usando la siguiente ecuación:

$$q = 9 Su \quad \text{Ec. 4.4}$$

donde:

$Su$  = Resistencia al corte sin drenaje del suelo en el punto de interés.

**2-b) Suelos Granulares (Sílicos).** Para suelos no cohesivos sílicos, no cementados el API RP 2A-WSD-2000 recomienda que la capacidad unitaria de punta ( $q$ ) se calcule utilizando la siguiente expresión:

$$q = \sigma'_v Nq \leq q_{lim} \quad \text{Ec. 4.5}$$

donde:

$\sigma'_v$  = Esfuerzo vertical efectivo del punto en cuestión

$Nq$  = Coeficiente adimensional de capacidad de carga que es función de  $\phi$  (ángulo de fricción interna)

$q_{lim}$  = Capacidad unitaria límite por punta

Factores de capacidad de carga ( $Nq$ ) para los suelos granulares compuestos principalmente de sílice recomendados por el API RP 2A-WSD -2000 se representan en la Tabla IV.1.2. Los valores limitantes de resistencia unitaria de punta también se muestran en dicha tabla.

**2-c) Suelos Granulares (Carbonatados).** El método para determinar la capacidad de carga por punta en arenas carbonatadas es similar al utilizado en el caso de las arenas sílicas, excepto que se utilizan valores menores de la capacidad unitaria límite por punta con el propósito de considerar el fenómeno de rompimiento de granos que se presenta en este tipo de suelos. Los valores adoptados se presentan en la Tabla IV.1.4. (Johnson et al., (2000)).

**Tabla. IV.1.4 Valores de la Resistencia Unitaria Límite por punta para diferentes contenidos de carbonato (Johnson et al, (2000))**

Tipo de suelo	Contenido de Carbonatos (%)	Capacidad Unitaria Límite por Punta (kPa)
Silíceo	$\text{CaCO}_3 < 10\%$	1900 – 12000
Calcáreo	$10\% \leq \text{CaCO}_3 < 50\%$	1900 – 12000
Carbonatado	$50\% \leq \text{CaCO}_3 < 90\%$	2874
Carbonatado	$\text{CaCO}_3 > 90\%$	1915

Con base en la ecuación 4.1 y considerando los criterios descritos anteriormente así como los parámetros mecánicos presentados en la Tabla IV.1.1. por medio de un software especializado, se calculan la capacidad axial última a compresión y tensión, la capacidad lateral y la capacidad en el fuste en el diámetro propuesto del pilote.

A continuación se presenta el listado donde se aprecian los valores de capacidad de carga para el diámetro propuesto. Tabla IV.1.5.

En seguida se presentan los gráficos correspondientes a estos valores, **a excepción de la capacidad de carga axial última**, todos los gráficos se presentan en sistema inglés tal como los arroja el software utilizado (Figuras IV.1.12, IV.1.13, IV.1.14 y IV.1.15).

Tabla IV.1.5. Capacidad de carga axial última a compresión (Qf + Qp) y a tensión (fA) obtenidas de los parámetros mecánicos del estudio geotécnico el sitio de interés.

CAPACIDAD DE CARGA AXIAL, DIAMETRO= 54 PULGS					
H (PIES)	FRIC-UNIT (KSF)	PUNTA UNIT (KSF)	fA (KIPS)	Qf+Qp (KIPS)	Pu-Lat (Lb/in)
0.00	0.0804	0.724	0.00	0.00	90.45
1.00	0.0317	0.765	0.79	1.58	109.07
1.50	0.0358	0.786	1.03	2.06	118.63
1.80	0.0379	0.798	1.19	2.37	124.46
2.00	0.0393	0.806	1.30	2.59	128.37
2.10	0.0399	0.811	1.35	2.70	130.35
3.00	0.0452	0.848	1.89	3.79	148.35
4.00	0.0515	0.889	2.58	5.15	169.02
4.92	0.0585	0.927	3.29	6.58	188.65
5.00	0.0591	0.931	3.36	6.72	190.37
5.91	0.0657	0.968	4.16	8.32	210.49
6.00	0.0664	0.972	4.24	8.49	212.40
6.89	0.0727	1.009	5.12	10.24	232.71
7.00	0.0735	1.013	5.23	10.47	235.12
8.00	0.0804	1.055	6.32	12.64	258.52
9.00	0.0873	1.096	7.51	15.01	282.60
9.82	0.0929	1.130	8.55	17.10	302.80
10.85	0.0999	1.176	9.95	19.91	328.59
20.45	0.2399	3.437	33.01	66.02	998.91
37.83	0.3841	4.488	109.66	181.05	1683.11
46.00	0.4571	4.975	158.24	237.37	1865.70
46.07	1.0674	21.541	158.99	317.99	8077.73
71.00	1.8170	35.410	667.29	1230.46	13278.60
81.00	1.8974	35.410	929.85	1493.01	13278.60
81.07	1.2715	68.168	931.42	1862.83	36746.93
134.00	1.7000	121.098	2043.17	3969.16	65279.52
134.07	1.9932	23.607	2045.00	2420.45	8852.63
163.00	2.2987	25.451	2922.67	3327.45	9544.16
163.07	0.3500	89.742	2923.98	4351.26	43945.50
184.00	0.3500	100.000	3027.54	4617.97	51964.44
184.07	2.5547	26.557	3028.98	3451.35	9958.95
211.00	2.9226	30.614	4071.61	4558.51	11480.40
211.07	1.4000	150.000	4073.75	6459.39	108326.27
239.00	1.4000	150.000	4626.54	7012.18	126333.27
239.07	3.1573	30.614	4628.79	5115.69	11480.40
251.00	3.2425	30.614	5168.48	5655.38	11480.40
251.07	1.4000	100.000	5170.77	6761.20	133339.61
279.00	1.4000	100.000	5723.56	7314.00	152009.08
279.07	3.7554	36.000	5726.12	6298.67	13500.00
316.00	3.9946	36.000	7749.22	8321.77	13500.00
316.07	2.4000	250.000	7752.38	11728.46	623386.06
365.00	2.4000	250.000	9412.54	13388.62	747602.50
365.07	5.3149	53.114	9416.36	10261.10	19917.90
382.00	5.4423	53.114	10703.68	11548.43	19917.90
382.07	2.4000	250.000	10707.57	14683.64	784227.56
399.00	2.4000	250.000	11281.99	15258.06	825355.56
399.07	5.5843	53.114	11285.94	12130.69	19917.90
409.00	5.6562	53.114	12074.92	12919.67	19917.90
409.07	2.4000	250.000	12078.91	16054.98	847049.50
435.50	2.4000	250.000	12975.66	16951.73	914146.06

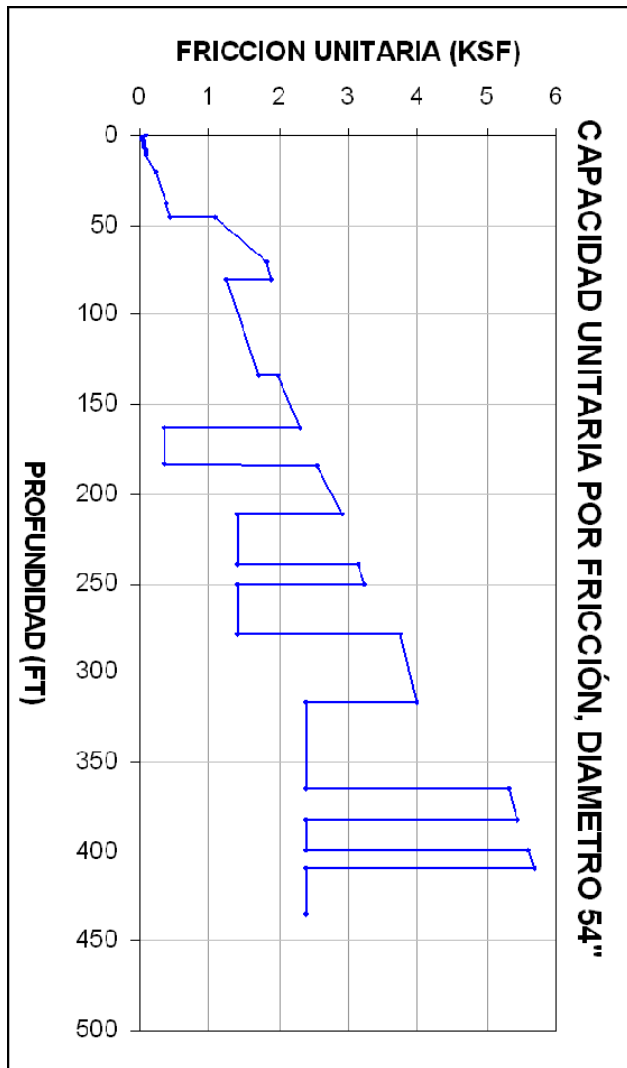


Figura IV.1.12. Capacidad unitaria por fricción.

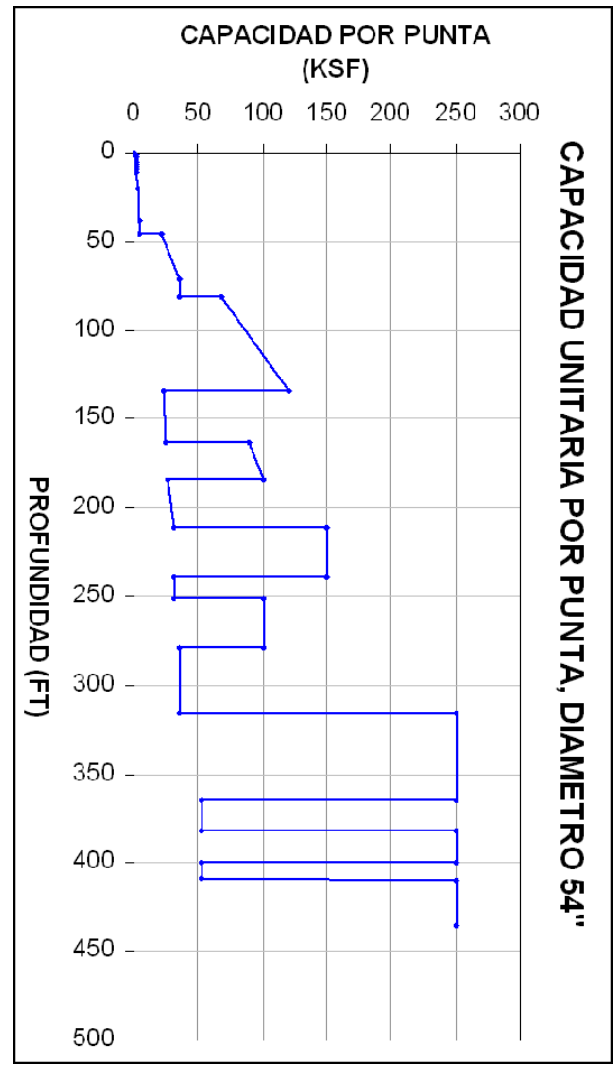


Figura IV.1.13. Capacidad unitaria por punta.

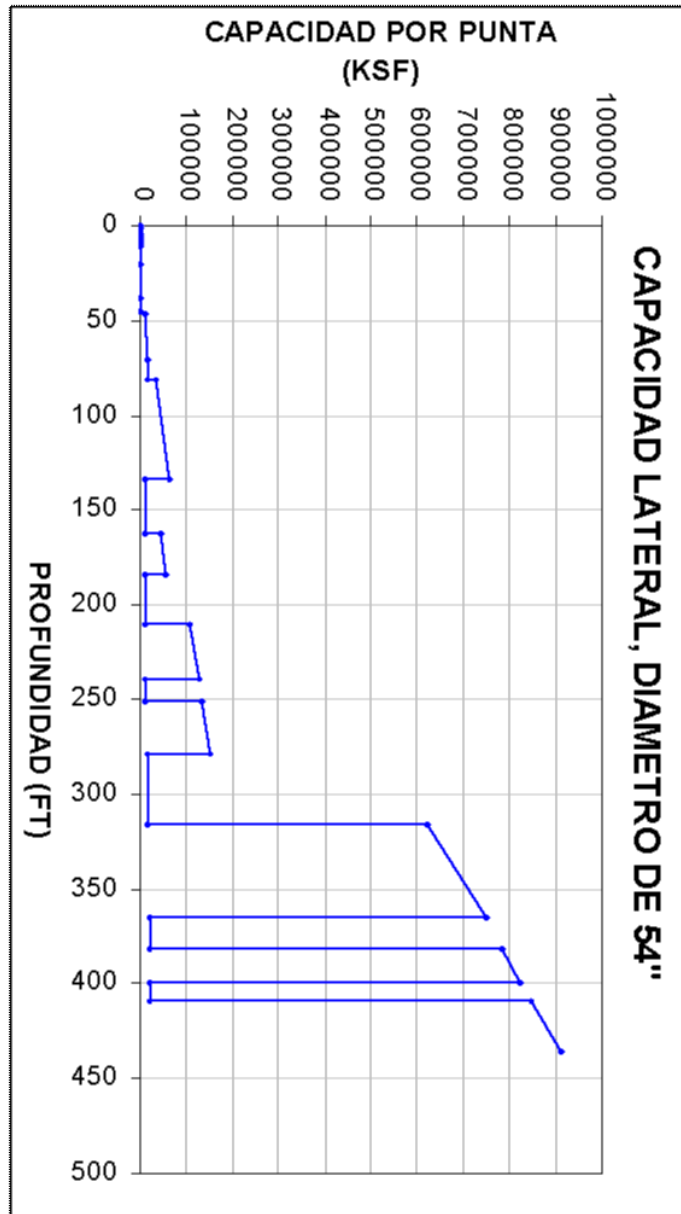


Figura IV.1.14 Capacidad lateral.

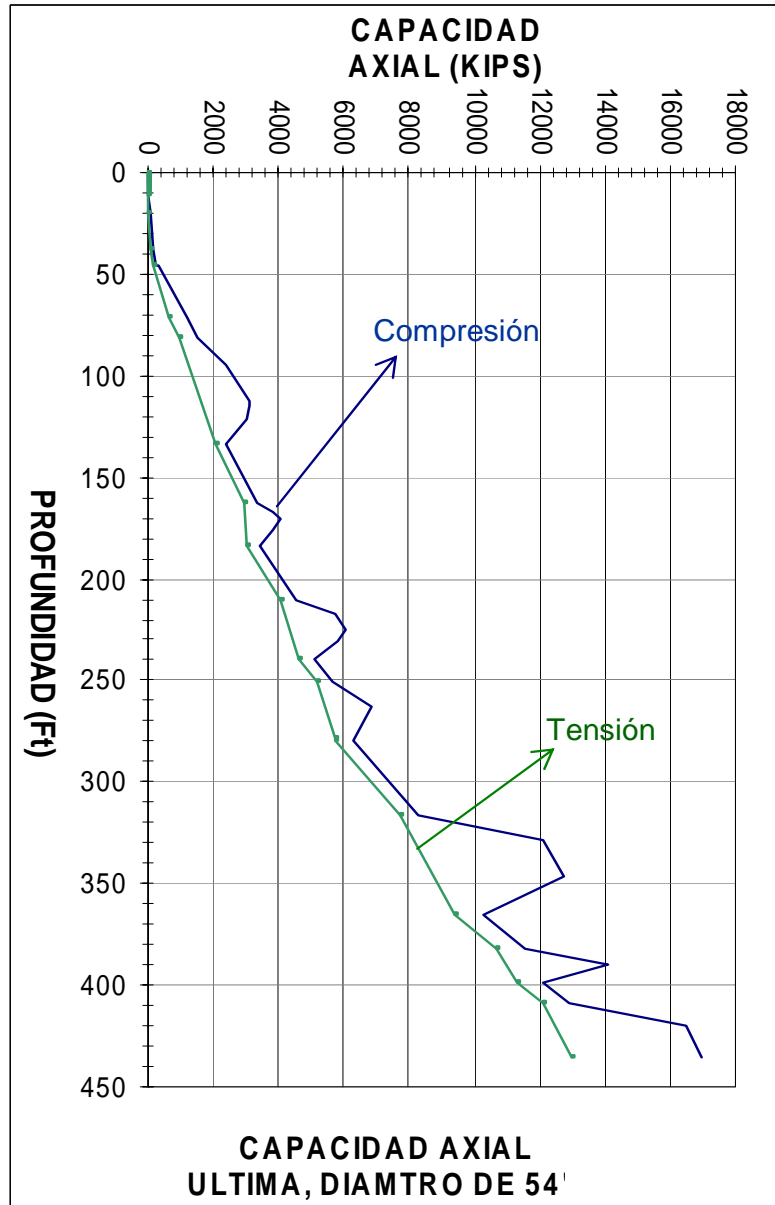


Figura IV.1.15. Capacidad axial última a compresión y a tensión para un diámetro de 1.372 m (54 in).

En el modelo de interacción suelo-estructura, se debe simular adecuadamente el comportamiento no-lineal del suelo y asegurar la compatibilidad de las deformaciones y el equilibrio de cargas actuantes y resistentes entre la estructura y el sistema suelo-pilote, (Figura IV.1.16). Para ello, una vez determinadas las capacidades de carga axial, por punta, por fricción y lateral, se realiza una discretización de estas mediante artificios matemáticos que obedecen el tipo de suelo del sitio y las especificaciones del API-RP-2A-WSD-2000. Estos artificios se conocen como **curvas de transferencia Q-z, t-z y P-y**, respectivamente.

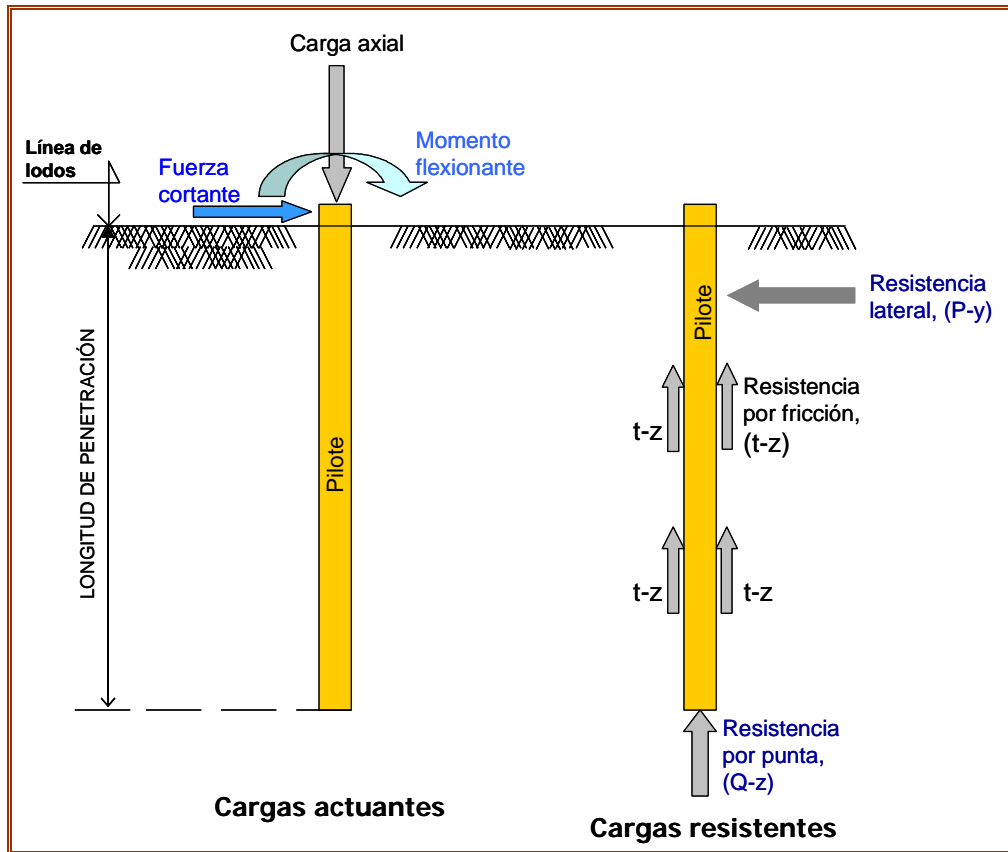


Figura IV.1.16. Cargas actuantes y resistentes en el pilote.

#### IV. 1.2.2. Datos de transferencia de carga axial.

Para realizar la transferencia de carga axial del pilote, se necesitan dos tipos de datos: uno que involucra la fricción lateral a lo largo del pilote (**datos t-z**) y el otro que involucra la capacidad de carga por punta, en la punta del pilote (**datos Q-z**). A continuación se describen los procedimientos utilizados para desarrollar estos datos de transferencia.

##### 1) Datos de transferencia de fricción lateral versus movimiento del pilote, (t-z).

La curva característica de fricción versus movimiento del pilote (**t-z**), en un suelo cohesivo y granular es definida a continuación. Estas curvas se basan en los resultados de pruebas modelo y pruebas de carga en pilotes de tamaño natural, así como en funciones teóricas derivadas (Coyle y Reese, 1966; Coyle y Sulaiman, 1967; Poulos y Davis, 1968; Vijayvergiya, 1977; y Kraft, et al., 1981). Las curvas de transferencia de fricción lateral son las mismas para la carga de compresión y de tensión (Figura IV.1.17).



Para suelos no cohesivos cuyo contenido de carbonato es mayor de 50%, las curvas  $t$ - $z$  exhiben fallas frágiles, con valores residuales que varían entre los 45 por ciento y 73 por ciento de los valores máximos, (Wiltsie et al). Por tanto las curvas  $t$ - $z$  para materiales granulares con un contenido de carbonato mayor al 50% se evalúan con base en los resultados de Wiltsie et al (1998), como se muestra en la Figura IV.1.18

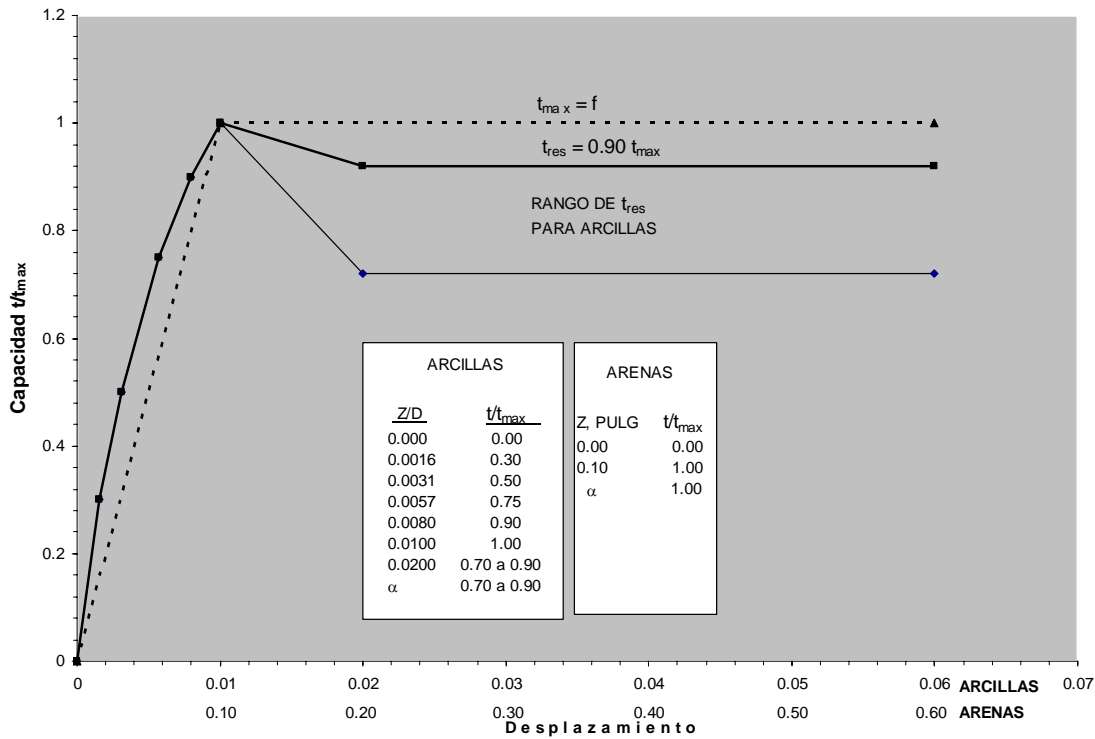


Figura IV.1.17. Curvas de transferencia de fricción lateral.

donde:

$z$  = desplazamiento local del pilote

$D$  = diámetro del pilote

$t$  = resistencia movilizada suelo-pilote

$t_{max}$  = resistencia unitaria máxima suelo-pilote, igual a la fricción lateral unitaria calculada para la capacidad axial del pilote, con el uso de las recomendaciones del API-RP-2A-WSD-2000.

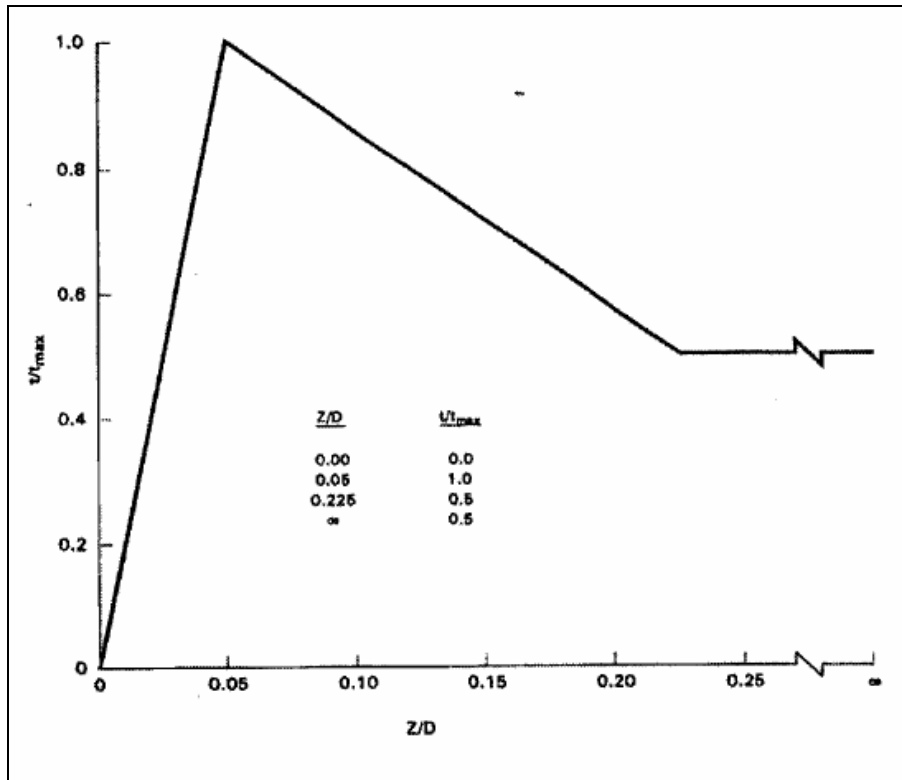


Figura IV.1.18. Curvas de transferencia de carga axial-desplazamiento, suelos granulares carbonatados.

donde:

$z$  = desplazamiento local del pilote

$D$  = diámetro del pilote

$t$  = resistencia movilizada suelo-pilote

$t_{max}$  = resistencia unitaria máxima suelo-pilote, igual a la fricción lateral unitaria calculada para la capacidad axial del pilote, con el uso de las recomendaciones del API-RP-2A-WSD-2000.

## 2) Datos de transferencia de carga en la punta versus desplazamiento de la punta, (Q-z).

Los desplazamientos requeridos para movilizarla capacidad de carga por punta son relativamente grandes. El API RP2A-WSD-2000 indica que la resistencia por punta no se moviliza completamente hasta que la punta del pilote se desplace una distancia de hasta 10% del diámetro del pilote. La curva de carga por punta versus movimiento de la punta, en suelos cohesivos y granulares, se define a continuación:

$z/D$	$Q/Q_p$
0.002	0.25
0.013	0.50
0.042	0.75
0.073	0.90
0.100	1.00

donde:

$z$  = Deflexión axial de punta, in. (mm).

$D$  = Diámetro del pilote, in. (mm).

$Q$  = Capacidad portante de punta, lb. (KN).

$Q_p$  = Capacidad total de punta, lb. (KN)

Wiltzie et al. (1998) ha reportado resultados de pruebas que indican el comportamiento altamente compresible de las arenas carbonatadas, el cual puede afectar significativamente la capacidad de carga por punta. Para considerar este comportamiento, las curvas  $Q$ - $z$  para materiales no cohesivos con más de 50% de contenido de carbonatos se calculan con base en los resultados de Wiltzie et al (1988) y de acuerdo con el estado de la practica en la Bahía de Campeche (Figura IV.I.19).

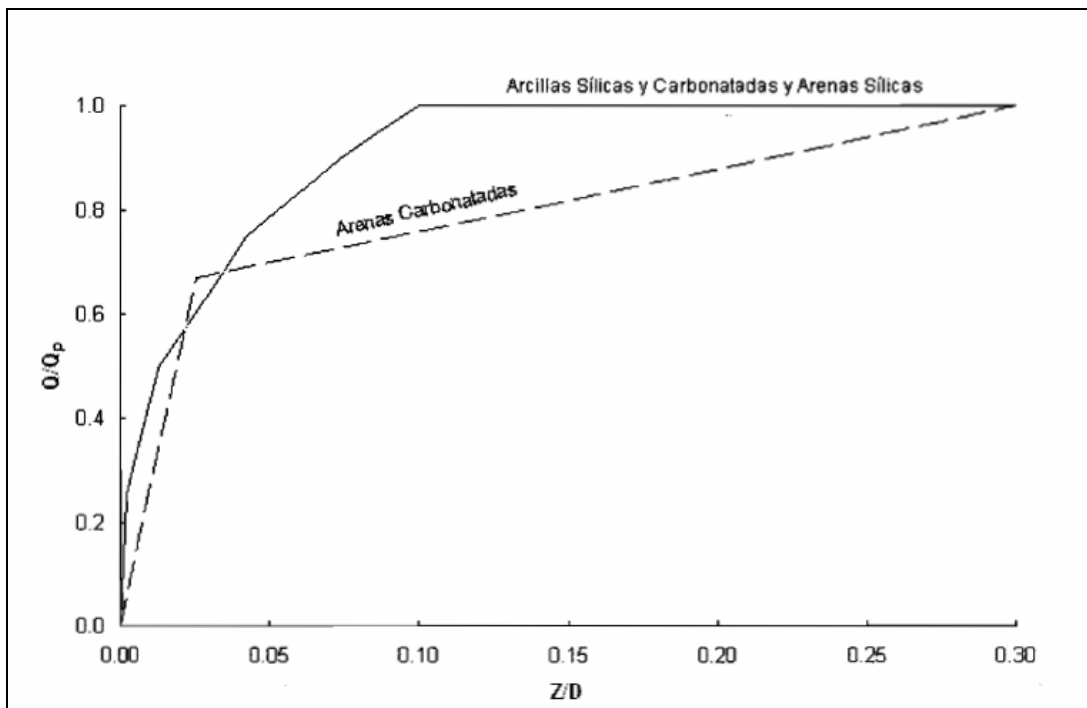


Figura IV.1.20 Curvas de transferencia de carga en la punta del pilote ( $Q$ - $z$ ) (API RP2A-WSD,2000) y arena carbonatada (Wiltzie et al.,1998)

### IV.1.2.3 Datos de transferencia de carga lateral versus deflexión (p-y).

Las deformaciones laterales y los momentos flexionantes en los pilotes se evalúan generalmente modelando el pilote como una viga sobre un medio elástico. El suelo alrededor del pilote se simula mediante un conjunto de resortes independientes entre sí, de características no lineales. Las características de fuerza-deformación de dichos resortes, conocidas como *curvas p-y*, (Figura IV.1.21), se establecen utilizando los procedimientos descritos en el API RP 2A-WS-2000.

