

58



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"INTRODUCCION AL PROYECTO Y CONSTRUCCION DE OBRAS MARITIMAS"



294688 T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
OCTAVIO ANTONIO (GOMEZ PELEGRIN OCHOA
DIRECTOR DE TESIS: ING. HECTOR LOPEZ GUTIERREZ

MEXICO, D. F.

2001



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/022/01

Señor
OCTAVIO ANTONIO GOMEZ PELEGRIN OCHOA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. HECTOR LOPEZ GUTIERREZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

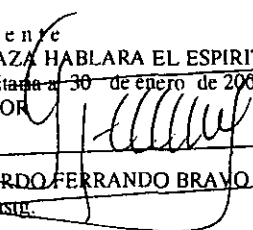
"INTRODUCCION AL PROYECTO Y CONSTRUCCION DE OBRAS MARITIMAS"

- INTRODUCCION**
- I. IMPORTANCIA DE LAS OBRAS MARITIMAS EN MEXICO**
 - II. TIPOS DE OBRAS MARITIMAS ESPECIALIZADAS ASOCIADAS A SU FUNCION Y COMPONENTES**
 - III. FACTORES DE DISEÑO**
 - IV. PROCESO CONSTRUCTIVO DE UNA PLATAFORMA**
 - V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 30 de enero de 2001.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GEB/GMP/mstg

AGRADECIMIENTOS

A *mi papa* por ser siempre un ejemplo a seguir de dedicación, responsabilidad y honestidad. Gracias por enseñarme estos valores, por ser un padre maravilloso, por criticarme positivamente, por respetarme, por ayudarme a crecer y por todo el amor que me das.

A *mi mama* por que se emociona conmigo, por todo el amor que nos da, por mantenernos unidos, por su comprensión, por educarme, por mostrarme a dar sin esperar recibir algo a cambio y por su alegría.

A *Ana* por su carácter jovial y alegre, por ser fuerte, por echarle ganas, por platicadora, por entenderme, por apoyarme, por siempre estar conmigo y por que te amo.

A *mi familia, abuelos y bisabuelos* por su ejemplo de unidad, integridad, fraternidad, alegría y apoyo. Además de escucharme, aconsejarme, confiarme y compartir todos mis momentos y los suyos conmigo.

A *Noemí* por su amor, alegría y comprensión. Así mismo por permanecer a mi lado cuando más lo he necesitado, por compartir y enseñarme tantas cosas y por ser tan especial para mí.

A *mis amigos* por su amistad, por compartir momentos importantes de mi vida y por enseñarme a disfrutar al máximo. Les agradezco el que me consideren su amigo al igual que toda la ayuda que me han proporcionado en toda mi vida.

A la Facultad de Ingeniería, la Universidad Nacional Autónoma de México y al Programa de Alto Rendimiento Académico por reforzar los valores de lealtad, compromiso y dedicación hacia mi país y mi profesión. También por educarme en lo académico, cultural, social y humano. Gracias a la U.N.A.M. por todo lo que me ha dado.

Al Ing. José Manuel Covarrubias Solís por ser un gran maestro en todos los sentidos, en especial por enseñarme a ser un ingeniero de excelencia y un ser humano íntegro.

Al Ing. Carlos Gómez Toledo por extendernos la mano sin interés para ayudarnos en lo académico. También por tus consejos, tu guía, apoyo y sobre todo por tu amistad.

Al Ing. Héctor López Gutiérrez por ayudarme en la elaboración de este trabajo, por sus consejos y por ayudarme para obtener lo mejor de mí.

A los Ingenieros Miguel Ángel Yáñez, Javier Gutiérrez, Víctor Valdés, Juan Carlos Fernández, Eduardo de Luna, Alejandro Murillo y José Luis Murillo por su ayuda y guía hacia mis intereses profesionales futuros, por su apoyo en la elaboración de mi trabajo de tesis y por su amistad.

Al M.I. Gerardo Ferrando Bravo, Ing. Gabriel Moreno Pecero, Ing. Marcos Trejo, Ingenieros y todas aquellas personas que laboran en la Facultad de Ingeniería por su ayuda y apoyo en todo momento durante mi estancia en la Universidad.

**INTRODUCCIÓN AL PROYECTO Y
CONSTRUCCIÓN DE OBRAS MARÍTIMAS
ESPECIALIZADAS**

ÍNDICE

Introducción	6
Capítulo uno. Importancia de las obras marítimas en México	8
Capítulo dos. Tipos de obras marítimas especializadas asociadas a su función y componentes	16
2.1 <i>Plataformas marinas</i>	17
2.1.1 Plataformas de plantilla	17
2.1.2 Plataformas de concreto	25
2.1.3 Acero o Concreto	28
2.1.4 Plataformas de piernas tensadas	29
2.2 <i>Tuberías submarinas</i>	30
2.3 <i>Emisores submarinos</i>	32
Capítulo tres. Factores de diseño	34
3.1 <i>Viento y Huracanes</i>	35
3.1.1 Consideraciones teóricas	39
3.1.1.1 Fuerzas del viento	42
3.1.1.2 El viento como agente generador de oleaje	43
3.1.1.3 Clases de oleaje por la acción del viento	47
3.1.1.4 Representación de los vientos	49
3.1.2 Criterios de diseño	50

3.2 Oleaje	53
3.2.1 Consideraciones teóricas	56
3.2.1.1 Teorías de oleaje	59
3.2.1.2 Reflexión	72
3.2.2 Manejo de la información	73
3.2.2.1 Análisis espectral del oleaje	77
3.2.2.2 Métodos de previsión de oleaje	79
3.2.2.3 Régimen de temporales	80
3.2.3 Criterios de diseño	83
3.2.3.1 Momento lineal de un fluido	84
3.2.3.2 Acción del oleaje en cilindros flexibles	86
3.2.3.3 Clasificación de los regímenes de cargas debidas a fluidos	86
3.3 Mareas	89
3.4 Corrientes	92
3.5 Consideraciones previas para el diseño	95
3.5.1 Consideraciones operativas	95
3.5.2 Consideraciones meteorológicas, oceanográficas y físicas	96
3.5.2.1 Viento	97
3.5.2.2 Oleaje	98
3.5.2.3 Mareas	99
3.5.2.4 Corrientes	99
3.5.2.5 Procesos Geológicos y cambios del suelo	100
3.5.2.6 Incrustaciones marinas	100
3.5.3 Consideraciones para la cimentación	100
3.5.4 Categorías de exposición de obras	101
3.5.4.1 Seguridad de vidas humanas	101
3.5.4.2 Consecuencia de falla	101

3.6	<i>Crterios de diseo</i>	103
3.6.1	Definici3n de cargas	103
3.6.2	Condiciones de carga	104
3.6.3	Cargas de diseo	105
3.6.3.1	Oleaje	105
3.6.3.2	Viento	112
3.6.3.3	Corrientes	115
3.6.3.4	Fuerzas por fabricaci3n e instalaci3n	116
3.6.4	Diseo estructural	117
3.6.4.1	Esfuerzos permisibles para estructuras cilndricas de acero	118
3.6.5	Conexiones	122
3.6.6	Fatiga	123
3.6.7	Cimentaci3n	124
3.6.7.1	Pilas de cimentaci3n	124
3.6.7.2	Diseo de pilas	126
Capítulo cuatro. Proceso Constructivo de una plataforma		128
4.1	<i>Fabricaci3n de la estructura</i>	129
4.1.1	Patios de construcci3n	129
4.1.2	Construcci3n	130
4.1.3	Trabajos previos al transporte de la estructura	135
4.2	<i>Transporte</i>	142
4.3	<i>Colocaci3n</i>	148
4.3.1	Reconocimiento submarino	148
4.3.2	Colocaci3n de la subestructura en el mar	150
4.3.3	Colocaci3n de la subestructura en posici3n vertical	156
4.3.4	Piloteo de la subestructura	167

<i>4.4 Equipos especiales</i>	174
4.4.1 Instalación de la superestructura	175
4.4.2 Colocación de paquetes de perforación	179
4.4.3 Tendido de líneas submarinas	183
4.4.4 Trabajos topográficos	184
Capítulo cinco. Conclusiones y recomendaciones	187
Bibliografía	192

Introducción

La explotación petrolera en México comenzó en el año de 1961 en el Golfo de México. Desde entonces Petróleos Mexicanos y el Instituto Mexicano del Petróleo se han dado a la tarea de desarrollar tecnología para aplicarla en los procesos de exploración, perforación y producción de derivados del petróleo. Esta tecnología abarca muchas áreas de desarrollo dentro de las cuales es de interés particular para los ingenieros civiles el área de estructuras marítimas costa afuera.

El siguiente trabajo tiene por objetivo el dar las bases introductorias para el proceso de creación de obras marítimas incluyendo su diseño y construcción buscando integrar a la comunidad de ingenieros civiles al área de ingeniería costa afuera la cual ha sido tradicionalmente ocupada por ingenieros petroleros. Los Ingenieros Civiles cuentan con las bases suficientes para poder desempeñar labores de suma importancia en este tipo de obras debido principalmente a las divisiones de la ingeniería que se involucran en su proceso de diseño y construcción las cuales se encuentran dentro de los conocimientos básicos impartidos durante sus estudios profesionales.

Con el afán de hacer este trabajo lo más claro y accesible se incluyen imágenes y diagramas que facilitan la asimilación de los conceptos integrados en cada uno de los capítulos que lo integran y mencionados en los siguientes párrafos.

En el primer capítulo se comenzará por mencionar la importancia de las obras marítimas para nuestro país considerando las ventajas económicas que éstas proveen considerando la vinculación que tenemos como países productores de petróleo. Además se buscará mostrar en todo momento la amplia necesidad que existe por la participación activa en este rubro de los egresados de la carrera de Ingeniería Civil.

En el segundo capítulo se describirán los tipos de obras marítimas que existen, dentro de las cuales encontramos principalmente a las plataformas, a las líneas submarinas de conducción y a los emisores submarinos. De cada una de éstas se mencionarán sus características principales, así como subclasificaciones de las mismas.

En el tercer capítulo se especificarán los procesos meteoceánicos que influyen directamente en el diseño como el viento, el oleaje, las mareas y las corrientes. Dentro de esta descripción se mencionará la teoría que caracteriza su comportamiento así como la manera en que se estudia estadísticamente para lograr interpretar y obtener los parámetros necesarios para el diseño de las obras marítimas. Así mismo en este capítulo se indicará la manera en que se desarrolla el diseño de una estructura marítima involucrando tanto a estas fuerzas naturales como a otros aspectos como la fabricación de las estructuras, su ubicación, riesgo, cimentación, etc.

En el cuarto capítulo se tratará a la construcción e instalación de estas estructuras en el mar. Se comenzará por describir el proceso de fabricación en patios para después abordar su transportación y colocación. Dentro de la colocación se mencionarán las dificultades técnicas del proceso indicando las versiones existentes para llevarse a cabo. Así mismo se describirán todos los aspectos necesarios para poner en operación la obra.

Finalmente en el quinto y último capítulo se harán recomendaciones y conclusiones a este tema, mencionando lo que se considera de mayor importancia y énfasis en la elaboración de estructuras marítimas.

Tema 1

Importancia de las obras marítimas en México

La importancia de las obras marítimas en México y el mundo radica principalmente en la alta capacidad de producir bienes para el país pudiéndose reeditar las grandes inversiones que en esta se hacen, en el avance tecnológico del país y en la cantidad de empleos que se generan. En México, se ha excluido la participación de manera intensiva de los ingenieros civiles en este tipo de obras lo cual como se mencionará más adelante es una práctica incorrecta debido a la gran cantidad de áreas en la cual se requiere de su apoyo.

Actualmente se ha visto que más del 60% de la población mundial vive en zonas cercanas a la costa y se espera que en los próximos 10 años esto se incremente en un 75% en los países en desarrollo. Esto ha ocasionado que se tenga una gran necesidad por la planeación del desarrollo costero mundial. Dentro de este desarrollo costero encontramos a las obras en ríos y costas, las obras portuarias y las obras costa afuera o marítimas.

Las obras marítimas en el mundo han ido adquiriendo una gran importancia debido principalmente a la explotación de hidrocarburos en zonas alejadas de la costa. Desde que comenzó la explotación petrolera en el mar a finales del siglo XIX, ésta ha mostrando un gran crecimiento, especialmente después de la segunda guerra mundial en donde hubo un avance tecnológico muy alto. Actualmente en el mundo se pueden encontrar más de diez mil plataformas operando; específicamente en el golfo de México se encuentran más de cuatro mil.

Este auge de la explotación petrolera costas afuera ha ocasionado que además de haber una gran necesidad de tecnología para la instalación de plataformas, se tenga que transportar el crudo y gas hacia las costas. Esto se ha logrado con el uso de buque tanques con altas capacidades de almacenamiento y más recientemente con el uso de tuberías submarinas, por lo que se han tenido que estudiar más a fondo el comportamiento de los mares y océanos de nuestro mundo para hacer estas obras posibles.

México a raíz del descubrimiento de zonas con yacimientos petroleros ha comenzado un desarrollo amplio en esta área. Petróleos Mexicanos inició la instalación de plataformas marinas en el año de 1961, con 10 plataformas para la explotación de yacimientos petroleros en el Golfo de México. Según esta institución hasta el primero de enero de 1999 se contaba con 531 pozos entre las dos regiones marinas, Noreste y Suroeste, del país; de los cuáles 357 se encontraban activos. Además estas dos regiones comprendían el 51.95% y el 17.41% de las reservas de aceite y gas del país.

RESERVAS 3P EN EL PAÍS DENTRO DE LAS REGIONES MARINAS				
Región	Aceite		Gas	
	mmmb	Porcentaje	mmmpc	Porcentaje
Marina Noreste	17.9	43.65 %	8.3	10.25 %
Marina Suroeste	3.4	8.29%	5.8	7.16 %
Total Regiones Marinas	21.3	51.95 %	14.1	17.41 %
Total Nacional	41	100.00%	81	100.00%
3P = Probada, probable y posible.				
mmmb = miles de millones de barriles				
mmmpc = billones de pies cúbicos				

11

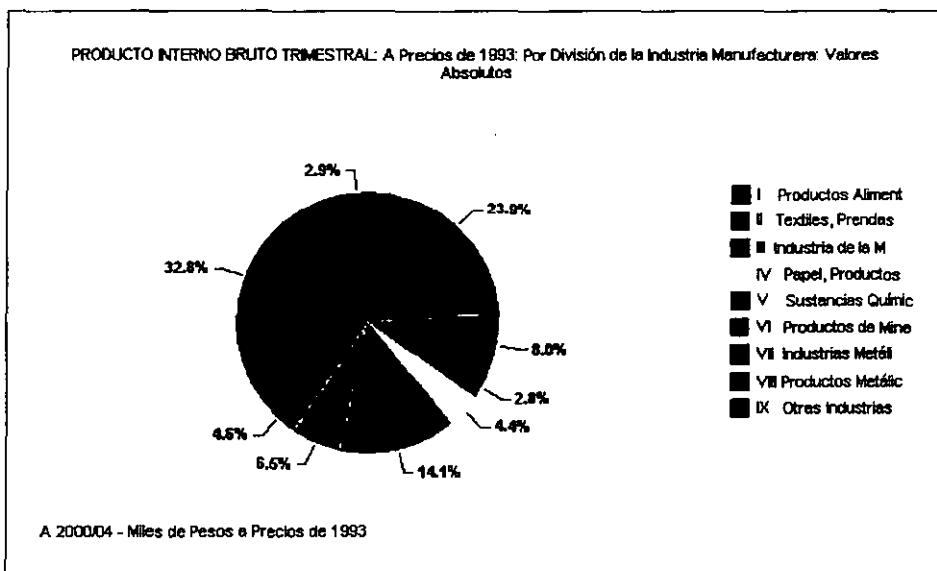
¹ "Las reservas de hidrocarburos de México" PEMEX

COMPLEJOS EN LAS REGIONES MARINAS

NORESTE	Pozos perforados	Pozos activos	Pozos exploratorios
Cantarell	211	174	-
Ek y Balam	35	14	-
Ixtoc	6	2	-
Ku-Maloob-Zaap	61	35	-
Total	258	225	-
SUROESTE	Pozos perforados	Pozos activos	Pozos exploratorios
Abkatún-Pol-Chuc	181	72	-
Caan	34	30	-
Ixtal	-	-	3
May	-	-	1
Och, Vech y Kax	23	16	-
Sinán	-	-	4
Taratunick	27	14	-
Total	265	132	8

Además, observando el último censo realizado en nuestro país se sabe que el 22% del Producto Interno Bruto se genera en zonas costeras. Puntualizando dentro del área de hidrocarburos en las siguientes páginas se indica que las Sustancias Químicas, Derivados del Petróleo, Productos de Caucho y Plástico representan un 14.1% del Producto Interno Bruto del país.

3



² Idem I

³ Idem I

PRODUCTO INTERNO BRUTO TRIMESTRAL

A Precios de 1993
Por División de la Industria Manufacturera
Valores Absolutos
(Miles de Pesos a Precios de 1993)

PERIODO	I Productos Alimenticios, Bebidas y Tabaco a/	II Textiles, Prendas de Vestir e Industria del Cuero a/	III Industria de la Madera y Productos de Madera a/	IV Papel, Productos de Papel, Imprenta y Editoriales a/	V Sustancias Químicas, Derivados del Petróleo, Productos de Caucho y Plástico a/	VI Productos de Metales no Metálicos, Excepto Derivados del Petróleo y Carbón a/	VII Industrias Metálicas Básicas a/	VIII Productos Metálicos, Maquinaria y Equipo a/	IX Otras Industrias Manufactureras a/
1991/01	55,315,475	18,105,393	7,058,263	11,292,317	33,214,349	15,265,377	9,749,298	48,933,156	5,702,220
1991/04	54,334,214	20,622,082	7,206,241	11,592,015	35,610,015	16,589,527	9,177,010	55,990,886	5,639,102
1992/01	56,697,014	19,910,396	8,115,065	10,856,554	35,095,648	16,011,715	9,388,387	56,968,318	6,351,987
1992/04	57,981,100	19,025,419	7,162,208	12,469,214	35,710,025	17,378,857	9,978,667	54,417,151	6,668,961
1993/01	60,267,803	18,895,274	7,694,917	10,861,786	34,927,031	17,540,329	9,536,774	54,126,274	6,133,085
1993/04	61,039,339	18,939,485	7,017,866	10,731,215	35,211,621	17,389,124	10,045,083	55,132,161	7,202,559
1994/01	60,562,824	18,299,332	6,984,988	10,777,733	34,515,814	17,269,129	10,161,052	54,966,529	6,578,134
1994/04	62,313,483	19,640,931	7,838,635	11,173,714	36,910,516	18,737,433	10,739,247	59,175,880	6,649,312
1995/01	63,095,599	18,025,348	7,298,034	10,663,135	36,169,977	17,433,350	10,106,767	54,744,244	6,352,995
1995/04	61,371,329	19,702,235	6,990,730	10,667,768	35,819,015	16,306,695	11,596,653	55,154,581	5,966,012
1996/01	64,695,067	19,736,977	6,706,362	10,230,322	38,134,549	16,471,029	12,577,693	59,559,264	6,873,915
1996/04	64,857,879	22,435,173	8,163,119	11,245,896	38,575,332	18,336,288	13,183,814	67,185,634	7,383,014
1997/01	64,894,621	20,909,150	6,341,940	10,764,471	38,976,714	17,021,498	13,746,732	68,720,633	7,008,819
1997/04	67,714,537	24,198,537	8,713,477	12,692,833	41,095,305	18,911,795	14,488,633	81,188,709	7,991,489
1998/01	68,928,850	22,968,050	7,281,388	12,175,330	41,838,847	18,790,079	15,125,471	81,839,209	8,508,002
1998/04	71,333,116	24,347,654	8,910,740	13,061,312	43,901,717	19,743,271	13,833,124	85,298,192	8,136,267
1999/01	71,425,030	23,171,508	7,409,580	12,397,387	42,387,220	19,243,504	14,888,692	83,193,159	7,962,602
1999/04	74,848,466	25,048,161	8,835,066	13,952,813	44,850,044	20,402,889	14,985,332	90,675,109	8,796,999
2000/01	75,764,781	25,318,927	7,543,948	13,504,103	44,843,056	20,730,093	15,684,266	96,121,121	9,900,217
2000/04	75,515,079	25,239,246	8,970,783	13,747,001	44,455,057	20,619,333	14,420,947	103,448,820	9,305,953

a/ Las cifras están referidas al año base de 1993 como nuevo periodo de referencia para los cálculos a precios constantes. Así la nueva base de ponderaciones (1993=100) sustituye a la que se venía utilizando y cuya referencia era el año de 1980. FUENTE: INEGI, Sistema de Cuentas Nacionales de México.

⁴ Idem 1

Considerando todas estas estadísticas se observa el gran potencial económico y tecnológico de las obras marítimas, lo cual ha sido comprendido por los países desarrollados y de la mitad del siglo pasado hasta la fecha por nuestro país en donde se han hecho grandes inversiones en este rubro. Cabe destacar la inversión realizada en el Complejo Cantarell en la zona de Campeche el cual considerando sus reservas se encuentra ubicado como el octavo supercomplejo del mundo por la Asociación Americana de Geólogos Petroleros.

Dada la importancia de las obras marítimas es imprescindible la participación de los ingenieros civiles en su diseño, construcción y operación. Haciendo un análisis de las tecnologías necesarias para el diseño de obras marinas, encontramos que se requieren especialistas en oceanografía, cimentaciones, estructuras, ingeniería civil marina y arquitectura naval.

Bajo un enfoque estricto se puede decir que el Ingeniero civil participa intensamente en las primeras cuatro de las cinco áreas indicadas. Sus conocimientos pueden facilitar el diseño de la estructura considerando que puede servir de enlace entre estas áreas ya que muchas se encuentran dentro de los conocimientos básicos impartidos en sus estudios profesionales.

Para aclarar un poco más lo que se desarrolla en cada una de las áreas se presenta el siguiente diagrama.



5

Finalmente como se verá en los capítulos posteriores, el trabajo de construcción de obras marítimas involucra una gran planeación dentro de la cual es imprescindible la participación del ingeniero civil. Además de que él es el especialista en cuestión de manejo de personal, control de calidad y desarrollo eficiente de las construcciones.

⁵ "Introduction to offshore structures" W.J. Graft.

Tema 2

Tipos de obras marítimas especializadas asociadas a su función y componentes

En este tema se mencionarán tres tipos de obras marítimas, las cuales son en orden de importancia las plataformas, las tuberías y los emisores submarinos. Para su estudio se abordarán una por una mencionando sus componentes, su función principal y algunos parámetros involucrados para su diseño.

2.1 Plataformas marinas

Las plataformas marinas son estructuras de varios niveles que engloban todo lo necesario para realizar trabajos en zonas lejanas a la costa. De acuerdo al material y forma de las plataformas, las podemos agrupar en las siguientes tres categorías:

- Plataformas de plantilla
- Plataformas de concreto
- Plataformas de piernas tensadas

2.1.1 Plataformas de plantilla

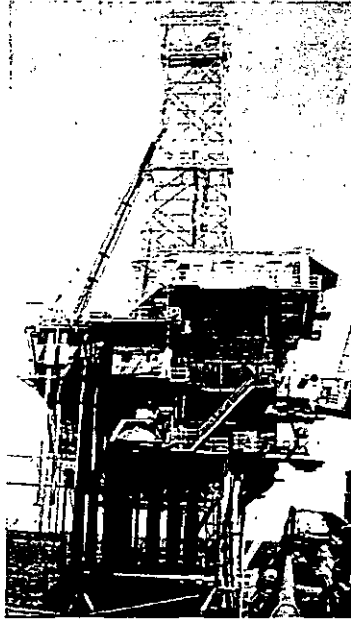
Las plataformas de plantilla son las de uso más común. Estas presentan varios niveles en donde se tienen todos los servicios necesarios para el desempeño de las actividades para la cual fue diseñada como pueden ser trabajos de explotación petrolera. Estas se componen por una estructura vertical de acero tipo armadura que recibe el nombre de jacket que comienza desde el lecho marino y asciende hasta elevarse unos metros arriba del nivel medio del mar. La función de este jacket es de sostener a la estructura que se encuentra en la parte superior y fuera del agua. El jacket puede ir anclado al lecho marino por medio de unos pilotes que penetran hasta proporcionar estabilidad o puede ser de tipo flotante. Además en la parte superior de la estructura se colocan una serie de placas unidas de tal manera que formarán una losa en donde se colocara el equipo y se realizará el trabajo.

Este tipo de plataformas según sus funciones se puede a su vez agrupar en los siguientes grupos:

- Plataformas de perforación y protección de pozos
- Plataformas de buque
- Plataformas auto contenedor de plantilla y de torre
- Plataformas de producción
- Plataformas de cuarteles
- Jacket y torre incinerantes
- Equipos adicionales

a) Plataformas de perforación y protección de pozos

Las plataformas de perforación y protección de pozos como su nombre lo indica se construyen para proteger a las tuberías por donde asciende el petróleo de los pozos productores. Estas plataformas se construyen en aguas no muy profundas y pueden contener de uno a cuatro pozos. Cuentan con equipo de extracción del petróleo, módulos de producción, grúa y cuarteles para necesidades básicas de los trabajadores.

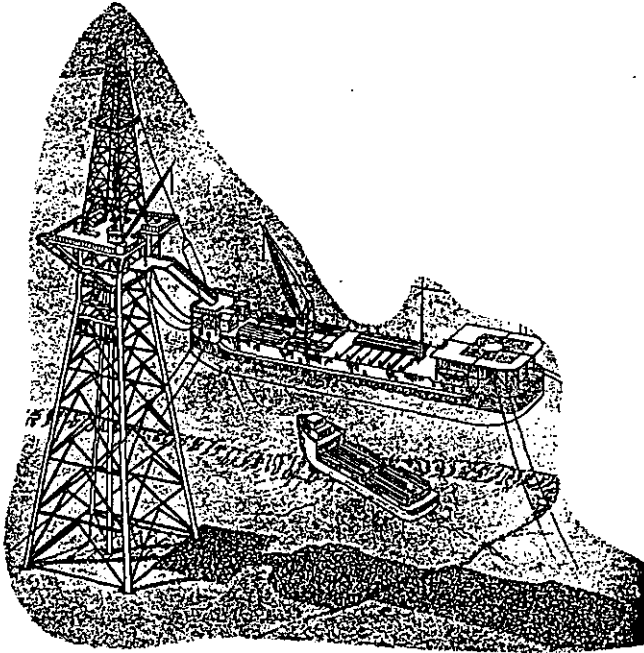


Plataforma de perforación.⁶

b) Plataformas de buque

Las plataformas de buque se utilizaban en los años sesentas. Estas se caracterizaban por ser una estructura que contenía el equipo de excavación y fuente de energía. La zona para la tripulación, el equipo de producción y el equipo suplementario se encontraba en un barco anclado junto a la plataforma. Este tipo de plataformas cada vez se encuentra más en desuso.

⁶ "Plataformas marinas en la sonda de Campeche" PEMEX.



Plataforma de buque.⁷

c) Plataformas auto contenedor

Las Plataformas auto contenedor son de mayor tamaño. Están compuestas por varios niveles. Dentro de estos niveles encontramos todo el equipo necesario para la extracción, el equipo suplementario, el equipo para la tripulación y todo el material y suplementos necesarios para seguir operando por períodos largos de tiempo. Algunas también contienen el equipo necesario para la producción del petróleo. Estas plataformas se ubican en zonas más alejadas de la costa. Normalmente tienen un helipuerto para poder transportar al personal que allí labora. Estas plataformas auto contenedor pueden ser de plantilla o de torre.

⁷ "Fortune Magazine" Feb. 1965.

c.1) Plataformas auto contenedor de plantilla

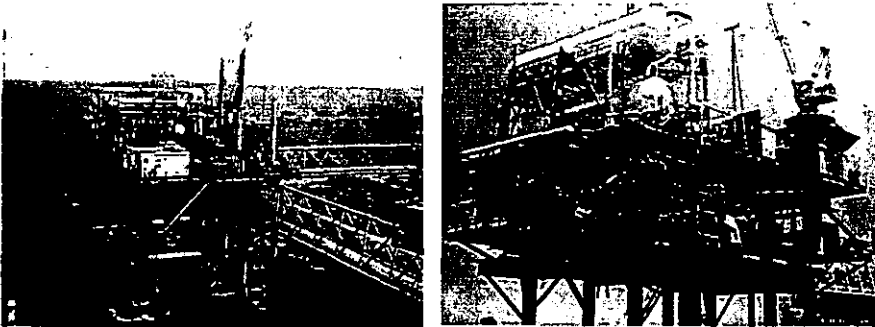
Las plataformas auto contenedor de plantilla consisten en una estructura grande con cubiertas en varios niveles que es soportada por largos pilotes hincados dentro del suelo marino. Estos pilotes son guiados a través del jacket hasta la parte inferior en donde son colocados en el lecho marino. El jacket sostiene juntos a los pilotes para que funcionen como una sola unidad. Anteriormente se utilizaban plataformas con una gran cantidad de pilotes. En la actualidad se utilizan plataformas de entre ocho y diez pilotes predominando las plataformas de ocho pilotes. El jacket de estas plataformas está compuesto por varias piernas que se van ensanchando e inclinando conforme se desciende hacia el lecho marino. Algunas plataformas modernas tienen alargamientos (botellas) en la parte inferior del jacket que permite hincar varios pilotes desde los tubos guías encontrados en las piernas de los jackets. Además, las plataformas auto contenedor de plantilla presentan abundantes refuerzos laterales y horizontales entre las piernas de los jackets para distribuir adecuadamente la carga.

c.2) Plataformas auto contenedor de torre

Las plataformas auto contenedor de torre presentan pocas diferencias con respecto a las de plantilla. Se caracterizan por tener dimensiones menores, piernas rectas (no inclinadas) y un menor número de soportes diagonales de mayor tamaño que los utilizados en las auto contenedor de plantilla. Estos refuerzos no ascienden hasta la losa fuera del agua. Esto reduce la resistencia lateral que ofrece la estructura al oleaje y en especial a las capas de hielo formadas en latitudes extremas. Generalmente estas plataformas se componen únicamente por cuatro piernas que a su vez funcionan como conductoras para los pozos extractores.

d) Plataformas de producción

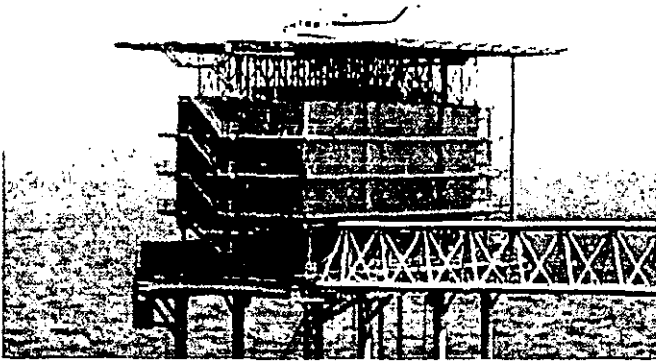
En las plataformas de producción o Tratamiento se realiza básicamente la separación de la mezcla de aceite-gas-agua del petróleo crudo en aceite crudo, gas natural y agua para poder ser transportadas, utilizadas o reinyectadas a la tierra. Contiene básicamente compresores, equipos de tratamiento y almacenamiento. De esta plataforma pueden salir tuberías con los productos semiprosesados hacia la costa.