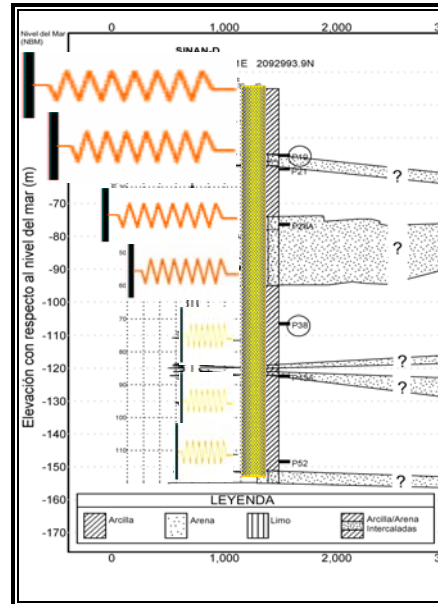


Figura IV.1.21 Esquema representativo de la capacidad lateral de los pilotes.

A continuación se describe brevemente la metodología para el cálculo de las curvas de transferencia de deformaciones laterales y carga axial, con base a las recomendaciones señaladas en el API RP 2A-WS-2000.

#### a) Suelos cohesivos.

Para suelos cohesivos normalmente o ligeramente preconsolidados con resistencias no drenadas menores o iguales a 96 kPa se utilizan los procedimientos empíricos para la construcción de curvas p-y propuestos por Matlock (1970) tal como lo recomienda el API RP 2A-WS-2000.

Las curvas genéricas para la obtención de los valores cíclicos y estáticos de acuerdo con el método de Matlock se muestran en la Figura IV.1.22 y 23.

Capacidad lateral de las arcillas:

$$P_u = 3c + \gamma X + \frac{cX}{D} \quad \text{EC. 4.6}$$

$$P_u = 9 c \text{ para } X > X_r$$

$$X_r = \frac{6 D}{\frac{\lambda D}{c} + J} \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$y_c = 2.5 * \epsilon_c * D \quad \text{Ec. 4.8}$$

Para  $X > X_r$

donde:

$P_u$  = Capacidad lateral última, psi. (Ton/m<sup>2</sup>)

$c$  = Resistencia al corte no drenada, obtenida de muestras de arcilla inalteradas, psi. (Ton/m<sup>2</sup>)

$D$  = Diámetro del pilote, in. (cm)

$\gamma$  = Peso volumétrico efectivo del suelo, kcf. (Ton/m<sup>3</sup>)

$J$  = Constante adimensional, un valor de 0.50 es adecuado para arcillas de la Sonda de Campeche.

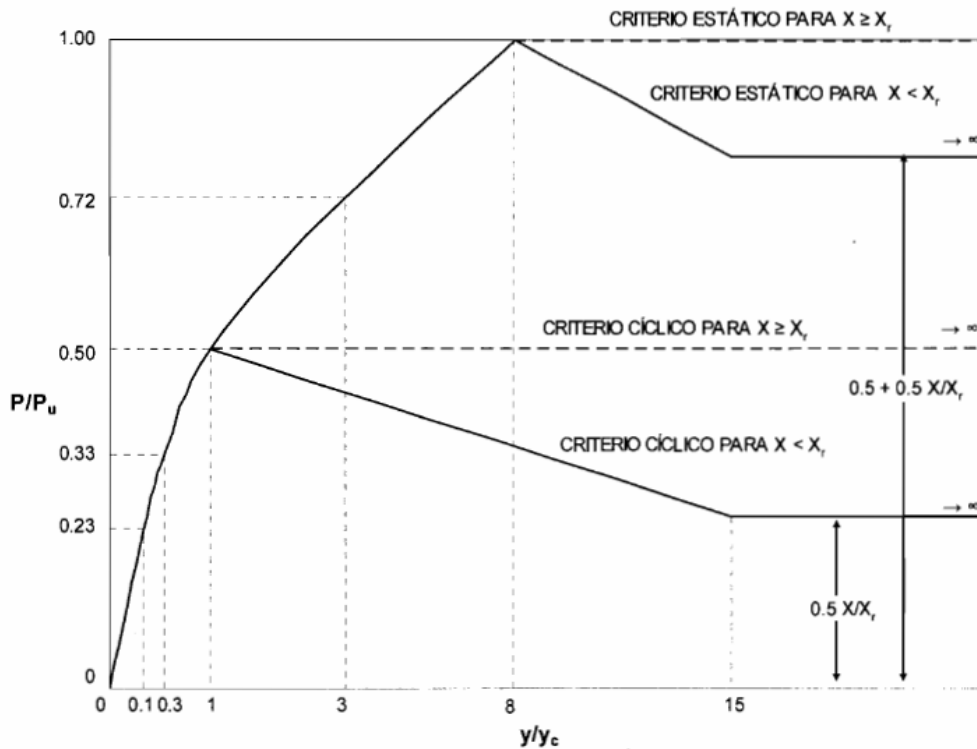


Figura IV.1.22. Curvas de transferencia p-y en arcillas con una  $S_u \leq 96$  kPa (Matlock, 1970)

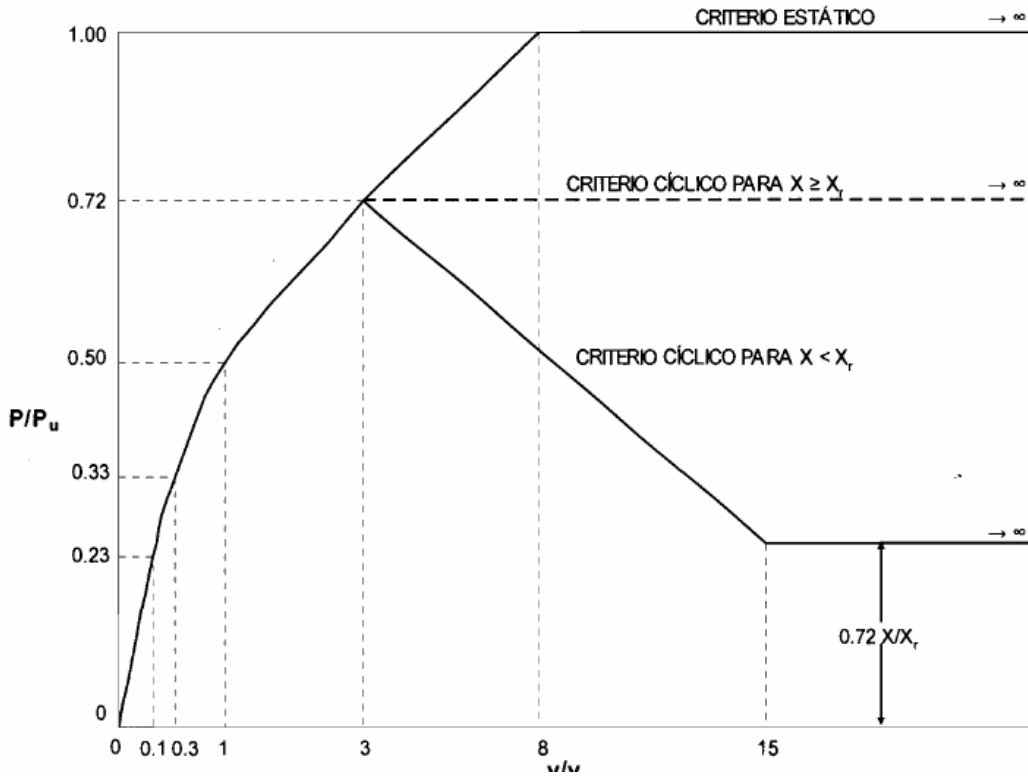


Figura IV.1.23. Curvas de transferencia p-y en arcillas con una  $S_u > 96$  kPa (Matlock, 1970)

**b) Curvas de capacidad lateral para arcilla no consolidada.**

Las relaciones de resistencia a la deflexión para pilotes en arcilla no consolidada son generalmente no lineales. Las curvas p-y para las cargas estáticas pueden ser generadas con la siguiente tabla.

$p/p_u$	$y/y_c$
0.00	0.00
0.50	1.00
0.72	3.00
1.00	8.00
1.00	$\infty$

donde:

$P$  = Resistencia lateral (kpa).

$Y$  = Deflexión lateral (mm).

$Y_c = 2.5\epsilon_c D$  (mm).

$\epsilon_c$  = Tensión que ocurre a la mitad del máximo esfuerzo de la prueba UU.

**c) Suelos granulares (Sílicos).**

Las curvas p-y para suelos granulares sílicos se generan utilizando los procedimientos recomendados por API RP 2A-WSD-2000. (Figura IV.I.24).

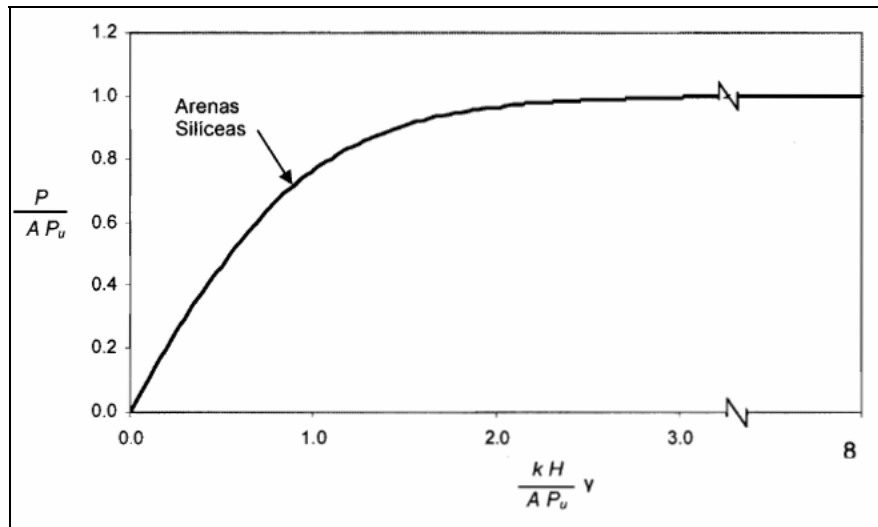


Figura IV.I.24 Curva de transferencia  $p-y$  para arena sílica, de acuerdo al API RP 2A-WSD, 2000.

Para el caso donde el equilibrio se alcanza bajo cargas cíclicas, las curvas  $P-Y$  pueden generarse usando la tabla siguiente:

Tabla IV.1.5.

$X > X_R$		$X < X_R$	
$P/P_u$	$y/Y_c$	$P/P_u$	$y/Y_c$
0	0	0	0
0.5	1	0.5	1
0.72	3	0.72	3
0.72	$\infty$	$0.72 X/X_R$	15
		$0.72 X/X_R$	$\infty$

**d) Suelos granulares (Carbonatados)**

Las curvas  $p-y$  para suelos granulares carbonatados ( $CaCO_3 \geq 50\%$ ) se desarrollan con base en los métodos recomendados por Wesselink et al (1988). La relación entre la resistencia del suelo y la deflexión lateral es función del diámetro del pilote, la profundidad del suelo en consideración y una constante ( $R$ ) que depende del tipo de suelo, utilizada para escalar la rigidez en el intervalo de deformaciones pequeñas. La Figura IV.1.25 presenta la forma característica de la curvas  $p-y$  para arenas carbonatadas.

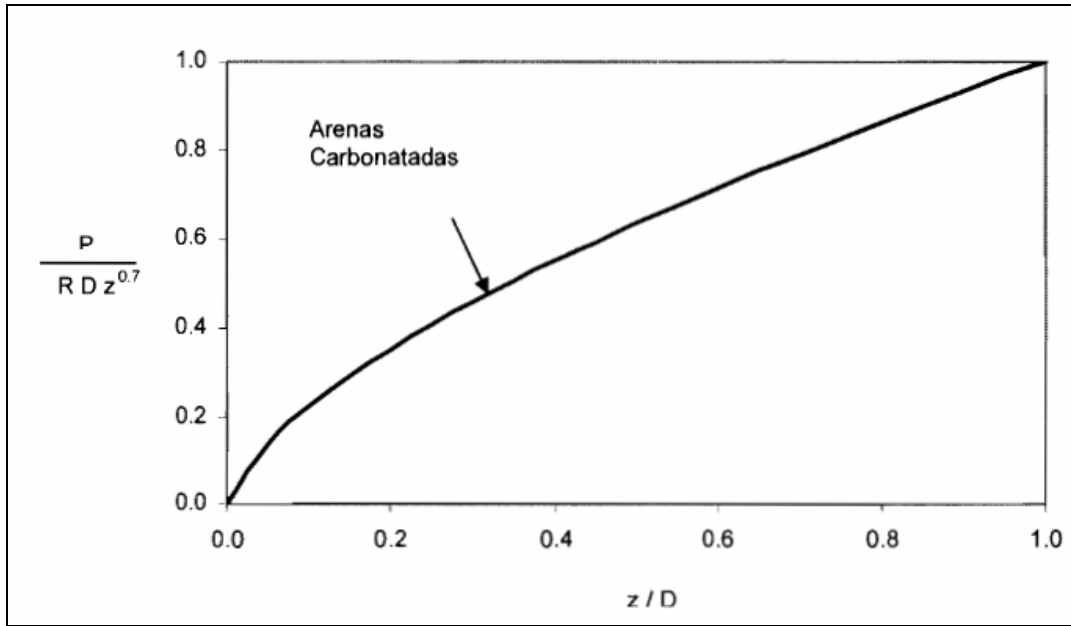


Figura IV.I.25 Curva de transferencia p-y para arena sílica, de acuerdo al API RP 2A-WSD, 2000.

La relación de resistencia-deflexión del suelo (p-y) para las arenas tienen un comportamiento no lineal; para la construcción de las curvas p-y a una profundidad dada se utilizará:

$$P = A * P_u * \tanh \left[ \frac{k * h}{A * P_u} \right] \quad \text{Ec. 4.9}$$

donde:

**A** = factor de carga para la condición de carga estática o cíclica

**A** = 0.9 para carga cíclica

Para carga estática:

$$A = \left( 3.0 - 0.8 \frac{H}{D} \right) \geq 0.9 \quad \text{Ec. 4.10}$$

**P<sub>u</sub>** = capacidad ultima a la profundidad dada H (KN/m)

**K**= Módulo de reacción (KN/m<sup>3</sup>), (Figura IV.1.26).



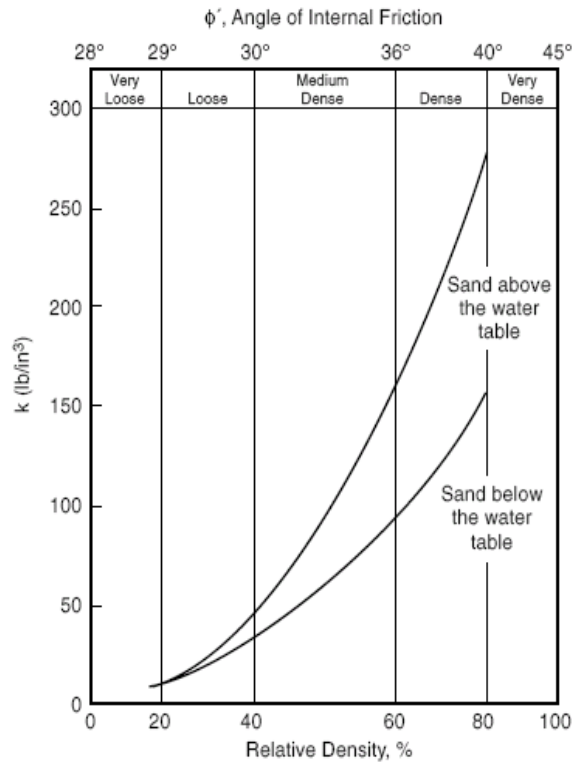


Figura IV.1.26. Curva de apoyo para obtener del módulo de reacción.

Finalmente, con la generación de las curvas de transferencia P-y, t-z y Q-z, se elabora el archivo de suelo necesario para modelar la interacción suelo estructura de acuerdo al diámetro de diseño. Este archivo de suelo se compone por la geometría final del pilote, la longitud de penetración y las curvas de transferencia P-y, t-z y Q-z siguiendo un formato adecuado para introducirlo en el programa de análisis que se está utilizando. En la siguiente tabla se presentan algunas de las curvas de transferencia para un pilote de 54" de diámetro propuesto.

Tabla IV.1.6 Curvas de transferencia Q-z, t-z y P-y. (solo se presentan algunas de las curvas para ilustrar su calculo y formato a seguir, el cual depende del programa a utilizar).

DIAMETRO= 54 PULGS											
ESTA INFORMACION CORRESPONDE AL FORMATO DEL SOFTWARE QUE SE ESTE UTILIZANDO.											
<b>SOIL TZAXIAL HEAD 5</b>				<b>SOL1 RES. AXIAL</b>							
SOIL	SLOCSM	8	0.00	0.0006							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.300	0.09	0.500	0.17	0.750	0.31	0.900	0.43
SOIL	T-Z	1.000	0.54	0.850	1.08	0.860	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	1.00	0.0002							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.300	0.09	0.500	0.17	0.750	0.31	0.900	0.43
SOIL	T-Z	1.000	0.54	0.850	1.08	0.860	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	1.50	0.0002							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.300	0.09	0.500	0.17	0.750	0.31	0.900	0.43
SOIL	T-Z	1.000	0.54	0.850	1.08	0.860	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	1.80	0.0003							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.300	0.09	0.500	0.17	0.750	0.31	0.900	0.43
SOIL	T-Z	1.000	0.54	0.850	1.08	0.860	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	2.00	0.0003							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.300	0.09	0.500	0.17	0.750	0.31	0.900	0.43
SOIL	T-Z	1.000	0.54	0.850	1.08	0.860	54.00				
<b>SOIL BEARING HEAD 5</b>				<b>SOL1 END BEARING</b>							
SOIL	SLOCSM	8	6.00	0.0068							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.250	0.11	0.500	0.70	0.750	2.27	0.900	3.94
SOIL	T-Z	1.000	5.40	1.010	27.00	1.020	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	6.89	0.0070							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.250	0.11	0.500	0.70	0.750	2.27	0.900	3.94
SOIL	T-Z	1.000	5.40	1.010	27.00	1.020	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	7.00	0.0070							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.250	0.11	0.500	0.70	0.750	2.27	0.900	3.94
SOIL	T-Z	1.000	5.40	1.010	27.00	1.020	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	8.00	0.0073							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.250	0.11	0.500	0.70	0.750	2.27	0.900	3.94
SOIL	T-Z	1.000	5.40	1.010	27.00	1.020	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	9.00	0.0076							
SOIL	T-Z	0.000	0.00	0.250	0.11	0.500	0.70	0.750	2.27	0.900	3.94
SOIL	T-Z	1.000	5.40	1.010	27.00	1.020	54.00				
<b>SOIL LATERAL HEAD 5</b>				<b>1.000 SOL1 PY LATERAL</b>							
SOIL	SLOCSM	8	0.00	0.090							
SOIL	P-Y	0.000	0.00	0.230	0.27	0.340	0.81	0.420	1.62	0.500	2.70
SOIL	P-Y	0.720	8.10	0.000	40.50	0.007	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	1.00	0.109							
SOIL	P-Y	0.000	0.00	0.230	0.27	0.340	0.81	0.420	1.62	0.500	2.70
SOIL	P-Y	0.720	8.10	0.051	40.50	0.058	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	1.50	0.119							
SOIL	P-Y	0.000	0.00	0.230	0.27	0.340	0.81	0.420	1.62	0.500	2.70
SOIL	P-Y	0.720	8.10	0.075	40.50	0.082	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	1.80	0.124							
SOIL	P-Y	0.000	0.00	0.230	0.27	0.340	0.81	0.420	1.62	0.500	2.70
SOIL	P-Y	0.720	8.10	0.089	40.50	0.096	54.00				
SOIL	SLOCSM	8	2.00	0.128							
SOIL	P-Y	0.000	0.00	0.230	0.27	0.340	0.81	0.420	1.62	0.500	2.70
SOIL	P-Y	0.720	8.10	0.098	40.50	0.106	54.00				

## **IV.2. Acciones mecánicas del pilote sobre y debajo de la línea de lodos: deflexión, cortante, flexión axial, interacción.**

Es importante señalar que en el presente trabajo se desarrolla el diseño de un pilote típico para un tetrápodo de perforación, con un diámetro de 54", la metodología utilizada para este fin se describe en los siguientes apartados y puede aplicarse para cualquier pilote de cimentación de plataformas marinas fijas.

Como ya se mencionó, el diseño de los pilotes de cimentación para plataformas marinas fijas, parte de un modelo analítico, (Figura IV.2.1), basado en un *análisis de operación y tormenta* donde se consideran ocho direcciones de oleaje, viento y corriente, (Figura IV.1.4), así como la interacción suelo- estructura. Con base a este análisis se determinan los elementos mecánicos sobre y debajo de la línea de lodos para el diseño por esfuerzos del pilote.

### **IV.2.1. Acciones mecánicas de los pilotes sobre y debajo de la línea de lodos.**

En el diseño de la cimentación se toman diferentes consideraciones de análisis, esto se debe, a que el pilote se encuentra en condiciones diferentes sobre y debajo de la línea de lodos generadas por la carga axial a compresión y las condiciones ambientales. Sobre la línea de lodos, el pilote se analiza como un elemento estructural sometido a cargas axiales de compresión y momentos flexionantes. El pilote se localiza en el interior de la pierna de la subestructura y se encuentra arrostrado por elementos secundarios conocidos como placas centradoras, localizadas regularmente en cada nivel de arrostramiento horizontal de la subestructura, estas placas cumplen con una doble función, la de guiar el pilote dentro de la pierna durante la instalación y la transmisión de los esfuerzos inducidos por las cargas laterales a los nodos de la subestructura.

Las fuerzas de viento y oleaje producen momentos de volteo que son absorbidos por los pilotes, como momentos de flexión, tanto por arriba como por abajo de la línea de lodos; el momento flexionante es considerablemente mayor en la proximidad de la línea de lodos, (Figura IV.2.2) y buscará una profundidad de empotramiento que le permita disiparse. El momento flexionante es equilibrado con la reacción del suelo y la longitud de penetración, el equilibrio alcanzado depende de la rigidez que presenten las características el suelo.

El análisis del pilote bajo la línea de lodos considera que el pilote al penetrar en el lecho marino, se encuentra confinado por el suelo e interactúa con sus propiedades mecánicas, mismas que desarrollaran con la sección geométrica del pilote, capacidades de compresión, tensión, lateral, de punta y de fricción que le proveerán la resistencia necesaria para absorber las cargas axiales y los momentos generados por las acciones de operación y tormenta a que estará sometido. En esta fase se realiza un análisis de interacción suelo-estructura descrito en el apartado anterior.

En la Tabla IV.2.1 se presentan las solicitaciones que actúan en el pilote sobre la línea de lodos y en la Tabla IV.2.2 las solicitaciones debajo de la línea de lodos.

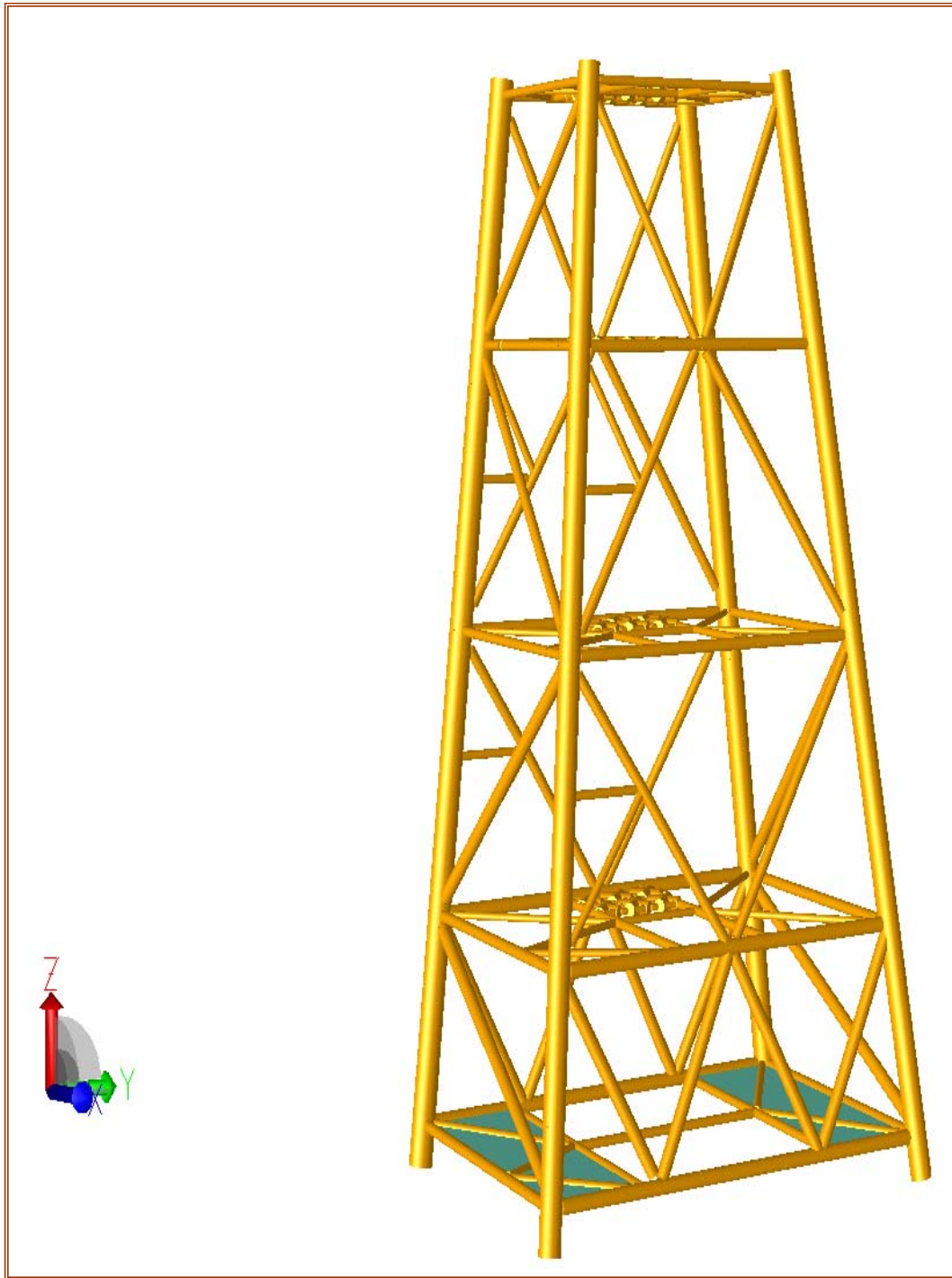


Figura IV.2.1. Modelo analítico de la estructura.

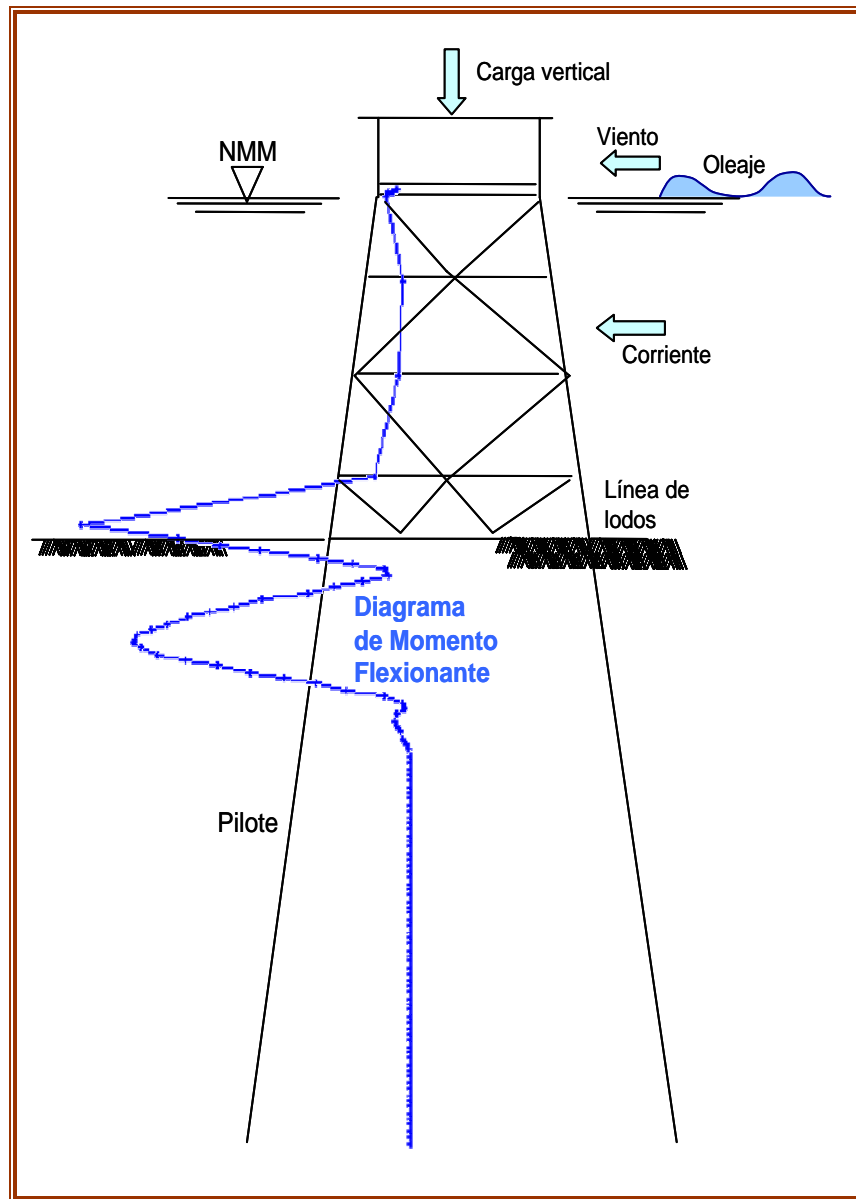


Figura IV.2.2. Diagrama de momento flexionante, sobre y debajo de la línea de lodos.

#### IV.2.2 Análisis de esfuerzos del pilote sobre y debajo de la línea de lodos.

Con base a los resultados obtenidos del análisis estructural, en condiciones de operación y tormenta, en sus diferentes direcciones y combinaciones ambientales, se procede al diseño del pilote por esfuerzos; el cual consiste en definir la distribución de espesores a lo largo del pilote y que garantice la integridad estructural del mismo ante las diferentes sollicitaciones.

Durante la etapa de diseño es importante considerar lo siguiente:

- Los espesores máximos a utilizar serán de 0.0635 m. (2.50 in.) para evitar que durante el rolado de las placas se produzcan discontinuidades en el material.
- Los diámetros propuestos de los tubos, deberán estar disponibles en el mercado, siendo lo más comerciales los de 0.762, 0.914, 1.067, 1.219, 1.372, 1.524, 1.676 y 1.829 m. (30, 36, 42, 48, 54, 60, 66 y 72 in.); para la optimización del material se recomienda hacer variar el espesor del pilote siguiendo la configuración de los momentos de flexión y la carga axial transmitida, para esto, el cambio de espesor se efectuará en carretes de tubo de 3.05 m. (10 ft.) de longitud mínima.
- Para facilitar el hincado de los pilotes se recomienda utilizar los máximos espesores de pared, por lo que se deberá utilizar lo mas posible acero ASTM A-36

Para facilitar los trabajos de soldadura en el campo, los tipos de acero utilizados en los puntos de unión serán de la misma resistencia, recomendándose el uso de tubería de **costura longitudinal**, evitando que durante la unión de los diferentes tramos queden alineadas las costuras laterales y verificando que el diámetro del pilote sea de fácil instalación con el equipo de hincado disponible. *Por ningún motivo se debe aceptar el uso de tubería con costura helicoidal.*

#### IV.2.2.1 Análisis de esfuerzos del pilote sobre la línea de lodos.

El diseño de las secciones del pilote sobre la línea de lodos se apegará a las recomendaciones de las secciones 3.2 y 3.3 del API-RP-2A-WSD-2000, sin embargo, se considera que las recomendaciones siguientes serán de mucha utilidad para los ingenieros involucrados en el diseño de cimentaciones profundas a base de pilotes tubulares de acero y punta abierta para plataformas marinas fijas.