Plataformas de producción.⁶

e) Plataformas de cuarteles

Las plataformas de cuarteles son aquellas donde se encuentran las comodidades para vivir para los trabajadores de estas obras costa afuera. Cuando las plataformas se encuentran ubicadas donde el lecho marino está a una gran profundidad, estos cuarteles van integrados a la plataforma tal como se describió en las plataformas auto contenedor. Para aguas no muy profundas, estos cuarteles ocupan una plataforma individual proporcionando mayor seguridad y libertad para el trabajo. Para consideraciones del diseño, se toma en cuenta que el número aproximado de personas que viven en esta plataforma es de 50 a 75 personas. Están integradas por una estancia, dormitorios, comedor, cocina, vestidor y en ocasiones cuarto de juegos.



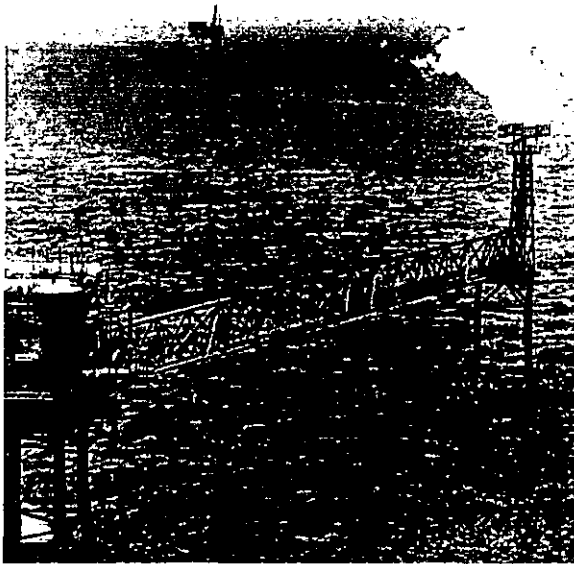
Plataforma habitacional.⁹

f) Jacket y torre incinerantes

La estructura conocida como Jacket y torre incinerantes son armaduras de forma triangular que se extienden desde el lecho marino hasta aproximadamente tres o cuatro metros arriba del nivel medio de agua. Se utilizan para zonas no muy profundas. Estructuralmente, se manejan de manera independiente trabajando de manera monolítica teniendo su propia cimentación formada por pilotes en sus tres extremidades. Se pueden construir con refuerzos tipo K o K a lo largo de su longitud mayor. En estructuras a grandes profundidades van integradas a la plataforma principal. Su función principal es de seguridad por si se requiere en algún momento quemar la producción de petróleo proveniente del pozo. En ocasiones se utiliza para quemar el gas que sale de la separación de la mezcla de petróleo crudo si éste no va a ser utilizado.

⁸ Idem 6.

⁹ Idem 6.



Torre incinerante.¹⁰

g) equipos adicionales

Como equipos adicionales se pueden encontrar los puentes que conectan a la plataforma principal con aquellas plataformas secundarias. Estos puentes deben permitir el paso libre de accesorios requeridos por los equipos de extracción y producción. También tenemos a la plataforma del helipuerto, la cual nos sirve para plataformas que se encuentran a distancias mayores a 80 kilómetros de la costa. Estas plataformas se deben calcular para los efectos estáticos y dinámicos que crea el helicóptero.

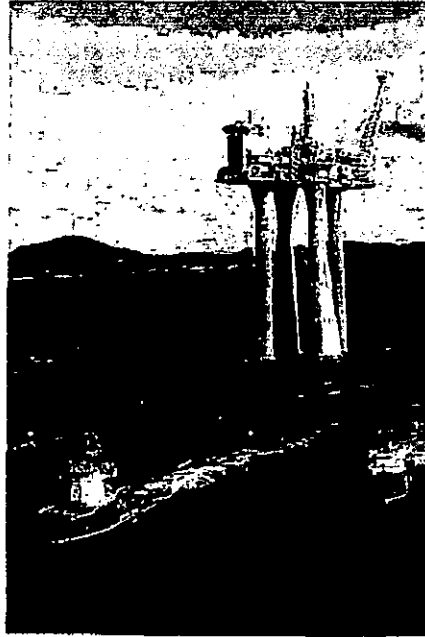
¹⁰ Idem 6.

2.1.2 Plataformas de concreto

La diferencia primordial entre las plataformas de plantilla y las plataformas de concreto radica en que las plataformas de concreto no llevan ningún tipo de anclaje al suelo marino debido a que estas por su gran peso trabajan por gravedad resistiendo todas las cargas a las cuales se encuentra sujeta. Al trabajar por gravedad y no presentar la necesidad de utilizar algún tipo de anclaje, las plataformas de concreto no requieren instalaciones submarinas. Esto les da una gran ventaja debido a la complejidad y alto costo que presenta este tipo de maniobras. Estudios han mostrados ahorros de hasta el 20% con respecto a las plataformas de plantilla. Algunas ventajas adicionales de esta plataforma son:

- Costo menor del material
- Alta resistencia a explosiones y fuego
- Construcción más sencilla
- Mayor resistencia a la corrosión
- Mayor resistencia a la fatiga por oleaje
- Se requiere poco mantenimiento

Para diseñar una plataforma de concreto se debe de verificar en principio que el suelo marino debe resistir las cargas de la plataforma sin permitir penetración y ofreciendo gran estabilidad para poder realizar los procesos requeridos. Esta restricción ha llevado a que este tipo de plataformas sea utilizado en los mares del Norte. Por otro lado, su construcción se realiza una parte en tierra y se termina en aguas protegidas. Posteriormente una vez terminado el 100% de la construcción de la plataforma, esta es arrastrada hacia el mar y una vez llegado al sitio proyectado, se sumerge bajo un estricto control de hundimiento. Una vez terminado este proceso la plataforma descansa en el fondo marino.



Plataforma de concreto.¹¹

La geometría de esta plataforma consiste en una sección con compartimentos celulares en la parte inferior los cuales proporcionan flotabilidad a la hora de arrastrar la estructura; y posteriormente al colocarse en el sitio final proporcionan cámaras de almacenamiento para el petróleo extraído. Al posarse la estructura en el fondo marino, es posible que lo penetre un poco a manera de encontrar su punto de equilibrio. Sobre estos compartimentos celulares emergen columnas similares a las piernas de las plataformas de plantilla las cuales salen del agua hasta la altura donde se encuentra una losa. Sobre esta losa se coloca todo el equipo necesario para la extracción y producción del petróleo. Otra diferencia es que este tipo de plataformas no lleva refuerzos laterales ni horizontales. Puede llevar acero de refuerzo en el interior de las columnas o puede funcionar como columnas pre- o pos-tensadas. Dentro de estas columnas también se localizan los conductores de los pozos de extracción.



Plataforma de concreto.¹²

¹¹ www.shell.com

¹² idem 11.

2.1.3 Acero o concreto

Una vez conocidas las plataformas de plantilla de acero y las de gravedad de concreto es importante el saber que regirá la elección de construir las plataformas de uno u otro material. Uno de los motivos más importantes para realizar esta elección está íntimamente relacionada con la cuestión económica. Sabemos que el concreto es un material mucho más barato que el acero; sin embargo para poder realizar una comparación válida es importante el equiparar el volumen requerido de cada material para un mismo proyecto. Esto obliga a hacer análisis de cada proyecto en el cual se evaluarán principalmente las condiciones a las cuales estén expuestas las obras marinas.

Para el Golfo de México, lugar de gran importancia para el diseño de las obras marítimas de la República Mexicana se presentan condiciones meteoceánicas que se podrían denominar como normales. El único riesgo importante se tiene para las condiciones de huracanes que se pueden presentar. Dado que estas condiciones no se dan con mucha eventualidad es normal que se presenten diseños de plataformas que no requieran una cantidad de acero que puedan justificar el empleo de concreto. Es por este motivo que se encuentran plataformas de plantilla en nuestras aguas.

El uso de plataformas de concreto ha mostrado una gran eficiencia en construcciones realizadas en el mar del Norte en donde encontramos condiciones meteoceánicas de alto riesgo. En éste lugar se presentan condiciones normales con oleajes de 9 metros y profundidades muy grandes. Esto complica las labores de colocación de plataformas de plantilla obligando al uso de grandes cantidades de acero. Además por las condiciones de oleaje y corrientes se presentan tiempos de construcción muy elevados. Esto obliga al uso de plataformas de concreto con las cuales se presentan soluciones económicamente viables y con pocas maniobras en el mar.

Otro aspecto importante a tomar en cuenta para el uso de plataformas de acero o de concreto, es el transporte. Pese a que la construcción y colocación de plataformas de concreto pareciera ser más sencilla y rápida se requiere de maquinaria muy especializada y de gran capacidad que es difícil encontrar en México, por lo que para poder realizar este tipo de obras se tendrían que hacer inversiones muy grandes en maquinaria para el transporte de las estructuras a su ubicación final. Esto obliga nuevamente a realizar plataformas de plantilla en nuestro país debido a que para este tipo de estructuras ya se tiene la infraestructura necesaria para su construcción, transporte y colocación.

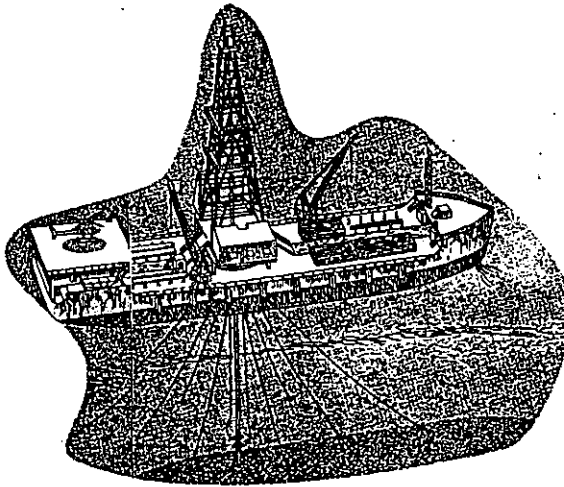
Como se puede ver es necesario comparar las condiciones particulares para cada sitio de interés así como la infraestructura con que se cuenta para la construcción de plataformas para poder realizar un estudio que justifique el uso de una u otra tecnología estructural. Un buen análisis repercutirá directamente en un diseño económicamente viable.

2.1.4 Plataformas de piernas tensadas

Las plataformas de piernas tensadas son estructuras flotantes sostenidas por miembros verticales anclados al fondo del océano. En esta plataforma se utilizan cilindros de flotación sumergidos diseñados para reducir la respuesta de la plataforma a las condiciones ambientales como clima y oleaje proporcionando la flotabilidad deseada. La flotabilidad de la plataforma debe exceder su peso de tal manera que ocasione que el sistema de anclaje se encuentre siempre en tensión por la fuerza vertical en sentido ascendente que proporciona.

Una de las ventajas de estas plataformas es que tienen la capacidad de ser móviles; esto implica no tener que estas fijas de por vida en un solo sitio. Además proporciona la ventaja de poder colocarse en cualquier profundidad debido a que se puede incrementar o reducir la longitud de los sistemas de anclaje.

Esto ocasiona una mayor versatilidad para trabajar como distintos tipos de plataforma (producción, extracción, cuarteles, etc.). Sin embargo, presenta costos elevados debido a los sistemas de anclaje que utiliza por lo que no es muy recomendable para ser utilizada en zonas donde la profundidad del agua no se encuentre dentro del rango de 455 y 610 metros. Otra característica de esta plataforma es que a diferencia de las plataformas de plantilla, su cubierta no únicamente sirve como soporte para el equipo, sino que es parte integral de la estructura ayudando a mantenerla unida.



Plataforma de piernas tensadas.¹³

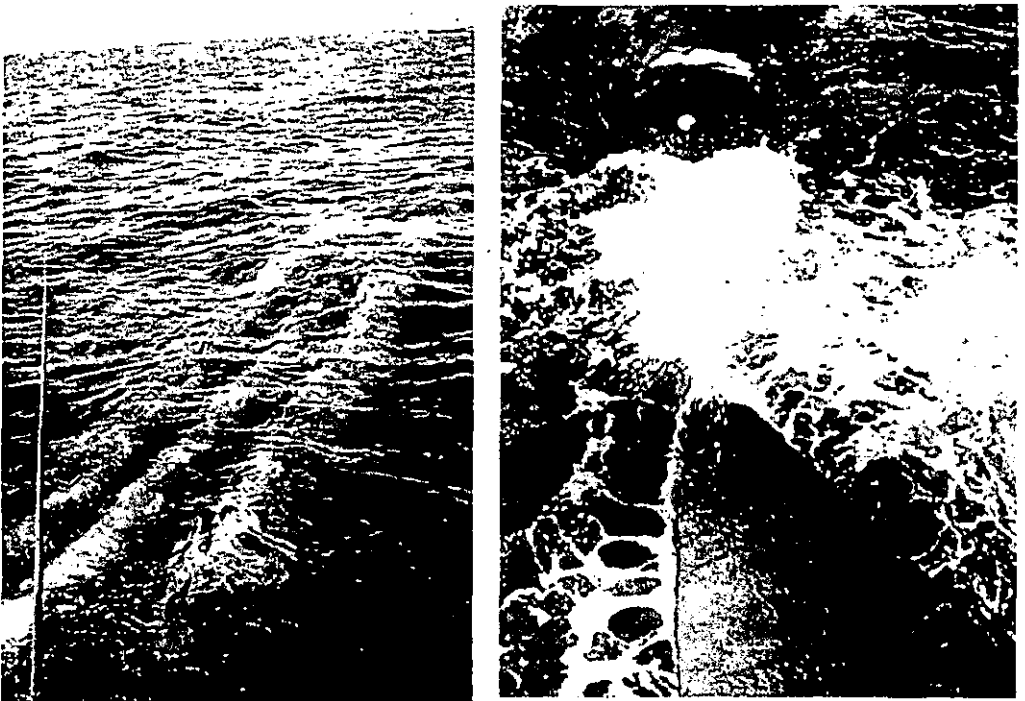
2.2 Tuberías submarinas

Es un conducto de tubos que sirve para transportar líquidos o gases. Las tuberías recorren grandes distancias en tramos que pueden ser superficiales o subterráneos dentro del océano y en su recorrido incorporan tuberías de distribución; así como estaciones de impulsión o bombeo. En nuestro caso, las tuberías que se colocan en el lecho marino generalmente son utilizadas para transportar productos derivados del petróleo.

¹³ Idem 7.

En la actualidad las tuberías han tomado gran importancia en este medio debido a la creciente construcción de plataformas petroleras en zonas alejadas de la costa.

Debido a la complejidad existente en el transporte de aceite y gas por medio de barcos transportadores así como el alto costo que representa, la construcción de tuberías submarinas de conducción ha ido en aumento.



Tuberías submarinas.¹⁴

El diseño de estas tuberías submarinas implica determinar la ruta, la geometría (diámetro exterior, interior y longitud), cantidad de acero utilizado como refuerzo, concreto de protección, manera de sujetarlo al lecho marino, entre otras.

¹⁴ Idem 6.

Para fijar estas características se deben de tomar en cuenta las posibles restricciones operacionales, del medio ambiente, de construcción e inclusive de los métodos existentes de diseño. Como restricciones operacionales se pueden encontrar la ubicación geográfica, la cantidad de fluido, la corrosión, las zonas donde deben ir colocadas las válvulas y conexiones y las estaciones de impulsión y bombeo.

Las restricciones ambientales involucran las condiciones de oleaje, corrientes y movimientos de los sedimentos principalmente. Y finalmente, Las restricciones de construcción se centran principalmente en la manera en que serán transportadas las piezas fabricadas en tierra a la zona de proyecto y la manera en que éstas serán colocadas y unidas bajo el fondo marino.

2.3 Emisores submarinos

Los emisores submarinos son tuberías lo suficientemente largas, con una sección difusora en su extremo para diluir el efluente. Generalmente estos emisores sirven para descargar fluidos provenientes de plantas de tratamiento de agua hacia el mar. Estos fluidos son transportados por una tubería desde la planta hasta el punto en donde serán depositados en el mar. En esta sección final es donde se encuentran los difusores. El funcionamiento de los emisores se puede resumir en tres pasos. Al entrar en contacto el efluente con el océano entra a una fase de dilución inicial donde se consideran parámetros como la velocidad de salida del chorro para el diseño. La descarga del chorro de agua del efluente ocasiona un flujo turbulento ocasionado por una descarga horizontal ahogada. Para su cálculo se toman en cuenta densidades tanto del efluente como del agua de mar. Posteriormente a la dilución inicial, la dilución se dará por un proceso de dispersión en donde se toma como parámetro para el diseño la corriente existente en el medio. Finalmente se tiene un período de decaimiento que es donde se diluyen las bacterias provenientes del agua tratada en el agua marina.

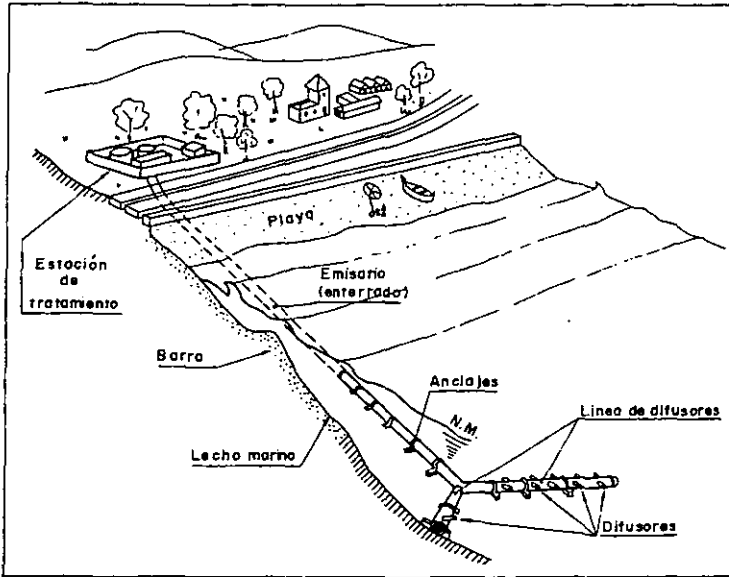
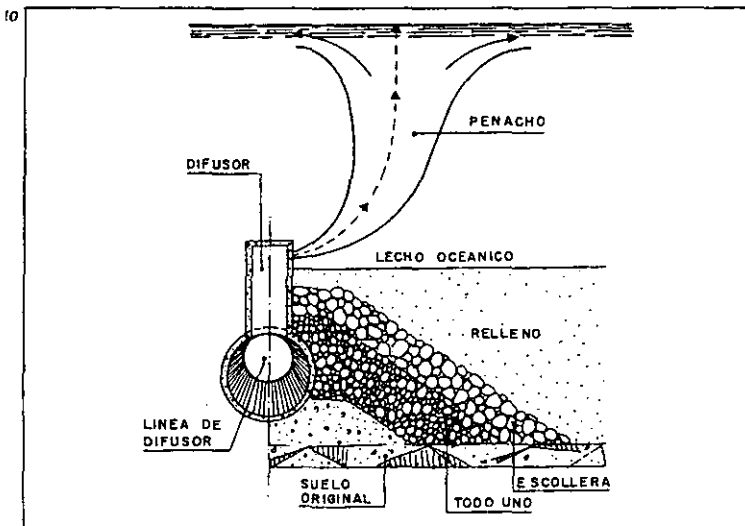


Diagrama de un emisor submarino.¹⁵



Vista frontal de un emisor submarino.¹⁶

¹⁵ "Planificación y explotación de puertos Ingeniería oceanográfica y de costas", Del Moral y Berenguer.

¹⁶ Idem 15

Tema 3
Factores de diseño

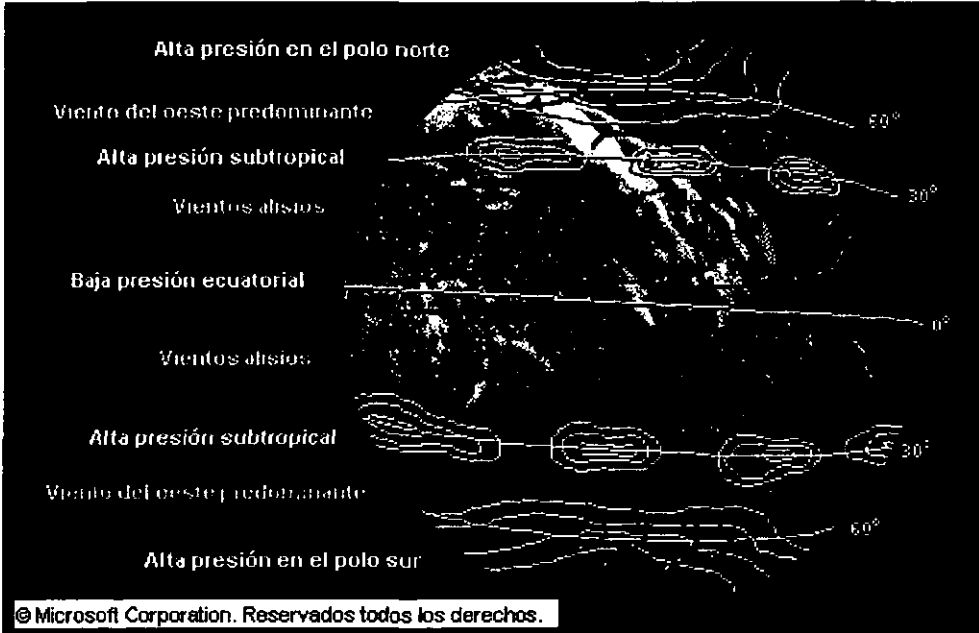
3.1 Vientos y Huracanes

Este término se suele aplicar al movimiento de las masas de aire; sin embargo, una definición técnicamente correcta es: corriente horizontal de aire que circula con relativa proximidad a la superficie terrestre. Los vientos se producen por diferencias de presión atmosférica, atribuidas, sobre todo, a diferencias de temperatura o densidad del aire. Las variaciones en la distribución de presión y temperatura se deben, en gran medida, a la distribución desigual del calentamiento solar, junto a las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. Cuando las temperaturas de regiones adyacentes difieren, el aire más caliente tiende a ascender y a soplar sobre el aire más frío y, por tanto, más pesado. Los vientos generados de esta forma suelen quedar muy perturbados por la rotación de la Tierra. Los vientos pueden clasificarse en cuatro clases principales: dominantes, estacionales, locales y, por último, ciclónicos y anticiclónicos.

a) Los vientos dominantes

Cerca del ecuador hay una banda de bajas presiones, llamada zona de calmas ecuatoriales, situada entre los 10° de latitud S y los 10° de latitud N. En esta zona, el aire es caliente y sofocante. A unos 30° del ecuador en ambos hemisferios hay otra banda de presiones altas con calmas, vientos suaves y variables. El aire superficial, al moverse desde esta zona hasta la banda ecuatorial de presiones bajas, constituye los vientos alisios, dominantes en las latitudes menores. En el hemisferio norte, el viento del norte que sopla hacia el ecuador se desvía por la rotación de la Tierra hasta convertirse en un viento del noreste, llamada alisio del noreste. En el hemisferio sur el viento del sur se desvía de forma similar para ser el alisio del sureste.

Desde el lado polar de la banda de presión alta en ambos hemisferios la presión atmosférica disminuye hacia centros de presión baja en latitudes medias y altas. Los vientos dirigidos hacia los polos, puestos en marcha por estos sistemas de presión, se desvían hacia el este por la rotación de la Tierra. Puesto que los vientos se denominan según la dirección desde la que soplan, los vientos de las latitudes medias se califican como dominantes del oeste. Éstos resultan muy modificados por las perturbaciones ciclónicas y anticiclónicas viajeras que provocan cambios diarios de las direcciones.



Direcciones de los vientos.¹⁷

Las regiones más frías de los polos tienden a ser centros de alta presión, en particular en el hemisferio sur, y los vientos dominantes que parten de estas áreas se desvían para convertirse en los vientos polares del este.

Al aumentar la altura sobre la superficie de la Tierra, los vientos dominantes del oeste se aceleran y cubren una superficie mayor entre el ecuador y el polo. Así, los vientos alisios y los polares del este son bajos y, en general, son reemplazados por los del oeste sobre alturas de unos cientos de metros. Los vientos del oeste más fuertes se producen a alturas de entre 10 y 20 Km y tienden a concentrarse en una banda bastante estrecha llamada corriente de chorro, donde se han medido hasta 550 km/h de velocidad.

b) Los vientos estacionales

El aire sobre la tierra es más cálido en verano y más frío en invierno que el situado sobre el océano adyacente en una misma estación. Así, durante el verano, los continentes son lugares de presión baja con vientos que soplan desde los océanos, que están más fríos. En invierno, los continentes albergan altas presiones, y los vientos se dirigen hacia los océanos, ahora más cálidos. Los ejemplos típicos de estos vientos son los monzones del mar de la China y del océano Índico.

c) Los vientos locales

Parecidos a las variaciones estacionales de temperatura y presión entre la tierra y el agua, hay cambios diarios que ejercen efectos similares pero más localizados. En verano sobre todo, la tierra está más caliente que el mar durante el día y más fría durante la noche: esto induce un sistema de brisas dirigidas hacia tierra de día y hacia el mar de noche. Estas brisas penetran hasta unos 50 Km tierra y mar adentro.

Hay cambios diarios de temperatura similares sobre terrenos irregulares que provocan brisas en las montañas y en los valles. Otros vientos inducidos por fenómenos locales son los torbellinos y los vientos asociados a las tormentas.

¹⁷ Enciclopedia Encarta 1999.

d) Ciclones y huracanes

Ciclón, en meteorología, es una zona de baja presión atmosférica rodeada por un sistema de vientos que se mueven en sentido opuesto a las manecillas del reloj (en el hemisferio norte.) Una zona correspondiente con vientos de sentido contrario se llama anticiclón. En el hemisferio sur, todas estas direcciones del viento se invierten.

Los huracanes son ciclones tropicales migratorios que se originan sobre los océanos en algunas regiones del ecuador, en particular los que surgen en las Antillas, incluso en el Caribe y el golfo de México. La mayoría de los huracanes se forman en las zonas de calmas ecuatoriales, un cinturón estrecho caracterizado por calmas, brisas leves y variables y chubascos frecuentes, que se sitúa entre los vientos alisios del noreste y del sureste. En el Atlántico, las zonas de calmas se localizan en su mayor parte al norte del ecuador, por ello no se producen huracanes en el Atlántico Sur. En el Pacífico hay calmas al norte y al sur del ecuador, por lo tanto hay huracanes en el Pacífico Sur y Norte.

Los huracanes consisten en vientos muy rápidos que soplan de forma circular alrededor de un centro de baja presión llamado ojo del huracán. Este centro se desarrolla cuando el aire cálido y saturado de las zonas de calmas ecuatoriales se eleva empujado por aire frío más denso. Desde el borde de la tormenta hasta su centro, la presión atmosférica cae bruscamente mientras que la velocidad del aire aumenta. Los vientos alcanzan una fuerza máxima cerca de los puntos de baja presión (en torno a 724 mm de mercurio o 0,85 atmósferas). El diámetro del área cubierta por vientos destructivos puede superar los 250 Km. Los vientos menos fuertes cubren zonas con un diámetro medio de 500 Km. La fuerza de un huracán se evalúa con un índice entre 1 y 5. El más suave, con categoría 1, tiene vientos de cuando menos 120 km/h. Los vientos del más fuerte con categoría 5 superan los 250 km/h. En el interior del ojo del huracán, que tiene un diámetro medio de 24 Km, los vientos se paran y las nubes se elevan, aunque el mar permanece muy agitado.

En general, los huracanes se desplazan en una trayectoria con forma de parábola. En el hemisferio norte suelen viajar primero hacia el noroeste y, en latitudes mayores, giran hacia el noreste. En el hemisferio sur la trayectoria usual empieza apuntando hacia el suroeste y luego hacia el sureste. Los huracanes viajan a velocidades variables; en las latitudes bajas éstas varían entre 8 y 32 km/h mientras que en las altas pueden alcanzar hasta 80 km/h. Las zonas en las que los vientos del huracán soplan en la misma dirección que la propia tormenta están sometidas a la máxima violencia destructiva.

A mediados de la década de 1950 se desarrolló un sistema coordinado de seguimiento de los huracanes y a lo largo de los años se han hecho mejoras periódicas. Radares, dispositivos de registro marinos, satélites meteorológicos geosíncronos (desde 1966) y otros instrumentos suministran datos que permiten el seguimiento de los movimientos de cada tormenta casi desde su formación. La mejora de los sistemas de predicción e información ha permitido reducir al mínimo la pérdida de vidas, pero los daños materiales siguen siendo grandes, en especial en las regiones costeras. El huracán Gilbert, el mayor del siglo XX (1988) en el hemisferio norte, con vientos en rachas que alcanzaron los 350 km/h, devastó Jamaica y zonas de México.¹⁸

3.1.1 Consideraciones teóricas

Para poder caracterizar a un viento es necesario definir tres parámetros esenciales: dirección, intensidad y frecuencia o número de veces que se presenta durante un lapso cualquiera.

- a) Dirección: se utiliza la Rosa de los vientos, que no es más que una circunferencia dividida en 4, 8, 16 y 32 segmentos correspondientes a los puntos cardinales. En esta se muestra de donde provienen los vientos.

¹⁸ Idem 17.

b) Intensidad: Es la velocidad con que sopla el viento. Se expresa en unidades de longitud sobre tiempo. Para su medición los marinos y los meteorólogos utilizan la escala de Beaufort para indicar su velocidad. Fue diseñada en 1805 por el hidrógrafo irlandés Francis Beaufort. Sus denominaciones originales fueron modificadas más tarde; la escala que se usa en la actualidad es la dada en la tabla adjunta.

ESCALA DE BEAUFORT	VELOCIDAD DEL VIENTO (km/h)	DENOMINACIÓN DEL VIENTO	SÍMBOLO EN EL MAPA METEOROLÓGICO
0	menos de 1	Calma	
1	1-5	Ventolina	
2	6-11	Muy flojo	
3	12-19	Flojo	
4	20-28	Bonancible	
5	29-38	Fresquito	
6	39-49	Fresco	
7	50-61	Frescochón	
8	62-74	Duro	
9	75-88	Muy duro	
10	89-102	Temporal	
11	103-117	Borrascosa	
12	más de 117	Huracán	

19 © Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

Además existe una escala para su definición meteorológica, la cual se menciona a continuación:

- Perturbación tropical: son circulaciones débiles que se dan en latitudes entre los 5° y 8°.
- Depresión tropical: circulación cerrada con centro bien definido. Alcanza velocidades máximas de 40 k.p.h.
- Tormenta tropical: Forma nubosidades espesas y algunas perturbaciones se disipan al alcanzar esta clasificación. Sus velocidades fluctúan entre los 60 y los 120 k.p.h.
- Ciclón: las velocidades son superiores a los 120 k.p.h.

¹⁹ Idem 17.