A continuación se presentan los criterios de diseño por esfuerzos para el pilote sobre la línea de lodos.

##### I. - Esfuerzo axial permisible a tensión

$$F_t = 0.60F_y \quad \text{Ec. 4.11}$$

I. a.- **Esfuerzo axial permisible a compresión  $F_a$** , debe ser determinado con las formulas del AISC cuando la relación  $D/t$  sea menor o igual que 60.

$$F_a = \frac{\left[ 1 - \frac{\left( \frac{Kl}{r} \right)^2}{2C_c^2} \right] F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3\left( \frac{Kl}{r} \right)}{8C_c} - \frac{\left( \frac{Kl}{r} \right)^2}{8C_c^2}} \quad \text{Para } \frac{Kl}{r} < C_c \quad \text{Ec. 4.12}$$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23 \left( \frac{Kl}{r} \right)^2} \quad \text{Para } \frac{Kl}{r} \geq C_c \quad \underline{\text{Ec. 4.13}}$$

donde:

$$C_c = \left( \frac{2\pi^2 E}{F_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \underline{\text{Ec. 4.14}}$$

$K$  = factor de la longitud efectiva.

$l$  = longitud unitaria, in (m)

$r$  = Radio de giro, in (m).

$E$  = Módulo de elasticidad de Young, Ksi (MPa).

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia, Ksi (Kg/cm<sup>2</sup>).

Para elementos con una relación de  $D/t$  mayor a 60, el esfuerzo crítico local, (el más pequeño de  $F_{xe}$  o  $F_{xc}$ ) se sustituye por  $F_y$  para determinar  $C_c$  y  $F_a$ .

#### a) $F_{xe}$ = esfuerzo crítico local elástico

$$F_{xe} = 2CEt / D \quad \underline{\text{Ec. 4.15}}$$

donde:

$C$  = coeficiente elástico crítico

$D$  = diámetro exterior, in (m)

$t$  = espesor del pilote, in (m)

El valor teórico de  $C = 0.6$ , sin embargo, una reducción del valor a  $C = 0.3$  se recomienda para utilizarlo en la ecuación 4.15.

#### b) $F_{xc}$ = esfuerzo crítico local inelástico

$$F_{xc} = F_y X \left[ 1.64 - 0.23 \left( \frac{D}{t} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \leq F_{xe} \quad \underline{\text{Ec 4.16}}$$

$$F_{xc} = F_y \quad \text{para } (D/t) \leq 60$$

donde:

$C$  = Coeficiente de pandeo elástico crítico, 0.60 es un valor teórico, sin embargo, un menor valor, tal como 0.30 es recomendado para tomar en cuenta las imperfecciones iniciales.

$D$  = Diámetro exterior del pilote, in (m)

$t$  = Espesor del pilote, in (m)

$E$  = Módulo de elasticidad de Young, Ksi (MPa)

Para determinar los valores de  $Kl/r$ , para pilotes sometidos a compresión se realiza un análisis estructural de acuerdo a las especificaciones del AISC, donde se define el efecto de los factores de longitud considerando los grados de libertad de las juntas, como libres o fijas, sin embargo, en lugar de estos análisis el API recomienda los siguientes valores:

**Tabla IV.2.3 Valores recomendados por el API para K.**

Situation	Effective Length Factor $K$	Reduction Factor $C_m^{(1)}$
<b>Superstructure Legs</b>		
Braced	1.0	(a)
Portal (unbraced)	$K^{(2)}$	(a)
<b>Jacket Legs and Piling</b>		
Grouted Composite Section	1.0	(c)
Ungouted Jacket Legs	1.0	(c)
Ungouted Piling Between Shim Points	1.0	(b)
<b>Deck Truss Web Members</b>		
In-Plane Action	0.8	(b)
Out-of-plane Action	1.0	(a) or (b) <sup>(4)</sup>
<b>Jacket Braces</b>		
Face-to-face length of Main Diagonals	0.8	(b) or (c) <sup>(4)</sup>
Face of leg to Centerline of Joint Length of K Braces <sup>(3)</sup>	0.8	(c)
<b>Longer Segment Length of X Braces<sup>(3)</sup></b>		
Secondary Horizontals	0.7	(c)
<b>Deck Truss Chord Members</b>		
	1.0	(a), (b) or (c) <sup>(4)</sup>

**II. - El esfuerzo permisible por flexión  $F_b$  debe ser determinado de acuerdo con las siguientes expresiones:**

$$F_b = 0.75 F_y \quad \text{Para } D/t \leq \frac{1500}{F_y} \quad \text{en sistema ingles;} \quad \frac{D}{t} \leq \frac{10,340}{F_y} \quad \text{en SI} \quad \text{Ec. 4.17}$$



$$F_y = \left[ 0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{Para } \frac{1500}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{3000}{F_y} ; \frac{10,340}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{20,680}{F_y} \quad \text{en SI} \quad \underline{Ec. 4.18}$$

$$F_b = \left[ 0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{Para } \frac{3000}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300 ; \frac{20,680}{F_y} < \frac{D}{t} < 300 \quad \text{en SI} \quad \underline{Ec.4.19}$$

donde:

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia, Ksi (Kg/cm<sup>2</sup>).

$D$  = Diámetro exterior del pilote, in (m)

$t$  = Espesor de diseño en la pared del pilote, in (m)

$E$  = Módulo de elasticidad de Young, Ksi (MPa)

**III. - El máximo esfuerzo por cortante  $f_v$ , es:**

$$f_v = \frac{V}{0.5A} \quad \underline{Ec. 4.20}$$

donde:

$f_v$  = el esfuerzo máximo de cortante, Ksi (MPa)

$V$  = fuerza cortante (transversal), Kips (MN)

$A$  = área de la sección transversal, in<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>).

Los esfuerzos cortantes permisibles,  $f_v$ , deberán determinarse como:

$$f_v = 0.4 F_y.$$

El análisis sobre la línea de lodos se puede realizar con un programa especializado donde se incluyan los criterios anteriores, más adelante se presenta un ejemplo del análisis por esfuerzos sobre la línea de lodos para el pilote propuesto de 54".

#### IV.2.2.2 Análisis de esfuerzos del pilote debajo de la línea de lodos.

El diseño de las secciones que forman los pilotes se realizará de acuerdo con las especificaciones de esfuerzos permisibles elásticos recomendados en las secciones 3.2 y 3.3, del API-RP-2A-WSD-2000 que a continuación se presentan.

Cuando los esfuerzos de trabajo son producto de las combinaciones ambientales críticas de tormenta, los esfuerzos permisibles pueden incrementarse en un tercio. La tendencia del pilote a pandearse como columna bajo la línea de lodos, deberá ser considerado en el diseño. Sin embargo, el pandeo de los pilotes bajo la línea de lodos normalmente no es problema porque aún los suelos más blandos restringen el desplazamiento. Cuando en pilotes cargados lateralmente actúan cargas axiales importantes, el efecto de carga-deflexión  $P-\Delta$ , deberá ser considerado en el cálculo de esfuerzos.

Un método efectivo para realizar este análisis consiste en modelar el pilote como una viga columna en un medio inelástico. Si tal análisis es efectuado, la interacción de esfuerzos en pilote puede ser determinada de acuerdo con la siguiente expresión, con su respectivo incremento de esfuerzos donde sea aplicable:

$$\frac{f_a}{0.6F_{xc}} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad \text{Ec. 4.21}$$

donde:

$F_{xc}$  se obtiene de la ecuación 4.16.

$F_b$  = esfuerzo permisible por flexión

Para el análisis estructural de sobre carga en el sistema de cimentación generado por cargas laterales, la interacción de esfuerzos en pilote puede ser determinada de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\frac{P/A}{F_{xc}} + \frac{2}{\pi} \left[ \arcsen \left( \frac{M/Z}{F_{xc}} \right) \right] \leq 1.0 \quad \text{Ec. 4.22}$$

donde:

**arcsen** esta dado en radianes

$A$  = área de la sección transversal, in<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>)

$Z$  = modulo de plasticidad de la sección, in<sup>3</sup> (m<sup>3</sup>)

$P, M$  = carga axial y momento flexionante generados por el análisis no lineal, incluye el efecto ( $P - \Delta$ )

$F_{xc}$  se obtiene de la ecuación 4.16.

Finalmente, se presenta un ejemplo donde se muestra el análisis de esfuerzos sobre y debajo de la línea de lodos para un pilote típico de 54" de diámetro, propuesto en el diseño de un tetrápodo recuperador de pozos. Con la finalidad de ilustrar algunos de los términos utilizados en la explicación del diseño sobre y debajo de la línea de lodos, se presenta el siguiente esquema representativo (Figura IV.2.3).

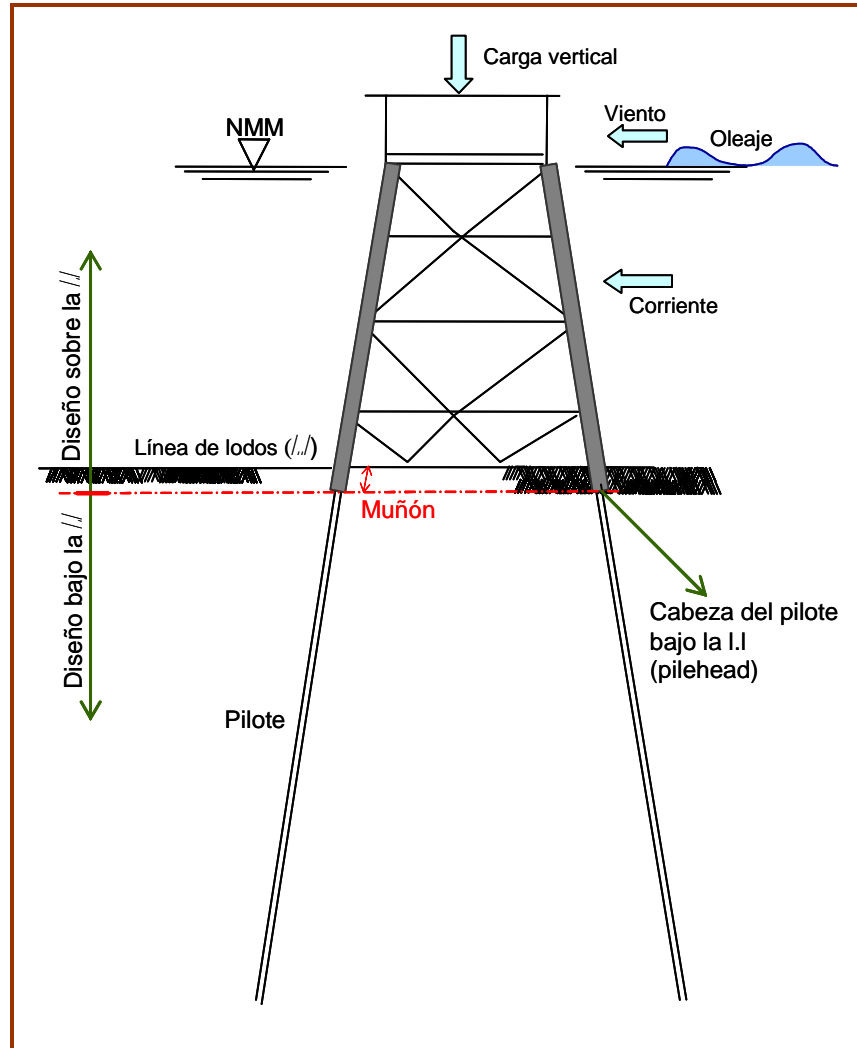


Figura IV.2.3. Esquema ilustrativo donde se especifica el parte aguas del diseño del pilote por esfuerzos sobre y bajo la línea de lodos

Como se ha mencionado, los datos necesarios para el diseño de pilotes se obtienen de un análisis de operación y tormenta de la plataforma, es importante señalar que regularmente, una plataforma fija esta constituida por pilotes que presentan diferentes características entre si, principalmente en el diámetro o/y pendiente, con base a ello, se definen dos o más pilotes típicos a diseñar para cada Eje donde aplique. Por ejemplo para el tetrápodo que se esta proponiendo, los Ejes presentan diferentes pendientes, los Ejes A-1 y B-1 presentan pendiente simple (1/8) mientras que los Ejes A-2 y B-2

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

poseen una doble pendiente( $\sqrt{2}/8$ ) considerando esto, para esta plataforma se deben diseñar dos pilotes típicos correspondientes a cada Eje transversal (Figura IV.2.4).

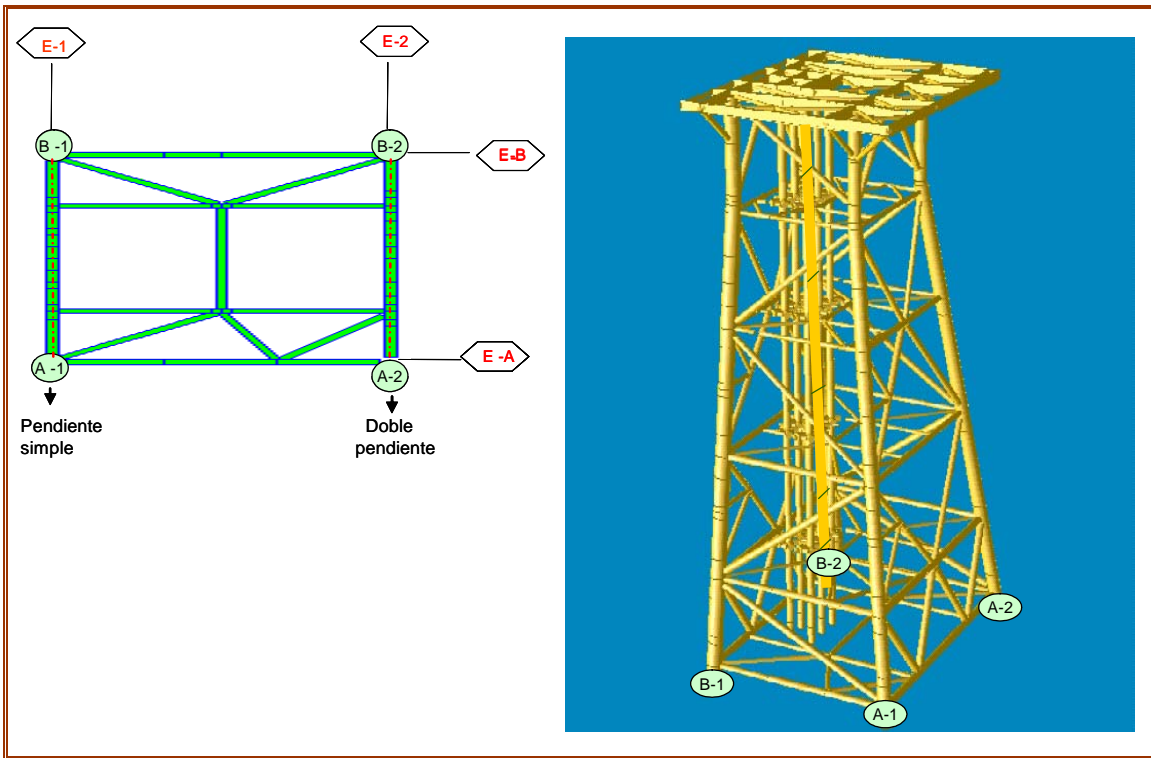


Figura IV.2.4. Esquema ilustrativo de las diferentes pendientes que presenta el tetrápodo.

Una vez definidos los pilotes a diseñar, se determina la longitud de penetración preliminar de cada pilote, para lo cual se utiliza el siguiente listado generado en los análisis de operación y tormenta inicial, en este listado se indica el número de pilote, grupo, combinación de carga, cargas críticas a compresión, cargas críticas a tensión, factor de seguridad, relación de interacción máxima, etc. con base a las descargas a compresión que se incluyen en este listado, y a la curva de capacidad del pilote correspondiente al diámetro, se obtiene la longitud de penetración preliminar, como se ve a continuación:

\* \* \* P I L E M A X I M U M A X I A L C A P A C I T Y S U M M A R Y \* \* \*

PILE	GRP	***** P I L E *****		***** C O M P R E S S I O N *****						***** T E N S I O N *****						*MAXIMUM*	
		P I L E H E A D		W E I G H T	P E N .	C A P A C I T Y	M A X .	C R I T I C A L	C O N D I T I O N	C A P A C I T Y	M A X .	C R I T I C A L	C O N D I T I O N	*MAXIMUM*			
		O . D .	T H K .												( I N C L . W T )		L O A D
IN	IN	K I P S	F T	K I P S	K I P S	K I P S	C A S E	F A C T O R	K I P S	K I P S	K I P S	C A S E	F A C T O R	C H E C K	C A S E		
58	PL1	54.00	2.50	269.7	296.3	-6348.2	-3320.4	-3320.4	65	1.91	6883.9	1745.6	1745.6	61	3.94	0.78	65
57	PL1	54.00	2.50	269.7	296.3	-6348.2	-3337.2	-3337.2	63	1.90	6883.9	1835.8	1835.8	67	3.75	0.79	63
80	PL2	54.00	2.50	183.8	175.3	-4104.9	-2247.9	-2247.9	66	1.83	4470.5	408.1	408.1	62	10.95	0.82	66
59	PL2	54.00	2.50	183.8	175.3	-4104.9	-2115.4	-2115.4	62	1.94	4470.5	511.3	511.3	66	8.74	0.77	62
152	CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-410.0	-410.0	64	4.53	1964.0	88.3	88.3	60	22.23	0.33	64
154	CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-110.0	-110.0	63	16.89	1964.0	0.0	0.0	50	100.00	0.09	54
166	CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-78.9	-78.9	64	23.54	1964.0	0.0	0.0	50	100.00	0.08	54
176	CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-318.5	-318.5	64	5.83	1964.0	49.4	49.4	60	39.72	0.26	64
164	CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-349.6	-349.6	64	5.32	1964.0	63.2	63.2	60	31.10	0.28	64
178	CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-81.9	-81.9	66	22.69	1964.0	0.0	0.0	50	100.00	0.08	55

Carga crítica a compresión:

- PL1: 3337.2 Kips
- PL2: 2247.9 Kips

De la curva de capacidad axial última para un pilote de 54 in y con los valores a compresión anteriores, se obtiene la longitud de penetración aproximada de cada uno de los pilotes a diseñar.

Conocida la longitud de penetración inicial así como el análisis de operación y tormenta inicial, se procede a determinar el caso mas critico de cada uno de los pilotes a diseñar, el cual corresponde a aquel pilote que se encuentre sometido a los mayores esfuerzos.

Para determinar el pilote más crítico, se obtienen los siguientes datos.

- Grupo definido para cada pilote, Figura IV.2.5.
- Condiciones de Carga, Figura IV.2.6.
- Relaciones de interacción, Figura IV.2.7.

De la figura IV.2.7, se observa que el pilote más esforzado para el Eje-1 es el número 58 debido a las relaciones de interacción altas que presenta, es importante señalar que las relaciones de interacción por esfuerzos, deben ser menores a la unidad. Por otra parte se observa que para el Eje-2 el pilote más esforzado es el número 59.

El diseño que se desarrollará en presente ejemplo, corresponde al pilote **Número 58**, con esto se describe una de las metodologías utilizadas para el diseño de los pilotes de plataformas marinas fijas, objetivo principal del presente trabajo.

En las tablas IV.2.1 y 2, se presentan los listados correspondientes a los elementos mecánicos del pilote sobre y debajo de la línea de lodos respectivamente.

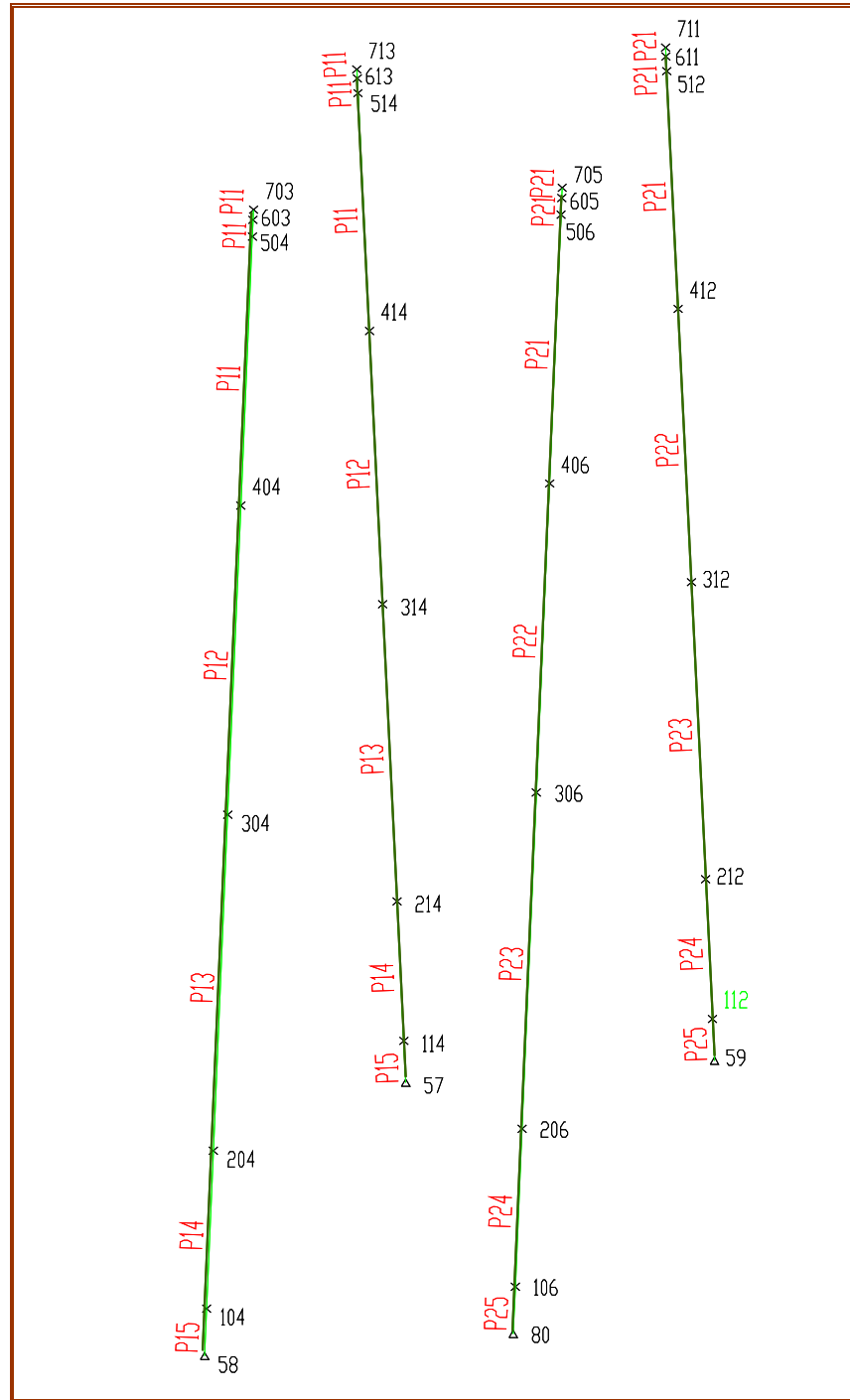


Figura IV.2.5 Grupo definido para cada pilote

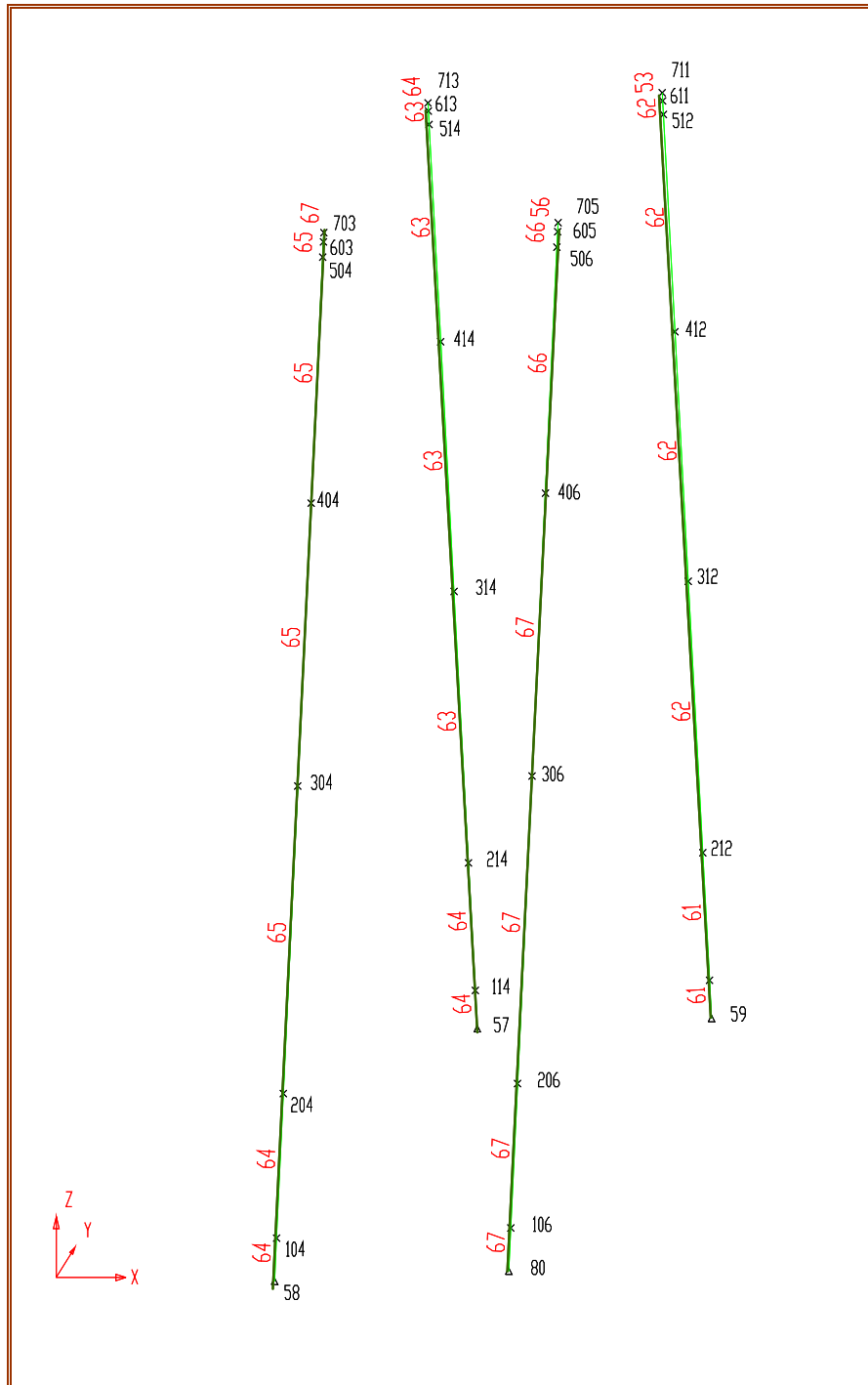


Figura IV.2.6. Condiciones de carga de pilotes en la subestructura

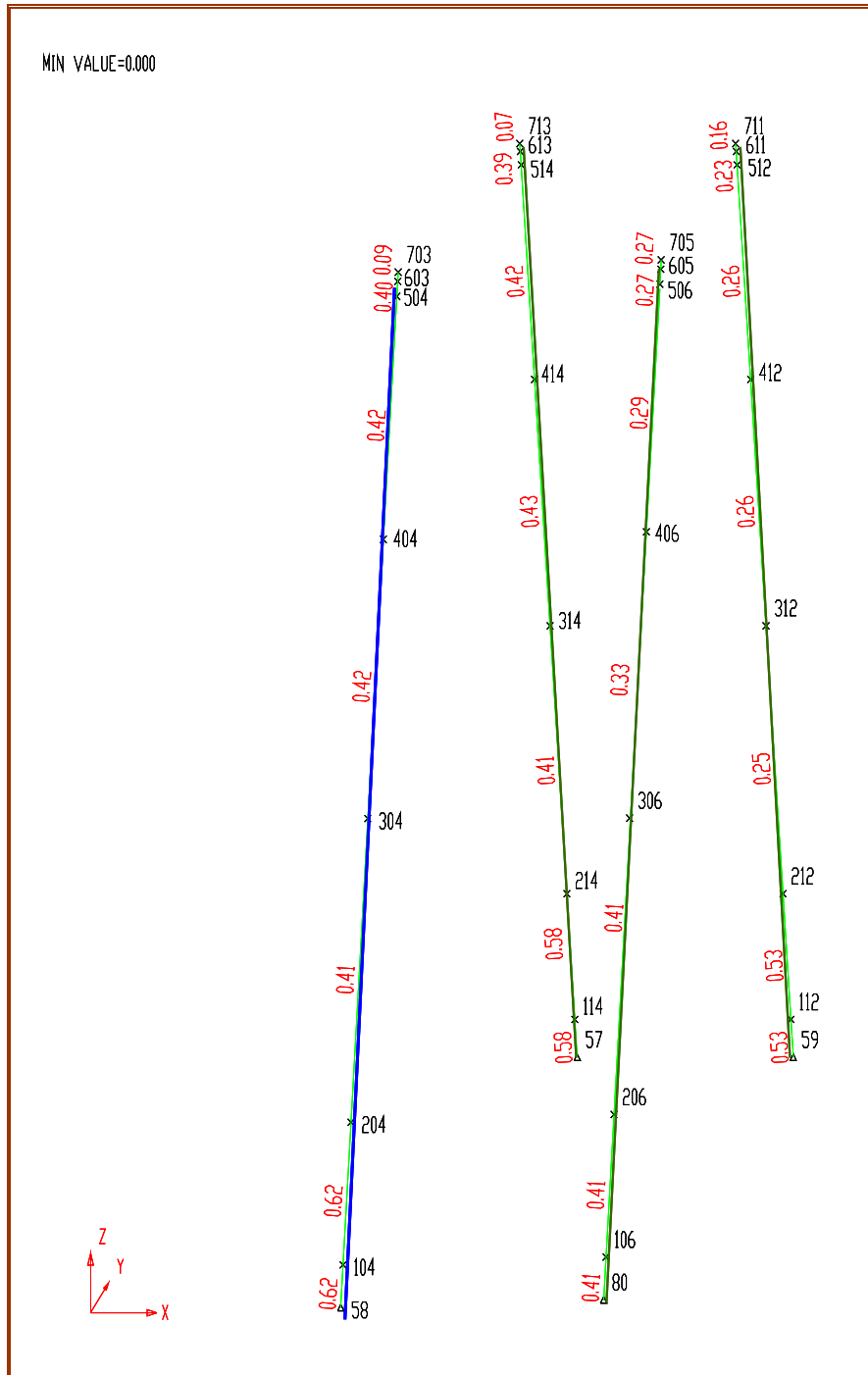


Figura IV.2.7. Relaciones de interacción de pilotes en la subestructura  
 A continuación se presentan los elementos mecánicos que actúan en el pilote sobre y debajo de la línea de lodos:



IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

**Tabla IV.2.1 Acciones mecánicas del pilote sobre la línea de lodos.**

MEMBER DETAIL REPORT										
MEMBER	GRP	LOAD CASE	DIST FROM END M	FORCE FX MT	MOMENT MY MT-CM	MOMENT MZ MT-CM	SHEAR FY MT	SHEAR FZ MT	TORSION MX MT-CM	AXIAL STRESS KGSMM
58-	104	P15	0.00							
			64	-1408.9	6744.4	-86405.7	-162.6	10.4	-8.9	-5.40
			2.16							
			64	-1404.3	8930.6	-121534.1	-162.6	9.8	-8.9	-5.38
104-	204	P14	0.00							
			64	-1404.0	8930.6	-121534.3	186.9	-14.9	-6.7	-5.38
			7.21							
			64	-1390.9	-2363.6	13272.7	186.9	-16.5	-6.7	-5.33
204-	304	P13	0.00							
			64	-1390.2	-2363.6	13272.7	-14.6	4.4	-6.5	-5.33
			0.47							
			64	-1390.2	-2159.1	12587.4	-14.6	4.4	-6.5	-5.33
			0.94							
			64	-1388.9	-1957.4	11903.7	-14.5	4.2	-6.5	-5.32
			2.46							
			64	-1386.6	-1333.0	9724.0	-13.8	3.9	-6.5	-6.58
			3.99							
			64	-1384.2	-754.0	7653.1	-13.1	3.6	-6.5	-6.57
			8.41							
			64	-1377.8	645.0	2294.8	-11.2	2.8	-6.5	-5.84
			12.83							
			64	-1370.1	1609.4	-2022.6	-8.6	1.7	-6.5	-5.81
			14.09							
			64	-1367.7	1807.0	-3054.4	-7.7	1.4	-6.5	-6.49
			15.36							
			64	-1366.0	1973.5	-3994.0	-7.0	1.2	-6.5	-6.48
304-	404	P12	0.00							
			64	-1365.5	1973.5	-3994.0	-3.4	-1.4	-6.5	-6.48
			0.51							
			64	-1365.5	1903.3	-4168.5	-3.4	-1.4	-6.5	-6.48
			0.51							
			64	-1365.5	1903.3	-4168.5	-3.4	-1.4	-6.5	-5.79
			4.63							
			64	-1358.4	1133.1	-5002.2	-0.6	-2.3	-6.5	-5.76
			8.74							
			64	-1351.3	-26.2	-4595.3	2.7	-3.3	-6.5	-5.73
			11.43							
			64	-1347.1	-988.1	-3575.2	5.2	-3.9	-6.5	-6.39
			14.12							
			64	-1343.4	-2102.8	-1885.0	7.6	-4.4	-6.5	-6.37
404-	504	P11	0.00							
			64	-1342.9	-2102.8	-1884.9	-5.8	2.6	-6.5	-6.37
			6.14							
			64	-1333.7	-828.5	-5446.4	-5.8	1.4	-6.5	-6.33
			12.29							
			64	-1324.0	-287.0	-9007.9	-5.8	0.2	-6.5	-6.28
504-	603	P11	0.00							
			64	-1324.0	-287.0	-9007.9	29.2	-1.8	-9.4	-6.28
			0.38							
			64	-1323.3	-359.1	-7885.2	29.2	-1.9	-9.4	-6.28
			0.77							
			64	-1322.7	-434.3	-6762.9	29.2	-2.0	-9.4	-6.27
603-	703	P11	0.00							
			64	-131.1	514.1	-7929.1	62.8	-9.5	-758.0	-0.62
			0.23							
			64	-130.7	293.9	-6483.3	62.8	-9.6	-758.0	-0.62
			0.46							
			64	-130.3	72.6	-5035.6	62.8	-9.6	-758.0	-0.62

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

Cada una de las columnas se explica a continuación:

Member- group:	Nodos del Elemento y grupo del mismo
Load case:	Combinación de carga
Dist from end:	Longitud parcial de cada segmento de pilote ubicado entre esos nodos
Force Fx:	Fuerza Axial
Moment My:	Momento en dirección Y
Moment Mx:	Momento en dirección Z
Shear Fy:	Fuerza cortante en dirección Y
Shear Fz:	Fuerza cortante en dirección Z
Torsion:	Torsión
Axial stress:	Esfuerzo axial

En la siguiente tabla se presentan las acciones mecánicas del pilote debajo de la línea de lodos:

Tabla IV.2.2. Acciones mecánicas debajo de la línea de lodos.