Para poder comprender el fenómeno de viento es necesario definir además que las isóbaras son líneas que unen puntos en el espacio en los que hay una misma presión atmosférica para un momento dado. Las líneas definidas nunca se cruzan pero pueden correr paralelas muy próximas unas con otras. Los elementos que las caracterizan son su perfil (rectilíneas, curvilíneas, de poco y mucho radio, abiertas o cerradas), la situación del máximo o del mínimo valor de presión y el gradiente horizontal de presión. Este gradiente de presión es la diferencia de valores de dos isobaras contiguas que se hallan a la unidad de distancia, medida ésta siempre perpendicular a las porciones infinitesimales de las isóbaras; la unidad de longitud empleada es el grado geográfico que es igual a 111.11 Km.

Por otro lado, para medir la presión se utilizan normalmente los milibares. Las isobaras presentan diferencias de presión entre sí de 3 o 5 milibares. Para mayor comprensión, se entienden las siguientes relaciones:

$$1 \text{ mb} = 0.750 \text{ mm Hg}$$

$$1000 \text{ mb} = 1 \text{ bar}$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \text{ mb}$$

Como se mencionó en párrafos anteriores, uno de los conceptos que caracterizan a las isobaras son las áreas de alta y bajas presiones. Las zonas de alta presión son isobaras cerradas cuyo valor aumenta desde la periferia hasta el centro en donde se encuentra la máxima presión, denominada H del inglés high. Éstas se caracterizan por gradientes pequeños, superficies extensas y circulación contraria a las manecillas del reloj. Por otro lado las zonas de baja presión son igualmente isobaras cerradas, en las que disminuye la presión desde la periferia hacia el interior y que se representan por la letra L del inglés low. En estas tenemos superficies relativamente reducidas, gradientes horizontales elevados y rotación en el sentido de las manecillas del reloj.

3.1.1.1 Fuerzas del viento

Una vez definidas las isobaras, se mencionarán las fuerzas que intervienen en la producción y movimiento de los vientos. Estas fuerzas serán: la fuerza de presión, la de fricción, la centrífuga y la de Coriolis. Se describirán brevemente cada de una de ellas a continuación:

- a) Fuerza de presión: Se origina debido al gradiente de presión que representa una fuerza real de presión dando origen al denominado "viento geostrófico". Esta fuerza está dada por la siguiente expresión:

$$F_p = \frac{\Delta P}{L^\circ \rho_a} \quad (\text{ec. 3.1.1})$$

siendo ΔP la diferencia de presiones en las isobaras consideradas
 L° la separación entre isobaras
 ρ_a la densidad del aire

- b) Fuerza de fricción: Actúa directamente sobre el viento reduciendo su velocidad al chocar con los distintos cuerpos que se ubican dentro de su curso. El viento al entrar en contacto con la superficie de la tierra sufre una desviación en su trayectoria de 40° y 45°, mientras que en el agua es sólo de 10° a 15°. Esto ocasiona que el viento circule con cierta inclinación con respecto a las isobaras. La ecuación que define esta fuerza es la siguiente:

$$F_f = \mu w \quad (\text{ec. 3.1.2})$$

siendo μ el coeficiente de fricción
 w el peso de la masa de aire

c) Fuerza centrífuga: Debido a la forma de la tierra, los vientos describen trayectorias curvas, por lo que se encuentran sometidos a dos fuerzas opuestas con respecto a su sentido: la centrípeta (del exterior al centro de rotación de la tierra) y la centrífuga que trata de sacar al cuerpo de su órbita. La fuerza centrífuga queda representada por la siguiente ecuación:

$$F_c = m \frac{v^2}{R} \quad (\text{ec. 3.1.3})$$

siendo m la masa del aire

v la velocidad tangencial de las partículas

R el radio de curvatura de la tierra

d) Fuerza de Coriolis: Se genera debido a la velocidad de rotación de la tierra y es por ella que las partículas sufren desviaciones en su trayectoria, formándose una curva cerrada llamada curva de inercia. Esta definida por la siguiente ecuación:

$$F_{cr} = 2\Omega v \sin \phi \quad (\text{ec. 3.1.4})$$

siendo Ω la velocidad angular de rotación de la tierra = $7.29 \cdot 10^{-5}$ rad/seg

v la velocidad del viento

ϕ los grados latitud del punto analizado

Se observa que esta fuerza es directamente proporcional al seno de la latitud por lo que tiende a ser nula en el ecuador y máxima en los polos.

3.1.1.2 El viento como agente generador de oleaje

El viento es el principal agente en la producción del oleaje. Su generación depende de factores como la velocidad del viento, y el área donde se genera el oleaje o fetch.

a) Velocidad del viento

La velocidad media en la atmósfera libre es la denominada velocidad del viento geotrópico V_g . Su determinación viene dada por la fórmula:

$$V_g = \frac{1}{2\Omega \sin \phi} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} \quad (\text{ec. 3.1.5})$$

siendo

Ω la velocidad angular de giro de la tierra = $7.29 \cdot 10^{-5}$ rad/seg

ϕ la latitud del lugar

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial n} = 0.00093 \frac{\Delta P}{\Delta n} \text{ (gradiente horizontal de presiones)}$$

Esta velocidad geotrópica se puede cambiar a velocidad real mediante la siguiente relación:

$$V = \text{cte } V_g \quad (\text{ec. 3.1.6})$$

La constante que se utiliza es un parámetro de corrección que depende de la diferencia de temperatura entre el agua de mar y el aire, dándose sus valores en la siguiente tabla:

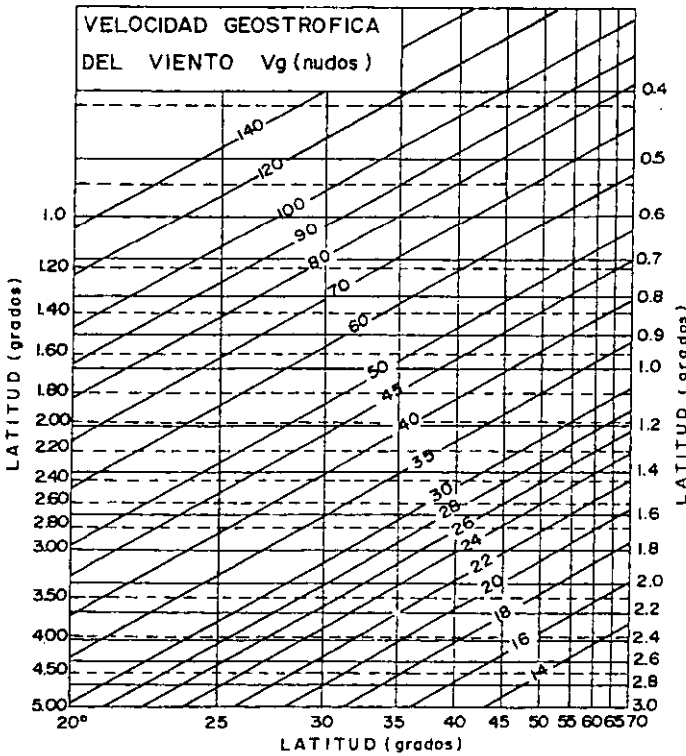
Diferencia de Temperatura	Constante de corrección
0 o negativo	0.60
0°-10°	0.65
10° - 20°	0.75
20° o mayor	0.90

Nota: es común utilizar en los cálculos prácticos un valor de c de 0.60

Por otro lado, para los cálculos de generación de oleaje, nos interesa lo que llamaremos "velocidad tipo" que es la que corresponde a la cota $z = 10 \text{ m}$ (U_{10}).

$$\frac{U_{10}}{V} \approx \frac{2}{3} \quad (\text{ec. 3.1.7})$$

lo cual es consistente con la corrección mencionada en el párrafo anterior. La Universidad de California ha obtenido unos gráficos que nos dan directamente el valor de V_g con base en el gradiente de presión de las isobaras.



b) Fetch

Una vez conocida la velocidad del viento debemos conocer el Fetch meteorológico que es la superficie de agua en donde actúa el viento con intensidad casi constante y con una dirección tal que genere oleaje capaz de propagarse hasta el punto de previsión considerado. La velocidad se puede considerar constante si varía ± 5 nudos (2.5 m/seg) de la medida. El ángulo que forma la dirección del viento con la línea que une el área de generación y el punto de presión debe ser menor de 30° , en zonas donde las isobaras sean casi rectas, y de 45° en zonas de isobaras curvas.

Los límites del fetch pueden quedar definidos por:

- una costa a barlovento del punto de previsión
- el expansionamiento de las isobaras
- las líneas indicativas en los mapas de distintos frentes
- con decay (distancia del frente del fetch al punto de previsión) mayor de 500 millas.

Por otro lado, se define el fetch esquemático como la superficie de agua comprendida en el rectángulo que mejor se pueda encajar en la superficie irregular que constituye el fetch meteorológico. Así se puede definir mediante la longitud y anchura.

Así mismo, se entiende por fetch estándar, el que produce los mismos efectos que el meteorológico sobre el punto de previsión, pero tiene anchura infinita y por ende queda integrado solamente por su longitud.

²⁰ Idem 15.

El proceso de determinación de los distintos parámetros que definen cada uno de estos tipos de fetchs, es el siguiente:

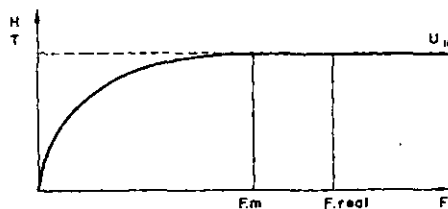
- Determinación grafica del fetch meteorológico sobre la(s) carta(s) meteorológicas.
- Ajuste dentro de la superficie del fetch meteorológico de un rectángulo equivalente, que es el fetch esquemático.
- Transformación del fetch esquemático en fetch estándar tratando de mantener los efectos producidos por uno y otro.

Una vez descritos el fetch y la velocidad del viento es posible definir las distintas clases de oleaje provocados por el viento, de los cuales se hablará a continuación.

3.1.1.3 Clases de oleaje por la acción del viento

Sabemos que tanto los fetchs como la duración de los vientos son limitados, por lo que se podrían dar los siguientes casos de oleaje:

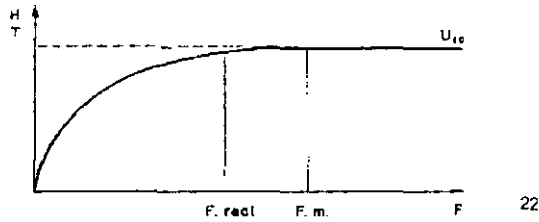
a) Fetch y duración superior a los mínimos: Para este caso se dice que el oleaje es "totalmente desarrollado", de tal forma que las características esenciales del oleaje (altura y periodo) crecerán desde el punto de origen, como funciones fijas del viento y de la distancia. Esto ocurrirá así hasta la distancia que se ha denominado fetch mínimo F_m , a partir de la cual habrá un equilibrio entre la energía captada al viento y la consumida para mantener la propagación del movimiento ondulatorio.



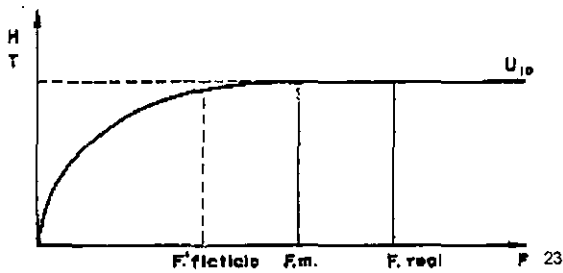
21

²¹ Idem 15

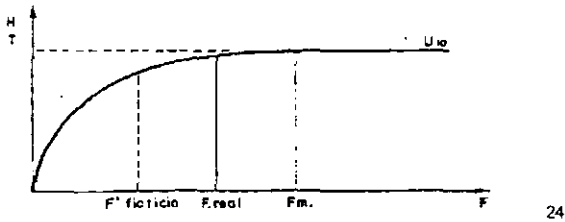
b) Fetch real menor que el mínimo, duración real mayor que la mínima: Se dice entonces que el oleaje es "parcialmente desarrollado" y crecerá hasta los valores del fetch real.



c) Fetch real mayor que el mínimo, duración real menor que la mínima: Se dará un crecimiento hasta un fetch ficticio que será menor que el real y el mínimo.



d) Fetch real menor que el mínimo, duración real menor que la mínima: Se dará el menor crecimiento de todos los casos planteados con anterioridad.



²² Idem 15.

²³ Idem 15.

²⁴ Idem 15.

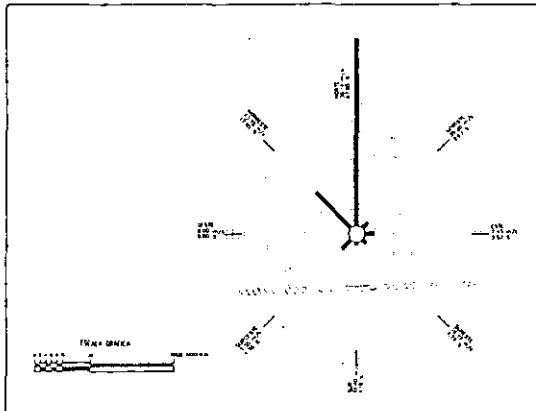
3.1.1.4 Representación de los vientos

Como se mencionó con anterioridad, los vientos son representados en diagramas que llamaremos "rosas de vientos" que generalmente serán de 16 direcciones. Los diagramas se pueden hacer por períodos mensuales, trimestrales o anuales. Comúnmente se utilizan 3 tipos de diagramas:

a) Diagramas de frecuencia o de "n": Representa el número de veces (n) en que el viento incide para cada dirección. También muestra el viento que sopla con mayor frecuencia al cual se le llama "viento reinante".

b) Diagrama de velocidad media o de "nv": Muestra los productos de las frecuencias por las velocidades de presentación. También recibe el nombre de diagrama de agitación o de Lenz.

c) Diagrama de velocidad máxima cuadrática o de " V^2_{max} ": Ilustra los datos respecto al cuadrado de la velocidad máxima de presentación. El viento que sopla con mayor intensidad se le conoce como "viento dominante".



Rosa de vientos.

3.1.2 Criterios de diseño

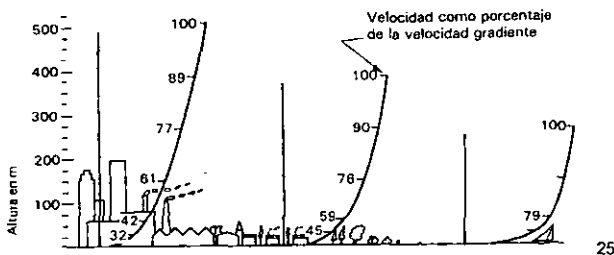
Para el diseño estructural son de gran interés los vientos de altas velocidades asociados a fenómenos atmosféricos excepcionales. Para su estudio se distinguen dos acciones: la primera o estática que se caracteriza por ser un viento constante durante un lapso de tiempo considerable y la segunda que es una oscilación aleatoria con periodos cortos, denominada ráfaga de viento.

La velocidad del viento varía con la altura. Esto ocasiona que dependiendo la rugosidad del terreno, éste se desarrolle a una menor o mayor altura. La ecuación que rige la variación de la velocidad del viento de acuerdo con la altura es la siguiente:

$$V = V_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^a \quad (\text{ec. 3.1.8})$$

donde a es un parámetro que depende de lo accidentado del terreno.

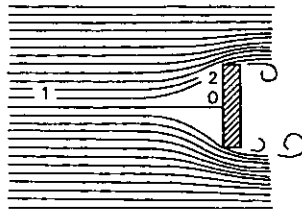
Para el caso de la superficie del mar se encuentra muy poca rugosidad del terreno presentándose un desarrollo rápido del viento. Esto se muestra en la siguiente figura comparativa:



El viento, al encontrar un obstáculo en su camino, tiende a rodearlo originando presiones en el cuerpo. La cara directamente opuesta al sentido del

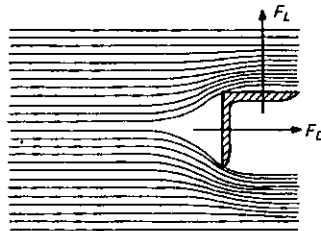
²⁵ "Diseño Estructural", Meli.

viento o barlovento recibe un empuje en toda su sección; mientras que la cara opuesta o sotavento sufre una succión debida a las turbulencias ocasionadas por el cambio de dirección del flujo.



26

Otro aspecto a considerar es la geometría del cuerpo debido a que en caras laterales al sentido del viento se producen succiones perpendiculares a éstas denominadas fuerzas de sustentación.



27

Para determinar la presión que ejerce el viento sobre un objeto se puede emplear la ecuación de Bernoulli en la dirección del flujo. Esta ecuación presupone a un fluido incompresible no viscoso. Tomando al punto 1 situado justo antes del objeto y al punto 0 en la parte central de la cara que se opone al flujo, tendremos la siguiente desigualdad:

$$p_o + 0 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (\text{ec. 3.1.9})$$

despejando obtenemos

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (\text{ec. 3.1.10})$$

²⁶ Idem 25.

Si integramos esta a lo largo de toda la cara en contacto con el viento obtenemos finalmente:

$$p = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \quad (\text{ec. 3.1.11})$$

donde C_D es el factor de forma o empuje. Con esta ecuación es posible definir las presiones que actúan sobre una sección de un objeto expuesto a la acción del viento. Cabe recordar que para obtener la fuerza sobre el objeto, únicamente debemos multiplicar esta presión por la superficie de la cara que está en contacto con el viento.

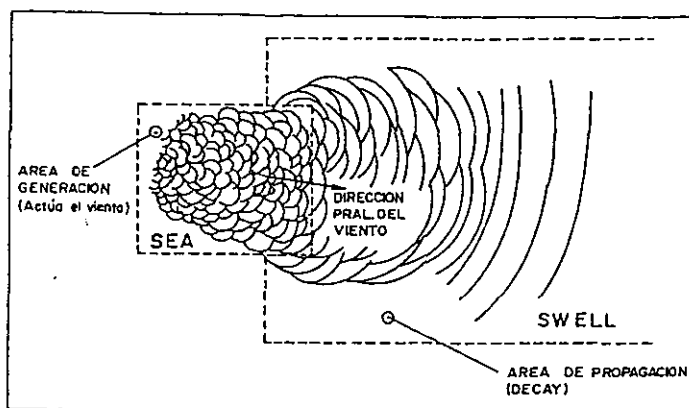
²⁷ Idem 25.

3.2 Oleaje

Se entiende por oleaje a una sucesión de olas siendo éstas, ondas de gran magnitud formadas en la superficie de las aguas. El oleaje es creado fundamentalmente por la acción de los vientos sobre la superficie líquida en reposo. Estos vientos se encuentran bajo un régimen turbulento con una velocidad media que denominaremos u . Esta velocidad cambiará en módulo y dirección lo que ocasiona fluctuaciones en las velocidades.

Por otro lado, estas fluctuaciones darán origen a cambios de tensión (presión y esfuerzo cortante) en la superficie del líquido que ocasionarán ondas circulares que se propagan radialmente desde el punto de su generación a los cuales identificaremos como remolinos de turbulencias. El tamaño de los remolinos dependerá de la velocidad del viento lo cual trae como consecuencia que la fluctuación de tensión abarcará una amplia gama de frecuencias y de números de onda. Los remolinos son transportados por la acción del viento de tal manera que si la velocidad del viento coincide con la celeridad de la onda al igual que en los períodos, se producirá una resonancia que provocará que la energía de la onda se incremente.

La zona donde actúa el viento para generar el oleaje se denomina SEA y su tipología presenta ondas con períodos cortos, direcciones múltiples, peraltes grandes con un aspecto general caótico. Por otro lado se llama SWELL a la zona en donde las ondas han salido del área de influencia del viento y presentan, por lo general, períodos mayores, crestas largas y dirección de avance definida.



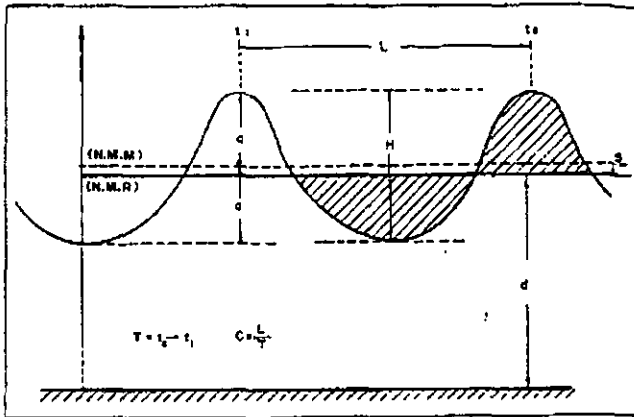
Sea y Swell.²⁸

Para la comprensión de este fenómeno es importante hacer las siguientes definiciones:

- Las ondas tienen una convexidad hacia la superficie que se alza sobre el nivel de reposo del mar a la cual denominaremos "cresta" precedida y seguida por una concavidad, por debajo del nivel medio, que llamaremos "seno"
- La distancia entre dos crestas o dos senos consecutivos se conoce como "longitud de onda" y queda representado por la letra L o λ .
- El desnivel o diferencia de altura entre cresta y seno se llama "altura de ola" con notación H .
- Al tiempo que transcurre entre el paso de dos senos o dos crestas consecutivos lo denominaremos "período" y se representa por T .
- La distancia vertical entre el lecho oceánico y la superficie del mar en reposo se conoce como "profundidad" denotada por la letra d .
- La relación entre la altura de ola y la longitud de ola será el "peralte".
- El nivel del mar antes de iniciarse el movimiento es el "nivel medio en reposo" (N.M.R.) y la línea horizontal equidistante entre crestas y senos es el "nivel medio en movimiento" (N.M.M.).
- La diferencia de altura entre ambos niveles será la "sobre elevación"

²⁸ Apuntes de Instalaciones alejadas de la costa del Ingeniero Guillermo Macdonel Martínez.

- Finalmente, el subíndice "o" añadido a estas variables indicará la referencia a un punto en mar profundo, mientras que el subíndice "b" indica un punto en la rotura de la ola.

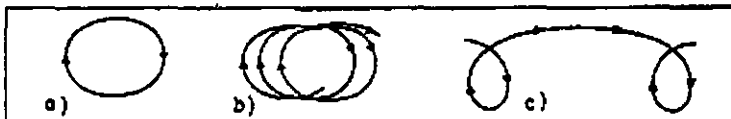


Partes de una onda.²⁹

Existen diversos tipos de ondas. Para este propósito se definirán dos clasificaciones básicas con base en el tipo de movimiento de las partículas del líquido y respecto al período.

De acuerdo al tipo de movimiento de las partículas del líquido, las olas se pueden dividir en:

- Oscilatorias: es cuando se describen órbitas cerradas.(a)
- Cuasi-oscilatorias: Se da cuando las órbitas descritas no son cerradas produciéndose un ligero movimiento neto en algún sentido.(b)
- De traslación: el movimiento neto de la partícula consiste en una traslación.(c)



Movimiento de las partículas.³⁰

²⁹ Idem 15.

Por otro lado de acuerdo al período se presenta el siguiente cuadro que indica sus divisiones.

PERÍODO	TIPO	FUERZA QUE LA ORIGINA	FUERZA QUE LA RESTAURA
<0.1 seg	Capilares	Viento	Tensión superficial
0.1 a 1 seg	Ultragravedad	Viento	Tensión superficial y gravedad
1 a 30 seg	Gravedad	Viento	Gravedad
30 seg a 5 min	Infragravedad	Viento	Gravedad
5 min a 12 hr	Largo período	Tormentas y Tsunamis	Fuerza de Coriolis
12 a 24 hr	Largo período	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis
> 24 hr	Muy largo período	Sol y Luna	Fuerza de Coriolis

División de ondas según su período³¹

3.2.1 Consideraciones teóricas

El fenómeno del oleaje es muy complejo debido a la superposición simultánea de olas de distintas formas y energía, por lo que es conveniente considerar una ola aislada o un tren de oleaje para poder realizar su estudio el cual permanecerá sin cambios en su forma y propagación para condiciones ambientales sin variaciones.

Si se considera a la ola con una forma definida por un movimiento armónico simple de tal manera que para un tiempo t , se presente una forma senoidal refiriéndonos a un nivel de aguas tranquilas en el eje x . Para el tiempo $t=0$, la elevación instantánea de la superficie η , estará dado por

$$\eta_{t=0} = A \cos(kx) \quad (\text{ec. 3.2.1})$$

³⁰ Idem 15.

³¹ Ingeniería Marítima y Portuaria. Medoncel, Pindter, Herrejón, Pizá y López. Editorial Alfaomega

donde A define a la amplitud de la ola y k es el número de ola que permite convertir al punto x a radianes.

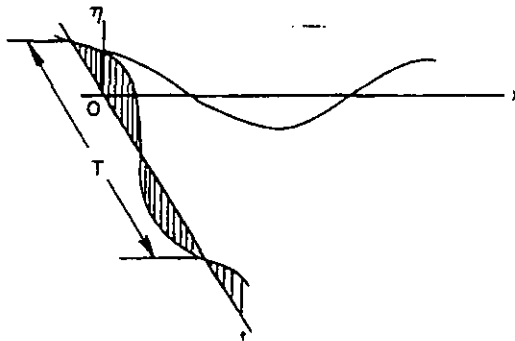
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{ec. 3.2.2})$$

La expresión general para η en un movimiento de ola senoidal progresivo a una velocidad que se llama celeridad representada por una "c", en la dirección del eje x en sentido positivo es:

$$\eta(x,t) = A \cos k(x - ct) \quad (\text{ec. 3.2.3})$$

Por otro lado, si se toma $x = 0$ y se considera la variación instantánea de la superficie de elevación con respecto al tiempo cuando la ola pasa por el origen O , se tiene lo siguiente; ilustrado en la siguiente figura:

$$\eta_{x=0} = A \cos(-kct) = A \cos(kct) \quad (\text{ec. 3.2.4})$$



Movimiento a lo largo de dos ejes de la ola.³²

Nuevamente el valor de kc es de convertir kct en radianes, o lo que es lo mismo

³² "Dynamics of offshore structures" James F. Wilson.

$$kct = 2\pi \left(\frac{t}{T} \right) \quad (\text{ec. 3.2.5})$$

donde T es el período de la ola y

$$kc = \omega \left(\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right) \quad (\text{ec. 3.2.6})$$

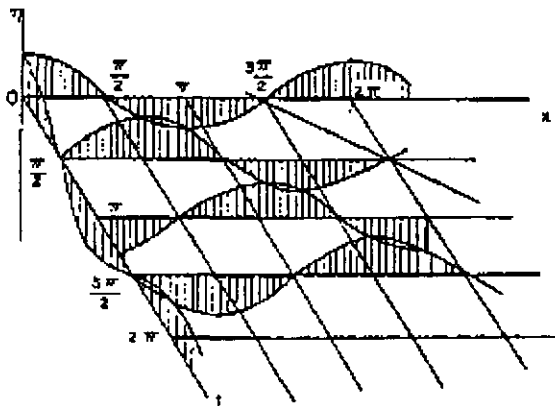
y ω es la frecuencia angular. De las ecuaciones 3.2.2 y 3.2.5 tenemos

$$\lambda = cT \quad (\text{ec. 3.2.7})$$

Con la ecuación 3.2.6 se puede escribir la ecuación 3.2.3 de la siguiente manera

$$\eta(x,t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (\text{ec. 3.2.8})$$

la cual queda representada en la siguiente figura.



Movimiento real del oleaje.³³

Al comparar dos olas similares con forma idéntica que pasan por un mismo punto en tiempos distintos, se puede dar para una en $t=0$

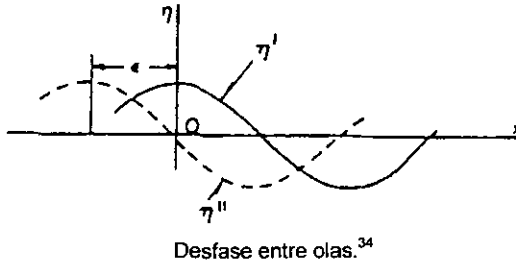
³³ Idem 32.

$$\eta'_{t=0} = A \cos kx$$

Y para la otra

$$\eta''_{t=0} = A \cos(kx + \varepsilon)$$

Donde ε es el desfase existente entre ambas olas mostrado en la siguiente figura.



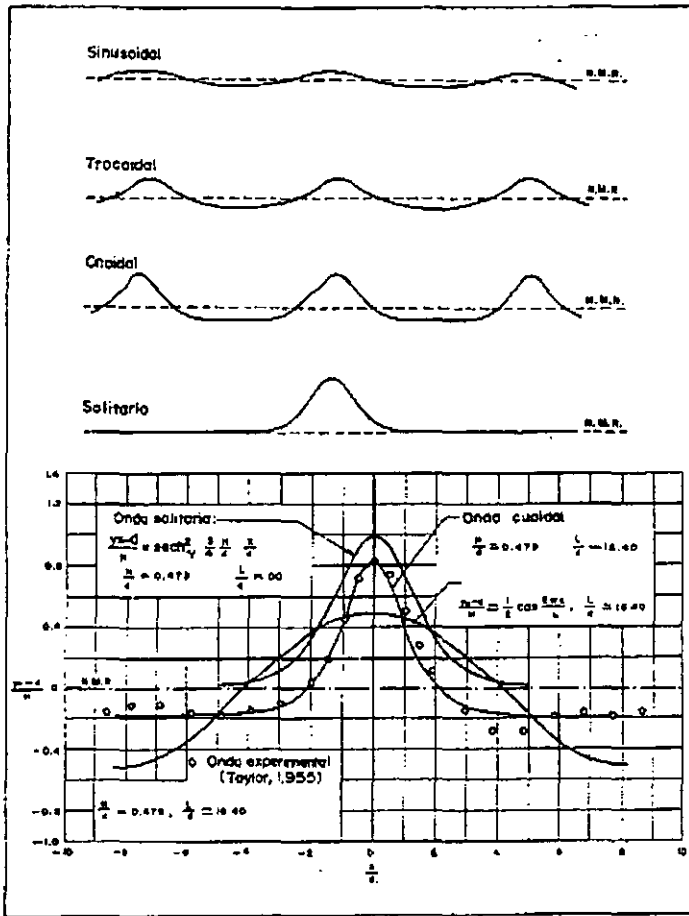
Finalmente, la expresión general para una ola senoidal se puede escribir como

$$\eta(x,t) = A \cos\{(kx - \omega t) - \varepsilon\} \quad (\text{ec. 3.2.9})$$

3.2.1.1 Teorías de oleaje

Con estas bases se pueden comprender las distintas teorías de oleaje descritas por diversos autores las cuales para su estudio se dividen en dos grandes universos: las teorías determinísticas y las probabilísticas. Las primeras son utilizadas para análisis de olas de con escala de tiempos cortos, mientras que las segundas se usan en olas con escala de tiempos largos. Las teorías determinísticas se pueden a su vez subdividir en teorías lineales y teorías no lineales. En este trabajo se estudiarán las teorías determinísticas de oleaje que repercutan en el cálculo y representación de oleaje en aguas profundas.

³⁴ Idem 32.