GROUP ID = PL1

DISTANCE FROM PILEHEAD	***** DEFLECTIONS *****				***** INTERNAL LOADS *****			***** STRESSES *****				PILE HEAD ID	CRITICAL LOAD CASE	MAXIMUM UNITY CHECK	
	LATERAL IN FT	AXIAL IN	ROT. RAD	ROT. RAD	BENDING MOMENT IN-KIP	SHEAR KIPS	AXIAL LOAD KIPS	BENDING STRESS KSI	AXIAL STRESS KSI	SHEAR STRESS KSI	COMB. STRESS KSI				
0.0	5.542	0.567	0.00808		75237.8	382.8	-3106.1	15.1							
1	-7.68	1.89	-22.79	58	64	0.494									
3.0	5.243	0.557	0.00870		61627.7	381.2	-3106.4	12.38	-7.68	1.88	-20.06	58	64	0.440	
5.9	4.923	0.548	0.00920		48134.7	377.8	-3107.0	9.67	-7.68	1.87	-17.35	58	64	0.386	
8.9	3.605	0.639	0.00772		29251.7	317.7	-3504.0	5.88	-8.66	1.57	-14.54	57	63	0.334	
11.9	3.326	0.628	0.00793		18374.3	312.1	-3503.5	3.69	-8.66	1.54	-12.35	57	63	0.290	
14.8	3.042	0.618	0.00803		8622.0	303.3	-3501.5	1.73	-8.66	1.50	-10.39	57	63	0.251	
17.8	2.756	0.607	0.00803		6979.7	290.6	-3497.6	1.40	-8.65	1.44	-10.05	57	63	0.244	
20.7	2.471	0.597	0.00795		15248.6	274.6	-3491.9	3.06	-8.63	1.36	-11.70	57	63	0.277	
23.7	2.191	0.586	0.00777		24278.0	256.1	-3484.8	4.88	-8.62	1.27	-13.49	57	63	0.313	
26.7	1.918	0.575	0.00751		32863.1	236.2	-3476.7	6.60	-8.60	1.17	-15.20	57	63	0.347	
29.6	2.159	0.473	0.00902		47622.3	263.4	-3072.1	9.57	-7.60	1.30	-17.16	58	64	0.381	
32.6	1.846	0.464	0.00855		56567.7	239.5	-3062.7	11.36	-7.57	1.18	-18.93	58	64	0.417	
35.6	1.551	0.454	0.00799		64645.8	214.7	-3052.4	12.99	-7.55	1.06	-20.53	58	64	0.448	
38.5	1.278	0.445	0.00737		71831.8	189.6	-3041.4	14.43	-7.52	0.94	-21.95	58	64	0.477	
41.5	1.027	0.436	0.00669		78127.4	164.7	-3029.5	15.69	-7.49	0.81	-23.18	58	64	0.501	
44.4	0.802	0.427	0.00595		83540.0	140.1	-3016.8	16.78	-7.46	0.69	-24.24	58	64	0.522	
50.4	0.435	0.409	0.00436		89335.9	15.2	-2953.4	17.95	-7.30	0.08	-25.25	58	64	0.542	
56.3	0.182	0.391	0.00279		81394.2	200.5	-2868.7	16.35	-7.09	0.99	-23.44	58	64	0.504	
59.3	0.096	0.382	0.00208		72747.7	267.6	-2822.6	14.61	-6.98	1.32	-21.59	58	64	0.467	
62.2	0.034	0.374	0.00147		62363.0	301.6	-2773.9	12.53	-6.86	1.49	-19.39	58	64	0.422	
65.2	0.008	0.365	0.00095		51298.8	309.6	-2722.9	10.30	-6.73	1.53	-17.04	58	64	0.374	
68.1	0.034	0.357	0.00053		40346.3	298.9	-2669.6	8.10	-6.60	1.48	-14.70	58	64	0.327	
71.1	0.046	0.349	0.00021		30041.6	276.6	-2614.0	6.03	-6.46	1.37	-12.50	58	64	0.282	
74.1	0.049	0.341	0.00002		20680.6	248.9	-2557.0	4.15	-6.32	1.23	-10.48	58	64	0.241	
77.0	0.037	0.408	0.00017		8179.1	166.0	-2828.8	1.64	-6.99	0.82	-8.64	57	63	0.208	
80.0	0.029	0.399	0.00022		2666.8	146.3	-2764.3	0.54	-6.83	0.72	-7.37	57	63	0.182	
83.0	0.021	0.390	0.00022		2226.2	101.2	-2706.8	0.49	-7.40	0.55	-7.89	57	63	0.195	
85.9	0.013	0.381	0.00019		4530.9	39.2	-2655.9	1.00	-7.26	0.21	-8.26	57	63	0.202	
88.9	0.007	0.372	0.00014		5014.9	1.1	-2603.9	1.10	-7.12	0.01	-8.22	57	63	0.200	
91.8	0.003	0.364	0.00009		4457.5	22.1	-2551.0	0.98	-6.97	0.12	-7.95	57	63	0.269	
94.8	0.000	0.355	0.00006		3440.4	29.7	-2497.0	0.76	-6.83	0.16	-7.58	57	63	0.258	
97.8	0.001	0.347	0.00003		2347.8	28.7	-2442.1	0.52	-6.68	0.16	-7.19	57	63	0.246	
100.7	0.001	0.339	0.00001		1396.4	23.5	-2386.1	0.31	-6.52	0.13	-6.83	57	63	0.235	
103.7	0.001	0.330	0.00000		680.1	16.7	-2329.0	0.17	-7.13	0.10	-7.29	57	63	0.252	
106.7	0.001	0.321	0.00001		208.5	10.4	-2270.7	0.05	-6.95	0.06	-7.00	57	63	0.243	
109.6	0.001	0.313	0.00001		56.5	5.3	-2211.4	0.01	-6.77	0.03	-6.78	57	63	0.235	
112.6	0.001	0.304	0.00001		170.4	1.9	-2150.9	0.05	-7.49	0.01	-7.53	57	63	0.261	
115.6	0.000	0.295	0.00001		189.5	0.2	-2089.2	0.05	-7.27	0.00	-7.33	57	63	0.254	
118.5	0.000	0.286	0.00000		159.3	1.1	-2026.6	0.04	-7.05	0.01	-7.10	57	63	0.246	
121.5	0.000	0.276	0.00000		111.8	1.3	-1962.7	0.04	-7.93	0.01	-7.97	57	63	0.277	
124.4	0.000	0.266	0.00000		66.0	1.1	-1897.7	0.02	-7.67	0.01	-7.69	57	63	0.267	
127.4	0.000	0.257	0.00000		31.0	0.8	-1831.7	0.01	-7.40	0.01	-7.41	57	63	0.257	
130.4	0.000	0.248	0.00000		8.8	0.5	-1764.7	0.00	-7.13	0.00	-7.14	57	63	0.248	
133.3	0.000	0.240	0.00000		1.8	0.2	-1696.7	0.00	-6.86	0.00	-6.86	57	63	0.238	
136.3	0.000	0.231	0.00000		3.2	0.0	-1638.0	0.00	-6.62	0.00	-6.62	57	63	0.230	
139.3	0.000	0.223	0.00000		3.5	0.0	-1589.2	0.00	-6.42	0.00	-6.42	57	63	0.223	
142.2	0.000	0.216	0.00000		3.5	0.0	-1540.9	0.00	-6.23	0.00	-6.23	57	63	0.216	
145.2	0.000	0.208	0.00000		3.2	0.0	-1493.0	0.00	-6.03	0.00	-6.04	57	63	0.210	
148.1	0.000	0.201	0.00000		2.7	0.0	-1445.5	0.00	-5.84	0.00	-5.84	57	63	0.203	
151.1	0.000	0.194	0.00000		2.2	0.0	-1398.4	0.00	-5.65	0.00	-5.65	57	63	0.196	
154.1	0.000	0.187	0.00000		1.7	0.0	-1351.6	0.00	-5.46	0.00	-5.46	57	63	0.190	

Cada una de las columnas se explica a continuación:

Distance from pilehead:	Longitud parcial del pilote a partir de la cabeza del pilote ( bajo la línea de lodos)
Deflecciones:	Desplazamientos lateral, axial y rotación.
Internal loads:	Cargas internas del pilote, momento flexionante, cortante y fuerza axial
Stresses:	Esfuerzos en punta, axial, por cortante y combinación de esfuerzos
Pile head:	Número de pilote ( nodo correspondiente al pilote)
Critical Load case:	Combinación de carga crítica
Maximum unity check:	Relación de interacción máxima.

Como puede observarse en los listados anteriores, la longitud total del pilote se discretiza en longitudes parciales pequeñas, con lo que se logra un análisis minucioso del comportamiento del pilote debido a las acciones mecánicas sobre y debajo de la línea de lodos. Con base a estos resultados parciales se realiza el análisis por esfuerzos correspondiente, de acuerdo a las ecuaciones descritas en la sección anterior. En las tablas IV.2.3 y 4, se incluye el diseño por esfuerzos donde se determina la distribución de espesores necesaria para absorber los esfuerzos, estos resultados son arrojados por un programa especializado para el análisis de pilotes de acero y punta abierta. Estas tablas son manejadas en sistema métrico para facilitar el manejo del software.

En la Figura IV.2.8., se presenta el esquema generado del diseño por esfuerzos que presenta el pilote de interés, donde se observa la distribución de espesores y longitudes de tramos preliminares.

Tabla IV.2.3. Análisis de esfuerzos sobre la línea de lodos.

NODO	Condic. de carga LC	Long. del elem. (cm)	AXIAL T	MOM (Y) T-CM	MOM (Z) T-CM	Tw (in)	Fy (kg/cm2)	R.I. < 1.0
703	64	46	-130.3	72.6	-5035.6	1.5	2530	0.08
603	64	46	-131.1	514.1	-7929.1	1.5	2530	0.10
603	64	77	-1322.7	-434.3	--6762.9	1.5	2530	0.46
504	64	77	-1324.0	-287.0	-9007.9	1.5	2530	0.48
504	64	1229	-1324.0	-287.0	-9007.9	1.5	2530	0.48
	64	1229	-1333.7	-828.5	-5446.4	1.5	2530	0.48
404	64	1229	-1342.9	-2102.8	-1884.9	1.5	2530	0.46
404	64	1412	-1343.4	-2102.8	-1885.0	1.5	2530	0.47
	64	1412	-1347.1	-988.1	-3575.2	1.5	2530	0.48
	64	1412	-1351.3	-26.2	-4595.3	1.5	2530	0.48
	64	1412	-1358.4	1133.1	-5002.2	1.5	2530	0.47
	64	1412	-1365.5	1903.3	-4168.5	1.5	2530	0.49
	64	1412	-1365.5	1903.3	-4168.5	1.5	2530	0.49
304	64	1412	-1365.5	1973.5	-3994.0	1.5	2530	0.49
304	64	1536	-1366.0	1973.5	-3994.0	1.5	2530	0.49
	64	1536	-1367.7	1807.0	-3054.4	1.5	2530	0.49
	64	1536	-1370.1	1609.4	-2022.6	1.5	2530	0.48
	64	1536	-1377.1	645.0	2294.8	1.5	2530	0.47
	64	1536	-1384.2	-754.0	7653.1	1.5	2530	0.52
	64	1536	-1386.6	-1333.0	9724.0	1.5	2530	0.54
	64	1536	-1388.9	-1957.4	11903.7	1.5	2530	0.55
	64	1536	-1390.2	-2159.1	12587.4	1.5	2530	0.56
204	64	1536	-1390.2	-2363.6	13272.7	1.5	2530	0.56
204	64	721	-1390.2	-2363.6	13272.7	1.5	2530	0.54
104	64	721	-1404.0	8930.6	-121534.3	2.0	3518	0.75
104	64	216	-1404.3	8930.6	-121534.1	2.0	3518	0.75
58	64	216	-1408.9	6744.4	-86405.7	2.0	3518	0.55

Tabla IV.2.4 Análisis de esfuerzos debajo de la línea de lodos.

Penetración	Area del pilote	Fy	Tw	F. Axial (Kg)	fa	fa / 0.6Fy	fb (kg/cm2)	fb/Fb	Unit Check	Espesor Sobre-hincado	Espesor Sub-hincado
m	cm2	Mpa	Cm	Kg	(Kg/cm2)						
0.000	2609.54	345	6.35	-1410169.4	540.4	0.256	1063.51	0.4031	0.50	-8.23	3.97
0.914	2609.54	345	6.35	-1410305.6	540.4	0.256	871.13	0.3302	0.44	-11.23	0.97
1.798	2609.54	345	6.35	-1410578.0	540.5	0.256	680.40	0.2579	0.39	-14.13	-1.93
2.713	2609.54	345	6.35	-1590816.0	609.6	0.289	413.48	0.1567	0.33	-17.13	-4.93
3.627	2609.54	345	6.35	-1590589.0	609.5	0.289	259.73	0.0984	0.29	-20.13	-7.93
4.511	2609.54	345	6.35	-1589681.0	609.2	0.289	121.88	0.0462	0.25	-23.03	-10.83
5.425	2609.54	345	6.35	-1587910.4	608.5	0.288	98.66	0.0374	0.24	-26.03	-13.83
6.309	2609.54	345	6.35	-1585322.6	607.5	0.288	215.54	0.0817	0.28	-28.93	-16.73
7.224	2609.54	345	6.35	-1582099.2	606.3	0.287	343.18	0.1301	0.31	-31.93	-19.73
8.138	2609.54	345	6.35	-1578421.8	604.9	0.287	464.53	0.1761	0.35	-34.93	-22.73
9.022	2609.54	345	6.35	-1394733.4	534.5	0.253	673.16	0.2551	0.38	-37.83	-25.63
9.936	2609.54	345	6.35	-1390465.8	532.8	0.252	799.61	0.3031	0.42	-40.83	-28.63
10.851	2609.54	345	6.35	-1385789.6	531.0	0.252	913.79	0.3463	0.45	-43.83	-31.63
11.735	2609.54	345	6.35	-1380795.6	529.1	0.251	1015.37	0.3848	0.48	-46.73	-34.53
12.649	2609.54	345	6.35	-1375393.0	527.1	0.250	1104.36	0.4186	0.50	-49.73	-37.53
13.533	2609.54	345	6.35	-1369627.2	524.9	0.249	1180.87	0.4476	0.52	-52.63	-40.43
14.448	2609.54	345	6.35	-1358277.2	520.5	0.247	1245.11	0.4719	0.54	-55.63	-43.43
15.362	2609.54	345	6.35	-1340843.6	513.8	0.243	1262.80	0.4786	0.54	-58.63	-46.43
16.246	2609.54	345	6.35	-1322229.6	506.7	0.240	1229.89	0.4661	0.53	-61.53	-49.33
17.160	2609.54	345	6.35	-1302389.8	499.1	0.236	1150.54	0.4361	0.51	-64.53	-52.33
18.075	2609.54	345	6.35	-1281460.4	491.1	0.233	1028.32	0.3897	0.47	-67.53	-55.33
18.959	2609.54	345	6.35	-1259350.6	482.6	0.229	881.52	0.3341	0.42	-70.43	-58.23
19.873	2609.54	345	6.35	-1236196.6	473.7	0.224	725.13	0.2748	0.38	-73.43	-61.23
20.757	2609.54	345	6.35	-1211998.4	464.4	0.220	570.31	0.2161	0.33	-76.33	-64.13
21.671	2609.54	345	6.35	-1186756.0	454.8	0.215	424.65	0.1609	0.28	-79.33	-67.13
22.586	2609.54	345	6.35	-1160878.0	444.9	0.211	292.33	0.1108	0.24	-82.33	-70.13
23.470	2359.99	345	5.715	-1284275.2	544.2	0.258	126.67	0.0480	0.23	-85.23	-73.03
24.384	2359.99	345	5.715	-1254992.2	531.8	0.252	41.30	0.0157	0.20	-88.23	-76.03
25.298	2359.99	345	5.715	-1228887.2	520.7	0.247	34.48	0.0131	0.20	-91.23	-79.03
26.182	2359.99	250	5.715	-1205778.6	510.9	0.334	70.17	0.0367	0.28	-94.13	-81.93
27.097	2359.99	250	5.715	-1182170.6	500.9	0.327	77.66	0.0406	0.28	-97.13	-84.93
27.981	2359.99	250	5.715	-1158154.0	490.7	0.321	69.03	0.0361	0.27	-100.03	-87.83
28.895	2359.99	250	5.715	-1133638.0	480.4	0.314	53.28	0.0279	0.26	-103.03	-90.83
29.809	2107.90	250	5.08	-1108713.4	526.0	0.344	40.33	0.0211	0.27	-106.03	-93.83
30.693	2107.90	250	5.08	-1083289.4	513.9	0.336	23.99	0.0125	0.26	-108.93	-96.73
31.608	2107.90	250	5.08	-1057366.0	501.6	0.328	11.68	0.0061	0.25	-111.93	-99.73
32.522	1853.28	250	4.445	-1030897.8	556.3	0.364	4.04	0.0021	0.28	-114.93	-102.73
33.406	1853.28	250	4.445	-1003975.6	541.7	0.354	1.09	0.0006	0.27	-117.83	-105.63
34.320	1853.28	250	4.445	-976508.6	526.9	0.344	3.30	0.0017	0.26	-120.83	-108.63
35.235	1596.13	250	3.81	-948496.8	594.2	0.389	4.22	0.0022	0.29	-123.83	-111.63
36.119	1596.13	250	3.81	-920076.4	576.4	0.377	3.55	0.0019	0.28	-126.73	-114.53
37.033	1596.13	250	3.81	-891065.8	558.3	0.365	2.49	0.0013	0.28	-129.73	-117.53
37.917	1596.13	250	3.81	-861555.8	539.8	0.353	1.47	0.0008	0.27	-132.63	-120.43

Tabla IV.2.5 Análisis de esfuerzos debajo de la línea de lodos (continuación).

38.832	1596.13	250	3.81	-831591.8	521.0	0.341	0.69	0.0004	0.26	-135.63	-123.43
40.630	1596.13	250	3.81	-770301.8	482.6	0.316	0.04	0.0000	0.24	-141.53	-129.33
41.544	1596.13	250	3.81	-743652.0	465.9	0.305	0.07	0.0000	0.23	-144.53	-132.33
42.459	1596.13	250	3.81	-721496.8	452.0	0.296	0.08	0.0000	0.22	-147.53	-135.33
43.343	1596.13	250	3.81	-699568.6	438.3	0.287	0.08	0.0000	0.22	-150.43	-138.23
44.257	1596.13	250	3.81	-677822.0	424.7	0.278	0.07	0.0000	0.21	-153.43	-141.23
45.141	1596.13	250	3.81	-656257.0	411.2	0.269	0.06	0.0000	0.20	-156.33	-144.13
46.055	1596.13	250	3.81	-634873.6	397.8	0.260	0.05	0.0000	0.20	-159.33	-147.13
46.970	1596.13	250	3.81	-613626.4	384.4	0.251	0.04	0.0000	0.19	-162.33	-150.13
47.854	1596.13	250	3.81	-592606.2	371.3	0.243	0.03	0.0000	0.18	-165.23	-153.03
48.768	1596.13	250	3.81	-571722.2	358.2	0.234	0.02	0.0000	0.18	-168.23	-156.03
49.682	1596.13	250	3.81	-551065.2	345.3	0.226	0.01	0.0000	0.17	-171.23	-159.03
50.566	1596.13	250	3.81	-537990.0	337.1	0.220	0.00	0.0000	0.17	-174.13	-161.93
51.481	1596.13	250	3.81	-532405.8	333.6	0.218	0.00	0.0000	0.16	-177.13	-164.93
52.365	1596.13	250	3.81	-526776.2	330.0	0.216	0.00	0.0000	0.16	-180.03	-167.83
53.279	1596.13	250	3.81	-521192.0	326.5	0.213	0.00	0.0000	0.16	-183.03	-170.83
54.193	1596.13	250	3.81	-515607.8	323.0	0.211	0.00	0.0000	0.16	-186.03	-173.83
55.077	1596.13	250	3.81	-510023.6	319.5	0.209	0.00	0.0000	0.16	-188.93	-176.73
55.992	1596.13	250	3.81	-504439.4	316.0	0.207	0.00	0.0000	0.16	-191.93	-179.73
56.906	1596.13	250	3.81	-492862.4	308.8	0.202	0.00	0.0000	0.15	-194.93	-182.73
57.790	1596.13	250	3.81	-475428.8	297.9	0.195	0.00	0.0000	0.15	-197.83	-185.63
58.704	1596.13	250	3.81	-458358.4	287.2	0.188	0.00	0.0000	0.14	-200.83	-188.63
59.619	1596.13	250	3.81	-441651.2	276.7	0.181	0.00	0.0000	0.14	-203.83	-191.63
60.503	1596.13	250	3.81	-425307.2	266.5	0.174	0.00	0.0000	0.13	-206.73	-194.53
61.417	1596.13	250	3.81	-409281.0	256.4	0.168	0.00	0.0000	0.13	-209.73	-197.53
62.301	1596.13	250	3.81	-393618.0	246.6	0.161	0.00	0.0000	0.12	-212.63	-200.43
63.216	1596.13	250	3.81	-378272.8	237.0	0.155	0.00	0.0000	0.12	-215.63	-203.43
64.130	1596.13	250	3.81	-363381.6	227.7	0.149	0.00	0.0000	0.11	-218.63	-206.43
65.014	1596.13	250	3.81	-345766.4	216.6	0.142	0.00	0.0000	0.11	-221.53	-209.33
65.928	1596.13	250	3.81	-325654.2	204.0	0.133	0.00	0.0000	0.10	-224.53	-212.33
66.843	1596.13	250	3.81	-306450.0	192.0	0.126	0.00	0.0000	0.09	-227.53	-215.33
67.727	1596.13	250	3.81	-288153.8	180.5	0.118	0.00	0.0000	0.09	-230.43	-218.23
68.641	1596.13	250	3.81	-270720.2	169.6	0.111	0.00	0.0000	0.08	-233.43	-221.23
69.525	1596.13	250	3.81	-254013.0	159.1	0.104	0.00	0.0000	0.08	-236.33	-224.13
70.439	1596.13	250	3.81	-238077.6	149.2	0.098	0.00	0.0000	0.07	-239.33	-227.13
71.354	1596.13	250	3.81	-222823.2	139.6	0.091	0.00	0.0000	0.07	-242.33	-230.13
72.238	1596.13	250	3.81	-208249.8	130.5	0.085	0.00	0.0000	0.06	-245.23	-233.03
73.152	1596.13	250	3.81	-194221.2	121.7	0.080	0.00	0.0000	0.06	-248.23	-236.03
74.066	1596.13	250	3.81	-182508.0	114.3	0.075	0.00	0.0000	0.06	-251.23	-239.03
74.950	1853.28	250	4.445	-172974.0	93.3	0.061	0.00	0.0000	0.05	-254.13	-241.93
75.865	1853.28	250	4.445	-163712.4	88.3	0.058	0.00	0.0000	0.04	-257.13	-244.93
76.749	1853.28	250	4.445	-154768.6	83.5	0.055	0.00	0.0000	0.04	-260.03	-247.83
77.663	2107.90	250	5.08	-144735.2	68.7	0.045	0.00	0.0000	0.03	-263.03	-250.83
78.577	2107.90	250	5.08	-133703.0	63.4	0.041	0.00	0.0000	0.03	-266.03	-253.83
79.461	2107.90	250	5.08	-123034.0	58.4	0.038	0.00	0.0000	0.03	-268.93	-256.73
81.290	2107.90	250	5.08	-102694.8	48.7	0.032	0.00	0.0000	0.02	-274.93	-262.73
82.174	2107.90	250	5.08	-93024.6	44.1	0.029	0.00	0.0000	0.02	-277.83	-265.63
83.088	2107.90	250	5.08	-83581.4	39.7	0.026	0.00	0.0000	0.02	-280.83	-268.63
83.972	2107.90	250	5.08	-74410.6	35.3	0.023	0.00	0.0000	0.02	-283.73	-271.53

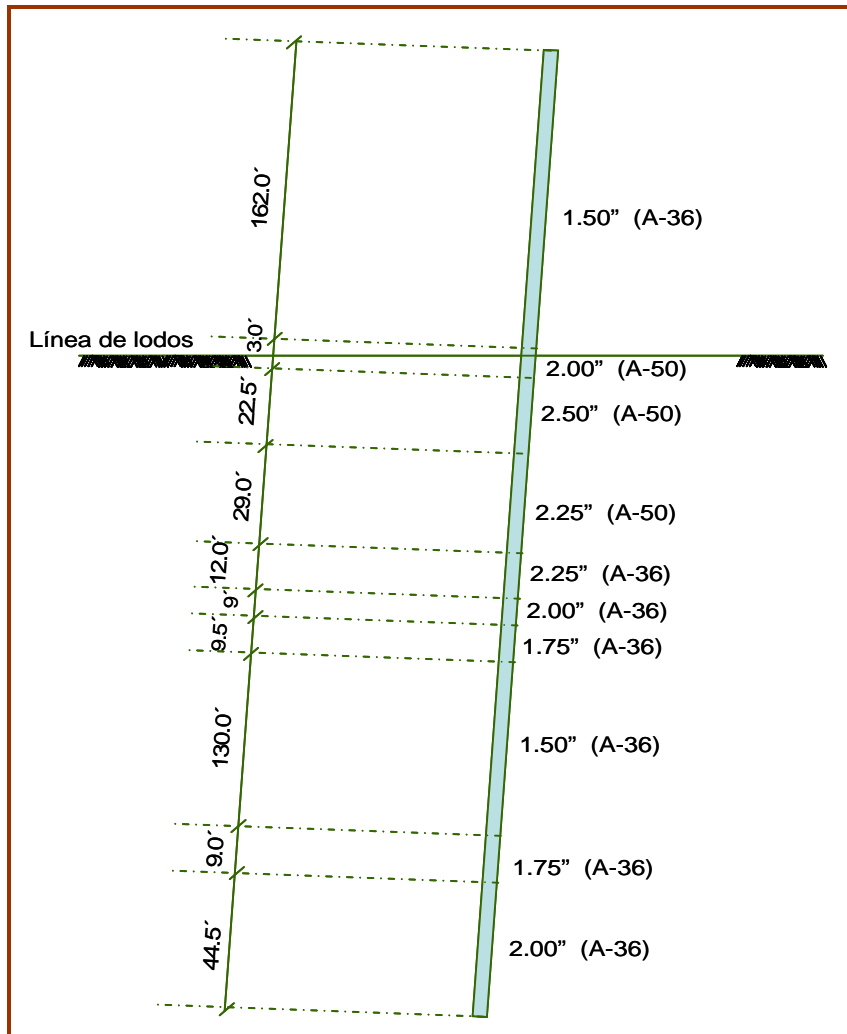


Figura IV.2.8. Diseño por esfuerzos del pilote sobre y debajo de la línea de lodos.

### IV.3. Análisis del hincado estático.

A partir del análisis por esfuerzos sobre y debajo de la línea de lodos del pilote, se determina una distribución preliminar de espesores y longitudes de tramos que conformaran el diseño final del pilote, para lo cual, se realiza un análisis de hincado estático que define la distribución final de espesores y la longitud final de cada tramo (Figura IV.2.8).

El análisis de hincado estático consiste en analizar la distribución preliminar de espesores definida del análisis por esfuerzos del pilote, con la finalidad de determinar si dicha distribución es capaz de soportar los esfuerzos inducidos por el peso del equipo de instalación y por cada golpe del martillo

hasta alcanzar la penetración final de diseño, los esfuerzos generados en el hincado no deben de exceder a los permisibles, de tal forma que las interacciones deberán ser menores a la unidad.

Para el análisis de hincado estático, se deben de cumplir las siguientes relaciones establecidas en el API-RP-2A-WSD-2000.

$$\frac{f_a}{0.6F_{xc}} + \frac{\sqrt{f_{bx}^2 + f_{by}^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad \text{Ec. 4.21 señala anteriormente}$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{\sqrt{\left[ \frac{C_{mx} f_{bx}}{1 - \frac{f_a}{F_{ex}}} \right]^2 + \left[ \frac{C_{my} f_{by}}{1 - \frac{f_a}{F_{ey}}} \right]^2}}{F_b} \leq 1.0 \quad \text{Ec. 4.23}$$

donde:

$F_{xc}$  = se obtiene de la ecuación 4.16.