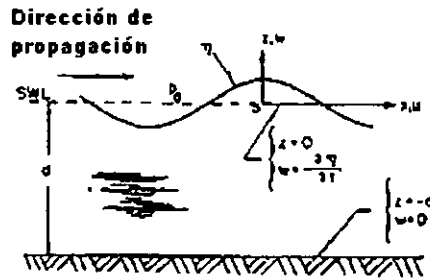


Comparación de distintas teorías de oleaje.³⁵

a) Teoría lineal

La teoría lineal es también conocida como teoría de Airy, de pequeña amplitud o de primer orden. Esta teoría fue desarrollada principalmente por Airy y por Laplace. Se considera una ola plana, armónica, simple y libre definida por la siguiente figura propagándose en el eje x en su dirección positiva.

³⁵ Idem 15.



Teoría lineal de oleaje.³⁶

Airy planteó las siguientes nueve hipótesis de partida mostradas resumidas:

1. La amplitud , A , de la perturbación de la superficie es muy pequeña comparada con la longitud de ola λ y la profundidad d .
2. La velocidad $(u^2 + w^2)/2g$ es insignificante comparada con la anomalía de la presión debida a condiciones hidrostáticas, donde u y w son las componentes horizontal y vertical de la velocidad respectivamente.
3. El fluido se encuentra a una profundidad uniforme, d .
4. El fluido es perfecto.
5. El fluido es incompresible y homogéneo.
6. La fuerza asociada con la rotación de la tierra (fuerza de Coriolis) es despreciable.
7. Es despreciable la tensión superficial.
8. El fondo es horizontal, fijo e impermeable.
9. La presión atmosférica a nivel del mar, p_a es uniforme. La presión del agua se denotará por la letra p .

Con base en estas condiciones, es necesario que la velocidad y presión de las partículas del fluido satisfagan las siguientes ecuaciones diferenciales:

³⁶ Idem 32.

- Ecuación del fluido perfecto

$$\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (\text{ec. 3.2.10a})$$

- Ecuación de condición de continuidad

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{ec 3.2.10b})$$

- Ecuaciones de conservación del momento o ecuaciones eulerianas de movimiento

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{ec. 3.2.10c})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (\text{ec. 3.2.10d})$$

- Ecuaciones que definen los estados límites

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \text{ en } z = 0 \quad (\text{ec. 3.2.11})$$

$$w = 0 \text{ en } z = -d \quad (\text{ec. 3.2.12})$$

$$p = p_a \text{ en } z = 0 \quad (\text{ec. 3.2.13})$$

Bajo un análisis matemático se puede decir que estas ecuaciones representan un problema lineal que admite ondas simples y armónicas como posible solución. Entonces, si

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad (\text{ec. 3.2.14})$$

se presentaría lo siguiente:

$$u = A \omega \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (\text{ec. 3.2.15})$$

$$w = A \omega \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (\text{ec. 3.2.16})$$

y

$$p = p_a - \rho g z + \rho g A \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (\text{ec. 3.2.17})$$

donde $-\rho g z$ es la componente hidrostática de la presión. Está comprobado que las ecuaciones 3.2.14 a 3.2.17 cumplen con las ecuaciones 3.2.10 y 3.2.12. También cumplen con las ecuaciones 3.2.11 y 3.2.13 cuando el numero de ola y su frecuencia satisfagan la relación:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \tag{ec. 3.2.18}$$

y como $c = \omega/k = \lambda/T$, se puede decir que la celeridad es igual a:

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} \tag{ec. 3.2.19}$$

que para el caso particular de aguas profundas

$$c = 1.56 T$$

Además, con estas ecuaciones se puede llegar a las siguientes ecuaciones y conclusiones:

- Aceleración horizontal de la partícula

$$\dot{u} = \frac{4\pi^2 A \cosh k(z+d)}{T^2 \sinh kd} \sin(kx - \omega t) \tag{ec. 3.2.20}$$

- Aceleración vertical de la partícula

$$w = \frac{r\pi^2 A \sinh k(z+d)}{T^2 \sinh kd} \cos(kx - \omega t) \tag{ec. 3.2.21}$$

- Presión dinámica

$$p = \rho g A \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) \tag{ec. 3.2.22}$$

- Celeridad de grupo

$$c_g = c \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] \tag{ec. 3.2.23}$$

que para aguas profundas es igual a

$$c_{go} = \frac{1}{2} c_o \quad (\text{ec. 3.2.24})$$

- Energía de oleaje

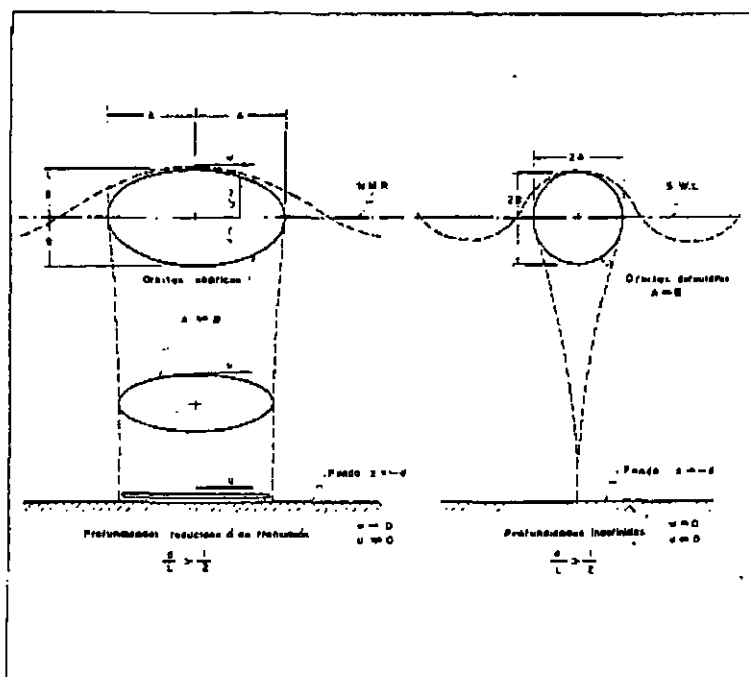
$$E = E_c + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (\text{ec. 3.2.25})$$

- Movimiento de las partículas

Según la teoría lineal, en aguas profundas donde $d/L > 1/2$ el movimiento de la partícula describe una órbita circular de radio inversamente proporcional a la distancia a la superficie.

$$r = \frac{H}{2} e^{2\pi z/\lambda} \quad (\text{ec. 3.2.26})$$

Mientras que en aguas con profundidades finitas las órbitas se transforman en elipses.



Movimiento de partículas por el oleaje.³⁷

b) Teorías no lineales

Las teorías no lineales solucionan el problema que se presenta en olas con amplitudes finitas. Las más importantes de estas teorías son:

b.1) Teoría trocoidal

Esta teoría fue utilizada en el pasado y de aquí parte la teoría de Stokes que se describirá más adelante. Se fundamenta en suponer que las partículas se mueven en órbitas circulares, lo cual resulta en una solución exacta para las olas de amplitud finita. Sin embargo esta teoría no es muy exacta por lo que en la actualidad se utilizan otras teorías para describir el oleaje.

³⁷ Idem 15.

b.2) Teoría cnoidal

Esta teoría fue estudiada primeramente por Korteweg y Vries en 1895 y más recientemente por Masch y Wiegel en 1961. Formula los parámetros descriptivos de las olas en términos de funciones cosenoidales elípticas de donde proviene su nombre. Su uso se limita a la zona en donde $0.01 \leq H/d \leq 0.78$ para relaciones de $d/L < 1/8$. La descripción de las diferentes características del oleaje como celeridad, longitud de onda, etc.; según la teoría cnoidal precisa la utilización del módulo elíptico K . Este módulo varía entre los valores $K=0$ (sinusoide) y $K=1$ (onda solitaria). Asimismo, también entran en juego los valores $K(k)$ y $E(k)$ que son las integrales elípticas de primera y segunda especie.

b.3) Teoría de amplitud finita de Stokes

La teoría de amplitud finita de Stokes se basa en la suposición de que el fluido motriz es irrotacional, lo cual se puede justificar físicamente si la viscosidad del fluido es muy pequeña. Las ecuaciones que rigen esta teoría se formulan de manera paralela a las de la teoría lineal, con los siguientes cambios:

- Ecuación de condición de cero viscosidad

$$\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (\text{ec. 3.2.27a})$$

- Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{ec. 3.2.27b})$$

- Ecuación de conservación de momento

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (\text{ec. 3.2.27c})$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (\text{ec. 3.2.27d})$$

Una vez que la velocidad se puede estimar entonces se puede determinar la presión. Las condiciones de frontera se obtienen debido a que la presión en la superficie de la ola es constante en cualquier lado, o lo que es lo mismo

$$p(x, n, t) = p_a = \text{cte} \quad (\text{ec. 3.2.28})$$

lo cual lleva a que

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} + w \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (\text{ec. 3.2.29})$$

En estas ecuaciones se observa que las condiciones de frontera para una superficie libre son no lineales con respecto a las variables desconocidas u, w y p .

Stokes resolvió este sistema de ecuaciones estableciendo soluciones particulares de segundo y tercer orden. Dentro del alcance de esta Tesis, se presentan las soluciones particulares de segundo orden a esta teoría.

- Ecuación de la superficie libre

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H^2}{8} \left(\frac{\pi}{\lambda} \right) \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} [2 + \cosh(k2d)] \cos[2(kx - \omega t)] \quad (\text{ec. 3.2.30})$$

- Velocidad horizontal de partículas

$$u = H \left(\frac{\pi}{T} \right) \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} H^2 \left(\frac{\pi^2}{T\lambda} \right) \frac{\cosh 2k(z+d)}{\sinh^4 kd} \cos[2(kx - \omega t)] \quad (\text{ec. 3.2.31})$$

- Velocidad vertical de partículas

$$w = H \left(\frac{\pi}{T} \right) \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} H^2 \left(\frac{\pi}{T\lambda} \right) \frac{\sinh 2k(z+d)}{\sinh^4 kd} \sin[2(kx - \omega t)]$$

(ec. 3.2.32)

- Aceleración horizontal de partículas

$$\dot{u} = H \left(\frac{2\pi^2}{T^2} \right) \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) + 3H^2 \left(\frac{\pi^3}{T^2\lambda} \right) \frac{\cosh 2k(z+d)}{\sinh^4 kd} \sin[2(kx - \omega t)]$$

(ec. 3.2.33)

- Aceleración vertical de partículas

$$\dot{w} = H \left(\frac{2\pi^2}{T^2} \right) \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) + 3H^2 \left(\frac{\pi^3}{T^2\lambda} \right) \frac{\sinh 2k(z+d)}{\sinh^4 kd} \cos[2(kx - \omega t)]$$

(ec. 3.2.34)

- Presión dinámica

$$p = \frac{H}{2} (\rho g) \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} H^2 \left(\frac{\rho g \pi}{\lambda} \right) \left[\frac{1}{\sinh 2kd} \right] \left[\frac{\cosh 2k(z+d)}{\sinh^2 kd} - \frac{1}{3} \right] \cos[2(kx - \omega t)]$$

(ec. 3.2.35)

- Celeridad de la ola

$$c = \left[\frac{g}{k} \tanh kd \right]^{1/2}$$

(ec. 3.2.36)

Expresiones de orden superior de la teoría de Stokes son simplemente aquellas en donde las aproximaciones para efectos correctivos se hacen en los términos potenciales. Básicamente, la teoría de Stokes, si se lleva a un orden lo suficientemente alto, debe adecuarse para describir olas en cualquier profundidad de agua. En la práctica, esta solo se utiliza en aguas profundas, ya que en aguas bajas los términos correctivos se vuelven muy largos e imprácticos para lograr un grado de precisión adecuado.

b.4) Teoría de la onda solitaria

La teoría de la onda solitaria es apropiada para olas permanentes con elevación fija y longitud infinita propagándose en un fluido en aguas quietas a profundidad uniforme. Esto significa que se puede utilizar para aguas bajas donde la elevación de ola es finita y la profundidad relativa H/d se mantiene constante. La onda solitaria no es ya una onda de oscilación sino una de traslación de una masa de agua.

Las condiciones a satisfacerse son aquellas de continuidad definidas por las ecuaciones de teoría lineal (3.2.10b) y la de fluido perfecto (3.2.10 a); con el potencial de velocidad definido por

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \qquad w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \qquad (\text{ec. 3.2.37})$$

las cuales nos llevan a la ecuación de Laplace

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \qquad (\text{ec. 3.2.38})$$

La condición de frontera en la superficie libre es

$$(u - c) \frac{\partial p}{\partial x} + w \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \qquad (\text{ec. 3.2.39})$$

Considerando que

$$p(x, n, t) = p_a \qquad (\text{ec. 3.2.40})$$

debe satisfacer la siguiente ecuación de Bernoulli

$$\frac{p}{\rho} - uc + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz = cte \qquad (\text{ec. 3.2.41})$$

Si la partícula que se mueve a través del eje horizontal se denota por ξ , donde $\xi=x-ct$, entonces la función potencial ϕ , la elevación de la superficie del agua η , y la velocidad vertical de la partícula deben tender a desaparecer para grandes ξ . Para estas condiciones, y conociendo que la relación H/d es menos de 0.7, se extiende la siguiente solución para ϕ y η .

$$\phi = -cd \frac{N}{M} \left[\frac{\sinh M(\xi/d)}{\cos M(1+z/d) + \cosh M(\xi/d)} \right] \quad (\text{ec. 3.2.42})$$

$$\eta = H \left[\operatorname{sech} \sqrt{\frac{3H}{4(d+H)}} \frac{\xi}{d} \right]^2 \quad (\text{ec. 3.2.43})$$

Donde M y N son parámetros dimensionales dados por

$$N = \frac{2}{3} \sin^2 \left[M \left(1 + \frac{2}{3} \frac{H}{d} \right) \right] \quad (\text{ec. 3.2.44})$$

$$\frac{H}{d} = \frac{N}{H} \tan \left[\frac{1}{2} M \left(1 + \frac{H}{d} \right) \right] \quad (\text{ec. 3.2.45})$$

Los componentes de velocidad de la partícula se obtienen directamente de la ecuación (3.2.42) utilizando las ecuaciones (3.2.37). Se observa que para olas sinusoidales η es periódico y cambia de signo, mientras que para la ola solitaria η es siempre positiva.

Para esta teoría se proporcionan las siguientes fórmulas adicionales:

- Energía del oleaje

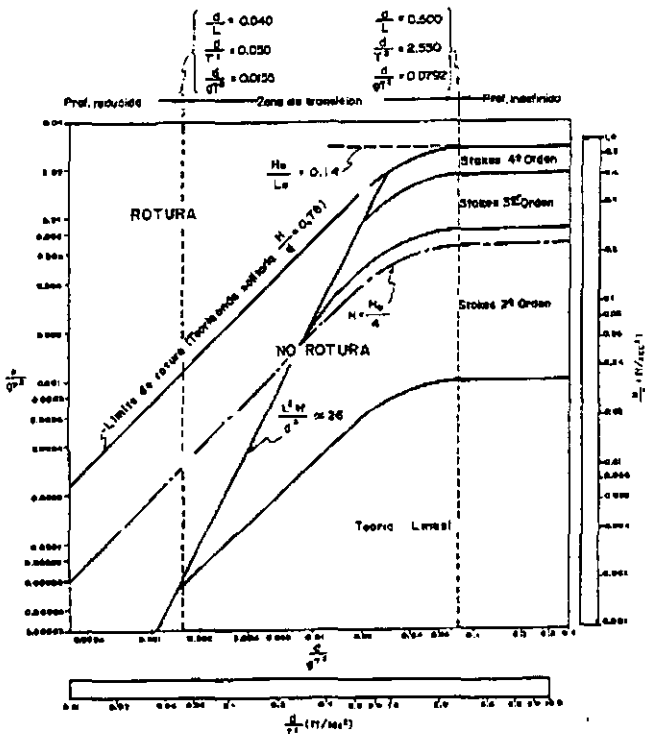
$$E = \frac{8}{3\sqrt{3}} \rho g H^{3/2} d^3 \quad (\text{ec. 3.2.46})$$

- Celeridad de la ola

$$c = \sqrt{g(H+d)} \quad (\text{ec. 3.2.47})$$

c) Validez de las teorías

Dean y LeMehaute han estudiado el problema de para que zonas marinas son válidas cada una de las teorías proporcionando unas gráficas. Dean nos muestra en su gráfica una relación entre la teoría de Airy, la Cnoidal y una teoría matemática. Por su parte Le Mehaute nos muestra casi la totalidad de las teorías con sus rangos de validez. Para entrar en estas gráficas se debe conocer la altura de ola H , su periodo T y la profundidad d . La gráfica de Le Mehaute es particularmente útil durante los procedimientos preliminares de un proyecto de ingeniería debido a que nos indica la posibilidad de teorías a emplear para solucionar los problemas de la manera más simple.

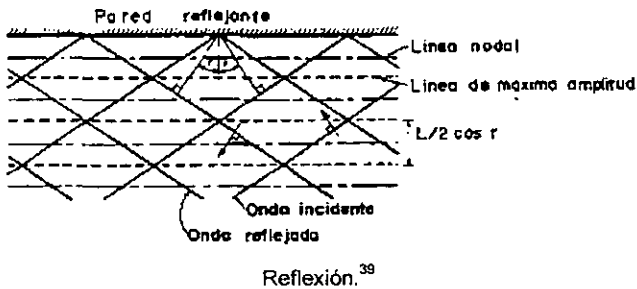


Validez de las teorías de oleaje según Mehaute.³⁸

³⁸ Idem 15.

3.2.1.2 Reflexión

Es de gran interés el poder describir el fenómeno que se da al reflejarse el oleaje, el cual ocasiona pérdidas de energía debido a la carga que puede representar para estructuras como los jackets en las plataformas petroleras. El fenómeno de reflexión se da debido a la presencia de objetos en la trayectoria del oleaje. La energía que contiene este oleaje puede disiparse, transmitirse o reflejarse en dirección distinta a la de incidencia. Aunque para su estudio estos fenómenos se pueden separar, en la realidad se presentan de manera conjunta dificultando de esta manera su comprensión. El caso más general de reflexión, se puede representar mediante la incidencia de una onda monocromática frente a una pared vertical recta. Como se muestra en la siguiente figura:



La ola incide a la pared con un ángulo α_i , el cual al ser reflejada saldrá con un ángulo α_r . Estos dos ángulos de acuerdo con la teoría lineal serán muy semejantes. La unión de las sucesivas crestas y senos ocasionan una agitación en rombos en donde las diagonales son las líneas de máxima amplitud. Por otro lado si el ángulo de incidencia es mayor a 45° , se formarán en las cercanías de la pared una onda que se mueve en un eje paralelo a ésta, y que recibe el nombre de reflexión match.

³⁹ Idem 15.

El estudio de este fenómeno se basa en general en dos casos: la reflexión en muros verticales y la reflexión en playas. Además se centra en el uso de un parámetro que llamaremos índice de reflexión χ , el cual corresponde al cociente de la ola incidente entre la reflejada. Para el primer caso el cual es de nuestro interés para las obras aguas afuera, se considera que el muro es liso e impermeable obviando la energía disipada por rugosidad y precolación. Con esto obtenemos que el índice de reflexión χ tiende a uno. Esto equivale a que el oleaje incidente sea el mismo al oleaje reflejado. Así mismo de acuerdo a la experiencia se ha observado que este índice disminuye conforme aumenta el peralte de la onda y según se va inclinando el talud del muro.

Considerando la teoría lineal se puede deducir el perfil de la onda que se produce en las inmediaciones de la pared vertical, u onda estacionaria. Esta onda tendrá la siguiente ecuación:

$$\eta = H_i \cos \frac{2\pi x}{L} \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (\text{ec. 3.2.48})$$

la cual es la resultante de igualar la fórmula de la onda incidente

$$\eta_i = \frac{H_i}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (\text{ec. 3.2.49})$$

y la onda reflejada.

$$\eta_r = \frac{H_r}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (\text{ec. 3.2.50})$$

3.2.2 Manejo de la información

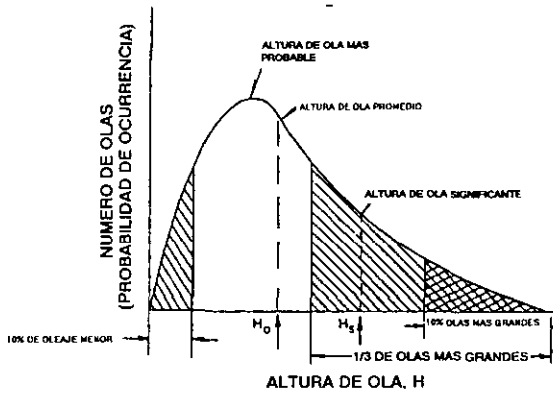
Se ha estudiado al oleaje regular bajo un punto de vista clásico determinista donde el análisis se basa en fluidos no viscosos e hidromecánicos aplicado a superficies de olas idealizadas o con longitud finita. A continuación se describirán las características de olas irregulares en un sentido estadístico basado en la experimentación de las alturas de olas superficiales.

En la vida real, se presentan trenes de oleaje los cuales tienen distintos períodos y alturas de ola. De esta manera, el período y altura de ola toman nuevo significado como maneras de describir la forma de las olas. Debido a la gran cantidad de datos recopilados que serían necesarios para mostrar una representación real del oleaje, se requiere un procedimiento para condensar esta información y hacerla más manejable.

Los modelos matemáticos utilizados para representar la superficie del mar se deben acercar a la realidad del oleaje tanto como sea posible. En la práctica, existen dos maneras de lograr esto. Una de ellas es de una manera puramente determinística ajustando un número suficiente de datos de trenes de oleaje a una serie armónica o de Fourier. La otra forma es describir estos datos mediante el uso de un espectro.

La irregularidad del mar se puede describir de forma abreviada por dos parámetros, la altura y el período de ola significativa. La altura de ola significativa H_s o $H_{1/3}$ se obtiene del promedio aritmético de las olas que comprenden el tercio mayor de un registro de oleaje. Por otro lado se presenta al período significativo T_s o $T_{1/3}$ el cual es el promedio de los períodos correspondientes a estas olas del tercio mayor del registro de oleaje.

Se ha observado que la altura de las olas sigue una distribución estadística que se acerca a la distribución estudiada en 1880 por Rayleigh. Ésta es una distribución de probabilidad sesgada en el sentido positivo. La curva correspondiente teórica fue definida por Putz y Barber ajustándola a los datos obtenidos de medidas oceanográficas. El área debajo de la curva representa el número total de olas en un registro de cierta longitud. La ordenada en el centroide de la totalidad del área define el promedio de altura, H_o , el cual se observa que ocurre menos veces que la altura de ola más probable. Esto se puede observar en la siguiente figura:



Distribución Rayleigh de altura de olas.⁴⁰

Basándose en la distribución de Rayleigh, la altura de ola promedio, H_o , la altura de ola significativa, H_s , y el décimo de altura de olas máximas, $H_{1/10}$, se aproximan a:

$$H_o = 0.89 \sqrt{H_{rms}} \quad (\text{ec. 3.2.51})$$

$$H_s = 1.41 \sqrt{H_{rms}} \quad (\text{ec. 3.2.52})$$

$$H_{1/10} = 1.80 \sqrt{H_{rms}} \quad (\text{ec. 3.2.53})$$

donde H_{rms} es un parámetro de la distribución, llamado raíz media cuadrática de la altura definido por:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad (\text{ec. 3.2.54})$$

N es el número total de olas en el registro

Igualmente, de acuerdo a esta distribución estadística, la probabilidad de que una altura de ola H sea más que cualquier valor arbitrario H es:

$$P(H > H) = e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (\text{ec. 3.2.55})$$

De estas ecuaciones se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$H_o = 0.625H_s \quad (\text{ec. 3.2.56})$$

$$H_{1/10} = 1.27H_s \quad (\text{ec. 3.2.57})$$

A continuación se incluye una tabla con los resultados de relaciones entre las alturas de olas.

Autor	Año	Fuente de referencia	H_s/H_o	$H_{1/10}/H_s$	H_{\max}/H_s
Munk	1944	Datos de campo	1.53	-	-
Seiwell	1949	Datos de campo	1.57	-	-
Wiegel	1949	Datos de campo	-	1.29	1.87
Barber	1950	Teoría	1.61	-	1.50
Putz	1950	Datos de campo	1.63	-	-
Longuet-Higgins	1952	Teoría	1.60	1.27	1.77
Autor	Año	Fuente de referencia	H_s/H_o	$H_{1/10}/H_s$	H_{\max}/H_s
Putz	1952	Teoría	1.57	1.29	1.80
Darbyshire	1952	Datos de campo	1.60	-	1.50
Hamada et al.	1953	Experimental	1.35		

Es conocido que el valor máximo probable de altura de ola dependerá de la duración de la tormenta o del tamaño del registro de oleaje. La siguiente relación se utiliza para obtener un valor aproximado de esta altura máxima:

$$H_{\max} = 0.707H_s \ln N \quad (\text{ec. 3.2.58})$$

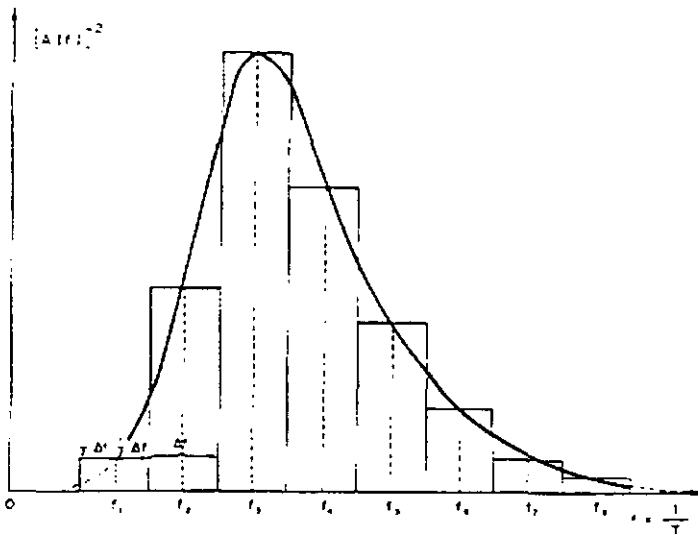
donde N es el número total de olas en el registro. Cuando N no es conocido, una aproximación razonable se da por

$$H_{\max} = 1.77H_s \quad (\text{ec. 3.2.59})$$

⁴⁰ Idem 32.

3.2.2.1 Análisis espectral del oleaje

El espectro de oleaje es básico para el estudio de oleaje en períodos cortos de tiempo debido a que facilita la descripción espectral y estadística del mismo. Pierson, Neuman y James dijeron que se representaría cada uno de los componentes del oleaje por una onda de Airy, los cuales serían agrupados con relación a las frecuencias medias f_i distribuidas uniformemente en $f_i \pm \Delta f_i$ en donde $f = 1/T$. Con esto se obtiene una distribución escalonada con un número infinito de componentes. Si se asocia a cada rectángulo de lado Δf con una ordenada un área proporcional a $|A(f_i)|^2$, donde $A(f)$ es la altura de onda de la componente de frecuencia media, se tiene una aproximación escalonada a la función $A^2(f)$, en la cual si se hace tender a cero Δf , resultará en una curva continua que representa la función espectral del oleaje.



Función espectral del oleaje.⁴¹

⁴¹ Idem 28.

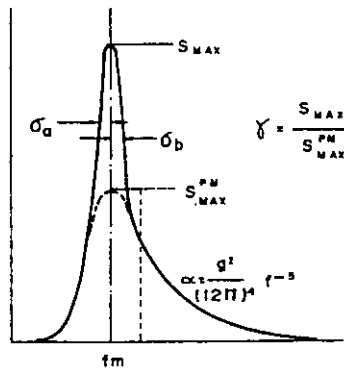
Esta área encerrada por la curva descrita se dice que es proporcional a la energía, por lo que a este espectro se le conoce también como espectro de energía designado por $S(f)$.

Desde su descubrimiento, se han propuesto una gran cantidad de espectros de oleaje, como el propuesto por Neumann en 1952, el de Pierson, Moskowitz, Kitaigorodski (PMK) en 1964 y el de JONSWAP en 1973 el cual es el de mayor aplicación en la actualidad.

a) Espectro JONSWAP

Su expresión general es la siguiente:

$$S_J(f) = \alpha \cdot g^2 \cdot (2\pi)^{-4} \cdot f^{-5} \cdot e^{\left[\frac{-5}{4} \left(\frac{f}{f_m} \right)^4 \right]} \cdot \gamma e^{-\frac{(f-f_m)^2}{2\sigma^2 f_m^2}} \quad (\text{ec. 3.2.60})$$



Definición de los espectros.⁴²

Con: $\sigma = \sigma_a = \text{cte. Para } f \leq f_m$

$\sigma = \sigma_b = \text{cte. Para } f > f_m$

f_m es la frecuencia del máximo del espectro

⁴² Idem 15.

Además, los autores obtuvieron las siguientes relaciones que nos permiten definir este espectro con base en el fetch y la velocidad del viento:

$$\alpha = 0.076x^{-0.22} \quad (\text{ec. 3.2.61})$$

$$f_m = 3.5x^{-0.33} \quad (\text{ec. 3.2.62})$$

$$\bar{x} = g \frac{x}{U_{10}^2} \quad (\text{ec. 3.2.63})$$

donde x es el fetch U10 es la velocidad del viento a una altura de 10 m sobre el nivel del mar.

Una vez conocido S(f) se puede conocer la variación de la energía y la altura de ola significativa mediante las siguientes ecuaciones, con lo cual quedaría resuelto el problema:

$$E(f) = 2 \int_0^{\infty} S(f) df \quad (\text{ec. 3.2.64})$$

$$H_s = 2.832 \sqrt{E} \quad (\text{ec. 3.2.65})$$

El problema entonces se convierte en obtener las mediciones in situ del oleaje con ayuda de monoboyas para poder definir nuestro espectro característico del fenómeno.

3.2.2.2 Métodos de previsión de oleaje

El método más utilizado para previsión de oleaje es el propuesto por Sverdrup, Munk y Bretschneider que recibe el nombre de las siglas de estos científicos (SMB). Este método relaciona la altura de ola significativa y el periodo significativo, con el fetch, velocidad y duración del viento. Las ecuaciones que lo definen son las siguientes:

$$\frac{gH}{U^2} = 0.283 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.42} \right] \quad (\text{ec. 3.2.66})$$

$$\frac{gT}{2\pi U} = 1.20 \tanh \left[0.077 \left(\frac{gF}{U^2} \right)^{0.25} \right] \quad (\text{ec. 3.2.67})$$

$$\frac{g^t}{U} = 6.5882 \exp \left\{ \left[0.0161 \left(\ln \frac{gF}{U^2} \right) - 0.3692 \ln \frac{gF}{U^2} + 2.2024 \right]^{0.5} + 0.8798 \ln \frac{gF}{U^2} \right\} \quad (\text{ec. 3.2.68})$$

donde F es el Fetch
 U es la velocidad del viento
 H es la altura de ola
 T es el periodo de ola
 t es la duración del viento

Una versión reducida de estas fórmulas es la propuesta por Bretschneider:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.00224 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.5} \quad (\text{ec. 3.2.69})$$

3.2.2.3 Régimen de temporales

Una vez definidas la manera en que se prevé el oleaje, se debe considerar para el diseño de estructuras marítimas el comportamiento de las estructuras bajo un régimen de temporal en el cual se observarán los valores extremos de alturas de olas. Para su estudio, será necesario el establecer una función extremal que indicará la probabilidad de que un valor considerado de altura de ola ligada a un temporal no sea excedido en un período de tiempo determinado. Esta función ayudará a fijar las alturas de ola de proyecto con base en los períodos de repetición de los temporales. El régimen de temporal proporciona una distribución probabilística de los temporales siempre considerando el riesgo que se presenta por lo mismo. Este riesgo será manejado por el proyectista.