$F_b$  = esfuerzo permisible por flexión.

$f_{bx}$  = esfuerzo actuante por flexión en dirección X

$f_{by}$  = esfuerzo actuante por flexión en dirección Y

$C_{mx}$  = Factor de reducción. Los valores que se incluyen en la Tabla 4.4 se definen de acuerdo al AISC y son los siguientes:

(a)  $C_m = 0.85$

(b)  $0.6 - 0.4 \left( \frac{M_1}{M_2} \right)$  mínimo de 0.4 y no mayor a 0.85

(c)  $1.0 - 0.4 \left( \frac{f_a}{F_e} \right)$  ó 0.85, para cualquier valor menor.

A continuación se presenta el análisis de hincado con el cual se determina el diseño final del pilote:



**CENTRO DE GRAVEDAD Y PESO DEL TRAMO PE1-1, EJE 1**

Sección (M)	Long. (KG/M)	Peso Unit. (KG)	Peso Tot. (M)	Brazo (KG-M)	Momento
GUIA	2.438	-----	1.64	0.00	0.00
0=54x 2.000	3.048	1654.704	5043.54	1.52	7686.35
0=54x 1.750	3.048	1454.827	4434.31	4.57	20273.68
0=54x 1.500	38.100	1252.961	47737.81	25.15	1200414.88
0=54x 1.750	3.048	1454.827	4434.31	45.72	202736.75
0=54x 2.000	3.048	1654.704	5043.54	48.77	245963.25
0=54x 2.250	3.048	1852.592	5646.70	51.82	292589.47
0=54x 2.250	3.048	1852.592	5646.70	54.86	309800.59
0=54x 2.500	17.983	2048.492	36838.03	65.38	2408451.75

CARACTERISTICAS DEL TRAMO DE PILOTE QUE ESTA REVISANDO

CENTRO DE GRAVEDAD CON RESPECTO A LA CABEZA = 33.54494 M

LONGITUD TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 74.371 M

PESO TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 114826.6 Kg (52.131 Kips)

Con base al peso del primer tramo de pilote, se determina la longitud que se hunde y la longitud a hincar de este, con la finalidad de determinar el martillo que se utilizara para hincar la longitud que sobresale de subestructura (Figura IV.5.1).

<i>Longitud del primer tramo:</i>	244 Ft (74.371 m)
<i>W pilote :</i>	52.131 Kips (114.827 Ton)
<i>Hundimiento por peso propio del pilote:</i>	17.5 Ft (5.334 m)
<i>Tirante de agua:</i>	139.44 Ft (42.5 m)
<i>Pendiente simple:</i>	1/8 = 1.0078
<i>Elevación de la subestructura:</i>	(+) 6.858 m
<i>Longitud de la línea de lodos a la Elev. (+) 6.858:</i>	163.20 Ft (49.742 m)
<i>Longitud a hincar:</i>	244 Ft - 163.20 FT - 17.5 Ft = 63.30 Ft (19.29m)

El primer tramo de pilote se estima que presentara un hundimiento por peso propio del orden de 5.334 m (17.5 ft), quedando aproximadamente 19.29 m (63 ft) de sección por arriba de la elevación +6.858 m, misma que se tomara como 19.81m (65 ft) para analizar el hincado con el martillo de menor energía, para este caso es el VULCAN-540.

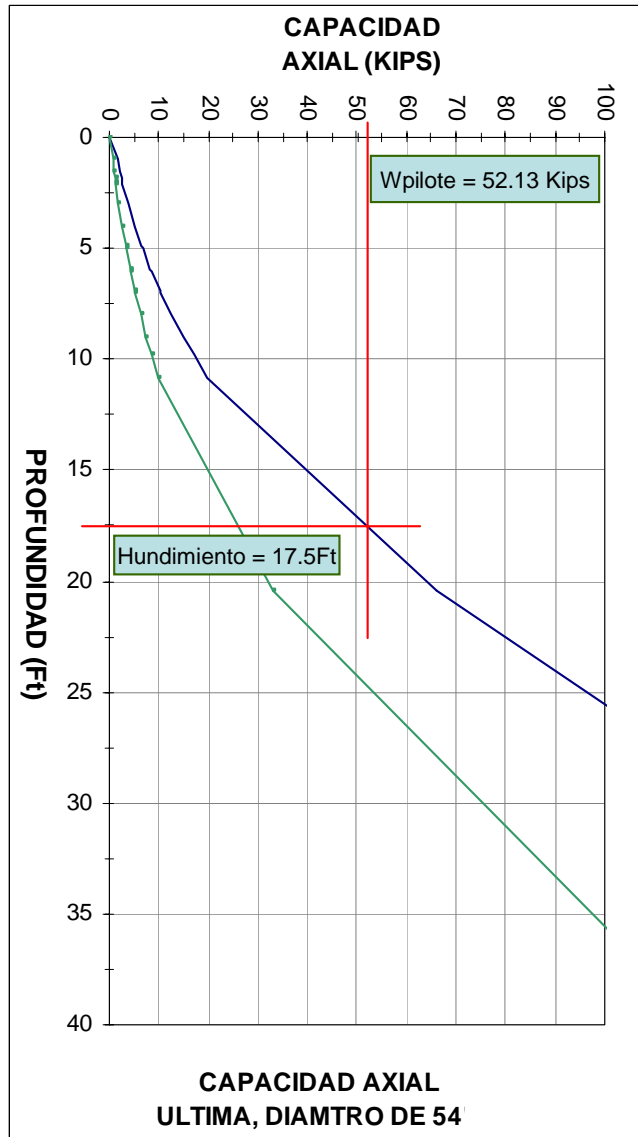


Figura IV.3.1. Determinación de la longitud que se hunde del primer tramo por peso propio del pilote.

**HINCADO DE LA PRIMERA SECCION DE PILOTE, EJE-1**

CENTRO DE GRAVEDAD Y ELEMENTOS MECANICOS DEL TRAMO T-1 a hincar

Sección	Long. (M)	Peso Unit. (KG/M)	Peso Tot. (KG)	Brazo (M)	Momento (KG-M)
GUIA	2.438	----.---	0.00	0.00	0.00
0=54x 2.250	5.000	1852.592	9262.96	2.50	23157.40
0=54x 2.500	17.983	2048.492	36838.03	13.99	515419.25

CARACTERISTICAS DEL TRAMO DE PILOTE QUE ESTA REVISANDO

CENTRO DE GRAVEDAD CON RESPECTO A LA CABEZA = 11.30046 M

LONGITUD TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 22.983 M

PESO TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 46100.99 Kg

REVISION DE PILOTES POR HINCADO ESTATICO

**REVISION POR HINCADO, VULCAN= 540**

Interacciones para  $\phi=54.000 \times 2.250$ :  $F_y=3518.0$

**0.25 (ecuación 3.3.1-3)**

Elementos mecánicos:

P= 127111.48 kg  $M_x= 40153464.00$  kgcm

Esfuerzos:

fa= 53.86 kg/cm<sup>2</sup>  $F_a=1825.76$  kg/cm<sup>2</sup>  
 fbx= 539.25 kg/cm<sup>2</sup>  $F_{bx}=2450.92$  kg/cm<sup>2</sup>

Propiedades geométricas:

Area=2359.99 cm<sup>2</sup> Momento de inercia=5106561.50 cm<sup>4</sup>  
 Radio de giro= 46.52 cm Módulo de sección=74461.38 cm<sup>3</sup>  
 Kx=1.00 Longitud= 2603.10 cm  
 KL/R= 55.96 Pend. del pilote= 8.000

**HINCADO DE LA SEGUNDA SECCION DE PILOTE, EJE-1**

CENTRO DE GRAVEDAD, PESO Y ELEMENTOS MECANICOS DEL TRAMO PE1-2

Sección (M)	Long. (KG/M)	Peso Unit. (KG)	Peso Tot. (M)	Brazo (KG-M)	Momento
GUIA	2.438	----.---	989.51	0.00	0.00
0=54x 2.500	15.240	2048.492	31219.01	7.62	237888.88
0=54x 2.250	3.048	1852.592	5646.70	16.76	94661.30
0=54x 2.250	8.839	1852.592	16375.06	22.71	371836.72
0=54x 2.000	3.048	1654.704	5043.54	28.65	144502.41
0=54x 2.250	6.096	1852.592	11293.40	33.22	375200.69

CARACTERISTICAS DEL TRAMO DE PILOTE QUE ESTA REVISANDO

CENTRO DE GRAVEDAD CON RESPECTO A LA CABEZA = 18.92456 M

**LONGITUD TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 36.271 M**

PESO TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 70567.23 Kg

REVISION DE PILOTES POR HINCADO ESTATICO

**REVISION POR HINCADO, VULCAN= 560**

Interacciones para  $\phi=54.000 \times 2.500$ :  $F_y=3518.0$

**0.52** (ecuación 3.3.1-4,API)

**0.37** (ecuación 3.3.1-2,API)

Elementos mecánicos:

P= 156443.08 kg

Mx= 67570280.00 kgcm

Esfuerzos:

fa= 59.95 kg/cm<sup>2</sup>

Fa= 340.05 kg/cm<sup>2</sup>

fbx= 828.28 kg/cm<sup>2</sup>

Fbx=2459.13 kg/cm<sup>2</sup>

Propiedades geométricas:

Area=2609.54 cm<sup>2</sup>

Momento de inercia=5594724.00 cm<sup>4</sup>

Radio de giro= 46.30 cm

Módulo de sección=81579.52 cm<sup>3</sup>

Kx=2.10

Longitud= 3931.90 cm

KL/R=178.33

Pend. del pilote= 8.000

**HINCADO DE LA TERCERA SECCION DE PILOTE, EJE-1**

CENTRO DE GRAVEDAD, PESO Y ELEMENTOS MECANICOS DEL TRAMO PE1-3 AKAL-TGP

Sección	Long. (M)	Peso Unit. (KG/M)	Peso Tot. (KG)	Brazo (M)	Momento (KG-M)
GUIA	2.438	-----	999.74	0.00	0.00
0=54x 2.250	3.048	1852.592	5646.70	1.52	8605.57
0=54x 2.000	21.336	1654.704	35304.77	13.72	484240.19

CARACTERISTICAS DEL TRAMO DE PILOTE QUE ESTA REVISANDO

CENTRO DE GRAVEDAD CON RESPECTO A LA CABEZA = 12.63593 M

**LONGITUD TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 24.384 M**

PESO TOTAL DEL TRAMO DE PILOTE = 41951.21 Kg

REVISION DE PILOTES POR HINCADO ESTATICO

**REVISION POR HINCADO, VULCAN= 5100**Interacciones para  $\phi=54.000 \times 2.250$ :  $F_y=2530.0$ **0.69** (ecuación 3.3.1-3)

Elementos mecánicos:

P= 185049.56 kg

 $M_x= 85803840.00$  kgcm

Esfuerzos:

 $f_a= 78.41$  kg/cm<sup>2</sup> $F_a= 705.08$  kg/cm<sup>2</sup> $f_{bx}=1152.33$  kg/cm<sup>2</sup> $F_{bx}=2005.83$  kg/cm<sup>2</sup>

Propiedades geométricas:

Area=2359.99 cm<sup>2</sup>Momento de inercia=5106561.50 cm<sup>4</sup>

Radio de giro= 46.52 cm

Módulo de sección=74461.38 cm<sup>3</sup>

Kx=2.10

Longitud= 2743.20 cm

KL/R=123.84

Pend. del pilote= 8.000

Como se puede observar en la revisión por hincado estático, de las diferentes secciones de pilote, los resultados son aceptables, dado que los esfuerzos generados no excedieron los permisibles, de tal forma que las interacciones son menores a la unidad, por lo cual satisfacen esta revisión por hincado. Con esto se determina el arreglo final del pilote y se calcula el factor de seguridad.

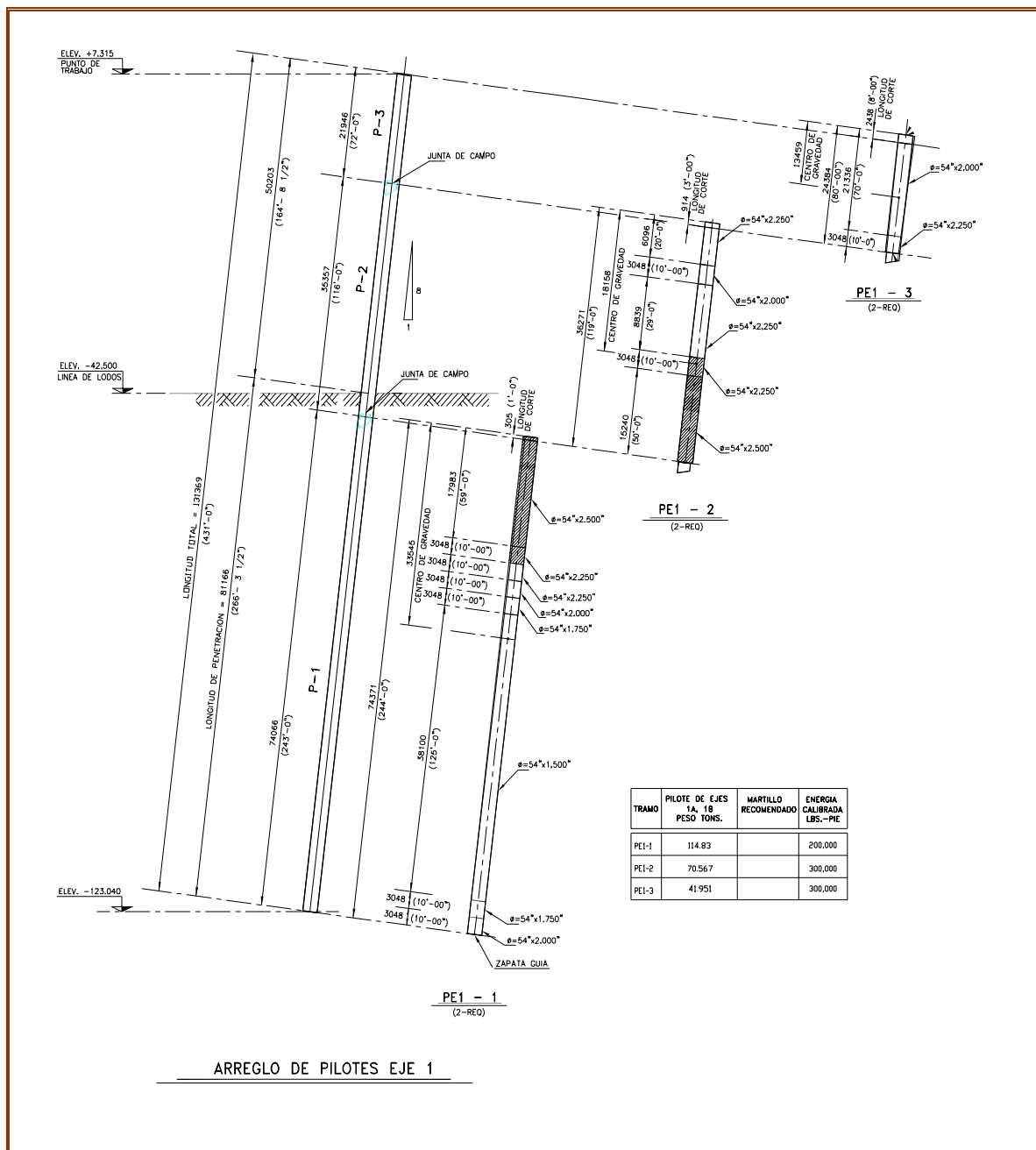


Figura IV.3.2. Arreglo final de pilotes para el Eje-1..

#### IV.6. Análisis de hincado dinámico.

Durante la instalación de los pilotes, estos son sometidos a esfuerzos inducidos por hincado continuo y reinicio de hincado debido a la aplicación de soldadura entre tramos, por fallas en el equipo, o alguna otra eventualidad. Con la finalidad de proporcionar un número máximo de golpes durante la instalación de los pilotes hasta alcanzar la profundidad de diseño considerando para ello un hincado continuo y/o reinicio (Figura IV.6.1).

El análisis de hincado dinámico se basa en la teoría de propagación de onda unidimensional, este método permite evaluar la capacidad del pilote para transmitir hasta la punta la energía de hincado a fin de lograr su penetración y que la sección del pilote resista los esfuerzos de hincado sin sufrir daño. En el desarrollo del análisis, el pilote se divide en una serie de pequeñas masas concentradas unidas entre si por resortes que simulan la resistencia longitudinal del pilote (rigidez).

Cuando el martillo golpea el cojinete se genera una fuerza  $R_c$ , que lo acelera ( $W_c$ ) y lo comprime. El cojinete transfiere una fuerza,  $R_o$ , al primer segmento de la cabeza del pilote,  $W_1$  y lo acelera un instante después que se ejerce en la cabeza del pilote,  $W_2$ , produciéndose una onda de compresión que se mueve hacia la punta del pilote. La fuerza vertical en cualquier instante,  $t$ , es equivalente a la compresión del resorte. La onda de fuerza, cuando se mueve hacia abajo, es parcialmente disipada en vencer la fricción y la fuerza que queda vence la resistencia por punta, cuando la onda llega al extremo del pilote. Para que el pilote penetre más profundamente es necesario que la fuerza de onda sea mayor que las sumas acumuladas de la máxima resistencia por fricción lateral y la máxima resistencia por punta, si no es así, se dice que el pilote ha alcanzado el rechazo.

La fuerza máxima esta en función de la energía del martillo y de su eficiencia, entre mayor eficiencia mayor será la fuerza. La fuerza dividida por el área transversal del pilote es igual al esfuerzo que se produce en el pilote durante el hincado, si el esfuerzo máximo producido excede la resistencia del pilote este se daña y entonces se dice que el pilote ha sido hincado excesivamente, o que ha sido sobre hincado (Ref. 8).

Los análisis de hincado dinámico del diseño propuesto como ejemplo en este trabajo, se llevó a cabo por el método de la ecuación de onda, utilizando para ello un software especializado.

En los análisis de hincado dinámico, efectuados mediante el programa fueron considerados los valores indicados en la Tabla IV.3.1 y IV.3.2, así mismo, fueron aplicadas las observaciones de campo durante instalaciones previas suponiendo suelos altamente sensitivos, como lo son los suelos de la Sonda de Campeche, mismos que al ser remoldeados pierden resistencia, los valores se indican con las tablas, Tablas IV.3.3 Y IV.3.4.

En las Tablas IV.3.1 y IV.3.2, se muestra la distribución de las longitudes propuestas en el diseño, evitando siempre interrumpir el hincado dentro de un estrato de arena, así mismo, se muestra el máximo número de golpes durante el hincado.

**Tabla IV.6.1. Distribución de longitudes del Pilote del Ejes 1.**

Distribución de longitudes de los Pilotes Eje1.				
Tramo	Longitud (ft)	Longitud de Corte (ft)	Tipo de martillo /Energía (lb-ft)	No Golpes/ft de penetración
T-1	244	1	200,000	12
T-2	119	3	300,000	22
T-3	80	8	300,000	48
SUMA	443	12		

Tabla IV.6.2. Distribución de longitudes del Pilote del Ejes 2.

Distribución de longitudes de los Pilotes Eje2.				
Tramo	Longitud (ft)	Longitud de Corte (ft)	Tipo de martillo /Energía (lb-ft)	No Golpes/ft de penetración
T-1	240	2	200,000	12
T-2	110	8	300,000	34
SUMA	350	10		

Tabla IV.6.3. Constantes dinámicas del suelo para la calibración del modelo

TIPO DE SUELO	COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO LATERAL, $C_d$	COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO EN LA PUNTA, $C_d$	COEFICIENTE DE DEFORMACIÓN ELÁSTICA LA PUNTA, $Q$
	s/ft	s/ft	in
ARCILLA	0.200	0.15	0.100
ARENA	0.050	0.15	0.100
LIMO	0.20	0.15	0.100

Tabla IV.6.4. Valores de sensibilidad definidos a partir de análisis y registros de plataformas de la Sonda de Campeche.

CONDICION	ARCILLOSOS		ARENOSOS	
	FRICCION	PUNTA	FRICCION	PUNTA
continuo	2.5	1.0	3.0	1.0
reinicio	2.0	1.0		

En la figura IV.6.1, se muestra el perfil de número de golpes/ft, se observa en el análisis que no se presenta ningún problema con los martillos con energía de 271.16 KJ y 406.74 KJ (200,000 y 300,000 lb/ft), pudiéndose llevar hasta la penetración de diseño de 81.166 m, 53.249m y 68.58 m de cada uno de ellos, únicamente se aprecia una alta resistencia al hincado en el último tramo, en el pilote del Eje 1 y Eje 2, debido a los estratos de arena que se presentan en el sitio.



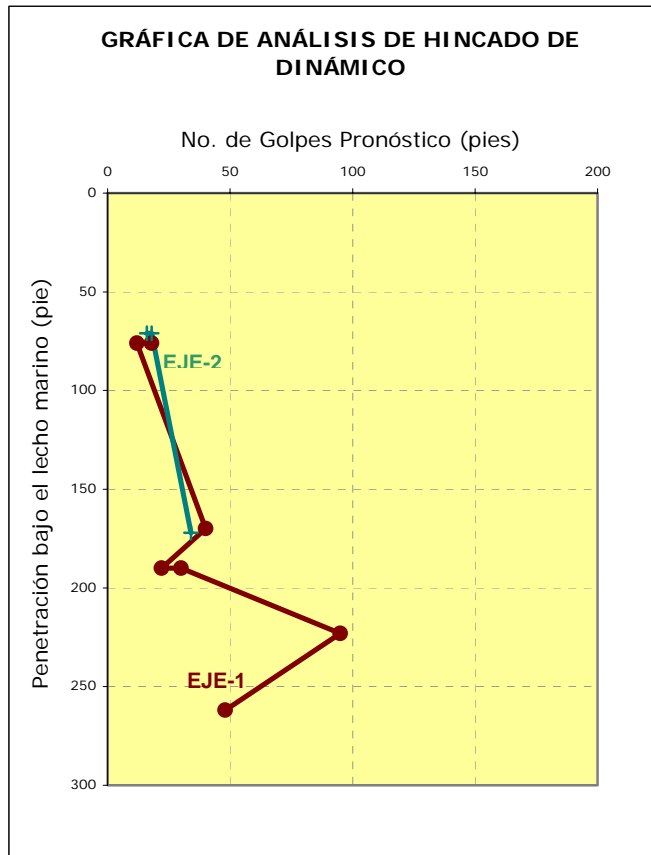


Figura IV.6.1. Gráfica de análisis de hincabilidad golpes/ft de los pilotes del tetrápodo.

**IV.4. Factor de seguridad.**

La longitud de penetración del pilote debe ser la necesaria para soportar las cargas máximas a compresión, y a su vez, cumplir con el factor de seguridad indicado. El API-RP-2A-WSD-2000, especifica que en el diseño de los pilotes se debe de considerar el factor de seguridad correspondiente a la condición de carga. en su sección 6.3, el API-RP-2A-WSD-2000, establece los siguientes valores:

**TablaIV.4.1. Valores recomendados por el API-RP-2A-WSD para el Factor de Seguridad.**

Condición de carga	Factor de seguridad
Condiciones ambientales de tormenta y cargas de equipo de perforación.	1.50
Condiciones ambientales de operación y cargas durante la etapa de perforación.	2.00
Condiciones ambientales de tormenta y cargas de producción.	1.50
Condiciones ambientales de operación y cargas durante la etapa de producción.	2.00
Condiciones ambientales de tormenta y condiciones de Cargas mínimas (para tirón en tubería de perforación)	1.50

IV. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL PILOTE

Con base al diseño final del pilote, el factor de seguridad se determina como:

$$F.S = \frac{Qu - Wp}{Qa} \quad \text{Ec. 4.24}$$

donde:

**Qu** = capacidad de carga ultima correspondiente al diámetro del pilote en la longitud de penetración, (Ton ó Kips)

**Wp** = peso del pilote. (Ton ó Kips).

**Qa** = carga actuante obtenida de un análisis en condiciones de operación y tormenta, (Ton ó Kips).

En el siguiente listado se presentan las descargas a compresión y a tensión **finales** generadas del análisis de operación y tormenta definitivo. Los pilotes se analizaron con una longitud de penetración de 90.312 m (296.3 ft), por otra parte, se considera que en el análisis de interacción suelo - estructura predominó la condición de tormenta, por tanto, los factores de seguridad obtenidos deben ser mayores a 1.50 (F.S. > 1.50), de igual forma se deberán obtener relaciones de interacción menores a la unidad.

**\* \* \* P I L E M A X I M U M A X I A L C A P A C I T Y S U M M A R Y \* \* \***

PILE GRP	***** PILE *****				***** COMPRESSION *****					***** TENSION *****				
	PILEHEAD	WEIGHT O.D. IN	PEN. THK. IN	CAPACITY KIPS FT	MAX. (INCL. WT) KIPS	CRITICAL LOAD KIPS	CONDITION LOAD KIPS	CAPACITY LOAD SAFETY CASE FACTOR	MAX. (INCL. WT) KIPS	CRITICAL LOAD KIPS	CONDITION LOAD KIPS	*MAXIMUM* LOAD SAFETY CASE FACTOR	UNITY CHECK	LOAD CASE
58 PL1	54.00	2.50	269.7	296.3	-6348.2	-3462.5	-3462.5	65 1.83	6883.9	1875.8	1875.8	61 3.67	0.82	65
57 PL1	54.00	2.50	269.7	296.3	-6348.2	-3502.7	-3502.7	63 1.81	6883.9	1952.9	1952.9	67 3.53	0.83	63
80 PL2	54.00	2.50	183.8	175.3	-4104.9	-2231.1	-2231.1	66 1.84	4470.5	425.2	425.2	62 10.51	0.82	66
59 PL2	54.00	2.50	183.8	175.3	-4104.9	-2118.4	-2118.4	62 1.94	4470.5	509.5	509.5	66 8.77	0.77	62
152 CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-283.5	-283.5	64 6.55	1964.0	47.4	47.4	60 41.42	0.23	64
154 CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-60.9	-60.9	50 30.53	1964.0	0.0	0.0	50 100.00	0.07	50
166 CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-60.9	-60.9	50 30.53	1964.0	0.0	0.0	50 100.00	0.07	50
176 CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-60.9	-60.9	50 30.53	1964.0	0.0	0.0	50 100.00	0.07	50
164 CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-60.9	-60.9	50 30.53	1964.0	0.0	0.0	50 100.00	0.07	50
178 CON	30.00	1.00	53.3	196.9	-1858.0	-60.9	-60.9	50 30.53	1964.0	0.0	0.0	50 100.00	0.07	50

Release 5.

Realizando una revisión con la ecuación 4.24, y con base a la curva de capacidad de carga obtenida del estudio geotécnico para un diámetro de 1.372 m (54 in), se determinan los siguientes factores de seguridad:

CALCULO, FACTORES SE SEGURIDAD EN LOS PILOTES, PENDIENTE SIMPLE, EJE 1, 54 PULGADAS							
PENETRACION BAJO LA LINEA DE LODOS, (PIES)	CAPACIDAD DE CARGA, COMP, (Kips)	PESO DEL PILOTE, (Kips)	CARGA ACTUANTE, COMP. (Kips)	FACTOR DE SEGURIDAD, COMP	CAPACIDAD DE CARGA A TENSION, (Kips)	CARGA EN TENSION, (KIPS)	FACTOR DE SEGURIDAD, TENSION
294.04	7985.00	268.49	3502.70	2.20	5982.46	1952.9	3.06

Con la revisión del factor de seguridad, se finaliza el diseño del pilote, y solo se debe realizar la revisión por izaje en patio de fabricación y en campo de cada uno de los segmentos del pilote.

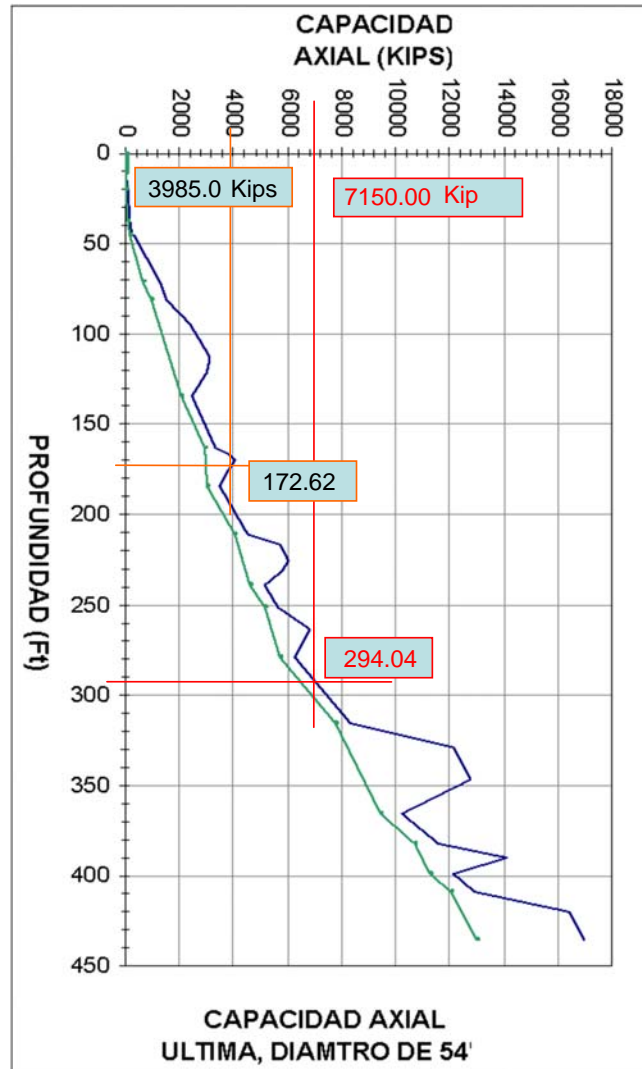


Figura IV.4.1. Capacidad de carga axial última a la longitud de penetración.

#### IV.5. Análisis por Izaje.

Una vez finalizado el diseño del pilote, se deberá revisar el izaje en patio y en campo, los esfuerzos generados de la maniobra de izaje de cada uno de las secciones que conforman el pilote. Para esta condición de izaje, el pilote se considera como una viga simplemente apoyada en dos puntos, (Figura IV.5.1 y IV.5.2), por tanto para el análisis de izaje, se debe cumplir con lo siguiente:

- Condición de izaje con dos puntos de apoyo:

$$M = w \cdot l^2 / 8 \quad \text{Ec. 4.25}$$

$$f_b = M / S \quad \text{Ec. 4.26}$$

donde:

**fb** = Esfuerzo actuante ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

**M** = momento máximo ( $\text{Kg-cm}$ ).

**S** = modulo de sección ( $\text{cm}^3$ ).

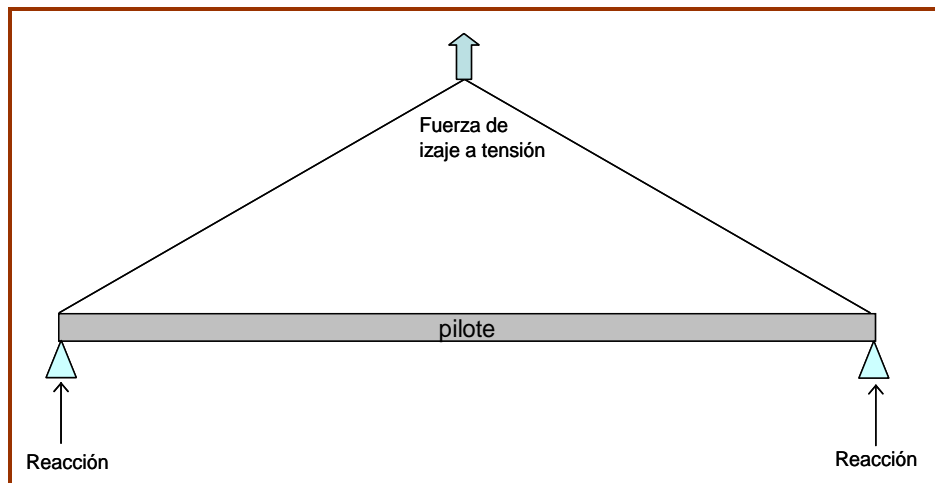


Figura IV.5.1. Esquema representativo de izaje con dos puntos de apoyo.

- Condición de izaje en cantiliver:

$$M = w \cdot l^2 / 2 \quad \text{Ec. 4.27}$$

$$fb = M / S \quad \text{Ec. 4.28}$$

donde:

**fb** = Esfuerzo actuante ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ).

**M** = momento máximo ( $\text{Kg-cm}$ ).

**S** = modulo de sección ( $\text{cm}^3$ ).

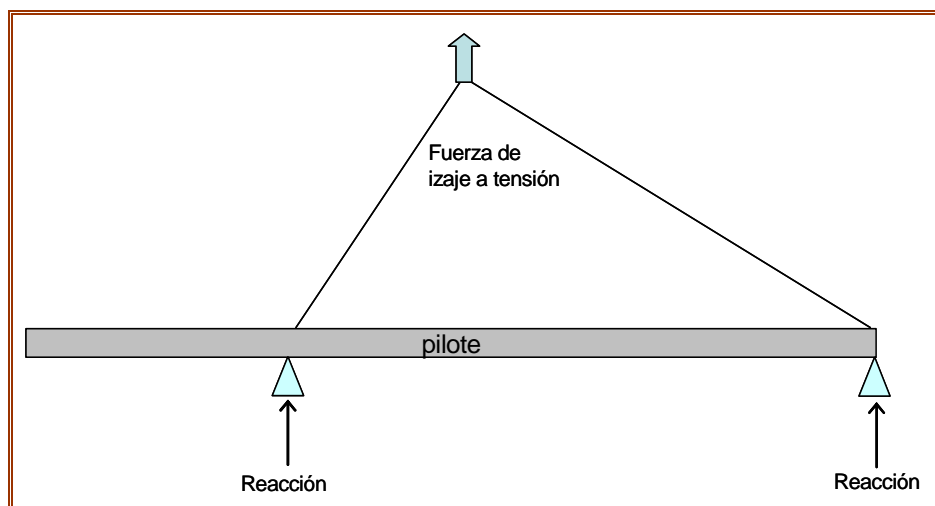


Figura IV.5.2. Esquema representativo de izaje en cantiliver.

Para ambos casos, el esfuerzo permisible esta dado por:

$$F_b = 0.66 F_y \quad \text{Ec. 4.29}$$

$F_b$  = Esfuerzo permisible (kg/cm<sup>2</sup>).

$F_y$  = Esfuerzo de fluencia (kg/cm<sup>2</sup>).

Para ambos análisis, se debe cumplir con la siguiente relación:

$$f_b/F_b < 1.0$$

A continuación se presenta el análisis de izaje para el tramo más largo del diseño, siendo este el primer tramo.

Longitud del tramo: 244 74.3712 m

Long. Parciales	Espesor
Ft	in
10	2
10	1.75
125	1.5
10	1.75
10	2
10	2.25
10	2.25
59	2.5

CONDICIÓN DE APOYO SIMPLE	
Espesor promedio =	1.86 in = 4.736 cm
Dimetro exterior, D =	54.00 in = 137.160 cm
Dimetro interior, d =	50.28 in = 127.711 cm
Área de sección =	1965.63 cm <sup>2</sup>
Peso unitario del pilote, =	1543.02 Kg/m = 15.43 Kg-cm
Módulo de sección $S_x = \pi/32 \times (D^4 - d^4/D)$ =	62918.05 cm <sup>3</sup>
Momento maximo = $Wl^2/8$ =	106681757 Kg -cm
$f_b$ act. = $M/S_x$ =	1695.57 Kg/cm <sup>2</sup>
$F_y$ =	2500 Kg/cm <sup>2</sup>
FB. Permisible =	1650 Kg/cm <sup>2</sup>
<b><math>f_b</math> act. &gt; FB</b>	
<b>No pasa la sección en condición de apoyo simple</b>	

En condición de apoyo simple, esta sección **no pasa por izaje**, por tanto se analiza la segunda condición, donde se propone un cantiliver de 60 Ft.

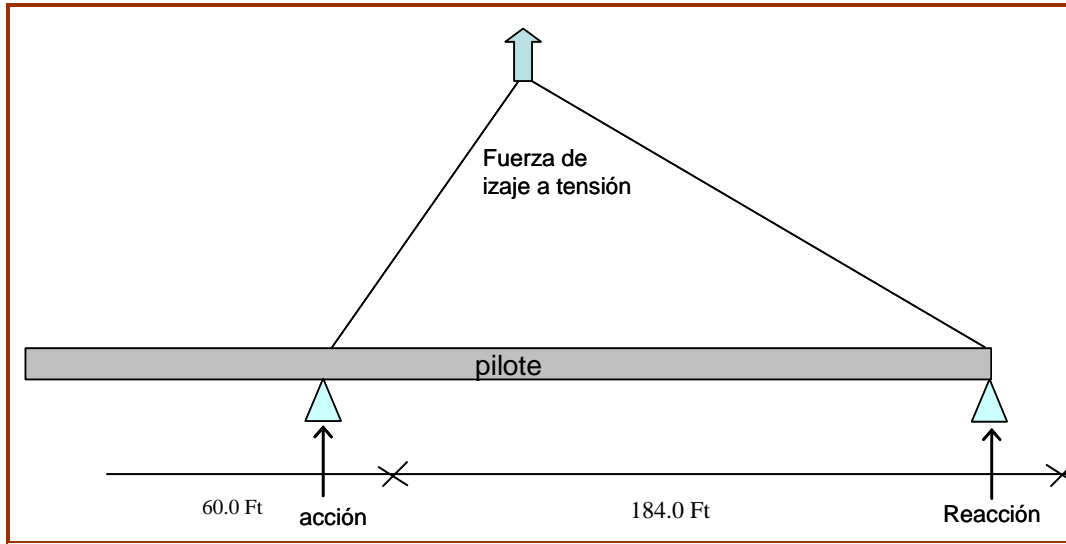


Figura IV.5.3. Esquema representativo de izaje en cantiliver.

Longitud del tramo:	244	74.3712 m
Longitud de apoyo, $l_1$ :	60	18.288 m

Long. Parciales	Espesor
Ft	in
10	2
10	1.75
125	1.5
10	1.75
10	2
10	2.25
10	2.25
59	2.5

CONDICION EN CANTLIVER	
Espesor promedio =	7.58 in = 19.262 cm
Dimetro exterior, D =	54.00 in = 137.160 cm
Dimetro interior, d =	50.28 in = 127.711 cm
Área de sección =	1965.63 cm <sup>2</sup>
Peso unitario del pilote =	1543.02 Kg/m = 15.43 Kg-cm
Módulo de sección $S_x$ =	62918 cm <sup>3</sup>
Momento maximo = $Wl^2/2$ =	25803166 Kg-cm
fb act. =	410.1075329 Kg/cm <sup>2</sup>
Fy =	2500 Kg/cm <sup>2</sup>
Fb. Permissible =	1650 Kg/cm <sup>2</sup>
<b>fb act. &gt; Fb</b>	
<b>Si pasa la sección en condición de cantiliver</b>	

Ft

Longitud del tramo:	244	74.3712 m
Longitud de apoyo, $l_1$ :	184	56.0832 m

Long. Parciales	Espesor
Ft	in
10	2
10	1.75
125	1.5
10	1.75
10	2
10	2.25
10	2.25
59	2.5

CONDICION DE APOYO SIMPLE	
Espesor promedio =	2.47 in = 6.281 cm
Dimetro exterior, D =	54.00 in = 137.160 cm
Dimetro interior, d =	50.28 in = 127.711 cm
Área de sección =	1965.63 cm <sup>2</sup>
Peso unitario del pilote, =	1543.02 Kg/m = 15.43 Kg-cm
Módulo de sección $S_x = \pi/32 \times (D^4 - d^4)/D$ =	62918.05 cm <sup>3</sup>
Momento maximo = $Wl^2/8$ =	60666110 Kg-cm
fb act. = $M/S_x$ =	964.208 Kg/cm <sup>2</sup>
Fy =	2500 Kg/cm <sup>2</sup>
Fb. Permissible =	1650 Kg/cm <sup>2</sup>
<b>fb act. &gt; Fb</b>	
<b>Si pasa la sección en condición de apoyo simple</b>	

Finalmente en condición de cantiliver el primer tramo si pasa, esta condición de izaje **se debe indicar en el plano de pilotes correspondiente, aprobado para construcción así como en las memorias de cálculo respectivas.**

De igual manera, se debe realizar un análisis de izaje para cada uno de los segmentos que componen el diseño final del pilote.

#### **IV.6. Generación de Ingeniería de detalle.**

Una vez que cada uno de los tramos de pilote ha cumplido de manera satisfactoria los procedimientos de diseño, se elabora la ingeniería de detalle, la cual consiste en proporcionar los detalles de los elementos secundarios necesarios para la instalación de los pilotes, tales como:

- Topes de aseguramiento temporal.
- Zapata de hincado.
- Guías de acoplamiento.
- Agujero de izaje.
- Longitud de corte para cada tramo.

A continuación se explica brevemente cada uno de estos elementos:

##### **IV.6.1. Topes de aseguramiento temporal.**

Durante la instalación de las primeras secciones de pilote, en la práctica se colocan apoyos temporales en la parte superior del pilote, conocidos como "topes", estos elementos temporales se sueldan cuando los tramos de pilote aun están en el chalán, facilitando de manera importante el control de la instalación. Los topes están hechos por placas en forma de (T) invertida, generalmente se sueldan de 2 a 4 de ellos en lados opuestos del pilote con la finalidad de controlar la penetración del tramo a instalar, se localizan regularmente entre los 30-45 ft desde la parte superior del pilote (Figura IV.6.1).

##### **IV.6.2. Zapata de hincado.**

La zapata de hincado solo se agrega a los primeros tramos de cada pilote, con la finalidad de facilitar el desplazamiento del pilote durante su instalación por peso propio y por hincado a través del suelo y vencer la resistencia que posee en los diferentes estratos que deberá cruzar el pilote. Las especificaciones del corte que se realiza al espesor de la pared del pilote, es de 45° como se muestran en la Figura IV.6.2.

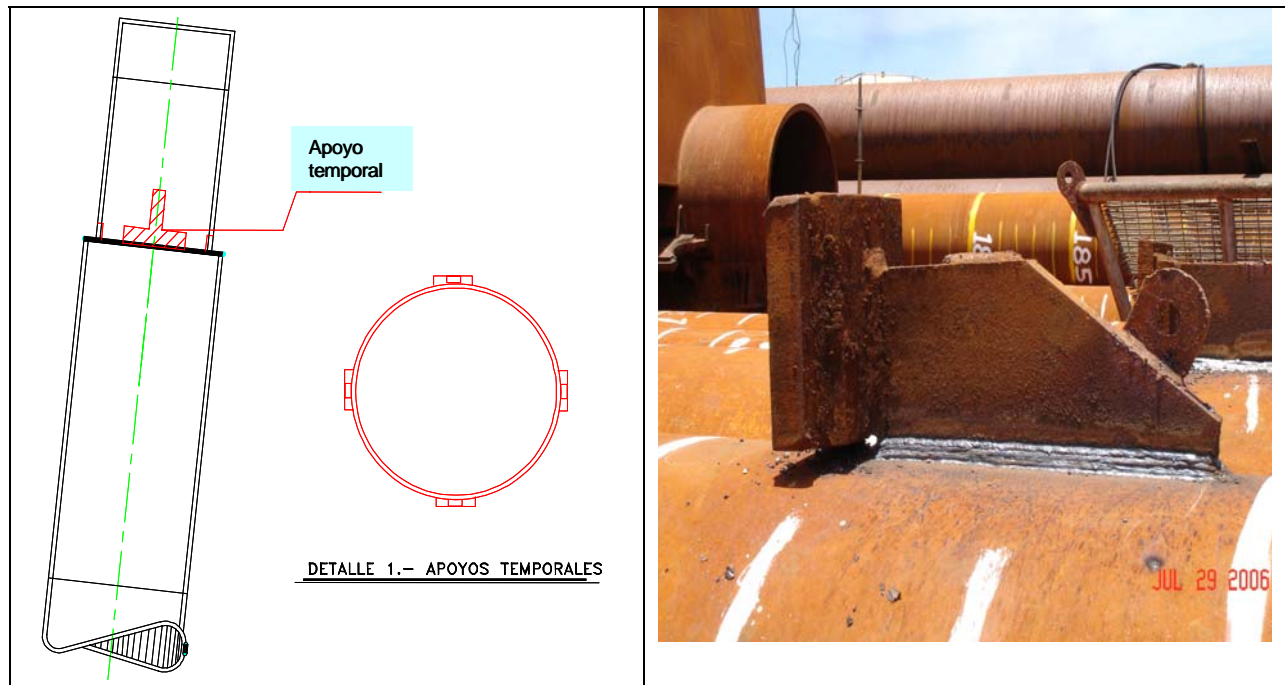


Figura IV.6.1 Apoyos temporales (topes)

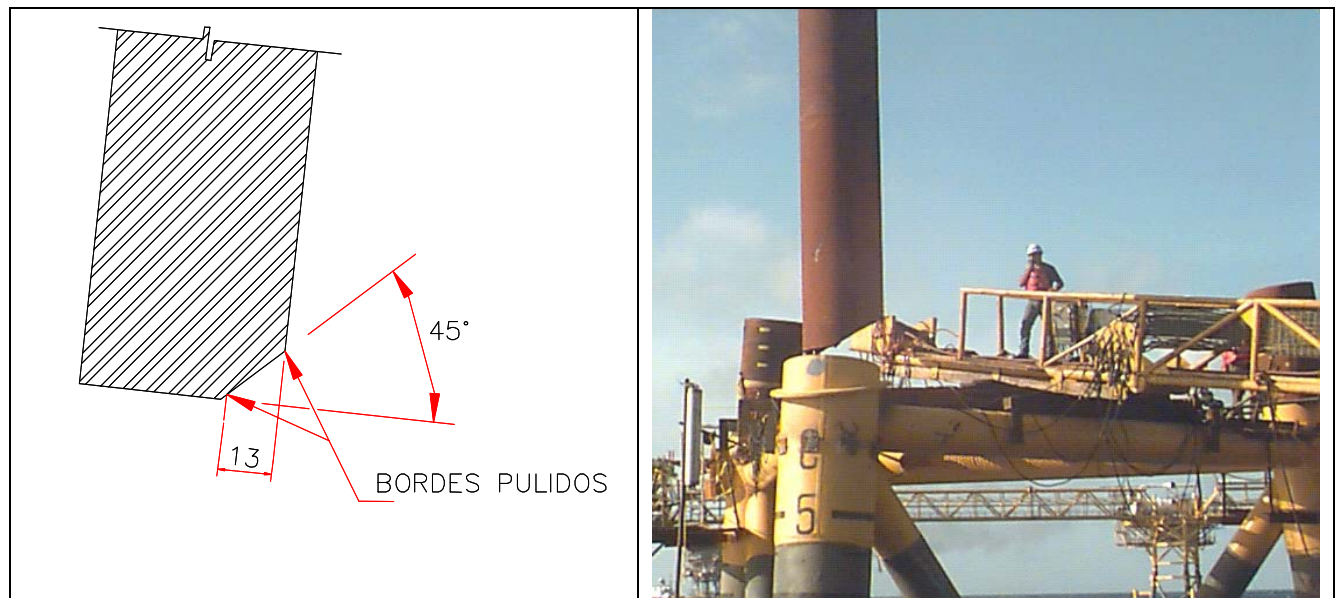


Figura IV.6.2. Zapata de hincado para las primeras secciones de pilote.



## IV.6.3. Guías de acoplamiento.

Para garantizar el correcto acoplamiento entre dos tramos o segmentos de pilote, es necesario colocar en la punta de cada uno de los segmentos del pilote y a partir de la segunda sección, un elemento de acoplamiento hecho de placa rolada que ayudará a mantener alineada la sección de pilote que se va a unir durante los trabajos de soldadura.

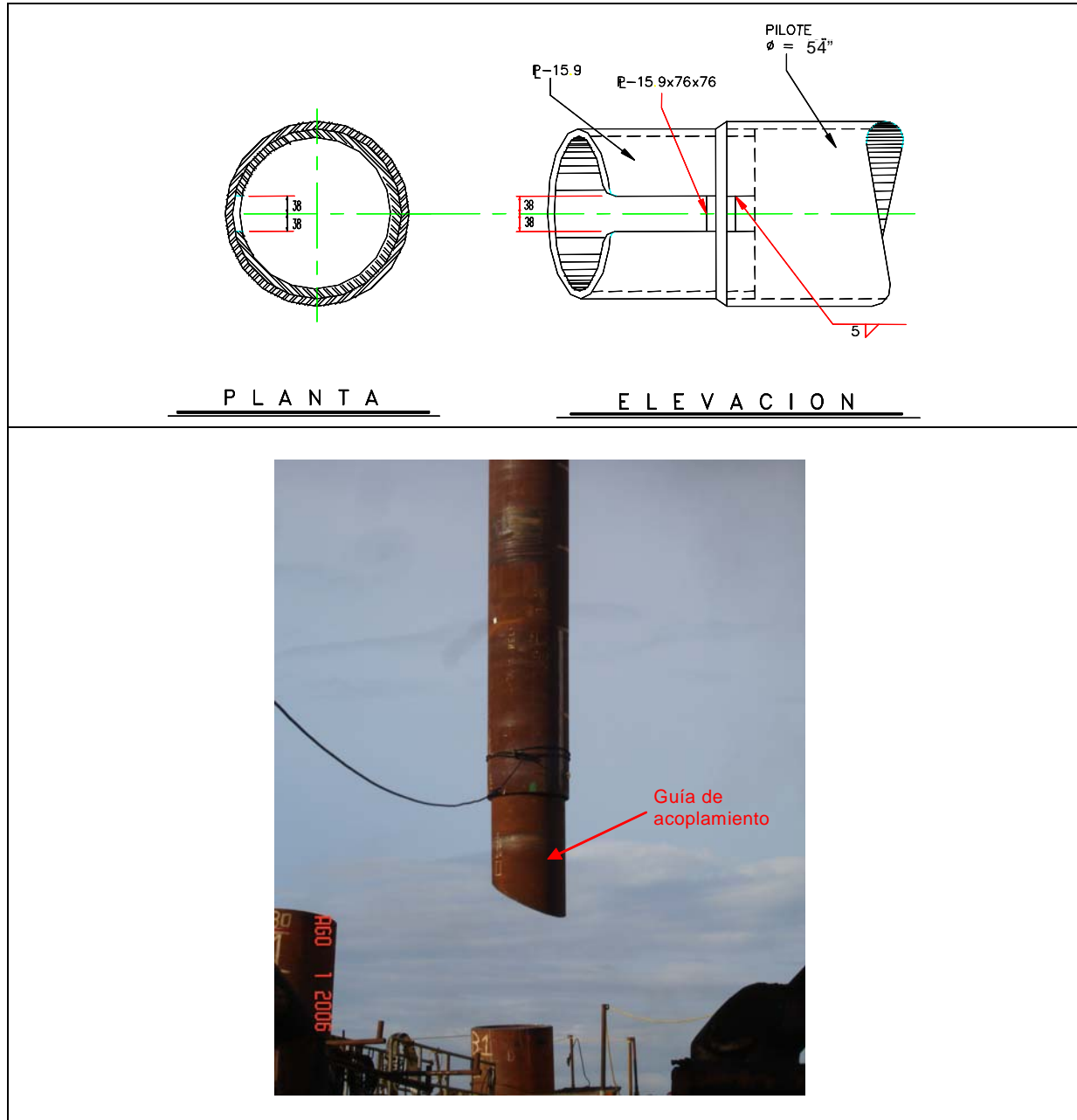


Figura IV.6.3. Guía de acoplamiento de los segmentos intermedios.

### IV.6.3. Agujero de izaje.

El agujero de izaje tiene como finalidad facilitar los trabajos de izaje y las maniobras de movimiento de sección del pilote, así mismo, ayuda a ponerlo en la posición necesaria para la aplicación de soldadura y maniobras de hincado in situ. La geometría de esta preparación se presenta en la siguiente figura:

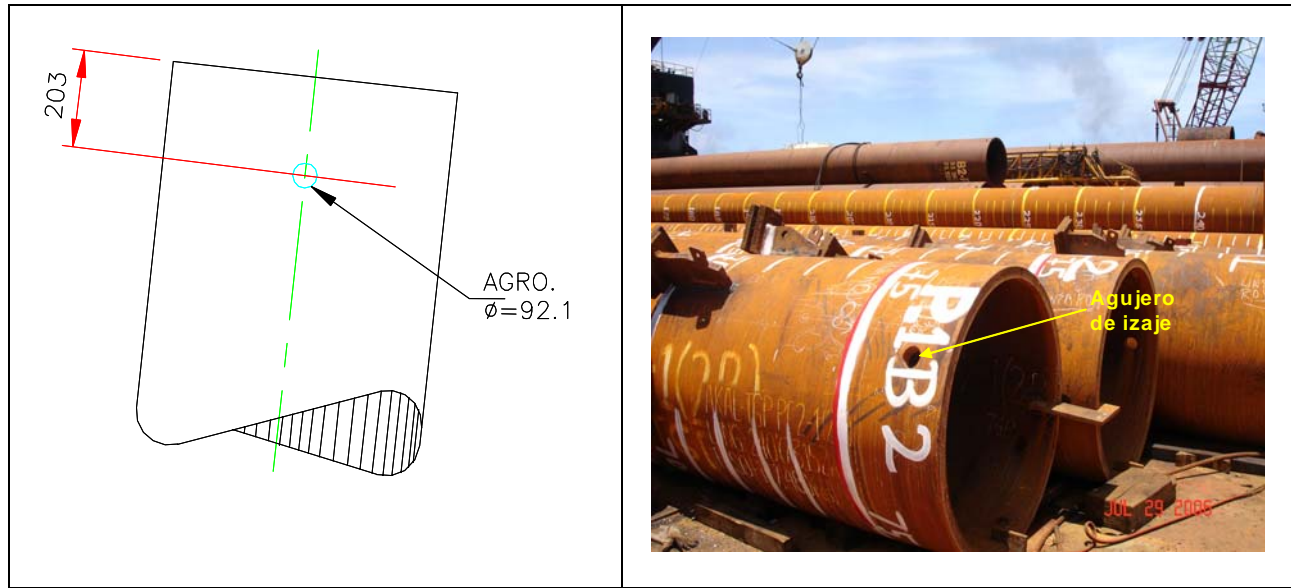


Figura IV.6.4. Agujero de izaje.

### IV.6.4. Longitud de corte para cada sección de pilote.

La longitud de corte, es la longitud de cada sección o tramo del pilote que deberá ser retirada al finalizar el hincado de la sección misma que por haber estado en contacto directo con los cojinetes del martillo y haber recibido impactos continuos, deforma el área de contacto del pilote. En la práctica, la longitud de corte se define entre 0.3048 y 0.610 m (1.0 y 2.0 ft) para las primeras secciones, y de 0.610 y 1.830 m, (2 a 6 ft) para las secciones siguientes dependiendo del número de golpes pronosticado por el análisis dinámico y del criterio del diseñador; así mismo depende del tipo de martillo a utilizar, los martillos hidráulicos llegan a requerir hasta 5.182 m (17 ft) de longitud de corte.

Una vez que se corta la longitud dañada del pilote, se esmerila con la finalidad de eliminar cualquier tipo de impureza que contamine la soldadura entre las secciones.

Cada uno de estos detalles se incluye en los planos aprobados para construcción del arreglo general de pilotes, con esto se concluye completamente el análisis estructural del pilote.

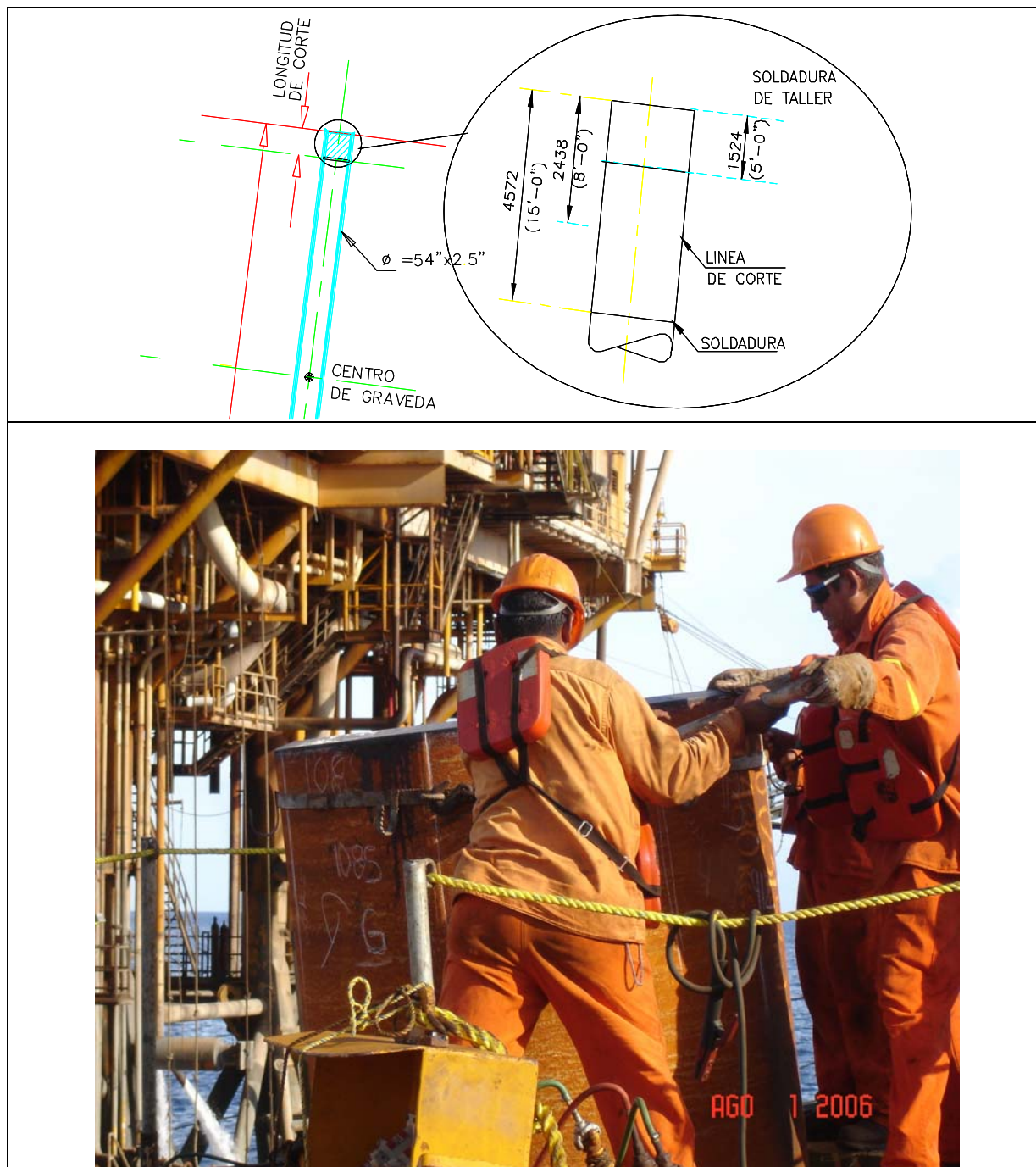


Figura IV.6.5. Longitud de corte para los primeros tramos.

# PROCESO CONSTRUCTIVO DE PILOTES.

## V. PROCESO CONSTRUCTIVO DE PILOTES.

Los pilotes son fabricados con base al diseño definido con anterioridad e integrado en un plano aprobado para construcción. De igual forma que la subestructura y la superestructura, los pilotes se fabrican en patios de fabricación destinados para la construcción de estructuras costa afuera, en la Republica Mexicana, existen patios de fabricación en ciudades como Tuxpan, Veracruz y principalmente en Tampico.

Los patios de fabricación cuentan con una superficie aproximada de 85,000 m<sup>2</sup>, divididos de acuerdo al proceso de construcción de las estructuras costa afuera, en las Figuras V.1 y 2 se muestra un esquema del patio de fabricación ubicado en Tampico, donde se puede apreciar el muelle de pilotes y conductores, muelle de superestructura y muelle de subestructura.

El equipo mínimo necesario con el que cuentan algunos de los patios de fabricación se enumera a continuación:

1. Grúas sobre orugas de diferentes toneladas de capacidad, 100 y 150 Ton por dar un ejemplo, (Figura V.3)
2. Máquina de soldar de 400 amps. (manuales)
3. Tractor trailer plataforma de 30 ton.
4. Montacargas de 15 ton aproximadamente
5. Máquinas para soldar semiautomáticas
6. Maquinas para soldar automáticas de 800 amps. (Figura V.4)
7. Máquinas de combustión interna de 400 amps.
8. Grúa hidráulica s/Neum de 40 ton aproximadamente
9. Grúa Titán hidráulica de 18 ton.
10. Grúa Pettibone de 15 ton.
11. Compresor portátil
12. Maquina roladora de placa, (Figura V.5).

Estos equipos no son limitativos dependen de la capacidad de producción que tiene el patio de fabricación, así como de sus necesidades de servicio.

Como puede apreciarse en el esquema de la Figura V.1, el patio de fabricación existen áreas bien definidas para almacenamiento y construcción de los pilotes; los pilotes están conformados por varios tramos de longitud y espesores variables; en el patio de fabricación se suministran los tubos que conformarán el pilote en su correspondiente diámetro y diversos espesores; o bien, si el patio de fabricación cuenta con una roladora, (Figura V.5) se suministra las laminas de acero necesarias para construir el diámetro y espesor requerido del pilote; ambas opciones permiten soldar en patio los carretes de tubo señalados en el plano estructural y constituir cada tramo de pilote de acuerdo a las especificaciones del plano.

En los siguientes apartados se explica brevemente el proceso constructivo al que se somete la tubería utilizada para la construcción del pilote de cimentación así como el proceso constructivo en el patio de fabricación (Figuras V.6 y 7).