El cálculo del régimen de temporales para una zona de previsión determinada se puede enfocar de distintas formas considerando la calidad y tipo de datos con que se cuenta. En general estos métodos se pueden agrupar en dos: uso de una distribución probabilística conocida para el tratamiento de valores extremos anuales o la aplicación de la ecuación extremal a partir del régimen de oleaje y del número de extremos. Estos dos casos se tratarán a continuación.

a) Ajuste a una ley probabilística

En este procedimiento, se cuenta con los datos obtenidos de las cartas meteorológicas por el método de S.M.B. o con los obtenidos mediante mediciones directas con boyas o sensores de oleaje. Con estos datos, se aplica la siguiente metodología:

- 1) Obtener para cada año meteorológico el temporal máximo tanteando entre los 3 o 4 temporales de mayor energía.
- 2) Repetir este proceso para $n > 20$ años.
- 3) Ordenar de menor a mayor cada uno de los valores de $H_{1/3}$ obtenidos de los n años procesados dándoles a cada uno un número de orden.
- 4) Obtener la ley probabilística que se ajuste a este fenómeno mediante la aplicación de la ley de Gumbel dada por:

$$p = e^{-e^{-\alpha(H_{1/3} - \mu)}} \quad (\text{ec. 3.2.70})$$

donde α es la intensidad extremal
 μ es el máximo característico

Si se opera con la variable reducida, se puede ajustar a una recta esta probabilidad, quedando definida por

$$y = \alpha(H_{1/3} - \mu) \quad (\text{ec. 3.2.71})$$

la cual al graficarla nos muestra la ley de probabilidad.

Gumbel dice que para muestras infinitas

$$\alpha = \frac{1.28255}{\sigma_{H1/3}} \quad (\text{ec. 3.2.72})$$

$$\mu = -0.45\sigma_{H1/3} \quad (\text{ec. 3.2.73})$$

Para muestras finitas, el propone las siguientes dos ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\sigma_N}{\sigma_{H1/3}} \quad (\text{ec. 3.2.74})$$

$$\mu = \mu_{H1/3} - \sigma_{H1/3} \frac{\mu_N}{\sigma_N} \quad (\text{ec. 3.2.75})$$

donde $\sigma_{H1/3} = \sqrt{\frac{\sum (H_{1/3} - \mu_{H1/3})^2}{n}}$ es la desviación estándar

$$\mu_{H1/3} = \frac{\sum H_{1/3}}{n}$$

y μ_N y σ_N están dadas por la siguiente tabla

N	μ_N	σ_N
20	0.52	1.06
30	0.54	1.11
40	0.54	1.14
	0.67	1.28

b) Función extremal $\phi(Hs)$

Este método parte de que se conoce el régimen de oleaje $F(Hs)$ y el número de excedencias por año en los estados del mar $n(Hs)$ con el cual procederíamos a obtener la función extremal con la siguiente fórmula:

$$\phi(Hs) = [F(Hs)]^{n(Hs)} \quad (\text{ec. 3.2.76})$$

Para obtener el régimen de oleaje se recurre al método de Sea and Swell que consiste en que a partir de observaciones visuales puntuales obtenidas en la

zona de oleaje, se recopila la información de acuerdo a la dirección de donde proviene el oleaje determinando una rosa de oleaje y la altura de ola dividida en intervalos. Además se indican los porcentajes referidos al tiempo total en que se presentan alturas de ola significantes comprendidas en estos intervalos, así como los porcentajes referidos al tiempo total anual.

Además, de la curva de estados del mar se obtiene el número de posibles excedencias por año $n(H_s)$; siendo éste el cociente entre el tiempo total del año y el tiempo medio de la excedencia a ese nivel. El tiempo medio de la excedencia es el promedio aritmético de las excedencias de la curva de estados.

Una de las ventajas de este método es que el poder calcular el régimen extremal con un solo año de evolución de H_s , además de que tiene mayor poder resolutivo que el método anteriormente expuesto.

3.2.3 Criterios de diseño

El diseño de estructuras marítimas se basa en la consideración de la acción de una ola sencilla de diseño. Esta ola es definida por su altura y período obtenido de cualquier teoría de oleaje antes definida. También es necesario calcular la presión, velocidad y aceleración de la misma. Después de obtener estos parámetros que describen a la ola, es preciso definir el régimen de flujo de agua que se presenta; para esto se utiliza el número de Reynolds Re y el de Keulegan-Carpenter K_c . El primero lo relacionamos con la viscosidad del fluido mientras que el segundo se relaciona con la fuerza que actúa sobre el cilindro. Estos dos parámetros se calculan con las siguientes fórmulas:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (\text{ec. 3.2.77})$$

$$K_c = \frac{u_o T}{D} \quad (\text{ec. 3.2.78})$$

donde μ la viscosidad absoluta del fluido
 T el período
 D el diámetro de un cilindro por donde pasa el flujo
 ρ la densidad del fluido
 u la velocidad del fluido
 u_0 la amplitud de la velocidad de la ola

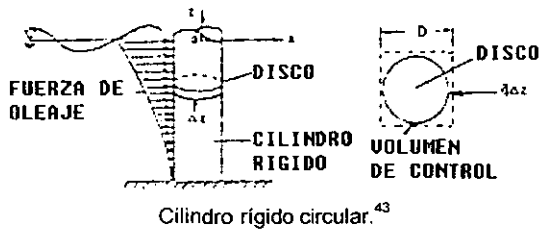
Una vez definidos estos parámetros, podemos empezar por describir las fuerzas que actúan sobre una estructura para después entender los fenómenos que se dan para el diseño.

3.2.3.1 Momento lineal de un fluido

Para obtener el momento lineal de un fluido nos basamos en la segunda ley de Newton aplicada a un fluido que diremos que está ocupando un volumen controlado v en cualquier instante del tiempo el cual queda representado por pequeños rectángulos imaginarios que rodean a nuestra estructura; para facilitar la comprensión se tomará un cilindro. Este volumen será calculado por la fórmula:

$$v = D^2 \Delta z \quad (\text{ec. 3.2.79})$$

donde D es el diámetro del cilindro
 Δz es su altura



⁴³ Idem 32.

Considerando un movimiento como se muestra en la figura de arriba y que el agua tiene una densidad ρ y una velocidad horizontal u , el esfuerzo horizontal neto en el disco se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$\sum F_x = \frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dV + \int_{A_o} \rho u \cdot u dA_o \quad (\text{ec. 3.2.80})$$

Para resolver esta fórmula consideramos que $\sum F_x = -q \Delta z$ donde q es la carga unitaria y el signo negativo se debe a que el esfuerzo se interpone al fluido. La primera integral es aproximadamente igual a lo que se muestra a continuación considerando que el fluido se desacelera por el objeto contra el que choca:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \rho u dV \approx -\rho D^2 \Delta z \dot{u} \quad (\text{ec. 3.2.81})$$

La segunda integral se resuelve de la siguiente manera:

$$\int_{\text{neto}} \rho u \cdot u dA_o = \int_{\text{fuera}} \rho u \cdot u dA_o - \int_{\text{dentro}} \rho u \cdot u dA_o = 0 - \rho u \cdot u \cdot D \cdot \Delta z \quad (\text{ec. 3.2.82})$$

Si sustituimos y simplificamos estas dos ecuaciones en la ecuación principal, obtenemos:

$$q \approx \rho D^2 \dot{u} + \rho D u \cdot |u| \quad (\text{ec. 3.2.83})$$

Para obtener la igualdad, se le implementan dos coeficientes a esta fórmula. El denominado C_D o coeficiente de arrastre al segundo sumando y el coeficiente de inercia C_M al primero. Los valores de estos coeficientes quedan dentro del intervalo de 0.4 a 2.0.

$$q = C_M \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{u} + \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| \quad (\text{ec. 3.2.84})$$

3.2.3.2 Acción del oleaje en cilindros flexibles

Si se considera un cilindro flexible con velocidad v y aceleración \dot{v} horizontal tal que supere a las velocidades y aceleraciones del oleaje tendremos que la ecuación 3.2.84 tendrá que verse modificada cambiando la velocidad u por la velocidad relativa $u - v$ y reemplazando \dot{u} por $\dot{u} - \dot{v}$. Si además intentamos representar la influencia de la longitud de ola Berge y Penzien definen la ecuación como sigue:

$$\dot{q} = C_{M1} \frac{\pi}{4} \rho D^2 \dot{u} + C_{M2} \frac{\pi}{4} \rho D^2 (\dot{u} - \dot{v}) + \frac{1}{2} C_D \rho D (u - v) |u - v| \quad (\text{ec. 3.2.85})$$

Los coeficientes de esta ecuación se obtienen de la siguiente manera:

$$C_M = C_{M1} + C_{M2} \quad (\text{ec. 3.2.86})$$

$$C_{M1} = 1.0 - 0.12 \frac{\pi D}{\lambda} \quad (\text{ec. 3.2.87})$$

$$C_{M2} = \quad (\text{ec. 3.2.88})$$

$$1.0 \quad \text{para} \quad \frac{\pi D}{\lambda} < 0.5$$

$$1.54 - 1.08 \frac{\pi D}{\lambda} \quad \text{para} \quad \frac{\pi D}{\lambda} > 0.5$$

3.2.3.3 Clasificación de los regímenes de cargas debidas a fluidos

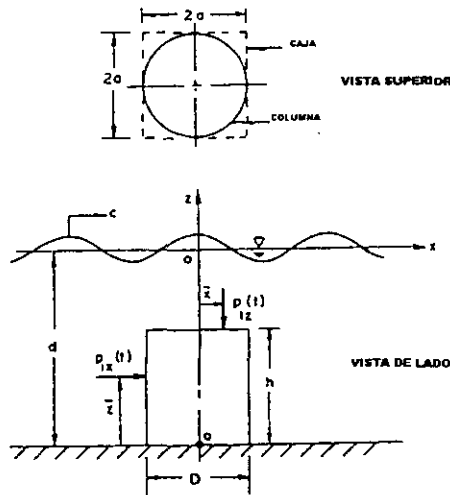
Hogben establece que "existen tres tipos de cargas en las estructuras: debidas al arrastre, a la inercia o a la difracción. La importancia relativa de estas en un caso particular depende del tipo y tamaño de la estructura y de la naturaleza de las condiciones de ola. En general se puede decir que las cargas de arrastre son resultado de la separación del fluido inducido por la velocidad relativa del mismo y son mucho más significantes para componentes tubulares de pequeños diámetros en olas de gran altura.

Las cargas de inercia se deben a gradientes de presión asociados con la aceleración relativa del ambiente fluido y son más significantes para componentes estructurales de grandes dimensiones seccionales. Las fuerzas de difracción se deben a la dispersión de olas en la estructura y solamente son significantes cuando las dimensiones de la sección son una fracción sustancial de la longitud de ola.⁴⁴

De acuerdo a esto, los regímenes de flujo se pueden dividir de acuerdo al diámetro del cilindro, altura y longitud de ola según los siguientes criterios:

1. Arrastre para $D/H < 0.1$.
2. Inercia para $0.5 \leq D/H \leq 1.0$
3. Difracción para $D/\lambda > 0.2$

Si consideramos la siguiente figura:



⁴⁴ Idem 32.

La fuerza horizontal, vertical y momento de volteo en una columna o cilindro sumergido queda definido por las siguientes ecuaciones:

$$p_{1x}(t) = C_h F_{kx} \quad (\text{ec. 3.2.89})$$

$$p_{1z}(t) = C_v F_{kz} \quad (\text{ec. 3.2.90})$$

$$M_o(t) = C_o \cdot (zF_{kx} + xF_{kz}) = C_o M_k \quad (\text{ec. 3.2.91})$$

Las fuerzas verticales y horizontales también reciben el nombre de fuerzas Froude-Krylov y son las originadas por la presión hidrodinámica en los centros de las secciones vertical y horizontal respectivamente de la estructura sumergida. Los coeficientes introducidos en esta ecuación se obtienen de las siguientes ecuaciones propuestas por Hogben y Standing:

$$C_h = 1 + 0.75 \left(\frac{h}{D} \right)^{1/3} \left[1 - 0.3 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (\text{ec. 3.2.92a})$$

$$C_v = 1 + 0.74 \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{h}{D} \right) \text{ para } \frac{\pi h}{\lambda} < 1 \quad (\text{ec. 3.2.92b})$$

$$C_v = 1 + \frac{\pi D}{2\lambda} \text{ para } \frac{\pi h}{\lambda} > 1 \quad (\text{ec. 3.2.92c})$$

$$C_o = 1.9 - 0.35 \frac{\pi D}{\lambda} \quad (\text{ec. 3.2.92d})$$

las cuales funcionan bajo los siguientes rangos:

$$h/D < 0.6 \text{ para } C_h, C_v \text{ y } C_o \quad (\text{ec. 3.2.93a})$$

$$0.3 < h/D < 2.3 \text{ para } C_h \text{ y } C_v \quad (\text{ec. 3.2.93b})$$

$$0.6 < h/D < 2.3 \text{ para } C_o \quad (\text{ec. 3.2.93c})$$

Finalmente es importante decir que Hogben y Standing encontraron que las fuerzas y momentos de difracción total son prácticamente independientes de la forma de la planta estructural. También Hogben nos dice que para torres de concreto que soportan a plataformas el cálculo se centrará fundamentalmente en las fuerzas de inercia, mientras que para plataformas jacket y tubos conductores, dominará la fuerza de arrastre por su pequeño diámetro.

3.3 Mareas

Se define a marea como el ascenso y descenso periódicos de todas las aguas oceánicas, incluyendo las del mar abierto, los golfos y las bahías, resultado de la atracción gravitatoria de la Luna y del Sol sobre el agua y la propia Tierra. Su intensidad está en relación directa con las posiciones relativas que el Sol y la Luna tienen respecto a la Tierra. De esta manera, de acuerdo a los astros que las originan, las mareas se dividen en: mareas lunares y mareas solares.

a) Mareas lunares

La Luna, al estar mucho más cerca de la Tierra que el Sol, es la causa principal de las mareas. Cuando la Luna está justo encima de un punto dado de la superficie terrestre, ejerce una fuerza de atracción del agua, que, por lo tanto, se eleva sobre su nivel normal. El agua que cubre la porción de Tierra más lejana de la Luna también está sometida a atracción; se forma así otra elevación que proporciona el fundamento de una segunda onda. La cresta de onda situada bajo la Luna se llama marea directa, y la del lado diametralmente opuesto de la Tierra se llama marea opuesta. En ambas crestas, prevalece la condición conocida como de marea alta o pleamar, mientras que a lo largo de la circunferencia formada por las zonas perpendiculares al eje de mareas directa y opuesta se producen fases de marea baja o bajamar.

Las mareas alta y baja se alternan en un ciclo continuo. Las variaciones producidas de forma natural entre los niveles de marea alta y baja se denominan amplitud de la marea. En la mayoría de las costas del mundo se producen dos mareas altas y dos bajas cada día lunar, siendo la duración media de un día lunar 24 h, 50 min y 28 s. Una de las mareas altas está provocada por la cresta de marea directa y la otra por la cresta de marea opuesta.

En general, dos mareas altas o bajas sucesivas tienen casi la misma altura. Sin embargo, en algunos lugares fuera del océano Atlántico estas alturas varían de forma considerable; este fenómeno, conocido como desigualdad diurna, todavía no se comprende bien en la actualidad.

b) Mareas solares

Asimismo, el Sol provoca el ascenso de dos crestas de onda opuestas, pero como el Sol está más alejado de la Tierra, su fuerza para crear mareas es un 46% menor que la Luna. El resultado de la suma de las fuerzas ejercidas por la Luna y el Sol es una onda compuesta por dos crestas, cuya posición depende de las posiciones relativas del Sol y de la Luna en un instante dado. Durante los periodos de Luna nueva y llena, cuando el Sol, la Luna y la Tierra están alineadas, las ondas solar y lunar coinciden. Resulta un estado conocido como mareas vivas; en ellas las mareas altas ascienden más y las mareas bajas descienden más de lo habitual. Cuando la Luna está en el primer o tercer cuadrante, el Sol forma un ángulo recto con respecto a la Tierra y las ondas quedan sometidas a fuerzas opuestas del Sol y de la Luna. Este estado es el de marea muerta: la marea alta es más baja y la baja más alta de lo normal. Las mareas vivas y muerta se producen 60 h después de las fases correspondientes de la Luna; este periodo se llama edad de la marea o de la fase de desigualdad. El intervalo entre el instante en que la Luna cruza un meridiano en un punto y cuando la siguiente marea alta llega a ese punto se llama intervalo Luna-marea, o de marea alta. El intervalo de marea baja es el periodo entre el instante en que la Luna cruza un meridiano y cuando llega la siguiente marea baja. Los valores medios entre los intervalos Luna-marea durante los periodos de Luna nueva y llena se conocen como establecimiento de puerto. Los valores de los intervalos durante otros periodos del mes se denominan, a veces, establecimientos corregidos.⁴⁵

⁴⁵ Enciclopedia Encarta.

c) Tipos de mareas según su ciclo

De acuerdo al número de pleamares y bajamares que tienen en su período, las mareas se pueden dividir en tres: diurnas, semidiurnas y mixtas.

- Diurnas: Tiene un pleamar y un bajamar por ciclo, en un período de 24 horas.
- Semidiruna: Tiene dos pleamares y dos bajamares durante dos sucesivos ciclos con período de 12 hr y 25 min cada uno donde las amplitudes de ambas son sensiblemente semejantes.
- Mixta: Tienen dos pleamares y dos bajamares durante dos ciclos sucesivos, con período de 12 hr y 25 min cada uno donde las amplitudes de ambas presentan diferencias notorias.

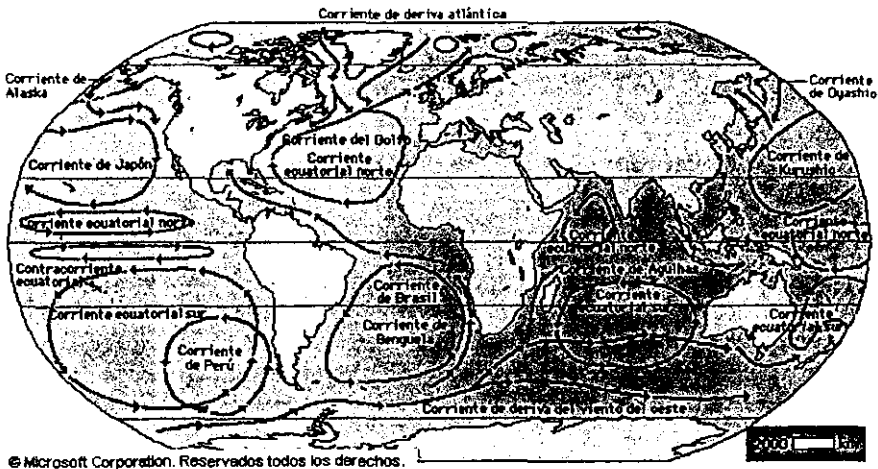
La diferencia en altura entre los niveles de dos pleamares o bajamares sucesivos definen la desigualdad diaria en las mareas mixtas y semidiurnas.

3.4 Corrientes

Las corrientes son movimientos, generalmente no periódicos, de masas de agua de mar que se pueden dar en distintas capas a distintas profundidades o entre ellas. Éstas son generadas por diversas acciones como el viento sobre la superficie del agua, las diferencias en densidades de la masa líquida, la sobre elevación del nivel medio debido a mareas y la topografía de la costa entre otras. Los parámetros que definen a las mareas son la dirección y la velocidad diaria. De acuerdo a su proceso de generación, se pueden clasificar en: corrientes generales, corrientes locales inducidas por el viento, corrientes inducidas por el oleaje y corrientes de marea.

a) Corrientes generales

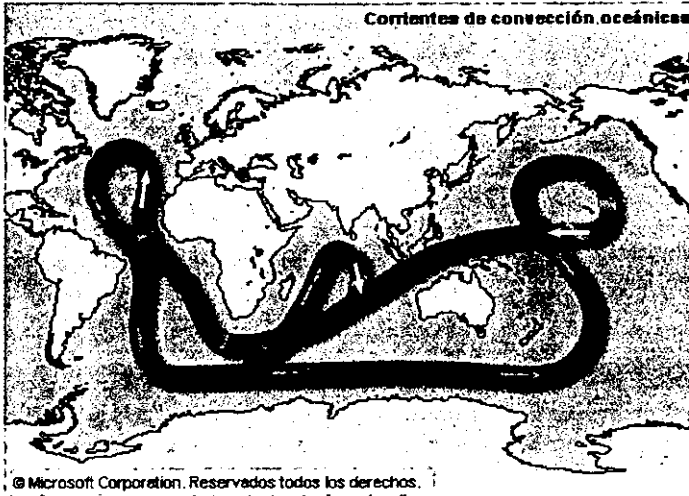
Son las que tienen su origen en la acción de los vientos permanentes en los desplazamientos de masas líquidas de diversas temperaturas. Se ha observado que el esquema de corrientes se puede adaptar al esquema de presiones sumándole algunas corrientes submarinas que se han hallado en la modernidad.



Corrientes en el mundo.⁴⁶

⁴⁶ Idem 45.

Estas muestran un movimiento general de la masa oceánica, la cual se ilustra a continuación.



Movimiento global de la masa oceánica.⁴⁷

b) Corrientes locales inducidas por el viento

El viento, al soplar sobre la superficie del mar ocasiona un esfuerzo cortante sobre el agua comunicándole de esta manera su movimiento. Las partículas que describían órbitas elípticas casi cerradas cuando el viento no actuaba, modifican su movimiento resultando una traslación causada por el impulso del viento.

Para obtener las corrientes debidas a la acción del viento, Ekman consideró la acción de un viento ideal y constante soplando sobre un plano de agua de extensión infinita. Además consideró las fuerzas de fricción y de Coriolis; llegando a la expresión siguiente válida para el hemisferio Norte:

$$V = U_0 e^{-az} \sin(45^\circ - az) \quad (\text{ec. 3.4.1})$$

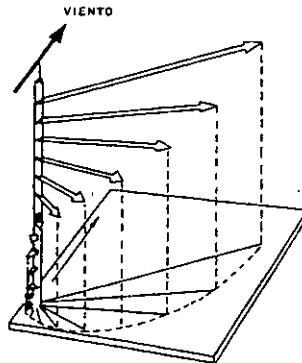
⁴⁷ Idem 45.

donde V es la velocidad de la corriente en la dirección del viento
 U_s es la velocidad absoluta de la corriente en la superficie (pie/seg)
 Z es la profundidad a la que se desea obtener la corriente

$$a = + \sqrt{\frac{\rho_w \Omega \sin \phi}{\mu_e}}$$

ρ_w es la densidad del agua
 Ω la velocidad angular terrestre $7.9 \cdot 10^{-5}$ rad/seg
 ϕ la latitud
 μ_e la viscosidad

Con esta teoría se puede comprobar que para una $z = 0$ equivalente a la superficie del agua, la dirección de la corriente varía 45° con respecto a la del viento. Y para valores de z mayores (mayor profundidad) esta variación va aumentando; llegando a ser totalmente opuesta para $z = \pi/a$. Esto se ilustra en el siguiente diagrama.



Comportamiento de las corrientes con respecto a la profundidad.⁴⁸

⁴⁸ "Ingeniería de Costas", Armando Frías y Gonzalo Moreno.

3.5 Consideraciones previas para el diseño

En este tema se hablará de todos los requerimientos operacionales y datos ambientales que afectan a las estructuras marítimas para poder obtener un diseño detallado de éstas. Se mantendrá un enfoque cualitativo sobre los fenómenos descritos anteriormente definiendo las condiciones que deberán tomarse en cuenta para el diseño de la estructura.

3.5.1 Consideraciones operativas

Existe una gran variedad de consideraciones que se deben hacer para el diseño de una estructura marítima de las cuales se mencionan brevemente las más importantes a continuación:

- a) **Función:** Es importante definir la función que tendrá la estructura para poder estudiar el equipamiento que será necesario incluir en las cubiertas.
- b) **Ubicación:** Dado que las condiciones oceanográficas y meteorológicas varían según la ubicación geográfica, también lo harán las condiciones de cimentación, al igual que la altura de ola de diseño, su período, las mareas, el suelo, etc.
- c) **Orientación:** La orientación se rige por la dirección prevaleciente del oleaje, los vientos, las corrientes y los requerimientos operativos.
- d) **Profundidad del agua:** Con el cálculo de esta se pueden establecer las elevaciones para las protecciones para el atraque de embarcaciones, las defensas, cubiertas y la protección de corrosión.

- e) Elevación de la cubierta: En el caso de plataformas, la plataforma se encuentra a una altura razonable por arriba de la cresta de oleaje de la ola de diseño para evitar el efecto de momento de volteo debido al impacto del oleaje sobre las estructuras en cubierta.
- f) Pozos: Los conductores de los pozos que estarán expuestos, generan esfuerzos sobre la plataforma por lo que deberán considerarse el número de ellos y su espaciamiento.
- g) Otros: Es también importante el conocer para el diseño de plataformas los sistemas de acceso y auxilio, la protecciones contra fuego, derrame y contaminación ambiental; la distribución del equipo, materiales y personal; así como la categorización de exposición de la estructura.

3.5.2 Consideraciones meteorológicas, oceanográficas y físicas

Su determinación contempla realizar mediciones y modelados para obtener información que debe ser analizada estadísticamente. Posteriormente se desarrollara la descripción de las condiciones ambientales normales y extremas contemplando que:

- a) Las condiciones ambientales normales son importantes durante la construcción y vida útil de la estructura.
- b) Las condiciones extremas son importantes durante la formulación de las cargas de diseño de la estructura.

Dentro de las consideraciones meteorológicas y oceanográficas se encuentran al viento, oleaje, mareas, corrientes, hielo, procesos geológicos (fallas, sismos, inestabilidad del suelo, gases atrapados en el subsuelo, etc.) y las incrustaciones marinas de las cuales hablaremos a continuación.

3.5.2.1 Viento

Las fuerzas del viento se ejercen sobre la estructura que se encuentre arriba del nivel del mar, así como en el equipo, las habitaciones y torres de perforación ubicadas sobre la plataforma. Las velocidades del viento se clasifican en rachas con duración menor a un minuto y vientos sostenidos con duraciones de un minuto o más. La información obtenida se da a la elevación estándar de 10 metros sobre el nivel medio del mar, con una duración promedio de una hora. Se realiza el estudio para condiciones normales y extremas determinando las velocidades de diseño de viento.

a) Condiciones normales

- Se obtiene la frecuencia de ocurrencia para cada velocidad de viento sostenido proveniente de varias direcciones para cada mes o temporada.
- Se describe la persistencia de vientos sostenidos sobre el umbral fijado para cada mes o estación.
- Se calcula la velocidad de rachas probables asociadas a la velocidad de vientos sostenidos.

b) Condiciones extremas

- Se ubica el lugar de la medición, la fecha de ocurrencia, la magnitud de las rachas y vientos sostenidos, así como la dirección usada para el pronóstico de huracanes.
- Se determina el período de retorno durante la vida útil de la estructura en los cuales se excedan los valores de velocidad de viento fijado como límite inferior de rachas.

3.5.2.2 Oleaje

El desarrollo de los parámetros de diseño relacionados con el oleaje se describe mediante:

- Obtener toda la información meteorológica y oceanográfica necesaria.
- Proyectar la rosa de vientos.
- Predecir los estados del mar en aguas profundas según la trayectoria de tormenta utilizando un modelo analítico.
- Definir el estado máximo posible del mar de acuerdo a las limitaciones geográficas.
- Fijar los efectos batimétricos en los estados del mar para aguas profundas.
- Utilizar las técnicas probabilísticas para predecir la ocurrencia de los estados del mar a lo largo de varios tiempos de análisis.
- Desarrollar los parámetros de diseño por oleaje de diseño a través de la evaluación de riesgos físicos y económicos.

Por otra parte, se obtiene la información de los estados del mar:

a) Condiciones normales para oleaje local y distante

- Para cada mes o temporada, la probabilidad de ocurrencia y el promedio de persistencia de los diversos estados del mar provenientes de direcciones específicas en términos de los parámetros que describen el estado general del mar.
- Las velocidades del viento, mareas y corrientes que ocurran simultáneamente dentro de los estados del mar discretos.

b) Condiciones extremas

Se pronostican las alturas de olas extremas de direcciones específicas en función de sus intervalos de recurrencia promedios; además de:

- El rango probable y distribución de los períodos de oleaje asociados a las alturas de olas extremas.
- La distribución proyectada de otras alturas de ola, elevaciones máximas de cresta, y espectros de energía de oleaje en los estados del mar que produzcan la altura de ola extrema.
- Las mareas, corrientes, y vientos que puedan ocurrir simultáneamente con los estados de mar extremos.
- La naturaleza, fecha y lugar de la condición extrema.

3.5.2.3 Mareas

Las variaciones en las elevaciones de la marea diaria astronómica ayudan a determinar las elevaciones de las defensas para barcazas, anclaje, límites superiores de incrustaciones marinas y zonas de impacto en miembros estructurales de acero.

3.5.2.4 Corrientes

Las corrientes afectan la ubicación y orientación del atraque de embarcaciones, así como las fuerzas sobre la estructura marina.

3.5.2.5 Procesos Geológicos y cambios del suelo

Se refiere a los cambios geológicos asociados a los movimientos de los sedimentos superficiales del fondo que pueden ocurrir en periodos relacionados con la vida útil de la plataforma. La naturaleza, magnitud y periodos de retorno de movimientos del suelo se evalúan con exploraciones in situ y modelados para proveer información que muestre el efecto de éstos sobre las estructuras y sus cimentaciones. Como ya se mencionó estos movimientos pueden ser fallas, sismos, inestabilidad del suelo, erosión y gases bajo la superficie.

3.5.2.6 Incrustaciones marinas

Las estructuras marinas acumulan incrustaciones de organismos marinos en su superficie. Ello es generalmente mayor cerca del nivel medio del agua, sin embargo existen zonas donde se encuentra todavía a profundidades de hasta 60 metros. Las incrustaciones marinas aumentan las fuerzas de oleaje debido al incremento del diámetro de los elementos y la mayor rugosidad.

3.5.3 Consideraciones para la cimentación

El conocimiento de las condiciones existentes del suelo en el sitio de construcción permite un diseño seguro y económico. Para esto se realizan estudios estratigráficos obteniendo la relación entre cuestiones físicas y de diseño. La investigación comienza con el reconocimiento del lugar siendo el propósito de este estudio el identificar problemas potenciales que ayuden a la planeación de los estudios estratigráficos. Además se hacen sondeos para describir cada una de las capas geológicas que componen la estratigrafía del sitio.

3.5.4 Categorías de exposición de las obras

Las estructuras se pueden clasificar en varios niveles de exposición para determinar el criterio de diseño que se utilizará en el proyecto. Los niveles se determinan de acuerdo a consideraciones de seguridad de vidas humanas y consecuencia de falla. La primera abarca la carga máxima anticipada que se podría presentar teniendo personal humano en la estructura. La segunda considera las pérdidas al dueño, a la operación y a la industria o gobierno.

3.5.4.1 Seguridad de vidas humanas

- a) Riesgo muy alto: Se ubican aquí las estructuras en donde hay personas viviendo y trabajando constantemente.
- b) Riesgo alto: Se consideran en esta categoría a las estructuras que normalmente se encuentran ocupadas por personas, a excepción de eventos meteorológicos extremos.
- c) Riesgo moderado: Se refiere a las estructuras que normalmente no se encuentran ocupadas o a aquellas que no entren en ninguna de las dos categorías anteriores.

3.5.4.2 Consecuencia de falla

La tabla mostrada indica la clasificación de acuerdo al "Criterio transitorio para la evaluación y el diseño de plataformas marinas fijas en la sonda de Campeche" ⁴⁹

⁴⁹ "Criterio transitorio para la evaluación y el diseño de plataformas marinas fijas en la sonda de Campeche" Emitido por PEMEX y el IMP.

SERVICIO	VOLUMEN DE PRODUCCIÓN MANEJADO	CATEGORÍA DE EXPOSICIÓN (CONSECUENCIA DE FALLA)	
		EVALUACIÓN	DISEÑO
ENLACE	-	MUY ALTA	MUY ALTA
MEDICIÓN	-	MUY ALTA	
COMPRESIÓN	-	ALTA	
HABITACIONAL	-	MODERADA	
INYECCIÓN	-	ALTA	
MIXTO	> 100 000 BPD	MUY ALTA	
	< 100 000 BPD	ALTA	
PERFORACIÓN	> 100 000 BPD	MUY ALTA	
	50 000 BPD - 100 000 BPD	ALTA	
	< 50 000 BPD	MODERADA	
PRODUCCIÓN TEMPORAL	> 100 000 BPD	MUY ALTA	
	< 100 000 BPD	ALTA	
PRODUCCIÓN PERMANENTE	-	MUY ALTA	
REBOMBEO	-	MUY ALTA	
RECUPERACIÓN DE POZOS	50 000 BPD - 100 000 BPD	ALTA	
	< 50 000 BPD	MODERADA	
TELECOM	-	MODERADA	

Categorización de las estructuras principales.⁵⁰

⁵⁰ Idem 49.

3.6 Criterios de diseño

3.6.1 Definición de cargas

Las cargas que se involucran en el diseño así como los efectos dinámicos que estas producen son las vivas, las muertas, las meteorológicas y oceanográficas, las debidas a la construcción y las dinámicas.

a) Cargas muertas: son aquellas que no cambian según el modo de operación.

Estas incluyen:

- Peso de la estructura en el aire incluyendo el de las pilas de sustentación y el lastre cuando sea conveniente.
- Peso del equipo y estructuras permanentemente montadas.
- Fuerzas hidrostáticas actuando en la estructura bajo el nivel de agua.

b) Cargas vivas: son aquellas cargas que afectan a la estructura durante su uso y que puede cambiar durante su operación. En el caso de las plataformas se integran por:

- Peso del equipo de perforación y producción
- Peso del área habitacional, helipuerto, equipo de salvamento, equipo de buceo y equipo suplementario para maquinaria y trabajadores que pueda ser agregado o removido de la plataforma.
- Peso de refacciones, combustibles y líquidos guardados en tanques.
- Fuerzas derivadas del uso de grúas, considerando la carga levantada y su movimiento.

c) Cargas meteorológicas y oceanográficas: son las cargas debidas a los fenómenos naturales como el viento, corrientes, oleaje, sismos, nieve, hielo y movimientos de la tierra. También incluyen las cargas por variaciones en la presión hidrostática y flotabilidad en la estructura debido a los cambios de nivel del mar por el oleaje y las mareas.

d) Cargas debidas a la construcción: incluyen la fabricación, cargado, transportación e instalación de las estructuras.

e) Cargas dinámicas: se deben a la oscilación en las estructuras debidas a la acción del oleaje, viento, sismo o maquinaria.

3.6.2 Condiciones de carga

En el diseño de estructuras se considera la condición de carga que produzcan los efectos más agresivos. Existen cuatro combinaciones de carga:

- Condiciones meteorológicas y oceanográficas de operación combinadas con cargas muertas y cargas vivas máximas ocasionadas por la operación normal de la plataforma.
- Condiciones meteorológicas y oceanográficas de operación combinadas con cargas muertas y cargas vivas mínimas asociadas a la operación normal de la plataforma.
- Condiciones de diseño meteorológico y oceanográfico con cargas muertas y cargas vivas máximas propias a la combinación de condiciones extremas.
- Condiciones de diseño meteorológico y oceanográfico con cargas muertas y cargas vivas mínimas debidas a la combinación de condiciones extremas.

Existen también condiciones temporales de carga que se dan durante la fabricación, transportación e instalación de estructuras. Para estas condiciones se toman en cuenta las condiciones y combinaciones apropiadas de cargas muertas, cargas provisionales máximas y cargas ambientales. Cada miembro estructural se diseña para la condición de carga que produzca el mayor esfuerzo.

3.6.3 Cargas de diseño

Las estructuras marítimas se encuentran expuestas a una gran variedad de cargas. Para su diseño es conveniente analizarlas individualmente y en conjunto, así como su acción local y general sobre la estructura. Algunas de estas que ya hemos visto en los capítulos anteriores son el oleaje, el viento, las corrientes, los sismos, el hielo, cargas accidentales y cargas por fabricación. A continuación se describirán las más importantes de estas considerando su importancia dentro del diseño de estructuras marítimas.

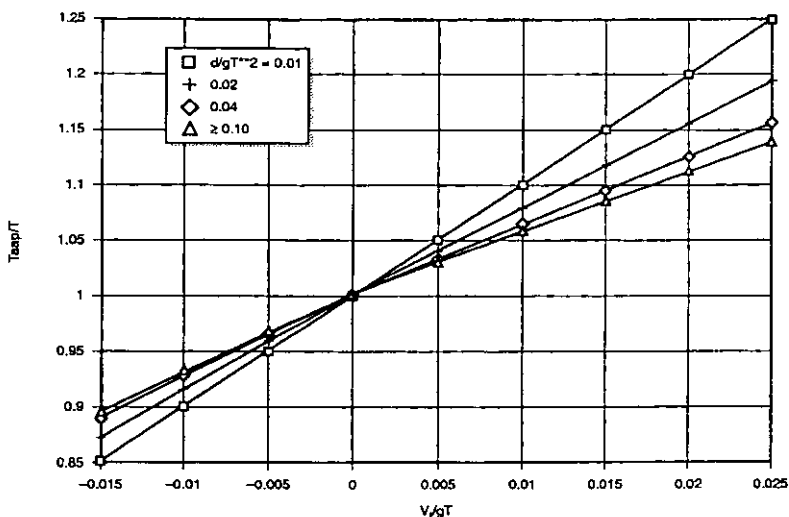
3.6.3.1 Oleaje

Las cargas debidas al oleaje son de naturaleza dinámica, sin embargo en la gran mayoría de los casos se pueden emplear análisis estáticos equivalentes a este fenómeno. A continuación se describen los dos métodos de análisis de oleaje mencionados.

a) Análisis estático de oleaje

El procedimiento para el oleaje incidente comienza por especificar los parámetros de oleaje descritos con anterioridad (altura y período de ola), profundidad de agua en tormenta y su sentido. Posteriormente se procede al cálculo de la fuerza debida al oleaje, lo cual se realiza mediante el método que procede:

- Se determina un período de ola supuesto debido al efecto de refracción del oleaje. Para definir este período supuesto, se emplea la siguiente gráfica para el caso de que $d/gT^2 > 0.01$. V_1 es la componente de la velocidad en la dirección del oleaje, g es la aceleración de la gravedad, d es la profundidad del agua, T el período y T_{app} el período supuesto.



Obtención del período supuesto.⁵¹

Para casos en que $d/gT^2 < 0.01$ se puede utilizar la siguiente relación:

$$(T_{app}/T) = 1 + V_i/gd \quad (\text{ec. 3.6.1})$$

- Se determinan los factores que describen el movimiento de la ola de acuerdo a la teoría de oleaje más conveniente, especificando la altura de ola, la profundidad en aguas tormentosas y el período aparente.
- Los componentes horizontales de las velocidades y aceleraciones de las partículas de la ola se reducen por un factor de movimiento del oleaje. Esto se realiza con el objetivo de lograr una mayor aproximación al modelo real del oleaje. Las mediciones del movimiento de oleaje admiten factores comprendidos entre 0.85 y 0.95 para tormentas tropicales y de 0.95 a 1.00 para tormentas extra-tropicales.

⁵¹ "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design" American Petroleum Institute.

- Se determina el perfil de oleaje local efectiva con el uso del factor de obstrucción de corriente. La velocidad del oleaje en los alrededores de la estructura se reduce debido a la obstrucción del flujo. La presencia de la estructura causa que el flujo incidental se desvíe; una parte de este flujo va alrededor de la estructura en vez de ir a través de ella, por lo que la velocidad del oleaje disminuya. En el caso de plataformas donde las cargas se obtiene de la suma de las cargas locales de la ecuación de Morison, se debe emplear la velocidad de oleaje local.

Algunos valores de los factores de obstrucción de oleaje para estructuras tipo jacket en el Golfo de México se mencionan a continuación:

Número de piernas	Incidencia del oleaje	Factor
3	Todo	0.90
4	Extremo	0.80
	Diagonal	0.85
	De costado	0.80
6	Extremo	0.75
	Diagonal	0.85
	De costado	0.80
8	Extremo	0.70
	Diagonal	0.85
	De costado	0.80

52

- El perfil de la corriente efectiva local se combina vectorialmente con el movimiento de oleaje para determinar las velocidades y aceleraciones locales del fluido para emplearlas en la ecuación de Morison. El perfil de corriente se presenta para condición de tormenta por lo que se adapta a la superficie de

⁵² Idem 51.

oleaje local. Una forma aceptada es la aproximación lineal de alargamiento. En el alargamiento lineal, la corriente en un punto de elevación z , arriba de la elevación de la superficie de oleaje η , es calculada desde el perfil específico de la corriente con elevación z' . Las elevaciones z y z' se relacionan linealmente de la siguiente manera:

$$(z'+d) = (z+d)d/(d+\eta) \quad (\text{ec. 3.6.2})$$

donde d es la profundidad para condición de tormenta.

- Todos los elementos estructurales, conductores, elevadores y accesorios incrementan su superficie de sección transversal considerando el espesor de las incrustaciones marinas. También los elementos con sección transversal circular, se clasifican como suaves o rugosos dependiendo de la cantidad de incrustaciones que se acumule en ellos con el tiempo. En el "Criterio Transitorio para la evaluación y diseño de plataformas marinas Fijas en la Sonda de Campeche"⁵³ se establecen los siguientes espesores de las incrustaciones respecto a la elevación del nivel del mar.

Rango de elevación respecto al NMM (m)	Espesor de Incrustaciones marinas duro (cm)
+1.0 a -20.0	7.5
-20.0 a -50.0	5.5
-50.0 a -80.0	3.5

- Se determinan los coeficientes de arrastre y de inercia considerando la corriente, oleaje y la forma, accidentalidad, tamaño y orientación de los miembros estructurales. Para situaciones típicas de diseño, las fuerzas

⁵³ "Criterio Transitorio para la evaluación y diseño de plataformas marinas Fijas en la Sonda de Campeche" Editado por PEMEZ y el IMP.

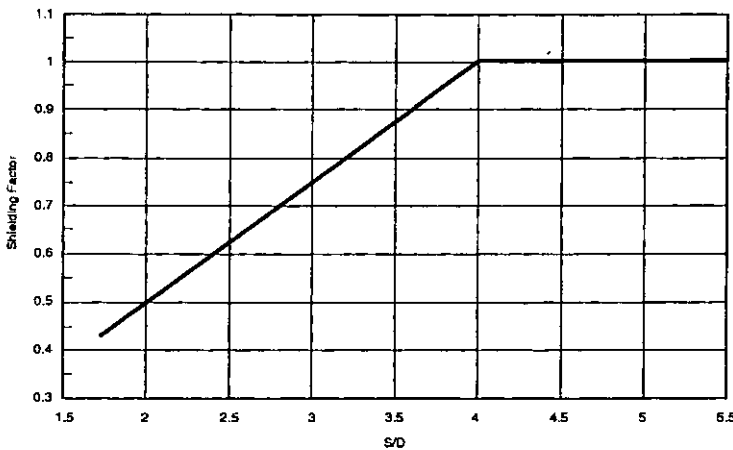
globales sobre la estructura se pueden obtener utilizando los siguientes valores para cilindros circulares.

Suaves $C_d = 0.65$ $C_m = 1.6$

Ásperos $C_d = 1.05$ $C_m = 1.2$

Para miembros que no sean cilindros circulares, los valores de los coeficientes se pueden obtener en el libro de la casa editora Dernorske Veritas llamado "Reglas para el diseño, construcción e inspección de estructuras costa afuera".⁵⁴

- Los coeficientes de fuerza de oleaje (de inercia y de arrastre) para el arreglo de conductores en plataformas se reducen por el factor de protección. Dependiendo de la configuración de la estructura y del número de conductores de pozos, las fuerzas de oleaje en los conductores pueden ser un gran porcentaje de las fuerzas totales de oleaje. Este factor de reducción se puede determinar de la siguiente gráfica donde S es el espaciamiento centro a centro de los conductores en la dirección del oleaje, y D es el diámetro de los conductores incluyendo a las incrustaciones marinas.



Factor de protección para cargas de oleaje en arreglos de conductores según el espaciamiento entre éstos.⁵⁵

⁵⁴ Idem 51.

⁵⁵ Idem 51.

- Se desarrollan modelos hidrodinámicos para conductores y accesorios. Los accesorios tales como botes, defensas y protecciones, corredores y escaleras se consideran para la inclusión del modelo hidrodinámico de la estructura debido a que pueden significar incrementos en las fuerzas de oleaje.
- Se calculan las fuerzas de corriente y oleaje local para todos los miembros de la estructura utilizando la ecuación de Morison. El cálculo de las fuerzas ocasionadas por las olas en objetos cilíndricos depende de la relación entre la longitud de ola y el diámetro de los miembros. Cuando la relación es grande (>5), el miembro no modifica significativamente la incidencia del oleaje. Las fuerzas de oleaje se pueden calcular por la suma de la fuerza de arrastre y de inercia como se vio con anterioridad en este capítulo mediante la ecuación:

$$F = F_D + F_I = C_D \frac{w}{2g} AU|U| + C_m \frac{w}{g} V \frac{\partial U}{\partial t} \quad (\text{ec. 3.6.3})$$

- donde
- F es la fuerza hidrodinámica por unidad de longitud
 - F_D es la fuerza de arrastre por unidad de longitud
 - F_I es la fuerza de inercia por unidad de longitud
 - C_D es el coeficiente de arrastre
 - w es el peso específico del agua en (N/m³)
 - g es la aceleración de la gravedad
 - A es el área normal del cilindro por unidad de longitud (igual al diámetro para cilindros circulares)
 - V es el volumen desplazado del cilindro por unidad de longitud (igual a $\pi D^2/4$ para cilindros circulares)
 - D es el diámetro efectivo del cilindro circular incluyendo las incrustaciones marinas
 - U es la componente de velocidad normal al eje de la estructura
 - $|U|$ es el valor absoluto de U
 - C_m es el coeficiente de inercia

$\frac{\partial U}{\partial t}$ es el componente de la aceleración local normal al eje de la estructura

- Se calcula la fuerza total como la suma de todas las fuerzas locales. El cortante total en la base y el momento de volteo se calculan por la suma vectorial de la fuerza de inercia y arrastre local debidas al oleaje, corrientes y a las fuerzas de viento en las porciones expuestas de la estructura. El cálculo se debe hacer considerando que la cresta de la ola incide sobre la estructura para obtener los valores de cortante base y momento de volteo máximos. Además se toma en cuenta que el máximo cortante puede no ocurrir simultáneamente con el máximo momento de volteo y que los esfuerzos máximos locales pueden ocurrir para posiciones de oleaje distintos a los que ocasionan las fuerzas máximas globales en la estructura.
- Los esfuerzos locales se deben tanto a fuerzas hidrodinámicas como a cargas transferidas por el resto de la estructura. Las fuerzas generadas localmente incluyen no sólo a las fuerzas de arrastre y de inercia modeladas por la ecuación de Morison, sino también a las fuerzas de volteo, a las fuerzas axiales de Froude-Krylov, a la flotación y al peso.

b) Análisis dinámico del oleaje

El análisis dinámico del oleaje se realiza cuando el estado de diseño del mar contiene energía de oleaje en frecuencias cercanas a la frecuencia natural de oscilación de la estructura. El contenido de energía de oleaje contra la frecuencia se puede describir por un espectro de oleaje (energía) determinado por mediciones de datos o por predicciones aplicables a la zona donde se encuentra la estructura.

Para el análisis dinámico se utiliza una teoría de oleaje lineal aplicada en tres dimensiones. También se consideran los efectos ocasionados por trenes de oleaje, así como las cargas no lineales de arrastre generadas por las corrientes y las cargas por vientos constantes.

El cálculo de la fuerza del fluido en un miembro se hace con la ecuación de Morison con la modificación de incluir el efecto de movimiento de la estructura. Para esto se hace la siguiente sustitución: en vez de $U|U|$ se utiliza $(U - v)|U - v|$ donde v es la componente de la velocidad de la estructura normal al eje del miembro.

Finalmente, el método de análisis dinámico utilizado es el que muestra el comportamiento con respecto al tiempo. Con este se predice la respuesta de las estructuras a condiciones extremas de oleaje. Para el diseño de miembros, los esfuerzos se determinan con un análisis estático que incluye de manera apropiada los efectos debidos a la respuesta dinámica de la estructura.

3.6.3.2 Viento

El criterio de diseño por viento se determina con base en el análisis de los datos que se obtengan del sitio de interés. Aunque las cargas por viento son de naturaleza dinámica algunas estructuras responden a éstas de una manera estática. Para el diseño se consideran tanto los vientos sostenidos como las rachas de viento. Los vientos sostenidos se utilizan para el cálculo de las cargas totales por viento en la estructura, mientras que las rachas se utilizan para el diseño individual de algunos elementos de la misma. En este caso se define la velocidad del viento con base en dos parámetros que son su elevación y su duración.

a) Perfiles de viento y rachas.

Para condiciones de vientos fuertes la velocidad de viento de diseño $u(z,t)$ (ft/s) con altura z sobre el nivel del mar correspondiente a un período de tiempo promedio t donde $t \leq t_o = 3600s$ se calcula con la siguiente ecuación:

$$u(z,t) = U(z) \cdot \left[1 - 0.41 I_u(z) \ln \left(\frac{t}{t_o} \right) \right] \quad (\text{ec. 3.6.4})$$

donde la velocidad de viento con duración de una hora $U(z)$ (ft/s) a la altura z (ft) se da por:

$$U(z) = U_o \left[1 - C \ln \left(\frac{z}{32.8} \right) \right] \quad (\text{ec. 3.6.5})$$

$$C = 5.73 \times 10^{-2} (1 + 0.0457 U_o)^{1/2} \quad (\text{ec. 3.6.6})$$

y donde la intensidad de la turbulencia $I_u(z)$ a la altura z se obtiene de:

$$I_u(z) = 0.06 \left[1 + 0.0131 U_o \left(\frac{z}{32.8} \right)^{-0.22} \right] \quad (\text{ec. 3.6.7})$$

U_o en ft/s es la media de la velocidad de viento de 1 hora a 32.8 ft (10m) de altura.

b) Espectro de viento

El espectro de viento se utiliza para aquellas estructuras en donde el estudio dinámico del viento es necesario. La ecuación de densidad de energía que describe a las fluctuaciones lineales de la velocidad del viento queda representada por la ecuación siguiente:

$$S(f) = \frac{320 \left(\frac{U_o}{3.28} \right)^2 \left(\frac{z}{32.8} \right)^{0.45}}{(1 + f^n)^{5n}} \quad (\text{ec. 3.6.8})$$

$$f = 172 \left(\frac{z}{32.8} \right)^{2/3} \left(\frac{U_o}{32.8} \right)^{-0.75} \quad (\text{ec. 3.6.9})$$

donde $n = 0.468$

$S(f)$ dado en $\text{ft}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$ es la densidad de energía espectral a una frecuencia f en Hz

z es la altura sobre el nivel del mar en ft

U_o es la velocidad media del viento con duración de 1 hora a 32.8 ft (10m) sobre el nivel del mar

c) Relación entre la velocidad y la fuerza del viento

La fuerza de arrastre del viento sobre un objeto se puede calcular con la ecuación:

$$F = (\rho/2)u^2C_sA \quad (\text{ec. 3.6.10})$$

donde F es la fuerza del viento

ρ es la densidad del aire

u es la velocidad del viento

C_s es el coeficiente de forma

A es el área del objeto

d) Consideraciones de la fuerza del viento local

Las fuerzas sobre cualquier superficie plana debe de considerarse que actúa normalmente a la superficie para todas las direcciones de donde provenga el viento. Las fuerzas en cilindros verticales se consideran que actúan en la dirección del viento.

Por otro lado, las fuerzas que actúan en superficies planas que no son perpendiculares a la dirección del viento, como lo pueden ser algunos lados de los edificios en la estructura, se deben calcular utilizando las fórmulas adecuadas que consideran el sesgo existente entre la dirección del viento y el plano de la superficie.

e) Coeficientes de forma

Los coeficientes de forma para la acción de vientos sobre áreas planas y perpendiculares a la dirección de estos más utilizados son:

- Vigas = 1.5
- Lados de edificios = 1.5
- Secciones cilíndricas = 0.5
- Superficie de plataformas en general = 1.0

3.6.3.3 Corrientes

La corriente total es la suma de las corrientes de marea, de circulación general y de tormenta tal como se mencionó anteriormente. La magnitud relativa de estos componente varía dependiendo de la ubicación de la estructura.

Cuando la corriente actúa de manera independiente la fuerza de arrastre se obtiene de la ecuación de Morison considerando que $dU/dt = 0$. Cuando éste fenómeno ocurre simultáneamente con el oleaje, el cálculo se realiza como se describió previamente en el análisis estático de oleaje, mediante la suma vectorial de las velocidades de las partículas en movimiento. Para miembros esbeltos se analiza la posibilidad de vibración debido a la periodicidad de la cubierta.

3.6.3.4 Fuerzas por fabricación e instalación

Las fuerzas por fabricación de la estructura son aquellas fuerzas ejercidas sobre miembros individuales, componentes de la estructura, o la unidad completa durante la descarga, manejo y ensamble en los patios de fabricación. Las fuerzas de instalación son las fuerzas sobre las estructuras durante las operaciones de movimiento de los componentes del sitio de fabricación al sitio de ubicación final, así como al instalar los distintos accesorios o equipos que completen la obra.

a) Fuerzas por erección

Las fuerzas por erección se dan por elevar la estructura durante la fabricación e instalación en la construcción de la obra. La magnitud de tales fuerzas se debe determinar considerando la acción de fuerzas estáticas y dinámicas aplicadas a la estructura.

b) Fuerzas de transportación

Las fuerzas de transportación se consideran para el diseño sin importar si la estructura es transportada en barcasas o si es una estructura flotante. Estas fuerzas son el resultado de la manera en que es sostenida la estructura por su flotabilidad o por algún medio de transporte, además de la respuesta de las condiciones del medio ambiente al remolque en su trayecto al sitio donde residirá.

c) Fuerzas de lanzamiento de la estructura

El lanzamiento de la estructura se puede dar ya sea del patio de construcción al mar en el caso de estructuras flotantes, o de la barcaza al sitio donde residirá permanentemente. En principio se calculan las fuerzas horizontales para iniciar el lanzamiento de la estructura. Sin embargo, las cargas más severas debido al lanzamiento de la estructura se dan por la rotación de la misma en el agua. Por esto hace un análisis profundo de las fuerzas inducidas dinámicamente a la estructura por el lanzamiento. Además se considera la acción dinámica del viento, oleaje y corrientes sobre la estructura al lanzarla y posicionarla en su sitio final.

3.6.4 Diseño estructural

Los miembros sujetos a la combinación de cargas por flexión y compresión se diseñan de manera que satisfagan los criterios de esfuerzos y estabilidad en toda su extensión. En el pasado se observó que las cargas ambientales variaban muy poco con respecto a las distintas direcciones de donde provenían lo cual resultó en diseños razonablemente simétricos bajo el punto de vista estructural y que además han mostrado un comportamiento adecuado en condiciones normales de operación y en tormentas. Actualmente con los grandes avances tecnológicos, se estudian los esfuerzos que se presentan para las estructuras marítimas considerando las direcciones de donde provienen las fuerzas incluyendo en el diseño la orientación más favorable para la estructura. Para esto, se debe considerar la dirección de las fuerzas así como el diseño de los pilotes.

Las fuerzas oceanográficas y meteorológicas se calculan para todas las direcciones con las cuales se puede diseñar el arreglo de la estructura y de los pilotes de cimentación, de ser necesarios. Como mínimo el estudio de fuerzas incluye las direcciones paralela y perpendicular para cada miembro estructural,

así como las direcciones diagonales. Estas direcciones se fijan con respecto a los ejes locales para cada miembro lo cual resulta en un mínimo de 8 direcciones de análisis para una estructura simétrica, rectangular y cuadrada; y un mínimo de 12 direcciones para una estructura tipo trípode.

Los pilotes se diseñan considerando la carga individual específica que actuará en cada uno de ellos debida a las condiciones de dirección antes mencionadas. Esto es muy posible que resulte en cimentaciones no simétricas donde cada pilote tendrá una distinta profundidad, rigidez y esfuerzo.

3.6.4.1 Esfuerzos permisibles para estructuras cilíndricas de acero

Para el diseño de estructuras cilíndricas se consideran los esfuerzos debidos a la tensión y compresión axial, al pandeo y al cortante según se indica:

a) Tensión axial

El esfuerzo permisible de tensión F_t para estructuras cilíndricas sujetas a cargas de tensión axial se determinan con la siguiente fórmula:

$$F_t = 0.6F_y \quad (\text{ec. 3.6.11})$$

donde F_y es el esfuerzo de fluencia en Megapascales.

b) Compresión axial

b.1) Pandeo en columnas

El esfuerzo permisible en compresión axial, F_a , para elementos con la relación D/t menor o igual a 60 se obtiene con la siguiente fórmula:

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2}\right] F_y}{5/3 + \frac{3(Kl/r)}{8C_c} - \frac{(Kl/r)^3}{8C_c^3}} \quad \text{para } Kl/r < C_c \quad (\text{ec. 3.6.12})$$

$$F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(Kl/r)^2} \quad \text{para } Kl/r \geq C_c \quad (\text{ec. 3.6.13})$$

donde

$$C_c = \left[\frac{12\pi^2 E}{F_y} \right]^{1/2} \quad (\text{ec. 3.6.14})$$

E es el módulo elástico de Young

K es el factor de longitud efectiva⁵⁶

l es la longitud sin reforzar

r es el radio de giro

Para miembros con relación $D/t > 60$ se sustituye el esfuerzo crítico por pandeo local (F_{xe} o F_{xc}) por F_y al determinar C_c y F_a .

b.2) Pandeo local

Para elementos no rígidos se investiga el efecto de pandeo local debido a la compresión axial cuando la relación $D/t > 60$. Cuando esta relación es mayor de 60 y menor de 300, y además las paredes tienen un espesor $t \geq 6$ mm, se deben determinar el esfuerzo de pandeo local elástico F_{xe} e inelástico F_{xc} . En general el pandeo local sobre columnas se obtiene sustituyendo estos valores por el de F_y en la ecuación de pandeo de columnas.

Los valores de esfuerzo de pandeo elástico e inelástico local se obtienen con las ecuaciones mostradas a continuación:

- Esfuerzo de pandeo local elástico

$$F_{xe} = \frac{2CEt}{D} \quad (\text{ec. 3.6.15})$$

donde C es el coeficiente de pandeo elástico crítico
 D es el diámetro exterior
 t es el espesor de la pared

El valor teórico de C es 0.6. sin embargo es común utilizar un valor reducido de $C = 0.3$ al considerar las imperfecciones de la geometría inicial de la estructura.

- Esfuerzo de pandeo local inelástico

$$F_{xc} = F_y \left[1.64 - 0.23(D/t)^{1/4} \right] \leq F_{xe} \quad (\text{ec. 3.6.16})$$

$$F_{xc} = F_y \quad \text{para } (D/t) \leq 60 \quad (\text{ec. 3.6.17})$$

c) Esfuerzo debido a una deflexión

El esfuerzo debido a una deflexión se calcula mediante:

$$F_b = 0.75F_y \quad \text{para } \frac{D}{t} \leq \frac{10340}{F_y} \quad (\text{ec. 3.6.18})$$

$$F_b = \left[0.84 - 1.74 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{para } \frac{10340}{F_y} < \frac{D}{t} \leq \frac{20680}{F_y} \quad (\text{ec. 3.6.19})$$

$$F_b = \left[0.72 - 0.58 \frac{F_y D}{Et} \right] F_y \quad \text{para } \frac{20680}{F_y} < \frac{D}{t} \leq 300 \quad (\text{ec. 3.6.20})$$

d) Esfuerzo cortante

El máximo esfuerzo cortante f_v para un elemento cilíndrico es:

$$f_v = \frac{V}{0.5A} \quad (\text{ec. 3.6.21})$$

donde f_v es el máximo esfuerzo cortante
 V es el cortante transversal
 A es el área transversal

El esfuerzo cortante permisible se obtiene de la relación:

$$F_v = 0.4 F_y \quad (\text{ec. 3.6.22})$$

e) Esfuerzo torsionante

El máximo esfuerzo torsionante f_{vt} para elementos cilíndrico se obtiene de:

$$f_{vt} = \frac{M_t(D/2)}{I_p} \quad (\text{ec. 3.6.23})$$

donde f_{vt} es el máximo esfuerzo torsionante
 M_t es el momento torsionante máximo
 I_p es el momento polar de inercia

El esfuerzo torsionante permisible F_{vt} se calcula de la siguiente ecuación:

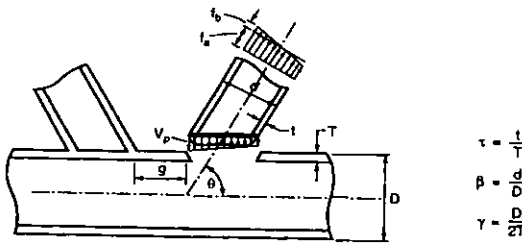
$$F_{vt} = 0.4 F_y \quad (\text{ec. 3.6.24})$$

3.6.5 Conexiones

Las conexiones al final de los elementos en tensión o compresión soportan el esfuerzo indicado por las cargas de diseño. Este no puede ser menor al 50% del esfuerzo efectivo del elemento. El esfuerzo efectivo es la carga de pandeo para miembros cargados en compresión o tensión, o la carga de fluencia para miembros sometidos a tensión. Para conexiones tubulares simples, se obtiene la siguiente condición:

$$\frac{F_{yb}(\gamma\tau \sin \theta)}{F_{yc}(11 + 1.5/\beta)} \leq 1.0 \quad (\text{ec. 3.6.25})$$

donde F_{yc} es el esfuerzo de fluencia para miembros en la coyuntura
 F_{yb} es el esfuerzo de fluencia para miembros reforzados
 $\beta, \gamma, \tau, \theta$ son parámetros geométricos de acuerdo a la siguiente figura



Terminología y Geometría para conexiones en tubos simples.⁵⁷

La soldadura en las conexiones debe tener una capacidad igual al:

- a) esfuerzo de los miembros unidos basado en la fluencia.
- b) esfuerzo de la coyuntura basado en el cortante.