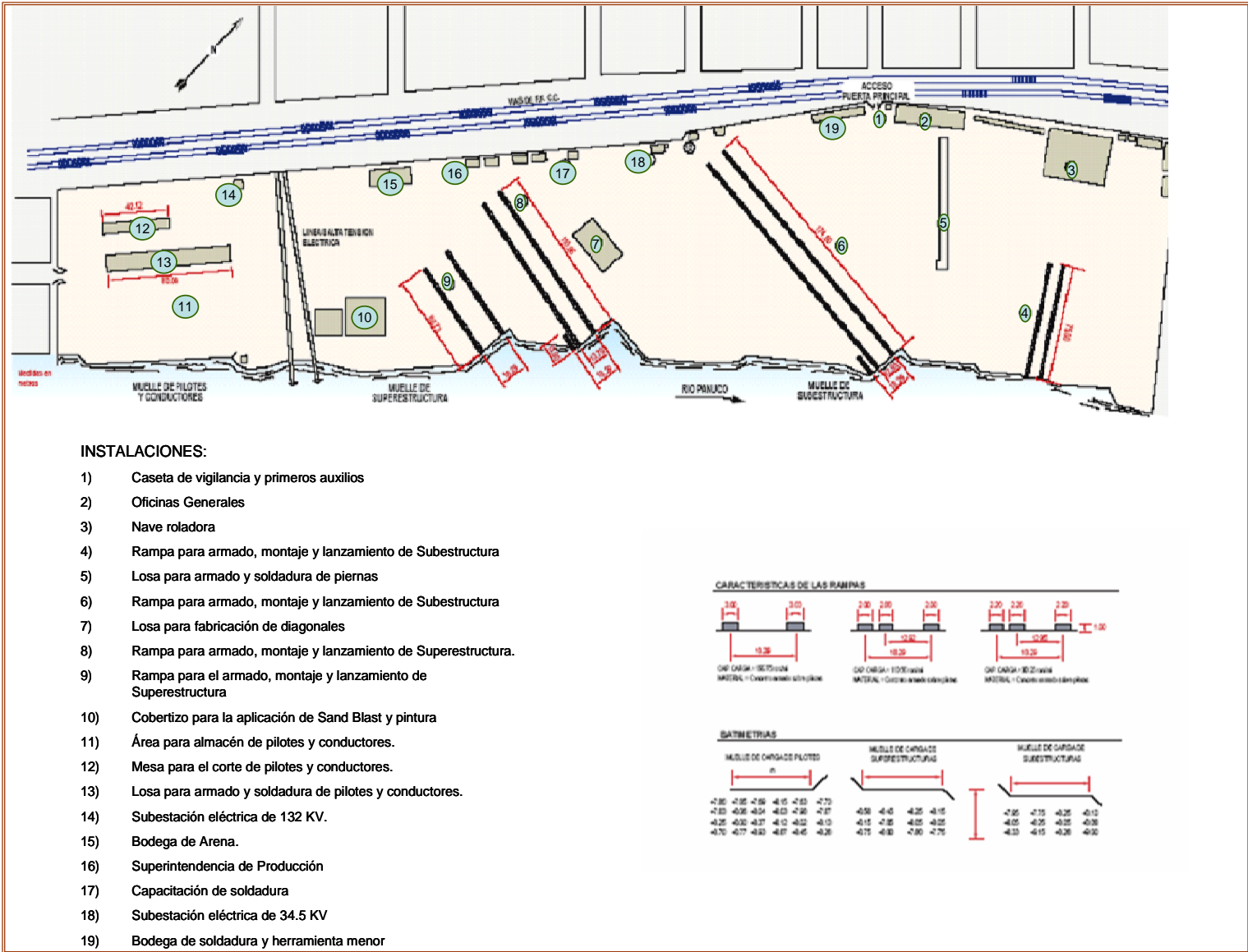


Figura V.1. Esquema ilustrativo del Patio de Fabricación.



Figura V.2 Vista panorámica del patio de fabricación.



Figura V.3 Gruas sobre orugas



Figura V.4. Maquina automática para soldar



Figura V.5. Maquina roladora de placa.



Figura V.6. Área de construcción en el patio de fabricación para la subestructura.



Figura V.7. Área de almacenamiento y construcción de pilotes y conductores.



### V.1. Proceso constructivo de pilotes, material y fabricación.

Los tubos que se utilizan para la fabricación de pilotes, van desde 0.762 m (30 in) hasta 1.829 m (72 in) de diámetro, para el caso específico de los pilotes, ya que existen tubos de hasta 3.810 m (150 in) de diámetro que no se utilizan como pilotes. Estos tubos se fabrican por medio de rolado de placa en frío. El acero rolado en frío satisface las necesidades del comportamiento estructural del pilote ante los esfuerzos inducidos por ser un material con una elevada resistencia mecánica, alta dureza y alta ductilidad.

En términos generales, para fabricar tubería en diámetros de 0.508 m (20 in) a 3.810 m (150 in) con espesores de 0.635 cm (0.250 in) a 6.35 cm (2.5 in) con una máxima longitud de carrete de 3.048 m (120 in), se utiliza el método de ROLADO PIRAMIDAL en el cual, las orillas de la placa se cortan a la medida necesaria para lograr el diámetro requerido, pasando enseguida al proceso de engargolado y rolado en frío en máquinas roladoras que le dan forma tubular. Los tubos ya formados se fijan por puntos de soldadura longitudinalmente para soldarlos posteriormente por el proceso de Doble Arco Sumergido Interior y Exterior (DSAW). Es importante señalar que **los pilotes no deben soldarse en forma helicoidal debido a los altos esfuerzos a los que se someten.**

El proceso de soldadura DSAW, (DOUBLE SUBMERGED ARC WELD), consiste en aplicar una costura interior y exterior al tubo posteriormente, para mejorar sus características dimensionales, esta tubería es expandida en frío aproximadamente 1%, en el área de acabado, la tubería se prueba hidrostáticamente, se aplican pruebas no destructivas, incluyendo inspección visual y dimensional, de acuerdo al uso final del tubo (Figuras V.1.1 y V.1.2).



Figura V.1.1 Costura interior y exterior del tubo rolado en frío, método DSAW.

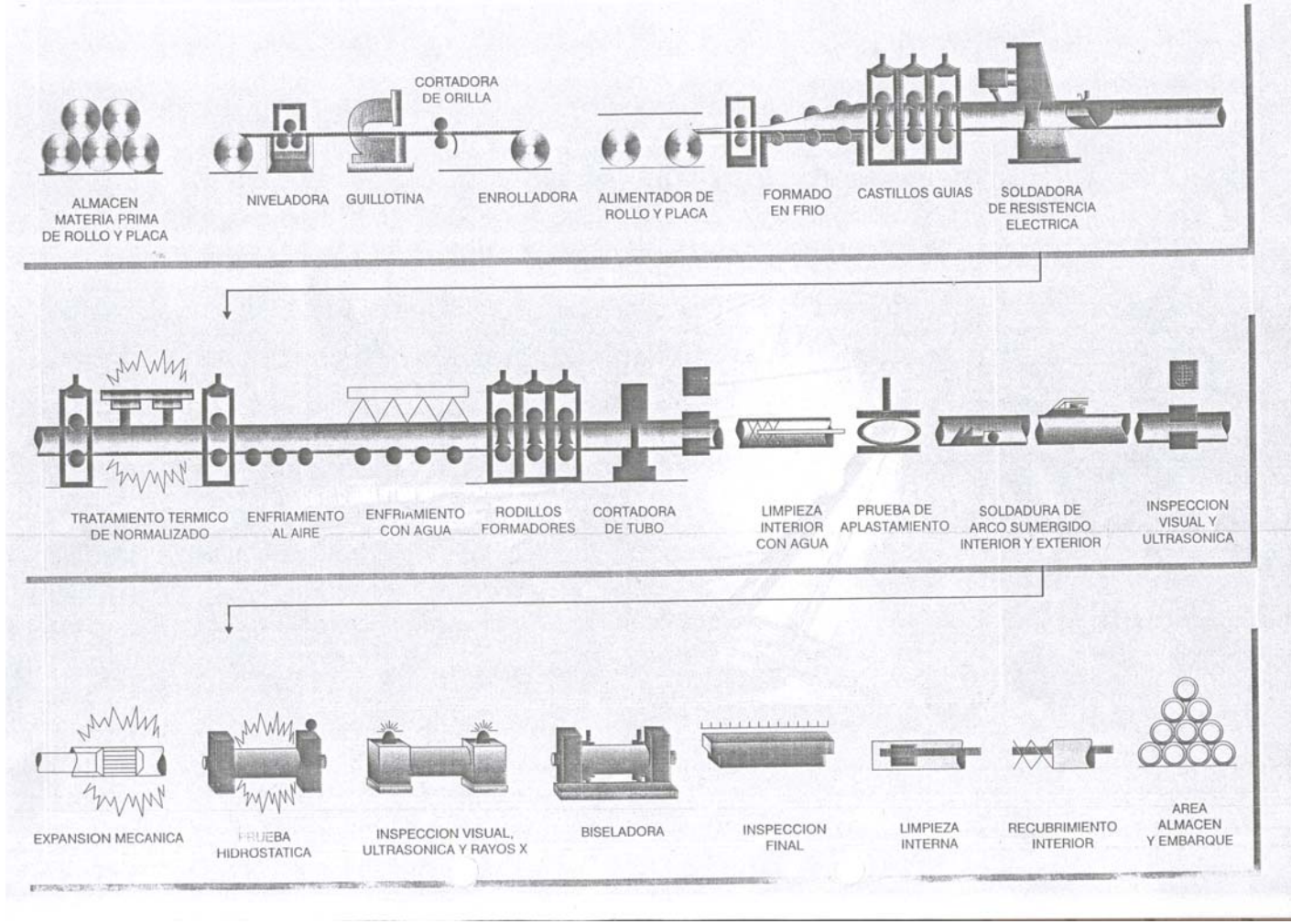


Figura V.1.2 Esquema ilustrativo del proceso constructivo de tubería en rolado en frío.

### V.1.1. Material.

Por diversas características, el acero ha sido elegido en una gran variedad de aplicaciones debido a las ventajas que ofrece como material estructural. El acero es una aleación de hierro que contiene entre un 0,04 y un 2,25% de carbono y a la que se añaden elementos como níquel, cromo, manganeso, silicio o vanadio, entre otros; posee una alta ductilidad, es decir, tiene la capacidad de soportar grandes deformaciones elásticas bajo cargas axiales sin fracturarse y bajo cargas normales puede fluir localmente en los puntos donde se producen altas concentraciones de esfuerzos. La alta resistencia del acero por unidad de peso, significa que se utilizara menor cantidad de material y por consiguiente se obtendrá menor peso estructural. Por otra parte, el acero posee tenacidad, es decir, que tiene resistencia y ductilidad, la tenacidad le proporciona al acero la capacidad de resistir grandes fuerzas aun después de sufrir grandes deformaciones, tales fuerzas pueden verse reflejadas durante su formación y montaje, siendo posible doblarlos, cortarlos, etc.

Otras propiedades de gran importancia son la resistencia a la corrosión y la soldabilidad, las cuales dependen directamente de la composición química del acero. La resistencia a la corrosión se produce aleando el acero con cobre y otros elementos, para producir alta resistencia ante los agentes atmosféricos, de manera que se produzca un óxido tenaz que inhiba los efectos de la corrosión. La soldabilidad es un factor importante en el diseño estructura, esta propiedad esta influenciada por el contenido químico del acero.

El acero estructural comúnmente utilizado en la ingeniería costa fuera es un acero dulce designado como ASTM A36 o brevemente A36 el cual posee un esfuerzo de fluencia ( $F_y$ ) de  $2,530 \text{ Kg/cm}^2$  (36 Ksi), y una resistencia a la tensión ( $F_u$ ) de  $4,075$  a  $5,620 \text{ Kg/cm}^2$  (58 Ksi a 80 Ksi). Se entiende como acero dulce a aquel que posee entre 0.15% a 0.29% de carbono.

Por otra parte, los aceros estructurales usados para la construcción de plataformas marinas fijas que son considerados por el Instituto Americano del Petroleo (API), son clasificados en grupos de acuerdo a su nivel de resistencia y características de solubilidad así como en clases de acuerdo a los requerimientos de tenacidad, Tabla V.1.

- **Grupo I.** Designados aceros dulces con esfuerzos de fluencia mínimo de  $2,810 \text{ Kg/cm}^2$  (41 Ksi) o menor. El equivalente de carbono es hasta de 0.40% o menor y estos aceros pueden soldarse por cualquier proceso de soldadura en el código AWS D1-1.
- **Grupo II.** Designados aceros de alta resistencia con esfuerzos de fluencia de  $2,810$  a  $3,655 \text{ Kg/cm}^2$  (40 - 52 Ksi). El equivalente de carbono es hasta de 0.45% o menor y estos aceros requirieren de un proceso de soldadura de bajo contenido de hidrógeno.
- **Grupo III.** Designados aceros de alta resistencia con esfuerzos de más de  $3,655 \text{ Kg/cm}^2$  (52 Ksi). Estos aceros pueden usarse de manera que cada aplicación sea investigada considerando:
  - a) la solubilidad y los procesos de soldadura especiales que pueden requerirse.

b) Los problemas de fatiga que pueden resultar de altos esfuerzos de trabajo, y la tenacidad, en relación de otros elementos de control de fractura, tales como, procedimientos de inspección, esfuerzos de servicio y temperatura ambiental.

Tabla V.1. Acero estructural especificado por el API.

Group	Class	Specification and Grade	Yield Strength		Tensile Strength	
			ksi	MPa	ksi	MPa
I	C	ASTM A36 (to 2 in. thick)	36	250	58–80	400–550
		ASTM A131 Grade A (to 1/2 in. thick)	34	235	58–71	400–490
		ASTM A285 Grade C (to 3/4 in. thick)	30	205	55–75	380–515
I	B	ASTM A131 Grades B, D	34	235	58–71	400–490
		ASTM A516 Grade 65	35	240	65–85	450–585
		ASTM A573 Grade 65	35	240	65–77	450–530
		ASTM A709 Grade 36T2	36	250	58–80	400–550
I	A	ASTM A131 Grades CS, E	34	235	58–71	400–490
II	C	ASTM A572 Grade 42 (to 2 in. thick)*	42	290	60 min.	415 min.
		ASTM A572 Grade 50 (to 2 in. thick; S91 required over 1/2 in.)*	50	345	65 min.	450 min.
II	B	API Spec 2MTI	50	345	70–90	483–620
		ASTM A709 Grades 50T2, 50T3	50	345	65 min.	450 min.
		ASTM A131 Grade AH32	45.5	315	68–85	470–585
		ASTM A131 Grade AH36	51	350	71–90	490–620
II	A	API Spec 2H Grade 42	42	290	62–80	430–550
		Grade 50 (to 2 1/2 in. thick)	50	345	70–90	483–620
		(over 2 1/2 in. thick)	47	325	70–90	483–620
		API Spec 2W Grade 42 (to 1 in. thick)	42–67	290–462	62 min.	427 min.
		(over 1 in. thick)	42–62	290–427	62 min.	427 min.
		Grade 50 (to 1 in. thick)	50–75	345–517	65 min.	448 min.
		(over 1 in. thick)	50–70	345–483	65 min.	448 min.
		Grade 50T (to 1 in. thick)	50–80	345–522	70 min.	483 min.
		(over 1 in. thick)	50–75	345–517	70 min.	483 min.
		Grade 60 (to 1 in. thick)	60–90	414–621	75 min.	517 min.
		(over 1 in. thick)	60–85	414–586	75 min.	517 min.
		API Spec 2Y Grade 42 (to 1 in. thick)	42–67	290–462	62 min.	427 min.
		(over 1 in. thick)	42–62	290–427	62 min.	427 min.
		Grade 50 (to 1 in. thick)	50–75	345–517	65 min.	448 min.
		(over 1 in. thick)	50–70	345–483	65 min.	448 min.
		Grade 50T (to 1 in. thick)	50–80	345–572	70 min.	483 min.
		(over 1 in. thick)	50–75	345–517	70 min.	483 min.
		ASTM A131 Grades DH32, EH32	45.5	315	68–85	470–585
		Grades DH36, EH36	51	350	71–90	490–620
		ASTM A537 Class I (to 2 1/2 in. thick)	50	345	70–90	485–620
		ASTM A633 Grade A	42	290	63–83	435–570
		Grades C, D	50	345	70–90	485–620
ASTM A678 Grade A	50	345	70–90	485–620		

Tabla V.1. Acero estructural especificado por el API. (Continuación)

Table 8.1.4-1—Structural Steel Plates (Continued)

Group	Class	Specification and Grade	Yield Strength		Tensile Strength	
			ksi	MPa	ksi	MPa
III	A	ASTMA537 Class II (to 2 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> in. thick)	60	415	80–100	550–690
		ASTMA678 Grade B	60	415	80–100	550–690
	API Spec 2W Grade 60 (to 1 in. thick)	60–90	414–621	75 min.	517 min.	
		(over 1 in. thick)	60–85	414–586	75 min.	517 min.
	API Spec 2Y Grade 60 (to 1 in. thick)	60–90	414–621	75 min.	517 min.	
		(over 1 in. thick)	60–85	414–586	75 min.	517 min.
	ASTMA710 Grade A Class 3 (quenched and precipitation heat treated)	through 2 in.	75	515	85	585
		2 in. to 4 in.	65	450	75	515
		over 4 in.	60	415	70	485

\*Maximum Vanadium Level Permitted = 0.10% V.

- **Clase C.** Son aceros de exitosa aplicación en estructuras soldadas a temperaturas de servicio sobre temperaturas de congelación, pero para los cuales las pruebas de impacto no están especificadas. Tales aceros son aplicados a los miembros estructurales primarios que involucran espesores limitados, disposición moderada, restricciones bajas, concentración de esfuerzos somera, cargas estáticas y redundancia estructural manera que una fractura aislada no sea catastrófica. Ejemplos de tales aplicaciones son los pilotes, piernas y arrostamientos de la subestructura, así como columnas y vigas de la superestructura.
- **Clase B.** son aceros adecuados para su uso donde el espesor, trabajo en frío, restricciones, concentración de esfuerzos, cargas de impacto y/o falta de redundancia indican la necesidad de mejorar la tenacidad. Donde las pruebas de impacto están especificadas.
- **Clase A.** son aceros adecuados para su uso a temperaturas abajo del punto de congelación y para aplicaciones críticas que involucran combinaciones adversas de los factores citados.

#### V.1.2. Construcción de pilotes en patio de fabricación.

En párrafos anteriores se describe el proceso de fabricación de la tubería utilizada en la construcción de pilotes, en este apartado se explicara brevemente el proceso de construcción de los pilotes en patio de fabricación.

- a) Plano estructural de ingeniería aprobado para construcción del arreglo general de pilotes.
- b) Suministro de material de acuerdo a las especificaciones requeridas en el plano.
- c) Corte de los carretes de acuerdo a las especificaciones del plano.

La longitud **mínima** de un segmento o carrete de tubería utilizada en la fabricación de pilotes debe ser de un diámetro ó 1.0 m (3.0 ft), lo que resulte menor, la longitud máxima de un carrete será de 10 ft. Las costuras longitudinales de dos segmentos de pilotes adyacentes deben tener una separación de 90° de una con respecto a la otra, (Figura V.1.3). **Los pilotes no deben soldarse en forma helicoidal debido a los altos esfuerzos a los que se someten.**

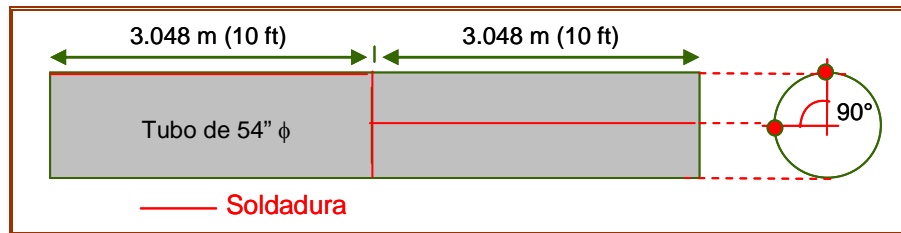


Figura V.1.3 Separación de soldadura longitudinal a 90° entre dos segmentos adyacentes de tubería para pilotes.

- d) Soldadura de los carretes.

La soldadura logra la unión de los metales por fusión. Antes de describir el método de soldadura, es importante mencionar las abreviaturas que se manejan en este ámbito, debido a que durante el desarrollo del apartado, se mencionan algunas de estas, en la siguiente tabla se presentan dichas abreviaturas.

<b>API</b>	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)
<b>ASME</b>	American Society Mechanical Engineer (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
<b>AWS</b>	American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura)
<b>CNPMOS</b>	Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios
<b>ema</b>	Entidad Mexicana de Acreditación
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization (Organización de Estándares Internacionales)
<b>NMX</b>	Norma Mexicana
<b>Pemex</b>	Petróleos Mexicanos, Organismos Subsidiarios y Empresas Filiales
<b>PQR</b>	Procedure Qualification Record (Registro de Calificación de Procedimiento)
<b>SUTEN</b>	Subcomité Técnico de Normalización
<b>WPS</b>	Welding Procedure Specification (Especificación de Procedimiento de Soldadura)

Los procedimientos de soldadura (WPS), la calificación del procedimiento de soldadura (PQR) y la calificación de habilidad de soldadores (WPQR), deben cumplir con la norma NRF-020-PEMEX-2005 y complementarse con el capítulo IV, partes A, B y C del AWS D/D1.1M-2004 o equivalente.

En el caso de la aplicación de soldadura en la tubería de pilotes, se debe aplicar la soldadura correspondiente en las juntas de unión de las secciones de pilotes de acuerdo al procedimiento de soldadura calificado para el proyecto conforme a la especificación AWS-D1.1 última edición o código equivalente. Los pilotes se someten a un proceso de soldadura en patio o taller y en campo, durante la instalación de los tramos. La **soldadura de tope en V plana**, se aplica a las uniones realizadas en patio o taller, mientras la **soldadura de tope con bisel simple** se aplica a las uniones de los tramos en campo durante su instalación, (Figuras V.1.4 Y V.1.5 respectivamente). La simbología correspondiente se observa en Figura V.1.6.

La desviación en la rectitud de pilotes no debe exceder de 0.3 cm (1/8 in) en cualquier tramo de 3.048 m (10ft), 1.0 cm (3/8 in) en cualquier tramo de 12.192 m (40 ft) y, 1.3 cm (1/2 in) en cualquier longitud mayor de 12.192 m (40 ft). El método para verificar la rectitud lineal debe ser con un alambre tensado (taut wire) a lo largo de la longitud del tubo, medido por lo menos en 3 puntos radiales sobre el diámetro.

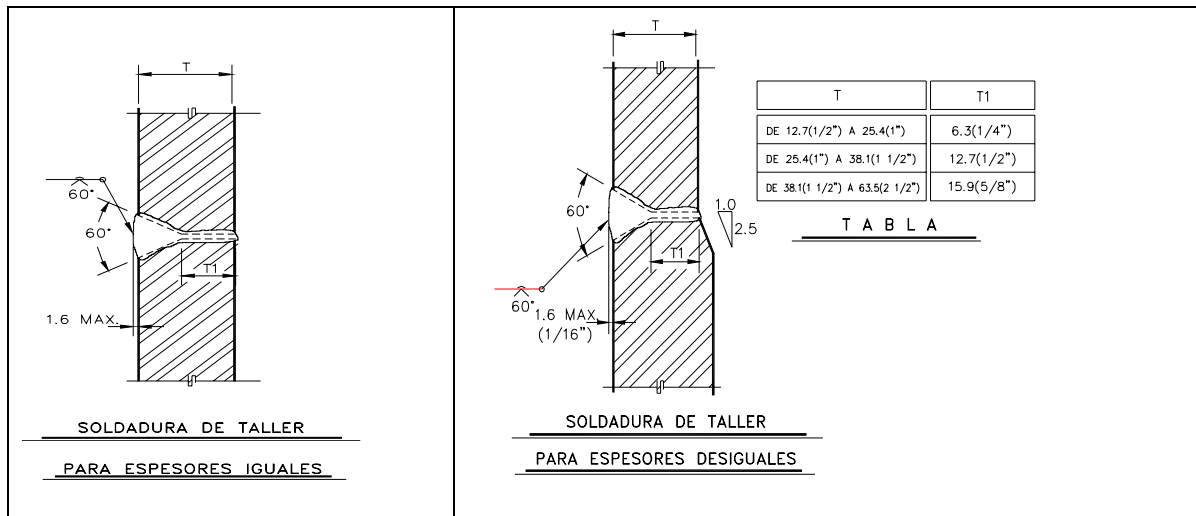


Figura V.1.4 Soldaduras de talle para pilotes.

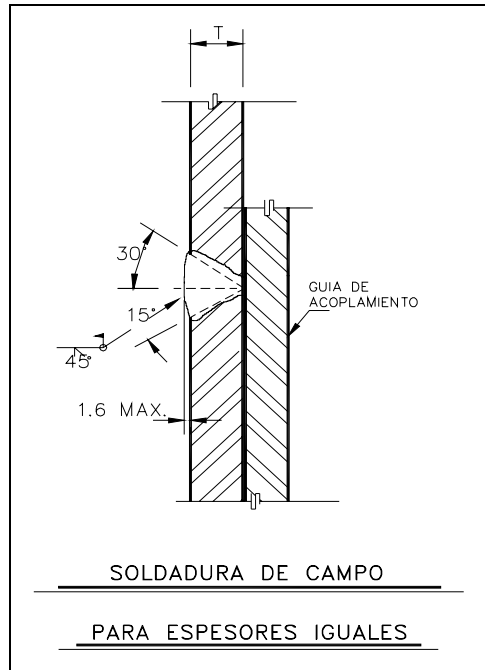


Figura V.1.5 Soldadura de campo para pilotes.

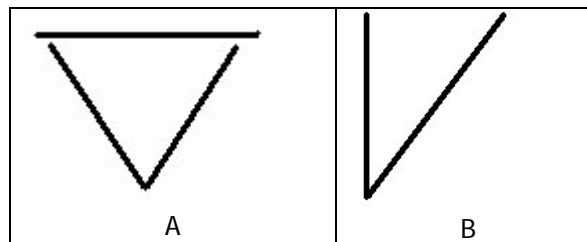


Figura V.1.6 Simbología de las soldaduras aplicadas en taller (A) y campo (B).

e) Pruebas no destructivas de calidad.

Los métodos no destructivos de inspección de soldadura en las estructuras fabricadas y en los pilotes de cimentación, incluyen la inspección visual y la radiográfica (RT), principalmente. La inspección con partículas magnéticas (MT) y con líquidos penetrantes (PT) se considera generalmente como técnicas de apoyo de la inspección visual. Sin embargo, estas dos técnicas tienen requisitos que se deben seguir. En el siguiente apartado se describen los métodos de inspección para la soldadura de los pilotes así como los criterios de aceptación.

f) Rotulación del tramo correspondiente del pilote.

Unas veces terminada la longitud de cada uno de los tramos del pilote, se procede a identificar cada



uno de ellos, rotulando generalmente en la parte superior del pilote, el nombre de la plataforma, número de tramo de pilote, eje al que corresponde, longitud y en algunos casos, el peso del tramo. Esto se realiza con la finalidad de facilitar la identificación de los tramos durante la instalación.



## V.2. Pruebas no destructivas.

A continuación se presentan los criterios de aceptación de las pruebas no destructivas para conexiones tubulares entre pilotes.

### V.2.1 Inspección visual.

Todas las soldaduras deben cumplir con el inciso 5.24 del AWS D1.1 o equivalente y se aceptan visualmente, siempre y cuando cumplan con lo siguiente:

- Las soldaduras deben estar libres de grietas.
- Todos los cráteres se deben rellenar.
- La cara de la soldadura debe quedar al ras con la superficie del metal base, debiendo presentar un contorno que emerja suavemente con el metal base. Los socavados no deben exceder 0.1 cm (1/32 in). La soldadura de refuerzo no debe exceder 0.3 cm (1/8 in).
- Se debe inspeccionar la raíz de la soldadura y no debe mostrar evidencia de agrietamiento, fusión incompleta o penetración inadecuada en la junta. Se permite una concavidad de la raíz dentro de los límites mostrados a continuación, previendo que el espesor total de la soldadura sea igual ó mayor que el metal base.
- La máxima concavidad en la raíz debe ser 0.2 cm (1/16 in) y la penetración excesiva debe ser como máximo 0.3 cm (1/8 in).

De forma complementaria se anexa la siguiente tabla tomada de la especificación técnica de calidad de materiales de PEMEX identificada como P.4.0310.07.

Tabla V.1. Criterios de aceptación para inspección visual de soldaduras.

Categoría de la discontinuidad y criterio de inspección	Conexiones no tubulares cargadas estáticamente	Conexiones no tubulares cargadas cíclicamente	Conexiones tubulares (todas las cargas)										
<b>(1) Prohibición de grietas.</b> Cualquier grieta es inaceptable, sin importar tamaño ó localización.	X	X	X										
<b>(2) Fusión de la soldadura/metal base</b> Debe existir fusión completa entre las capas adyacentes de metal de soldadura y entre el metal de soldadura y el metal base.	X	X	X										
<b>(3) Sección transversal del cráter</b> Todos los cráteres se deben rellenar para proporcionar el tamaño especificado de la soldadura, a excepción en los extremos de soldaduras de filete intermitentes fuera de su longitud útil.	X	X	X										
<b>(4) Perfiles de soldadura</b> Los perfiles de soldadura deben ser de acuerdo al párrafo 5.23 de AWS D1.1.	X	X	X										
<b>(5) Tiempo de inspección</b> La inspección visual de soldaduras en todos los aceros puede iniciar inmediatamente después de que se han enfriado a temperatura ambiente las soldaduras terminadas. Los criterios de aceptación para los aceros ASTM A 514, ASTM A 517 y ASTM A 709 Grado 100 y 100 W, se deben basar en la inspección visual realizada no menos de 48 horas después de la terminación de la soldadura.	X	X	X										
<b>(6) Soldaduras de tamaño insuficiente</b> El tamaño de una soldadura de filete en cualquier soldadura continua puede ser menor que el tamaño nominal especificado (L) sin corrección por las siguientes cantidades (U): <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border: none;"> <tr> <td style="text-align: center;">L,</td> <td style="text-align: center;">U,</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><u>Tamaño nominal especificado de la soldadura, mm (in)</u></td> <td style="text-align: center;"><u>Disminución permisible de L, mm (in)</u></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≤5 (3/16)</td> <td style="text-align: center;">≤ 2 (1/16)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6 (1/49)</td> <td style="text-align: center;">≤ 3/32 (2.5)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">≥ 8 (5/16)</td> <td style="text-align: center;">≤ 3 (1/8)</td> </tr> </table> En todos los casos, la porción de tamaño insuficiente de la soldadura no debe exceder 10% de la longitud de la soldadura. En las soldaduras en el alma-patín de las vigas, se prohíbe recorrer la soldadura en los extremos para una longitud igual dos veces al ancho del patín.	L,	U,	<u>Tamaño nominal especificado de la soldadura, mm (in)</u>	<u>Disminución permisible de L, mm (in)</u>	≤5 (3/16)	≤ 2 (1/16)	6 (1/49)	≤ 3/32 (2.5)	≥ 8 (5/16)	≤ 3 (1/8)	X	X	X
L,	U,												
<u>Tamaño nominal especificado de la soldadura, mm (in)</u>	<u>Disminución permisible de L, mm (in)</u>												
≤5 (3/16)	≤ 2 (1/16)												
6 (1/49)	≤ 3/32 (2.5)												
≥ 8 (5/16)	≤ 3 (1/8)												
<b>(7) Socavado</b> (A) Para materiales menores de 2.5 cm (1.0 in) de espesor, el socavado no debe exceder de 0.1 cm (1/32 in), con la siguiente excepción: el socavado no debe exceder de 0.2 cm (1/16 in), para cualquier longitud acumulada hasta de 5.0 cm (2 in) en cualquier longitud de 30.0 cm (12 in). Para el material igual ó mayor a 2.5 cm (1 in) de espesor, el socavado no debe exceder de 0.2 cm (1/16 in) para cualquier longitud de la soldadura.	X												

Tabla V.1. Criterios de aceptación para inspección visual de soldadura. (Continuación).