3.6.6 Fatiga

En el diseño de conexiones tubulares es necesario considerar los problemas por fatiga relacionados a los esfuerzos locales cíclicos. Es común emplear la técnica del análisis espectral. En una manera muy general el análisis por fatiga se debe de realizar de la siguiente manera:

- a) Se desarrolla un estudio sobre todos los estados del mar que se esperan durante la vida de la estructura.
- b) Se realiza un análisis para obtener la respuesta estructural de los elementos para una fuerza de oleaje en términos de esfuerzo. Se utiliza un factor de movimiento de oleaje igual a 1.0 y un factor de protección de 1.0. Para esto se utiliza un análisis espectral donde se determine el esfuerzo resultado de dicho estado del mar. Se toman en cuenta los efectos dinámicos para estructuras con periodos de oscilación semejantes a los correspondientes a las cargas ambientales.
- c) Se consideran los esfuerzos locales que ocurren en conexiones tubulares como posibles puntos de falla en las intersecciones. Se utilizan factores de concentración de esfuerzos adecuados para este análisis.
- d) Para cada punto cercano a las intersecciones de elementos, se calcula la respuesta al esfuerzo para cada estado del mar, considerando efectos de esfuerzos totales y locales. La respuesta a esfuerzos se combina con distribuciones de esfuerzos a largos intervalos, con lo cual se calcula la relación de daño acumulativo por fatiga, D , mediante la ecuación:

$$D = \Sigma (n/N) \quad (\text{ec. 3.6.26})$$

⁵⁷ Idem 51.

donde n es el número de ciclos aplicados dentro de un rango de esfuerzo dado

N es el número de ciclos para el cual el rango de esfuerzo dado es permitido por las curvas S-N

e) En general el diseño por fatiga para cada unión y elemento estructural es al menos del doble de la vida útil de la estructura.

3.6.7 Cimentación

La cimentación se diseña para soportar las cargas estáticas, cíclicas y transitorias sin sufrir deformaciones o vibraciones excesivas en la estructura. Es importante investigar la posibilidad de movimiento del suelo marino con relación a los elementos de cimentación; así como las fuerzas que causan dicho movimiento para incluirlas en el diseño. La cimentación en estructuras como las plataformas consiste en la colocación de pilas de cimentación. Un aspecto importante a considerar en el diseño de cimentaciones es la erosión del lecho marino. Ésta afecta tanto a la resistencia lateral como axial de las pilas.

3.6.7.1 Pilas de cimentación

Existen básicamente tres tipos de pilas de cimentación: pilas hincadas, pilas coladas in situ, y pilas acampanadas. El uso de estas varía según las necesidades estructurales que se emplean para el diseño.

a) Pilas hincadas

Se utilizan pilas con puntas expuestas para este tipo de cimentaciones. Estas pilas son hincadas en el suelo marino con martillos de impacto que utilizan vapor, diesel o fuerza hidráulica como fuente de energía. El espesor de la pared

de pilas debe ser tal que resista las cargas axial y lateral así como los esfuerzos que se originan por su hincado.

Estos esfuerzos se pueden predecir utilizando los principios de esfuerzos elásticos debidos a la transmisión de cargas de oleaje considerando los parámetros que rigen el comportamiento del suelo, pilas, amortiguadores y martillo.

b) Pilas coladas in situ

Las pilas coladas in situ se utilizan en suelos que soportan perforaciones abiertas con o sin lodos perforadores. Existen dos tipos de pilas coladas in situ:

- De una sola etapa: consiste en la excavación de un hoyo donde se coloca la pila. Este hoyo es después rellenado con mortero dando el soporte necesario para la transmisión de esfuerzos.

- De dos etapas: Consiste en dos pilas colocadas concéntricamente, coladas para volverse una sola sección compuesta. Una pila se hinca hasta una penetración determinada en donde bajo de ella se puede mantener un hoyo abierto. Esta pila externa se convierte en la funda para la siguiente operación que consiste en penetrar el suelo para insertar la pila interna que posteriormente será rellenada con mortero para convertir a ambas pilas en un solo elemento compuesto.

c) Pilas acampanadas

Las campanas se construyen en el extremo de la pila para aumentar la capacidad de sostenerse en el suelo. La excavación de la campana se lleva a cabo desde la parte inferior de la pila mediante una herramienta expansiva. Se excava un hoyo piloto bajo la campana que actúe como un vertedero de material cortado. La campana y pila se rellenan con concreto hasta una altura que

desarrolle una adecuada transmisión de esfuerzos y que logre el trabajo en conjunto de los dos elementos.

3.6.7.2 Diseño de las pilas

El diseño de pilas de penetración provee la capacidad de resistir las cargas máximas axiales con un factor apropiado de seguridad. Las capacidades permisibles se determinan dividiendo la capacidad última de la pila entre el factor de seguridad.

La capacidad última en pilas a cargas axiales se determina con la ecuación:

$$Q_d = Q_f + Q_p = fA_s + qA_p \quad (\text{ec. 3.6.26})$$

donde Q_f es la resistencia a la fricción
 Q_p es la carga transportada en la punta
 f es la capacidad unitaria por fricción
 A_s es la superficie lateral de la pila
 q es la capacidad de carga transportada en la punta
 A_p es el área de la punta de la pila

Para suelos cohesivos, la capacidad por fricción y de carga transportada se obtienen de la siguiente manera:

$$f = \alpha c \quad \dots$$

$$q = 9c$$

donde c es el esfuerzo cortante de un suelo sin drene en el punto en cuestión

α es un factor adimensional calculado por:

$$\alpha = 0.5\psi^{-0.5} \psi \leq 1.0$$

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

$\psi = c/p'_o$ para el punto en cuestión

p'_o es la presión de sobrecarga efectiva en el punto en cuestión

Para suelos no cohesivos, se utilizan

$$f = Kp_o \tan \delta$$

$$q = p_o N_q$$

donde

K es el coeficiente de presión lateral del suelo

δ es el ángulo de fricción entre el suelo y la pared de la pila

p_o es la presión de sobrecarga efectiva en la punta

N_q es un factor adimensional de transporte de carga

Tema 4
Proceso constructivo de una plataforma

Una vez obtenido el diseño de la estructura marina, el paso siguiente es su construcción y montaje en el sitio proyectado. Para el caso de plataformas marinas y líneas submarinas, su construcción se puede dividir en las siguientes fases: fabricación de la estructura, transporte y colocación. En éste capítulo se describirá cada fase así como la fabricación de los equipos especiales como la superestructura de una plataforma.

4.1 Fabricación de la estructura

4.1.1 Patios de construcción

La fabricación de la estructura tanto de plataformas marinas como de líneas submarinas se realiza en patios de construcción, los cuales deben reunir una serie de características especiales. Con respecto a su ubicación, los patios generalmente se encuentran en las desembocaduras de ríos donde se tengan tirantes suficientes para la navegación buscando tener un acceso fácil al mar. Además deben tener acceso inmediato vía terrestre para asegurar el adecuado abastecimiento de materiales y personal para la construcción. Estos accesos terrestres deben ser tanto carreteros como ferroviarios.

Debido a las grandes dimensiones de las estructuras que serán fabricadas en los patios, estos deben contar con la superficie suficiente para poder desarrollar el trabajo de manera cómoda; ya que esto permitirá un proceso más eficiente. Los patios deben ser suficientes para poder ubicar áreas de trabajo, almacenamiento de equipo y materiales, áreas de circulación para el equipo pesado, área de oficinas, comedores, bodegas y estacionamiento. Además, es esencial que éstos cuenten con los servicios básicos de agua potable, drenaje, sistemas de comunicación y especialmente energía eléctrica.

Una vez ubicado el sitio adecuado para la instalación del patio, se procede al acondicionamiento del mismo mediante el desmonte, el despalme del terreno y la elevación de la resistencia del suelo mediante compactación.

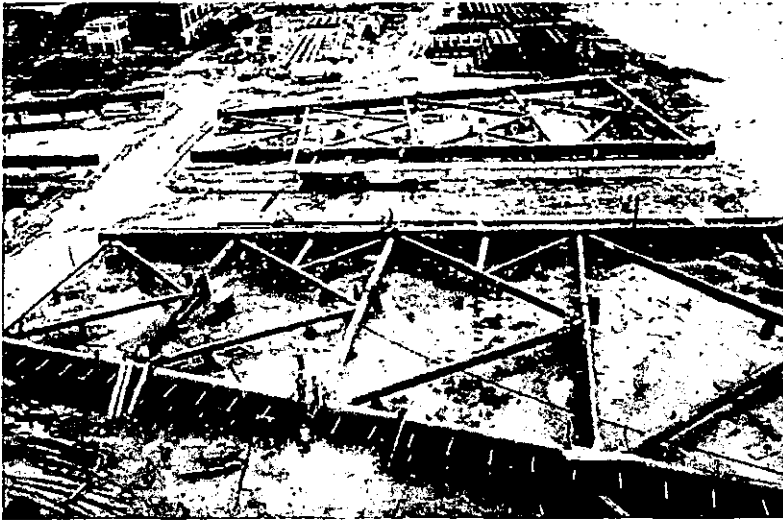
En la zona de transición tierra-mar, los patios de construcción deben de contar con muelles para el acceso de chalanes y remolcadores que serán los encargados de transportar nuestras estructuras. También se deben de construir las vigas de deslizamiento con las cuales nos ayudaremos para montar la estructura en el medio de transporte marino. Tanto los muelles como las vigas de deslizamiento deben de calcularse para poder soportar las cargas que le transmitirán las estructuras fabricadas. Dentro de este diseño se incluye su cimentación por medio de pilotes.

Finalmente se debe de proveer la profundidad requerida por los chalanes y remolcadores a plena carga para poder maniobrar adecuadamente. Esto incluye en ocasiones el dragado de las márgenes del río o de la costa hasta una profundidad de diseño.

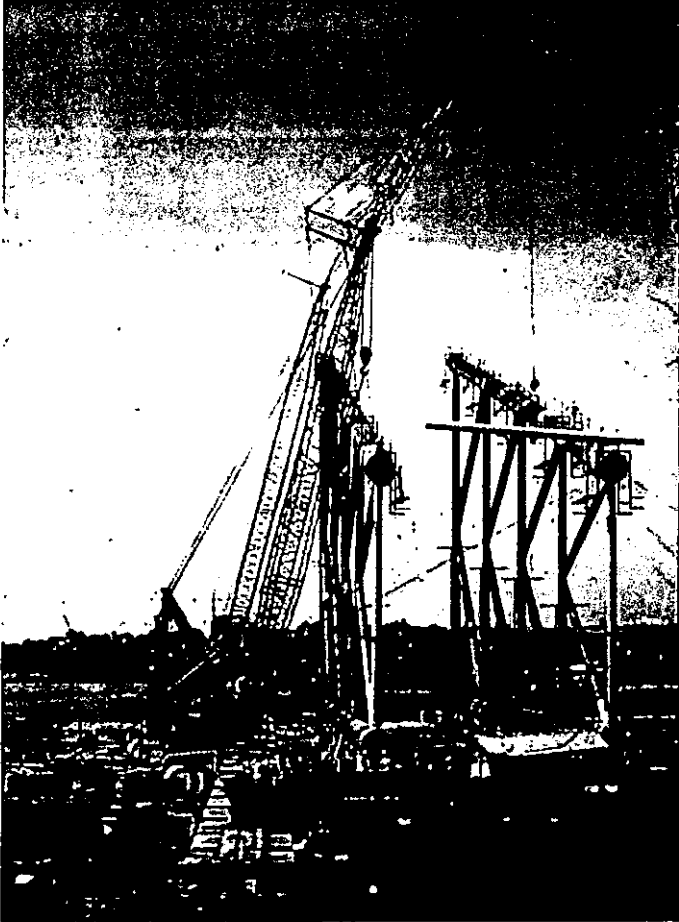
4.1.2 Construcción

En los patios se lleva a cabo la construcción de la subestructura, superestructura, pilotes y conductores de una plataforma marina, así como de las secciones que integrarán una línea de conducción submarina. La construcción de estas estructuras comprende principalmente el pedido y recibimiento de materiales, cortes, doblajes, maniobras, soldadura y protección anticorrosiva de las partes. Para éste propósito, los componentes son prefabricados en los patios de construcción a unidades de gran tamaño que pueden ser transportadas al sitio donde se colocarán. En el caso de las plataformas, el jacket es armado en su totalidad en tierra para después colocarlo en el mar.

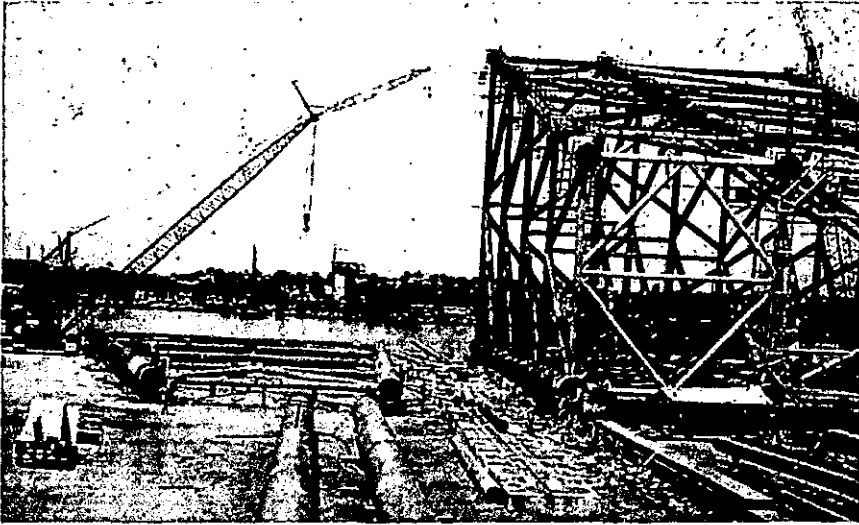
La subestructura de las plataformas marinas generalmente esta integrada por una unidad tubular formada por 4 marcos de acero. Estos marcos son soldados en el piso. Después son rotados por grúas hacia su posición vertical para ser unidos con otros elementos estructurales de tal manera de ir integrando la base de la plataforma. Posteriormente se soldan los refuerzos longitudinales y transversales en los distintos niveles de la estructura. Una vez terminado este proceso, el jacket descansa en uno de sus lados más largos. Para entonces, las dos piernas intermedias del jacket se ubican en las vigas de lanzamiento. Cabe resaltar que cada parte del jacket debe de llevar su protección anticorrosiva. Todo este procedimiento debe de ir respaldado por los planos de la estructura, los cuales deben de estar totalmente comprendidos por los ingenieros encargados de la construcción.



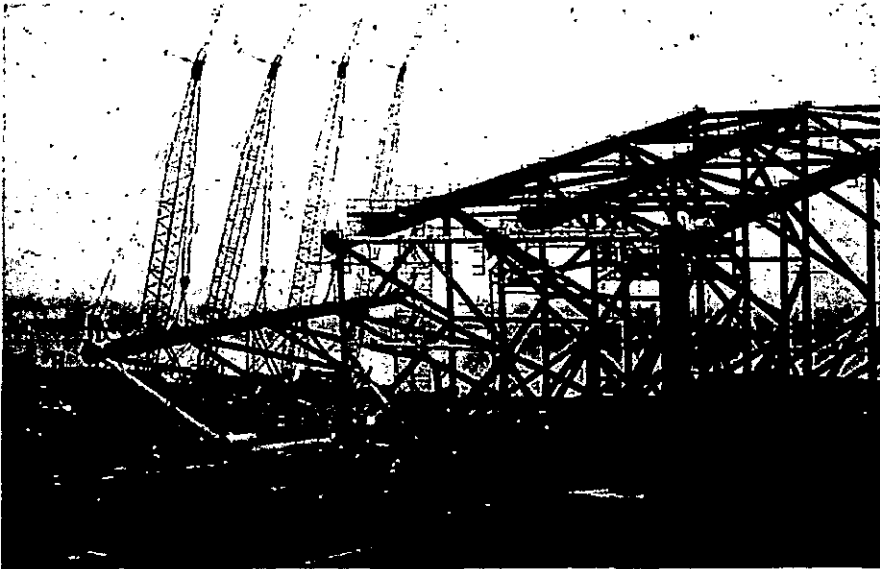
Marcos armados en el patio de construcción.



Unión de dos marcos en su posición vertical, sostenidos por grúas.



Subestructura con tres marcos ya soldados y listos en las vigas de lanzamiento.



Izaje del cuarto marco para ser soldado a la subestructura.

Un proceso de construcción de una plataforma de perforación y rebombeo debe incluir los siguientes pasos:

a) Subestructura (Jacket)

1. Recepción de materiales
2. Fabricación de marcos
3. Arriostramiento horizontal
4. Fabricación de pasillos y barandales
5. Defensas y atracaderos
6. Pintura y protección anticorrosiva
7. Carga y Amarre

b) Superestructura (Deck)

1. Recepción de materiales
2. Fabricación de marcos
3. Fabricación de cubierta inferior
4. Fabricación de cubierta superior
5. Fabricación de pasillos, barandales y escaleras
6. Instalaciones electromecánicas
7. Fabricación y montaje de tuberías
8. Pintura y protección anticorrosiva
9. Carga y amarre

c) Pilotes

1. Recepción de material
2. Fabricación de primera sección
3. Fabricación de segunda sección
4. Fabricación de tercera sección
5. Fabricación de cuarta sección
6. Carga y amarre

d) Conductores

1. Recepción de material
2. Fabricación de primera sección
3. Fabricación de segunda sección
4. Fabricación de tercera sección
5. Fabricación de cuarta sección
6. Carga y amarre⁵⁸

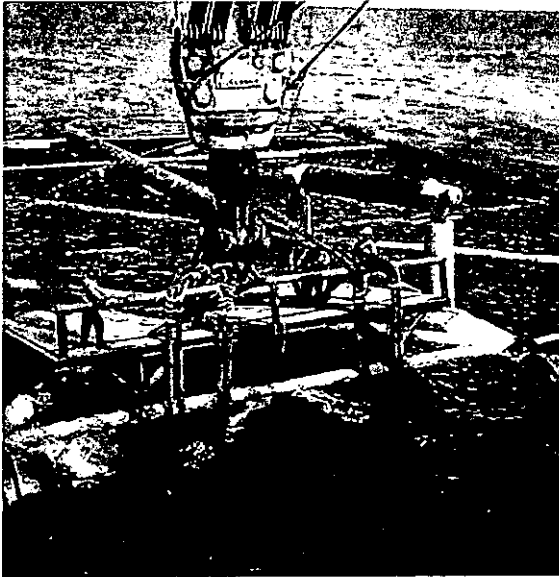
4.1.3 Trabajos previos al transporte de la estructura

Además de la fabricación de la estructura, en los patios se realizan preparaciones para facilitar la instalación en el mar. Es de gran importancia la preparación de las estructuras y de los chalanes que las transportarán al campo para su instalación debido a que de acuerdo a las condiciones en que lleguen las estructuras dependerá la minimización de los tiempos de trabajo en la instalación. Este ahorro de tiempo se relaciona con el observar las pérdidas de tiempo debido a modificaciones en las estructuras, demoras en los patios de fabricación, mal tiempo u otros imprevistos. Para lograr una optimización en éstos tiempos es menester contar con toda la información concerniente a la instalación de las estructuras. Deben conocerse completamente los planos estructurales, el peso y centro de gravedad de las estructuras, así como las características del suelo e hidromecánicas de la zona donde se instalará. Para evitar demoras en el lanzamiento de la subestructura será necesario que antes de la salida de la estructura al mar, se supervisen los trabajos en el patio de construcción que se tratan a continuación.

⁵⁸ Apuntes de Instalaciones alejadas de la cota del Ing. Guillermo Macdonel Martínez.

a) *Barcaza de lanzamiento y subestructura*

La subestructura cuenta con una plataforma de maniobras, la cual se instala en su parte más alta. Ésta va asegurada a los miembros estructurales de la subestructura con la ayuda de abrazaderas; además de ir soldada al paño superior del plano horizontal de la subestructura.



Plataforma de maniobras

Para el izaje se coloca un arreglo de dos estrobo de 6 pulgadas de diámetro por 80 pies y un grillete de 200 ton o 300 ton por cada par de piernas centrales en las orejas de la subestructura, a través de las cuales se realiza esta maniobra. Para fijar la capacidad de los grilletes se considera el centro de gravedad de la estructura lo cual obliga a que en el lado donde vienen los atracaderos y defensas de la estructura se utilicen grilletes de mayor capacidad. Una vez colocados los estrobo y grilletes a las orejas de la estructura, los estrobo se colocan sobre la plataforma de maniobras y son asegurados con cabos de manila.

Se añaden a la estructura dos cables de acero de 1 ½ pulgadas de diámetro por 75 pies de longitud conectados a los grilletes de las piernas con el propósito de servir de cables de arrastre o de recuperación de la subestructura. Estos cables estarán localizados en la parte superior de la estructura cuando ya esté cargada sobre el chalán. En su otro extremo estarán conectados a un grillete de 100 ton del cual saldrá otro cable de acero de 50 pies con un orinque en su extremo. Este cable irá asegurado a la cubierta del chalán del lado de popa; una vez preparada la estructura para el lanzamiento, el orinque se conecta al cable del ancla del barco grúa para que una vez efectuado el lanzamiento cuando la estructura se encuentre flotando en el mar sea recuperada por el barco mediante éste sistema de cables.

También se colocan dos cuerdas de propileno de 400 pies de longitud con boyas color anaranjado en sus extremos en el plano horizontal inferior de las piernas. Estas sirven para ser recuperados por un remolcador que realiza la acción de ir aguantando y guiando la subestructura mientras es jalada con el cable del ancla del barco grúa.

Con el objetivo de ayudar a despegar la subestructura de las guías de lanzamiento y romper la fricción existente entre la subestructura y los esquís de lanzamiento se colocan los puntos de gateo que consisten en una placa vertical la cual se pone a dos pies del final de la guía de lanzamiento en que va colocada la subestructura en el chalán. Para su funcionamiento se incluyen dos gatos hidráulicos de 60 toneladas cortas los cuales son proporcionados en campo por el barco grúa.

En los patios de construcción se incluye en la barcaza de lanzamiento el siguiente equipo que va asegurado sobre la cubierta del chalán:

- Equipo de corte formado por botellas de oxígeno y de acetileno incluyendo mangueras.
- Un winche de aire con 600 pies de cable de acero, 25 pies de manguera de aire, coples y conexiones.
- Un compresor de aire de 700 pies cúbicos por minuto.
- Un depósito de 55 galones de diesel, para los motores de combustión interna que requieran combustible.

Finalmente, se realiza una inspección final de la subestructura y chalán de lanzamiento contemplando primordialmente que:

- todas las válvulas de inundación estén cerradas,
- las válvulas de descarga de aire arriba de la subestructura estén cerradas,
- todas las protecciones de fábrica sean retiradas de las válvulas de inundación,
- todos los estrobos para las maniobras de izaje estén asegurados en la plataforma de maniobras,
- los cables de arrastre de la pieza y cabos de polipropileno para retenida y guía estén asegurados en su posición para el arrastre,
- los winches y las bombas de lastrado operen correctamente, y
- todo el equipo adicional se encuentre asegurado a bordo del chalán.⁵⁹

b) Preparación de la barcaza para izaje de la subestructura

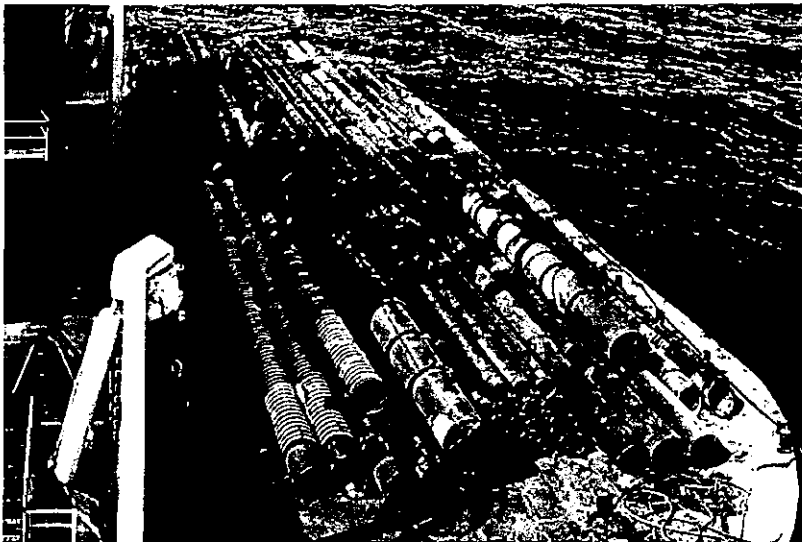
Es necesario corroborar que el chalán y la subestructura antes de salir del patio de fabricación compruebe la colocación de la plataforma de maniobras para izaje desde el chalán y la colocación de estrobos y grilletes para realizar el izaje de la subestructura.

⁵⁹ "Proceso de instalaciones de Plataformas marinas" PEMEX.

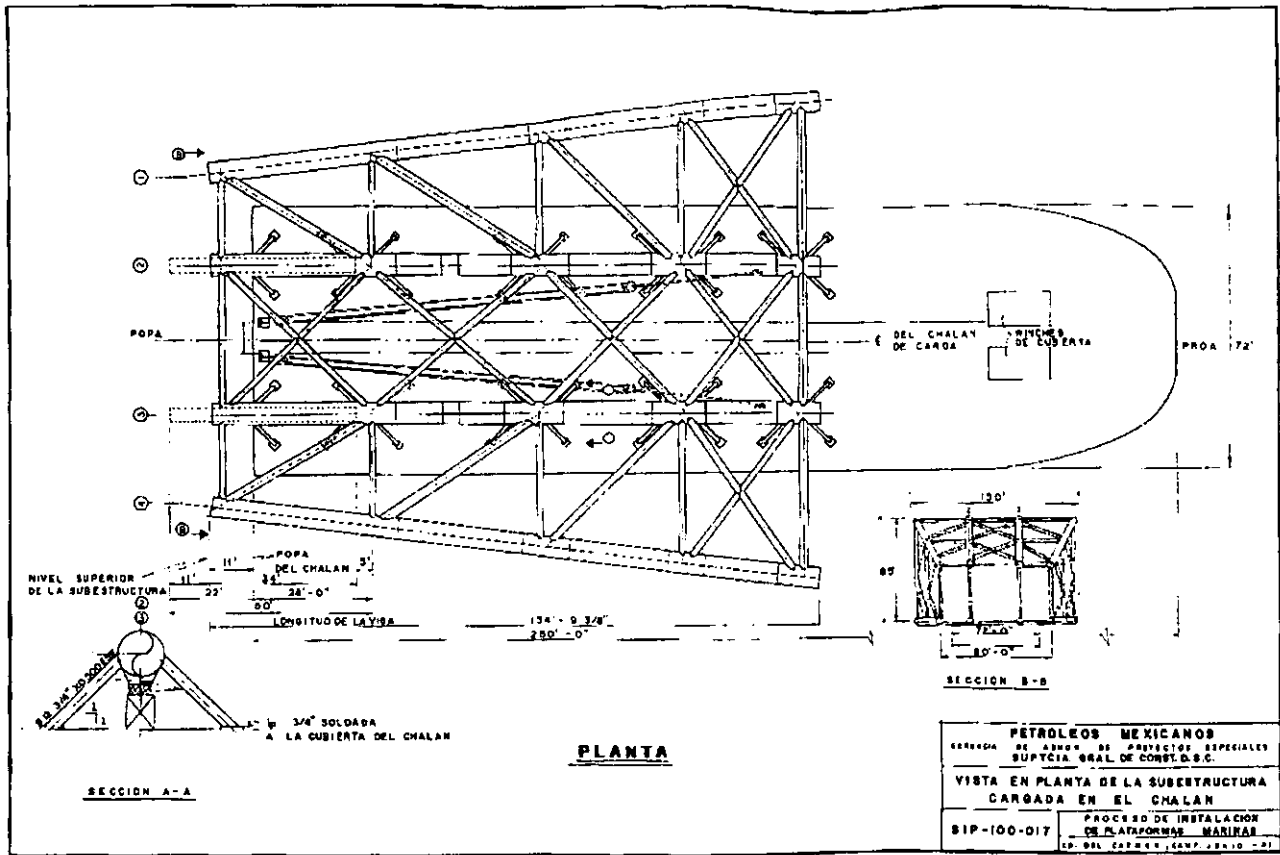
La subestructura tiene dos plataformas de maniobras, una para colocar los estobos para efectuar el izaje de la subestructura del chalán y otra para efectuar la colocación en posición vertical. Esta plataforma va colocada al centro entre las orejas de izaje y asegurada a los miembros de la estructura mediante abrazaderas. Una vez terminada la maniobra la plataforma será sacada del mar mediante buzos.

c) Preparación para los pilotes y conductores

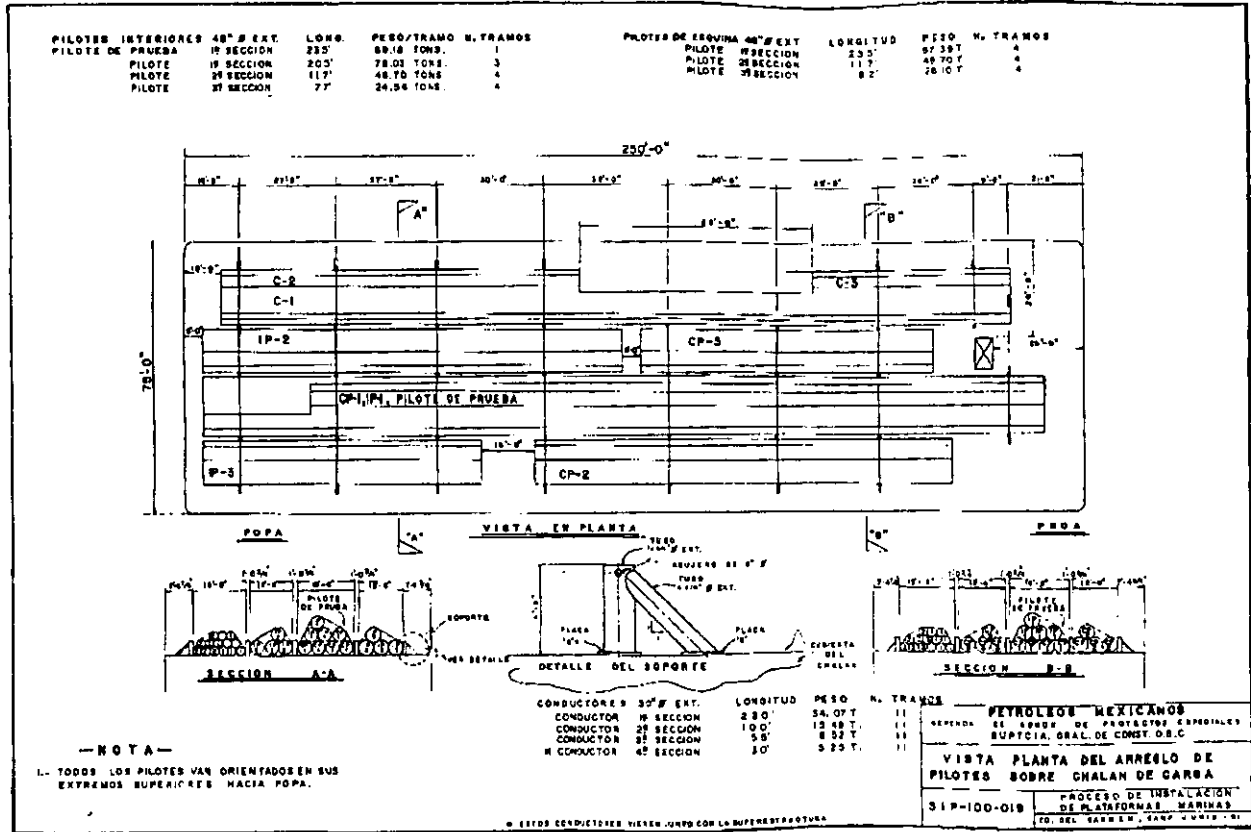
Los pilotes y conductores se cargan en un chalán con soportes en las esquinas formados por postes y placas soldadas. Se colocan sobre la cubierta y son asegurados con cable de acero. Se dejan accesos para transitar entre las secciones que integran el pilote permitiendo un manejo rápido de los pilotes y conductores. Cada sección de pilotes y conductores vienen preparados con agujeros de 5 pulgadas de diámetro a dos pies de distancia del extremo superior para poder ser sujetados. Se busca un arreglo como el mostrado en el siguiente diagrama para evitar demoras al no haber continuidad en las maniobras de colocación.