Categoría de la discontinuidad y criterio de inspección	Conexiones no tubulares cargadas estáticamente	Conexiones no tubulares cargadas cíclicamente	Conexiones tubulares (todas las cargas)
(B) En miembros primarios, el socavado no debe tener una profundidad mayor de 0.025 cm (0.01 in) de profundidad cuando la soldadura está transversal a los esfuerzos de tensión bajo cualquier condición de carga de diseño. El socavado no debe ser mayor de 0.1 cm (1/32 in) de profundidad para el resto de los casos.		X	X
<b>(8) Porosidad</b> (A) Las soldaduras de bisel en JPC en uniones a tope transversales a la dirección de los esfuerzos de tensión calculados no deben tener ninguna porosidad de rechupe visible. Para el resto de las soldaduras de bisel y para las soldaduras de filete, la suma de la porosidad de rechupe visible de 0.1 cm (1/32 in) ó mayor en diámetro no debe exceder de 1.0 cm (3/8 in) en cualquier pulgada lineal de soldadura, y no debe exceder de 2.0 cm (3/4 in) en cualquier longitud de 30.0 cm (12 in) de soldadura.	X		
(B) La frecuencia de la porosidad de rechupe en soldaduras de filete no debe exceder de uno en cada 10.0 cm (4.0 in) de longitud de soldadura y del diámetro máximo no debe exceder 0.25 cm (3/32 in). Excepción: para las soldaduras de filete que unen los refuerzos con el alma, la suma de los diámetros de la porosidad de rechupe no debe exceder 1.0 cm (3/8 in) en cualquier pulgada lineal de soldadura y ni exceder 2.0 cm (3/4 in) en cualquier longitud de 30.0 cm (12 in) de soldadura.		X	X
(C) Las soldaduras de bisel en JPC en uniones a tope transversales a la dirección de los esfuerzos de tensión calculados no debe tener ninguna porosidad de rechupe. Para las otras soldaduras de bisel, la frecuencia de la porosidad de rechupe no debe exceder uno en 10.0 cm (4 in) de longitud y el diámetro máximo no debe exceder 0.25 cm (3/32 in).		X	X
<b>Nota General:</b> Una "X" indica la aplicabilidad para el tipo de conexión; el área sombreada indica la no aplicación.			

### V.2.2. Radiografías (RT)

La inspección por RT se define como un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico, diseñado para detectar discontinuidades macroscópicas y variaciones en la estructura interna o configuración física de un material.

En la actualidad, dentro del campo de la industria existen dos técnicas comúnmente empleadas para la inspección radiográfica:

- Radiografía con rayos X.
- Radiografía con rayos gamma.

La principal diferencia entre estas dos técnicas es el origen de la radiación electromagnética; ya que, mientras los rayos X son generados por un alto potencial eléctrico, los rayos gamma se producen por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo.

Los rayos X son generados por dispositivos electrónicos y los rayos gamma por fuentes radioactivas naturales o por isótopos radioactivos artificiales producidos para fines específicos de Radiografía Industrial, tales como: iridio 192, cobalto 60, cesio 137 y tulio 170.

El equipo que se emplea con más frecuencia para la inspección radiográfica es el siguiente:

1. Fuente de radiación (rayos X o rayos gamma).
2. Controles de la fuente.
3. Película radiográfica.
4. Pantallas intensificadoras.
5. Indicadores de calidad de la imagen.
6. Accesorios.

Las radiografías se deben hacer utilizando una fuente sencilla de rayos X ó radiación gamma. Las uniones soldadas se deben radiografiar y la película numerada por los métodos que proporcionen una completa y continúa inspección de la junta dentro de los límites especificados de inspección. Los límites de la unión se deben mostrar claramente en las radiografías. La película corta, pantallas cortas, socavado excesivo por la radiación dispersa, ó cualquier otro proceso que oscurezca porciones de la longitud total de soldadura hace que la radiografía sea inaceptable.

La película debe tener la longitud suficiente y se debe colocar para proporcionar por lo menos 1.3 cm (1/2 in) de película más allá del borde proyectado de la soldadura. Se pueden radiografiar soldaduras con longitudes mayores de 35.0 cm (14 in) traslapando los casetes de película y haciendo una sola exposición, ó utilizando casetes individuales de película y hacer exposiciones individuales. Se deben aplicar las previsiones del párrafo 6.17.5 del AWS D1.1.

Para comprobar si hay radiación dispersa, una letra de plomo "B", de 1.3 cm (1/2 in) de altura y 0.2 cm (1/16 in) de espesor se debe pegar en la parte posterior de cada casete de película. Se debe rechazar la radiografía si la imagen de la letra "B" aparece en la radiografía.

Ventajas de la radiografía.

- Es un excelente medio de registro de inspección.
- Su uso se extiende a diversos materiales.
- Se obtiene una imagen visual del interior del material.
- Se obtiene un registro permanente de la inspección.
- Descubre los errores de fabricación y ayuda a establecer las acciones correctivas.

Limitaciones de la prueba RT.

- No es recomendable utilizarla en piezas de geometría complicada.
- No debe emplearse cuando la orientación de la radiación sobre el objeto sea inoperante, ya que no es posible obtener una definición correcta.
- La pieza de inspección debe tener acceso al menos por dos lados.
- Su empleo requiere el cumplimiento de estrictas medidas de seguridad.
- Requiere personal altamente capacitado, calificado y con experiencia.
- Requiere de instalaciones especiales como son: el área de exposición, equipo de seguridad y un cuarto oscuro para el proceso de revelado.
- Las discontinuidades de tipo laminar no pueden ser detectadas por este método.

#### **V.2.4. Líquidos penetrantes y partículas magnéticas, LP y PM respectivamente.**

Las soldaduras que están sujetas a líquidos penetrantes y partículas magnéticas, además de la inspección visual, se deben evaluar en base a los requisitos aplicables para la inspección visual. Se debe realizar la prueba de acuerdo con los párrafos 6.14.4 o 6.14.5 del AWS D1.1, cualquiera que sea aplicable.

**LP.** Se pueden utilizar los líquidos penetrantes para detectar las discontinuidades abiertas a la superficie. Se puede utilizar el método del estándar ASTM-E165 para la inspección con líquidos penetrantes, y los criterios de aceptación deben estar de acuerdo con la sección 6, parte C, del AWS D1.1, cualquiera que sea aplicable.

En términos generales, esta prueba consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente a la superficie a examinar, el cual penetra en las discontinuidades del material debido al fenómeno de capilaridad. Después de cierto tiempo, se remueve el exceso de penetrante y se aplica un revelador, el cual generalmente es un polvo blanco, que absorbe el líquido que ha penetrado en las discontinuidades y sobre la capa de revelador se delinea el contorno de ésta.

Ventajas de la prueba LP.

- La inspección por Líquidos Penetrantes es extremadamente sensible a las discontinuidades abiertas a la superficie.
- La configuración de las piezas a inspeccionar no representa un problema para la inspección.
- Son relativamente fáciles de emplear.
- Brindan muy buena sensibilidad.
- Son económicos.
- Son razonablemente rápidos en cuanto a la aplicación, además de que el equipo puede ser portátil.
- Se requiere de pocas horas de capacitación de los Inspectores.

Limitaciones de la prueba LP.

- Sólo son aplicables a defectos superficiales y a materiales no porosos.
- Se requiere de una buena limpieza previa a la inspección.
- No se proporciona un registro permanente de la prueba no destructiva.
- Los Inspectores deben tener amplia experiencia en el trabajo.
- Una selección incorrecta de la combinación de revelador y penetrante puede ocasionar falta de sensibilidad en el método.
- Es difícil quitarlo de roscas, ranuras, huecos escondidos y superficies ásperas

**PM.** La inspección por Partículas Magnéticas permite detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos. Se selecciona usualmente cuando se requiere una inspección más rápida que con los líquidos penetrantes.

Los criterios de aceptación de partículas magnéticas incluidos en el AWS D1.1, se basan en el tamaño de la discontinuidad real, y no en el tamaño de la discontinuidad según lo indicado por medio de partículas magnéticas. Cuando las discontinuidades superficiales son reveladas por medio de PM, la aceptación se debe basar en una medición visual directa de la discontinuidad real. En donde la discontinuidad no se puede observar visualmente (con lupa, si se requiere) después del retiro del medio indicador, la evaluación se debe basar en el tamaño y la naturaleza de la indicación de partículas magnéticas.

Ventajas de la prueba PM.

- Requiere de un menor grado de limpieza.
- Generalmente es un método más rápido y económico.
- Puede revelar discontinuidades que no afloran a la superficie.
- Tiene una mayor cantidad de alternativas.

Limitaciones de prueba PM.

- Son aplicables sólo en materiales ferromagnéticos.

- No tienen gran capacidad de penetración.
- El manejo del equipo en campo puede ser caro y lento.
- Generalmente requieren del empleo de energía eléctrica.
- Sólo detectan discontinuidades perpendiculares al campo.

### V.3. Transportación de pilotes.

Una vez que los pilotes pasan por el proceso de construcción e inspección en patio, son transportados al sitio de instalación. El objetivo del análisis de transportación es garantizar que los pilotes conserven su integridad durante y después de su transportación, es decir, que los segmentos de pilote no rebasen los límites permitidos de interacción de esfuerzos, por efecto de las cargas generadas por los movimientos inducidos durante el tiempo de su transportación, desde el patio de fabricación hasta su sitio de instalación.

El análisis de transportación de los pilotes dependerá del peso seco de cada tramo de pilote, de la longitud de cada tramo, del orden de instalación y de los medios de transportación. Para llevar a cabo la transportación, se emplean embarcaciones conocidas como barcazas o comúnmente "chalán de transportación", los cuales, a su vez, son trasladados por pequeñas embarcaciones llamadas Remolcadores (Figuras V.3.1 y 2).

El arreglo de los pilotes sobre el chalán debe ser apropiado para seguir el orden de instalación indicado en los planos, con esto se busca evitar perder tiempo en mover los pilotes en campo para poder liberar los primeros tramos de pilote, por tanto en el primer tendido de pilotes sobre el chalán, se buscara acomodar las ultimas secciones a instalar, sobre este tendido se colocaran las segundas secciones y por ultimo, las primeras secciones a instalar. Este arreglo generalmente se realiza cuando los pilotes son trasportados de forma separada de la subestructura. (Figura V.3.3), sin embargo, en algunas ocasiones, los pilotes son transportados junto con la subestructura y demás accesorios, dependiendo de las dimensiones del chalán asignado para la transportación. En este caso, los pilotes deben colocarse de tal manera que no sean lastimados por la subestructura durante la transportación y por las maniobras de instalación de la misma, considerando también el orden de instalación de los pilotes (Figura V.3.4).



Figura V.3.1 Barcaza de transportación



Figura V.3.2 Remolque de barcaza



Figura V.3.3 Arreglo de pilotes en la barcaza de transportación.





Figura V.3.4 Arreglo de pilotes en la barcaza de transportación junto con la subestructura.

El arreglo para transportar la subestructura y los pilotes desde los patios de fabricación hasta el chalán, se realiza por medio de la viga de deslizamiento, izaje con grúa(s) para transportarla hacia el chalán, izaje costa afuera para su colocación, para esto, debe considerar el mayor peso estimado de la carga.

Para el análisis de transportación, se define el tipo de barcaza a emplear, el cual puede ser considerado como, chalán grande o pequeño de acuerdo a las siguientes características:

➤ **Barcaza grande.**

Para grandes barcazas se definen los siguientes parámetros, además de considerar que la carga total no exceda las 5,000 Ton.

- Manga: 24.4 m a 36.6 m
- Puntal: 5.0 m a 8.0 m
- Eslora: 76.0 m a 122.0 m

➤ **Barcaza pequeña.**

Para barcazas pequeñas, en los cuales cualquiera de las dimensiones es menor que las arriba mencionadas, y donde el peso total de la carga no excede las 1500 Ton, los parámetros a considerar para el cálculo de las fuerzas que serán usadas para el diseño de la carga, seguros marinos y trincado de acuerdo a la norma vigente.

Por otra parte, el remolcador debe tener la capacidad suficiente para conservar una velocidad mínima de 5 a 7 nudos en condiciones climáticas aceptables cubriendo todo el trayecto.

La transportación (barco remolcador y chalán de transporte) debe diseñarse para condiciones ambientales estacionales extremas con periodo de retorno de 10 años, en la parte más expuesta de la ruta para el mes o meses durante los cuales la transportación tiene lugar. Se pueden emplear los valores que se indican en la Tabla 10.3 de la norma NRF-003-PEMEX-2000. Los parámetros definidos en la tabla antes indicada son válidos únicamente para maniobras realizadas en rutas típicas y fuera de la temporada de huracanes.

La altura de ola de diseño para condiciones de transportación y sus parámetros asociados (período pico espectral, velocidades de viento, etc.) están definidos en la Tabla V.3.3 (Ref. 6). Estos parámetros son válidos únicamente para maniobras realizadas en rutas típicas y fuera de la temporada de huracanes.

Tabla V.3.3. Parámetros de diseño en condiciones de transportación para las estructuras a instalar en la Sonda de Campeche. (Ref. 6)

PARÁMETROS DE DISEÑO	CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN
	MUY ALTA
Altura de ola significativa $H_{sig}$ (m).	5.38
Período pico espectral (s).	11.86
Velocidad de viento asociado con $H_{sig}$ a 10 m sobre el NMM (m/s).	14.36
Velocidad superficial de corriente asociada con $H_{sig}$ (cm/s).	26

#### V.4. Instalación de pilotes.

La instalación de los pilotes es una etapa delicada debido a una serie de maniobras que esta implica, por tal razón, es necesario la supervisión de un especialista en geotecnia como ingeniero de campo, con la capacidad de tomar decisiones en campo que le permitan dar solución a cualquier contingencia que se pueda presentar durante la instalación. El supervisor abordo, debe de contar con la información mínima necesaria para el apoyo de la instalación, tal como: planos estructurales de pilotes aprobados para construcción, estudio de mecánica de suelos del sitio, el cual debe corresponder con el indicado en los planos estructurales, memorias de cálculo, software especializado para el análisis dinámico del pilote con la finalidad de comparar el numero de golpes esperados en el diseño con el real alcanzado en la instalación, o bien resolver alguna contingencia que se presente durante el hincado de los pilotes, como el rechazo prematuro, suspender el hincado en estratos arenosos, etc.

Entre las actividades a desempeñar por el ingeniero de campo durante la instalación de los pilotes, se encuentran:

- Localizar el cero de referencia en las secciones principales y verificar que las longitudes y espesores reales de las diferentes secciones, coincidan con los valores teóricos. Cualquier desviación importante al respecto deberá ser reportada al superintendente y al representante de la compañía instaladora.
- Revisar de acuerdo a las longitudes reales de los pilotes, que estas sean suficientes para alcanzar la penetración de diseño, recordando que se necesitan dejar al menos 10 ft en la última sección para poder usar el martillo y hacer el corte de los pilotes.
- Verificar la redondez de las guías de embone.
- Verificar las soldaduras en las guías de embone y cerciorarse que se encuentren completas.

En forma resumida se enumeran las siguientes maniobras de instalación:

1. Izaje, instalación e hincado de primeras secciones
2. Izaje de las siguientes secciones
3. Aplicación de soldadura.
4. Pruebas de ultrasonido.
5. Hincado de secciones.
6. Nivelación de subestructura.
7. Instalación de coronas.

#### **V.4.1 Izaje, instalación e hincado de primeras secciones.**

Para el caso de las primeras secciones, estas se deben de izar ya sea de la cubierta de la barcaza o de la cubierta del barco grúa y colocar en las piernas correspondientes de la subestructura de acuerdo a los Ejes definidos en los planos. El izaje debe realizarse por los agujeros de izaje diseñados para este fin e incluidos en el plano estructural del pilote, o bien, por un arreglo de izaje similar al analizado en el diseño de pilotes que se presento como ejemplo en la sección IV.7.

Es importante señalar que las primeras secciones de cada pilote, deben romper la tapa de sello que posee la pierna en la parte inferior de la misma, (Figura V.4.1), por lo cual, es necesario levantar estas secciones, una longitud adecuada para que desarrolle una velocidad de caída controlada y logre romper la tapa de sello por peso propio. En las figuras V.4.2 y V.4.3 se presentan la etapa de izaje e instalación de las primeras secciones. Una vez que la primera sección cae por peso propio, rompe la tapa de sello, se hunde en el lecho marino hasta alcanzar la estabilidad, la longitud de penetración por peso propio esperada de las primeras secciones se deberá tener definida antes de su instalación, (Memoria de cálculo). La longitud que queda por arriba de la elevación de la subestructura, en caso de que así sea, se debe de hincar utilizando el martinete recomendado en el diseño y plano estructural (Figura V.4.4 y 5).

En caso de que la subestructura sea un octápodo, se colocaran las cuatro primeras secciones de los pilote interiores, soldar e hincar dos segundas secciones de estos pilotes, de esta manera la subestructura quedara en condiciones seguras para continuar con la instalación de las siguientes secciones.

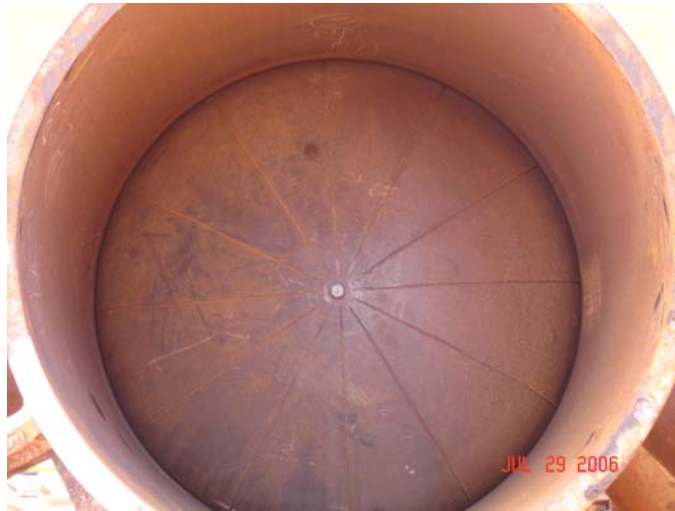


Figura V.4.1 Tapa de sello localizada en la parte inferior de cada pierna de la subestructura.



Figura V.4.2 Izaje de primeras secciones



Figura V.4.3 Instalación de la primera sección



Figura V.4.4 Hincado de primeras secciones.



Figura V.4.4 Acción del martillo de vapor sobre el pilote a hincar.



Figura V.4.5 Finaliza hincado de primeras secciones.



Figura V.4.6 Longitud optima (2-6 ft) para realizar corte de la primera sección de pilote y unión de soldadura del siguiente tramo

#### V.4.2 Izaje de las siguientes secciones.

La longitud de estas secciones regularmente es mas pequeña que la longitud de las primeras secciones, sin embargo, debe ser adecuada para evitar caer en un estrato de arena cuando se finalice el hincado de cada sección, con el fin de evitar el congelamiento del pilote y el rechazo prematuro, (Figura V.3.7). Estas secciones se deben izar por los agujeros diseñados para este fin, el ingeniero de campo deberá de verificar los detalles de izaje para cada sección en los planos de construcción, cualquier desviación importante al respecto deberá ser reportada al superintendente y al representante de la instaladora.

Una vez izadas, con la guía de acoplamiento que poseen estas secciones se logran acoplar con la sección ya instalada, se sueldan y se procede a su hincado, (Figuras V.3.4.8 y 9).

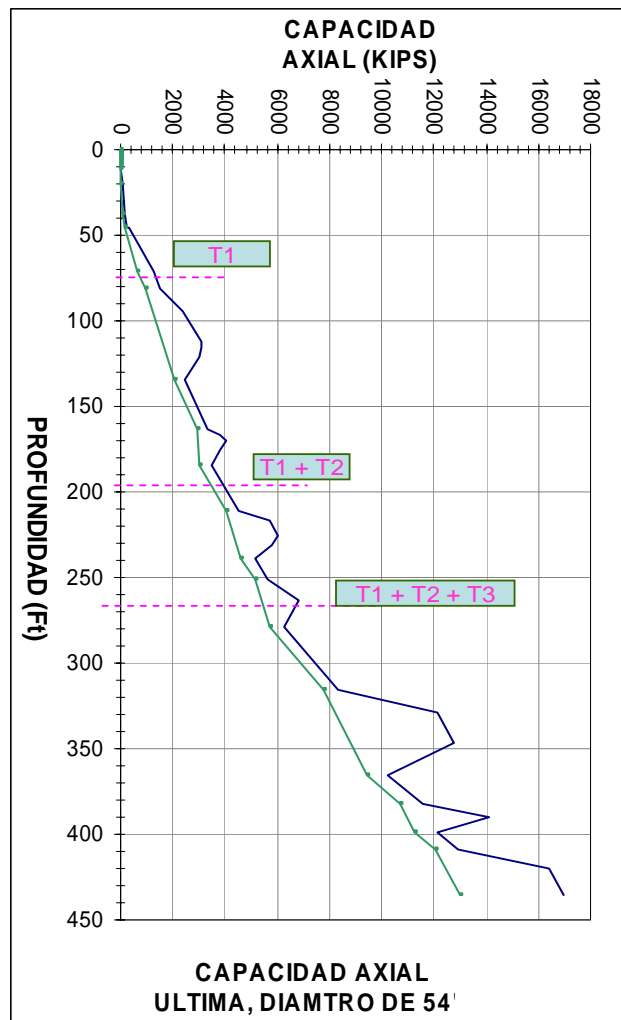


Figura V.3.7 Índices de penetración durante el hincado hasta la longitud final de diseño.



Figura V.3.8 Maniobras de izaje para segundas secciones.



Figura V.3.9 Izaje de la segunda sección.



### V.4.3 Aplicación de soldadura.

Una vez que se logra el acoplamiento de las secciones, (Figuras V.4.10-11), se procede a la aplicación de soldadura en la junta correspondiente entre estas, con base al procedimiento de soldadura y personal calificado conforme a la especificación AWS-D1.1 última edición o código equivalente (Figura V.4.12).



Figura V.4.10 Maniobras de acoplamiento entre secciones.



Figura V.4.11. Acoplamiento entre secciones.



Figura V.4.12 Aplicación de soldadura entre secciones.

#### V.4.4 Pruebas de ultrasonido.

La prueba de ultrasonido se debe de realizar en la soldadura de las juntas de unión de los pilotes para verificar que cumpla con los criterios de aceptación de acuerdo a la especificación AWS-D1.1 última edición o código equivalente, (Figura V.4.13). Esta prueba es realizada por un especialista calificado el cual, con base a los resultados de la prueba, se acepta o se rechaza la soldadura, en caso de ser rechazada deberá retirarse lo necesario y volverse a aplicar, lo que implica más tiempo y material.

#### V.4.5 Hincado de secciones.

Las secciones de pilote se deben hincar con el martillo recomendado en el plano estructural o su equivalente en energía nominal, con la finalidad de garantizar la penetración de cada sección y la longitud total de penetración, de igual forma, se evita dañar el pilote utilizando otros martillos que no son recomendados por el diseñador. A fin de que sirva como referencia para pronosticar el comportamiento de los pilotes durante el hincado, en campo se debe contar con una copia del análisis dinámico del pilote donde se determino el número de golpes esperados para cada sección (Figuras V.4.14 y 15).



Figura V.4.13 Inspección de soldadura en campo con un palpador angular de 60°.



Figura V.4.14. Martillos disponibles en la cubierta del barco instalador.



Figura V.4.15. Martillos Vulcan

Durante la fase de hincado de la última sección de pilote, puede presentarse el caso de que el pilote alcance la penetración de diseño, si este caso se presenta, se recomienda utilizar el sistema de inyección de agua a alta presión y aire, con la finalidad de remover los sedimentos y obstrucciones del interior del pilote.

Una vez removido el sedimento obstructor se continuará con el hincado del pilote. La fase señalada anteriormente, se repetirá hasta alcanzar la penetración de diseño.

#### V.4.6 Nivelación de la subestructura

La nivelación de la subestructura, se realiza mediante un arreglo de estrobos definido de acuerdo a las necesidades de corrección, para este tetrápodo, los estrobos se localizaron en tres de los ejes de la subestructura utilizando las orejas de izaje como apoyo para aplicar tensión a los estrobos, dejando un eje libre como referencia para la nivelación. (Figura V.4.16)

Al término de la nivelación se procede al aseguramiento de pierna- pilote mediante la colocación de coronas sin el retiro del arreglo de estrobos.



Figura V.4.16. Nivelación de la subestructura.

**V.4.7. Instalación de coronas.**

Una vez nivelada la subestructura, se realizará la instalación de coronas o placas de ajuste para la unión de cada pierna de la subestructura con los pilotes, esto con la finalidad de asegurar la estructura y los pilotes. Posteriormente se verificará la nivelación final de la subestructura y en caso de existir una diferencia de nivel respecto al proyecto ésta se informará a PEMEX para su corrección y posteriormente, proceder con la instalación de la superestructura. El nivel donde se realiza la conexión de la subestructura y la superestructura, se conoce como "punto de trabajo" y se localiza generalmente en la elevación (+) 7.315, por lo tanto los pilotes se cortaran hasta esa elevación en espera de la conexión con la superestructura. Con la instalación de coronas y preparación del punto de trabajo, se da por terminada la instalación de la subestructura y los pilotes.



Figura V.4.17. Preparación de coronas en el pilote.

# CONCLUSIONES.

**VI. CONCLUSIONES.**

En el presente trabajo, se desarrolló a detalle una metodología utilizada en el diseño de cimentaciones profundas para plataformas marinas fijas, con base a los criterios establecidos en el API-RP-2A-WSD-2000. Las plataformas marinas fijas son las estructuras más utilizadas en la Sonda de Campeche para la explotación de hidrocarburos, estas plataformas también se conocen como plataformas tipo Jacket y se dividen en diferentes tipos de acuerdo a la función que van a desempeñar. Las plataformas marinas están constituidas por tres componentes que son: la superestructura, la subestructura y los pilotes de cimentación.

El sitio donde se ubicará la (s) nueva (s) plataforma (s), se determina con base a la exploración del lugar mediante estudios geofísicos profundos que detecten los yacimientos marinos, la producción estimada y, finalmente, la o las plataformas necesarias para su explotación.

Los estudios de exploración que anteceden el diseño e instalación de la plataforma marina fija se dividen en dos tipos, el estudio preliminar o geofísico y el estudio definitivo o geotécnico. El estudio geofísico es un estudio somero que se lleva a cabo en un área definida de 2.1 X 2.1 Km, este estudio se realiza a bordo de una embarcación debidamente equipada con lo necesario para recabar la información del sitio. El objetivo de realizar el estudio geofísico, es detectar las anomalías que existen en el lecho marino, los eventos geológicos y los riesgos potenciales que pueden existir en el área y que probablemente afecte la instalación de la nueva plataforma. Toda la información recabada y debidamente procesada, se integra en un informe geofísico, donde se describen los eventos encontrados, la metodología utilizada, las fichas técnicas de los equipos y los planos geofísicos correspondientes.

El estudio geofísico, determina la localización definitiva del estudio geotécnico, este estudio es más detallado que el geofísico debido a que se trata de un sondeo profundo de 120 m. de profundidad por debajo el lecho marino; a lo largo de todo el sondeo, se recuperan muestras alteradas e inalteradas y se realizan pruebas de resistencia "in situ" como veleta remota y PCPT. De igual forma que el estudio geofísico, el estudio geotécnico se realiza a bordo de una embarcación debidamente equipada con lo necesario para recabar la información del sitio. El objetivo del estudio geotécnico es definir los parámetros mecánicos del sitio, necesarios para el diseño de la cimentación de las plataformas marinas fijas. Los resultados de dicho estudio se presentan en un informe final que comprende pruebas "in situ", pruebas en el laboratorio costa fuera, pruebas convencionales de laboratorio en tierra, criterios estáticos y dinámicos para el análisis de la cimentación, conclusiones y recomendaciones para su instalación.

El diseño de los pilotes para la cimentación de las plataformas, se basa en la información proporcionada en el reporte geotécnico, con ella se consideran los parámetros mecánicos incluidos, el tirante de agua, el perfil stratigráfico del sitio, las curvas de transferencia de carga axial y lateral, así como las recomendaciones dadas para el diseño e instalación de los pilotes. El diseño de los pilotes consiste en términos generales, en las siguientes fases:

- Proponer la longitud de penetración necesaria para que los pilotes alcancen el factor de seguridad que señala la norma, en este caso el API-RP-2A-WSD-2000,

VI. CONCLUSIONES

---

- Proponer una distribución de espesores sobre y debajo de la línea de lodos con base a un análisis de esfuerzos y de acuerdo a la distribución de los elementos mecánicos sobre y debajo de la línea de lodos.
- Con la distribución de espesores por esfuerzo, proponer la longitud de cada sección que conformará el pilote, con ello efectuar el análisis de hincado estático para establecer la longitud final de cada sección, así como la distribución final de los espesores. En esta fase de diseño es muy importante cuidar que la punta del pilote quede en un estrato de arena durante el hincado, esto es con la finalidad de evitar un rechazo prematuro o el fenómeno de congelación del pilote, solo a la penetración final de diseño, la punta del pilote puede quedar en un estrato de arena.
- Una vez definida la longitud final de cada sección, se debe realizar un análisis de izaje en patio y en campo de cada una de las secciones, las cuales deben de cumplir con la condición de esfuerzos que establece que los esfuerzos actuantes deben ser menores al 60% del esfuerzo resistente.
- Realizar un análisis de hincado dinámico de cada sección del pilote, con la finalidad de garantizar que el pilote alcance la penetración de diseño sin dañar las secciones del pilote ni el martillo utilizado durante la instalación. Con este análisis se determina el número de golpes esperado para cada sección para alcanzar la penetración final.

Una vez finalizados los análisis se emite el plano del arreglo general de pilotes, el cual debe contener, el arreglo de pilotes, la ingeniería de detalle, las notas de maniobras en patio de fabricación, notas sobre las maniobras de instalación, la curva de capacidad de carga axial con las coordenadas del estudio geotécnico y las características del material.

Para conocer más sobre los pilotes tubulares de punta abierta utilizados en la cimentación de plataformas marinas fijas, se describe el proceso constructivo que sigue el pilote, material y pruebas no destructivas que permiten verificar la calidad durante la construcción. Para tal fin existen patios de fabricación especializados que cuentan con un espacio exclusivo de almacén y mantenimiento de los pilotes, equipo necesario y personal calificado para la construcción de los mismos.

Finalmente, es importante conocer el proceso de instalación de los pilotes, esto permite al diseñador adquirir más sensibilidad y visión de los que se está diseñando, con base a las experiencias adquiridas en la instalación de los pilotes, se mejoran los criterios de diseño y se cuida cada una de las fases del mismo.

Este trabajo es una muestra de lo completo y detallado que es diseñar una cimentación de este tipo, por tal motivo, se presentaron desde el inicio, los estudios que anteceden el diseño así como la construcción e instalación de los pilotes. Los criterios presentados en este trabajo son un conjunto de conocimientos adquiridos por personal del área de geotecnia del I.M.P. y una servidora y pueden ser una guía para aquellos interesados en aprender a diseñar este tipo de pilotes.



# BIBLIOGRAFÍA.

## BIBLIOGRAFÍA.

1. "Geotecnia Marina en la Sonda de Campeche"  
PEMEX. Subdirección de Proyecto y Construcción de Obras  
México, 1985.
2. Informes Geotécnicos y Geofísicos finales  
Foundex et all  
Campaña de exploración 2003  
México 2003
3. Informes Geotécnicos y Geofísicos finales  
Fugro et all  
Campaña de exploración 2005  
México 2003
4. "Criterios generales para el diseño de plataformas marinas fijas en la Sonda de Campeche"  
PEMEX, exploración y producción.  
Residencia de construcción Árbol Grande.  
Diciembre de 2001.  
Tampico, Tamaulipas.
5. "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design", práctica recomendada 2A-WSD (RP 2A -WSD)  
American Petroleum Institute  
20ª Edición, Diciembre 2000.
6. "Diseño y evaluación de Plataformas Marinas Fijas, en la Sonda de Campeche"  
No. Documento: NRF-003-PEMEX-2000  
Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios.  
Diciembre 2000.
7. Planning and design of fixed offshore platforms  
"Capítulo 16. Conceptual Development."  
Von Nostraud Reinhold, 1986.  
Ed. B. Mecllland and M.D. Reifel.
8. "Calificación de personal y procedimientos de soldadura para la fabricación de plataformas marinas"  
Subdirección de operaciones y comercialización, coordinación de normalización.  
PEMEX Exploración y Producción

Direcciones electrónicas:

<http://www.monografias.com/trabajos22/ensayos-no-destructivos/ensayos-no-destructivos.shtml#metodo>

<http://www.invdes.com.mx/antiores/Marzo2001/htm/plata.html>

<http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Teaching/master/toc.htm>