Arreglo de pilotes en el chalán donde serán transportados.



Subestructura en el chalan.



4.2 Transporte

El transporte se realiza en un chalán para lanzamiento de subestructuras, el cual se ajusta a las siguientes características: 250 pies de largo, 72 pies de ancho y 16 de profundidad, equipado con esquís de lanzamiento dobles con una longitud de 230 pies de centro a centro, y volteo de la vigueta de lanzamiento en un tramo final de 50 pies de longitud, 2 winches de cubierta con jalón de cable sencillo de 90 000 libras, 4 correderas de lanzamiento, 6 bombas de lastrado, válvulas de transferencia para lastre separadas accionadas desde el cuarto de control sobre la cubierta del chalán, cables de acero para remolque enganchados a las cadenas propias del chalán en la proa, cabos de remolque de emergencia y todas las señalizaciones requeridas para llenar los requisitos de la certificación de las autoridades marítimas.

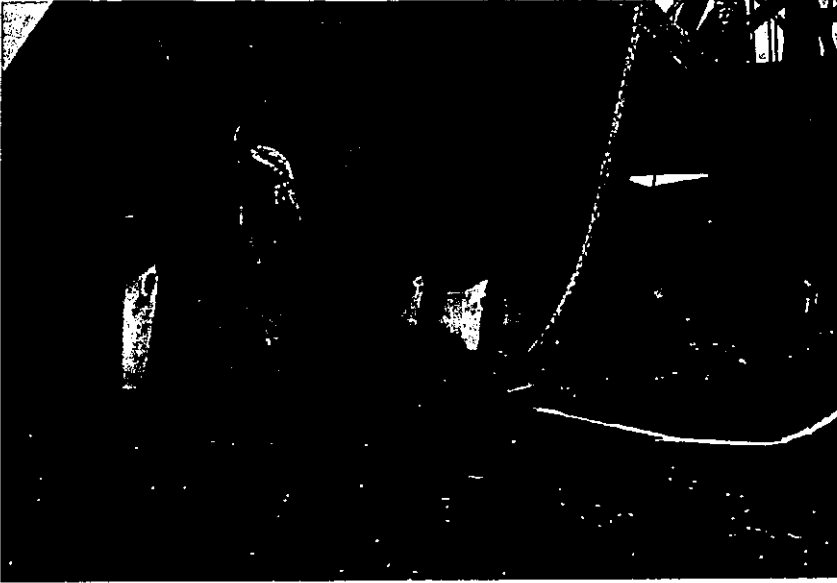
La estructura es cargada al chalán a través de las vigas de deslizamiento. Una vez colocada la estructura en estas vigas, se conecta un cable en uno de sus extremos a la estructura y en el otro a un winche. El winche jala la estructura hacia el chalán. Cabe mencionar que las vigas de deslizamiento se encuentran lubricadas para facilitar el movimiento de la estructura hacia el chalán. Ya estando la estructura en el chalán, es asegurada mediante unos tubos que van soldados a la estructura y a una placa unida a la embarcación. La embarcación con la subestructura es jalada con un remolcador hasta la zona en donde será colocada. En este sitio se encontrará el barco grúa con el cual se procederá a la maniobra de izaje.



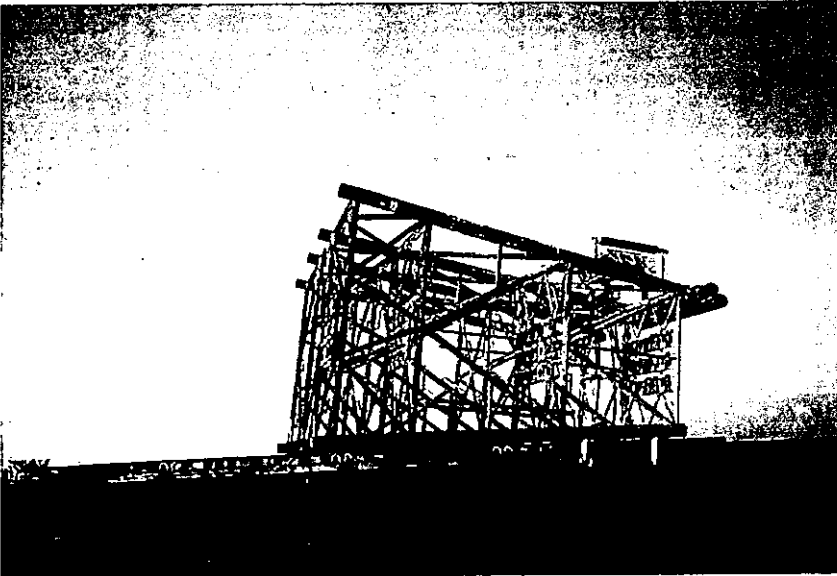
Chalán recibiendo a la subestructura.



Estructura recién colocada en el chalán desde el patio de construcción.



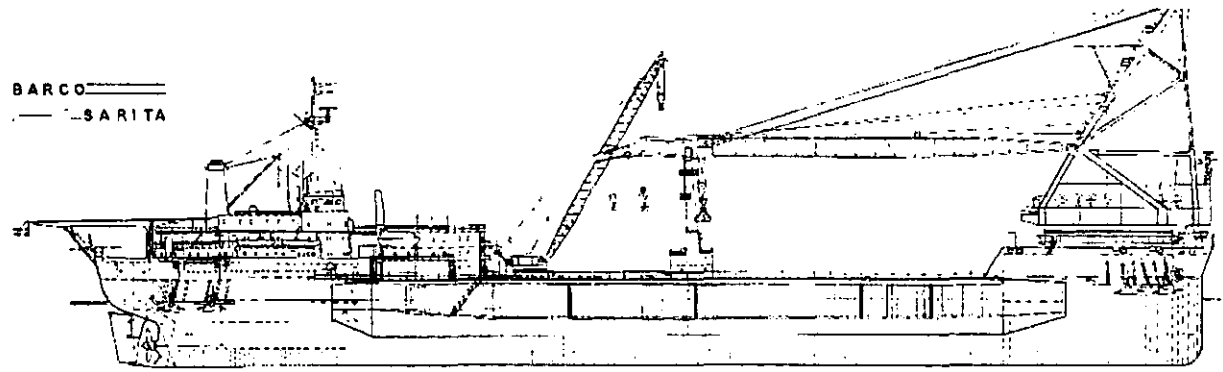
Detalle de seguros marinos de la estructura.



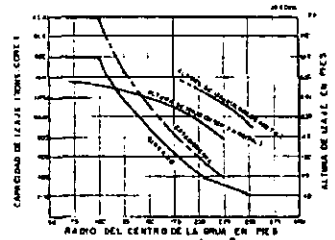
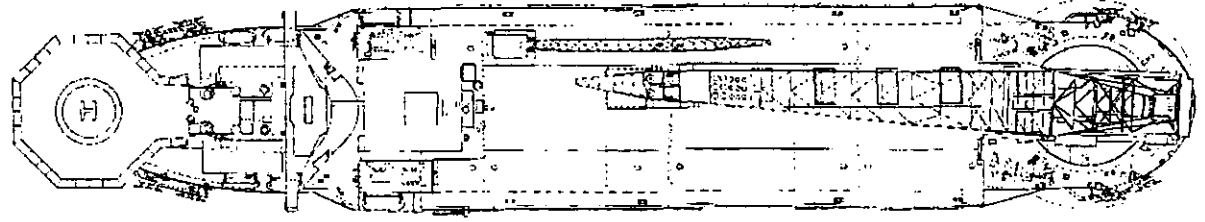
Estructura siendo transportada en el chalán.

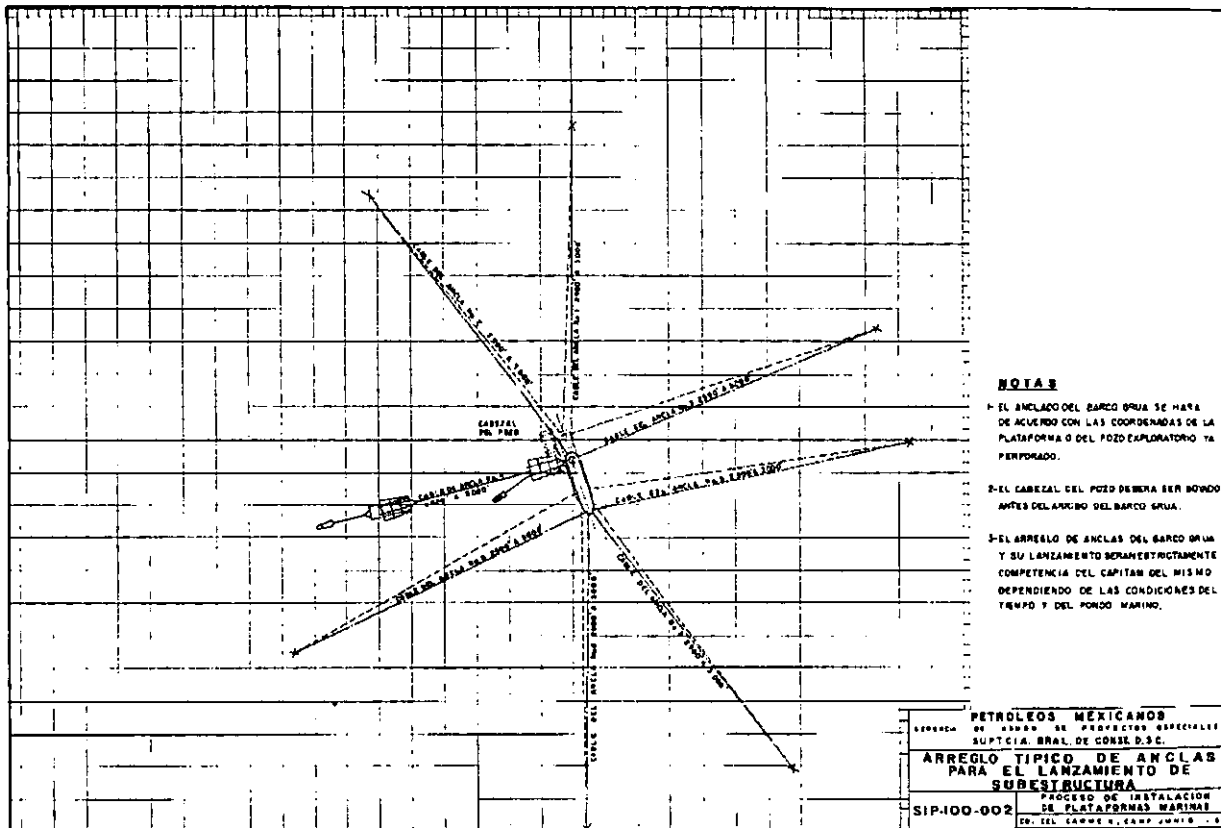
El barco grúa se posiciona en la localización donde va a ser instalada la subestructura. Esta localización es proporcionada por un barco posicionador el cual verifica las coordenadas con los sistemas Shore-An y Argo que se apoyan en sistemas vías satélite y bases ubicadas en tierra o en mar. El sistema Argo es un sistema de posicionamiento que está integrado por una estación móvil auxiliada por dos o tres estaciones fijas en tierra. Tiene una precisión de 5 metros y un alcance de hasta 200 kilómetros. La estación móvil se integra a la embarcación y envía y recibe información de su ubicación a intervalos de una vez por segundo.

Una vez realizado la verificación, se lanza una boya de señalamiento que será recuperada una vez instalada la subestructura. El barco grúa lanza sus ocho anclas para quedar fijo en la posición. La tolerancia para la ubicación oscila en un radio de 50 metros del lugar exacto. En el caso de que haya pozo exploratorio, la subestructura debe ir encima de éste.



ELEVACION





63

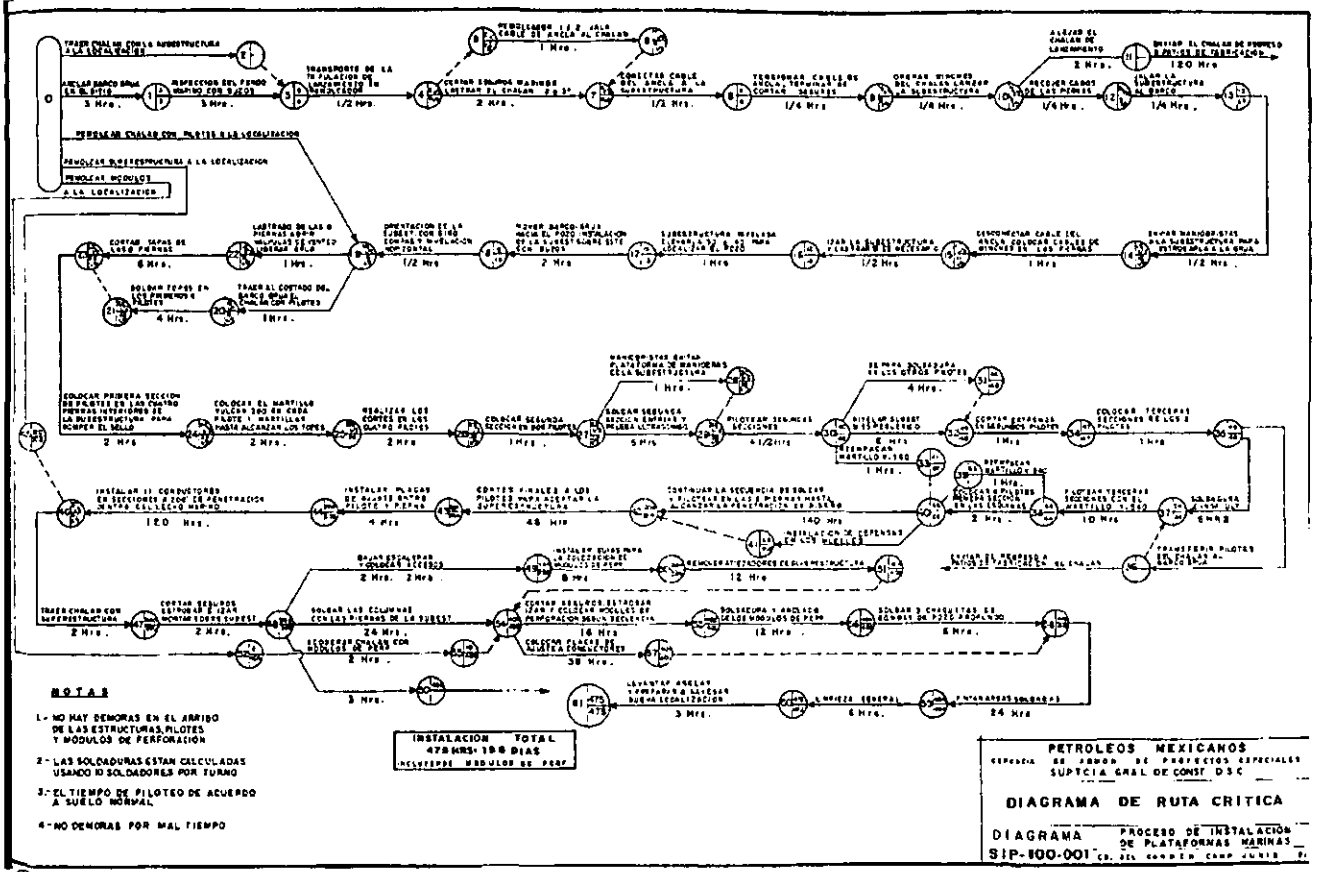
Arreglo de anclaje para el lanzamiento.

4.3 Colocación

Cuando ya se encuentra la estructura en la zona donde permanecerá durante su vida útil se procede a su colocación. Esto comienza por realizar un reconocimiento marino de la zona, después se coloca la subestructura en el mar dejándola ahí flotando. Posteriormente se pone en posición vertical y se hunde. Finalmente se pilotea la subestructura quedando fija al fondo marino.

4.3.1 Reconocimiento submarino

Una vez en posición, la primera actividad es la de checar el fondo marino con buzos para detectar si existen obstáculos que puedan entorpecer los trabajos de instalación de la subestructura; en caso afirmativo se retiran con cables de winches desde la superficie del barco hasta quedar completamente limpio el fondo marino. Para este proceso se utiliza un equipo de buceo de superficie con 6 elementos, 3 buzos y 3 ayudantes. Los buzos bajan en una canastilla que es sostenida con la grúa de cubierta del barco grúa. En el caso de que la subestructura vaya colocada encima del pozo exploratorio, el barco grúa se aleja en dirección contraria a donde queda instalada la estructura con el objeto de evitar que al recuperar la pieza estructural y colocarla en posición vertical pueda ser dañado el cabezal del pozo.



Ejemplo de Ruta Crítica.

4.3.2 Colocación de la subestructura en el mar

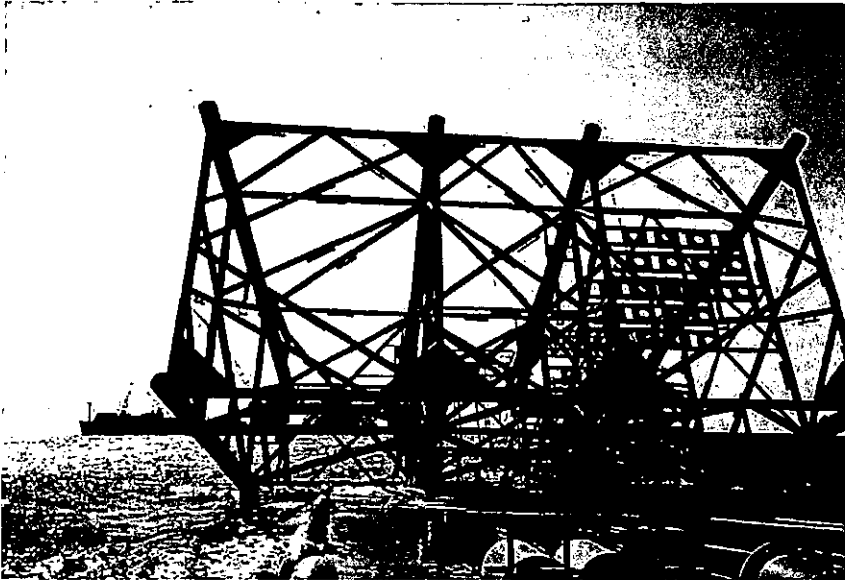
Para bajar subestructuras del chalán existen dos procedimientos. El primero es lanzando la plataforma al mar y el segundo es el de izar la pieza estructural directamente del chalán. El método más seguro y cómodo es el segundo, sin embargo en algunas ocasiones no es posible llevarlo a cabo debido al tamaño de la base de la subestructura que complica el acercamiento del chalán con la pieza estructural al barco grúa sin que ésta sufra daño.

a) Lanzamiento

Ya realizado el reconocimiento submarino, la barcaza de lanzamiento se coloca a 1200 o 1500 pies del barco grúa del lado de estribor dependiendo de las condiciones del tiempo y el mar. La tripulación integrada por soldados, maniobristas, mecánicos, ingenieros de campo, superintendente del barco grúa y capataces de soldadura y cubierta; sale por remolcador hacia la barcaza de lanzamiento para preparar la maniobra. El proceso de lanzamiento se describe a continuación:

1. Se distribuyen los equipos de corte a todo lo largo de los 4 corredores en donde se localizan los seguros marinos e inician la operación de corte.
2. Se checa el funcionamiento de todos los equipos, incluyendo bombas para lastrado del chalán, winches de lanzamiento y compresor de aire.
3. Se recorre hacia proa los cables y poleas de lanzamiento utilizando el winche de aire y el compresor.
4. Se lastra la popa del chalán 2° o 3°.

5. Se colocan los gatos hidráulicos de 60 T.C. en posición por detrás de las vigas que soportan la estructura sobre las correderas de deslizamiento.
6. Se lleva desde el barco grúa el cable del ancla 1 o 2 al chalán de lanzamiento donde es conectada por la popa del chalán a la subestructura.
7. Utilizando el winche de aire los maniobristas conectan el cable del ancla a los cables de arrastre de la subestructura.
8. Una vez conectado el cable del ancla a los estrobos de arrastre, el remolcador deja en libertad ese cable el cual queda flojo y no produce tensión alguna a la subestructura.
9. Cuando faltan por cortar 2 seguros de babor y estribor de proa se corta el cable que asegura el grillete de 100 ton y que conecta los cables de arrastre.
10. Toda la tripulación se concentra en la proa del chalán.
11. Se lanzan al mar las galgas de retenida de la subestructura las cuales se localizan en la proa del chalán.
12. Se cortan los dos últimos seguros marinos.
13. Se operan los winches y gatos hidráulicos para iniciar el despegue de la subestructura. Los winches siguen operando hasta que caiga al mar la pieza estructural.



Lanzamiento de subestructura.

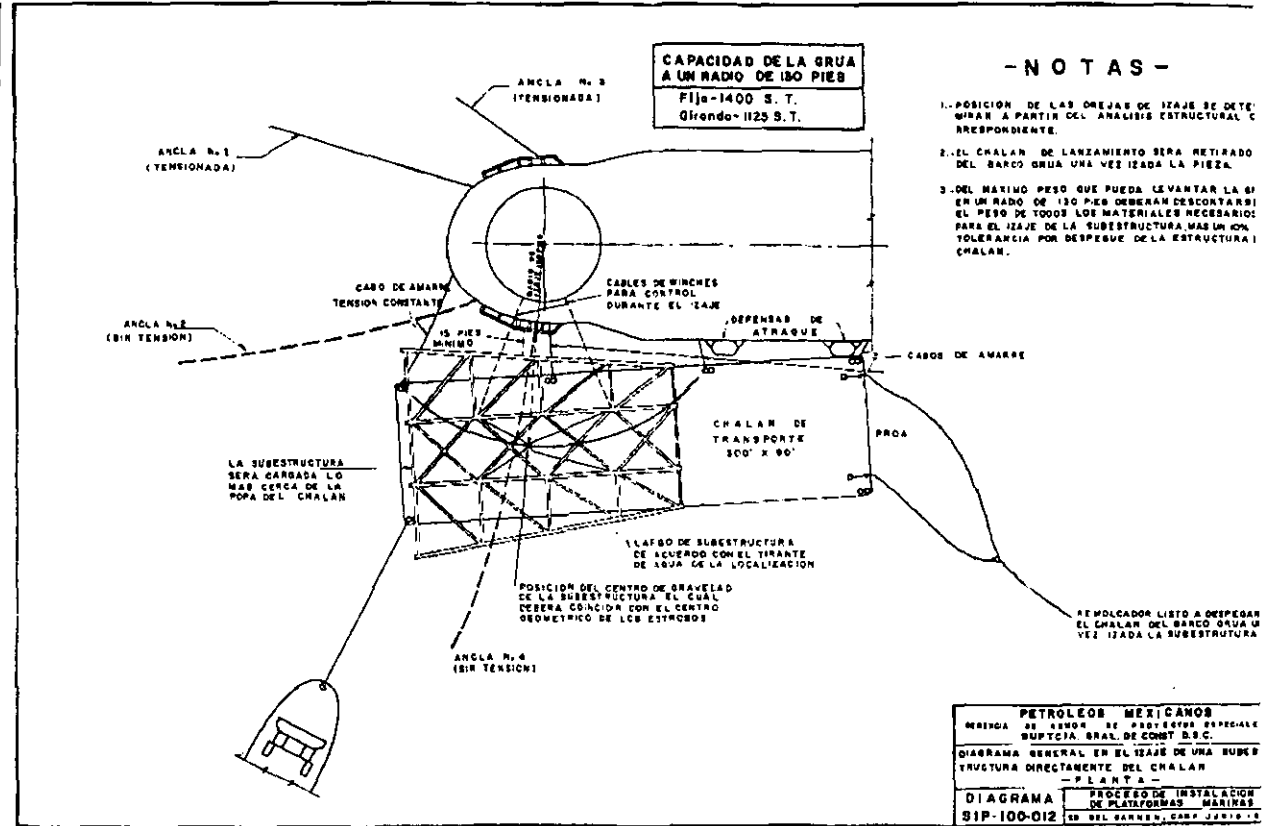
14. Estando la estructura en el mar, el remolcador aleja el chalán de lanzamiento.

15. El remolcador del barco grúa recoge del mar una de las galgas o cabos de retenida, lo conecta al winche de cubierta y lo tensiona hasta controlar la estructura, el barco grúa empieza a jalar el cable del ancla para acercar la pieza estructural al barco grúa.

b) Izaje directo del chalán

Partiendo nuevamente de que ya se realizó el reconocimiento del fondo marino, se trae el chalán con la estructura y se acodera del lado de babor del barco grúa en dirección proa-popa y se controla la popa del chalán con el remolcador del barco grúa.

1. Se amarra la proa del chalán al barco grúa donde descansa sobre las defensas colocadas en la banda de babor.
2. La popa se controla con el remolcador mediante un winche de vapor desde el barco el cual transmite al chalán una tensión constante y lo mantiene fijo.
3. En esta posición el barco grúa tiene una capacidad de izaje máxima por lo que es posible izar con comodidad subestructuras que se adapten a la capacidad de la grúa.
4. Una vez que la estructura es izada 20 o 30 pies por encima del chalán, éste es llevado fuera de la zona de izaje de la estructura.
5. Ya fuera el chalán se baja la pieza estructural hasta dejarla flotando en el mar.
6. En este momento los maniobristas abordan la plataforma de maniobras y colocan los estobos sobre el bloque principal de la grúa.
7. Antes de izar la estructura a su posición vertical deberá de largarse un cabo de retenida que será conectado al remolcador. Éste se coloca a 90° con respecto al barco grúa y jala el cabo conforme se van desarrollando las maniobras de izaje.

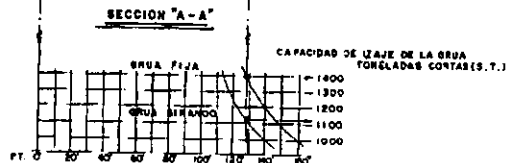
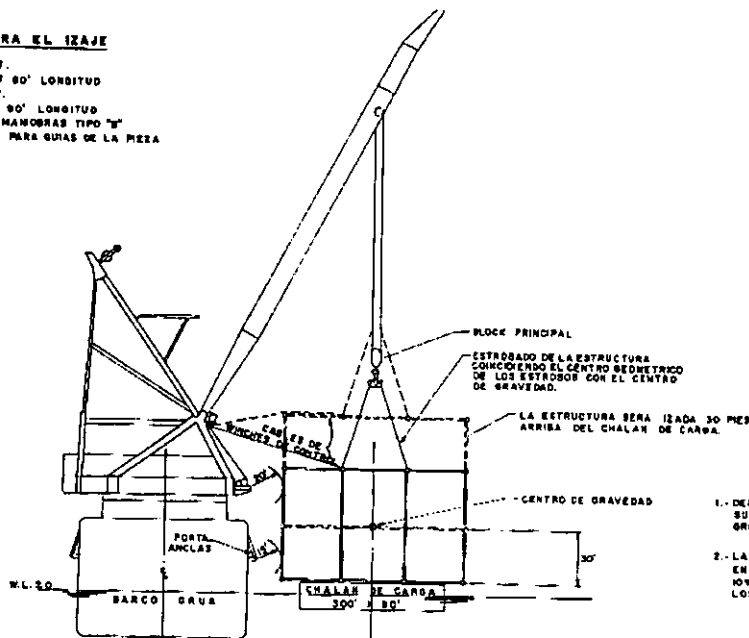
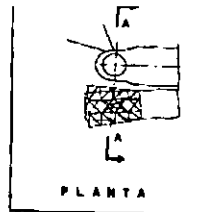


65

Izaje desde el chalán.

MATERIALES PARA EL IZAJE

- 1.- 4 BRILLETES 800 S.T.
- 2.- 4 ESTROBOS 8 1/2" \varnothing 80' LONGITUD
- 3.- 4 BRILLETES 300 S.T.
- 4.- 4 ESTROBOS 8 1/2" \varnothing 90' LONGITUD
- 5.- 2 PLATAFORMAS DE MANOBRAS TIPO "M"
- 6.- CABLES Y BRILLETES PARA GUIAS DE LA PIEZA



NOTAS

- 1.- DEBERA CUIDARSE QUE LAS PIERNAS DE LA SUBESTRUCTURA NO SE ACERQUEN AL BARCO GRUA MENOS DE 15 PIES
- 2.- LA CAPACIDAD DE IZAJE DE LA GRUA SE MUESTRA EN LA TABLA CORRESPONDIENTE, SE CONSIDERA UN 10% DEL PESO DE LA ESTRUCTURA EL PESO DE LOS MATERIALES PARA EL IZAJE.

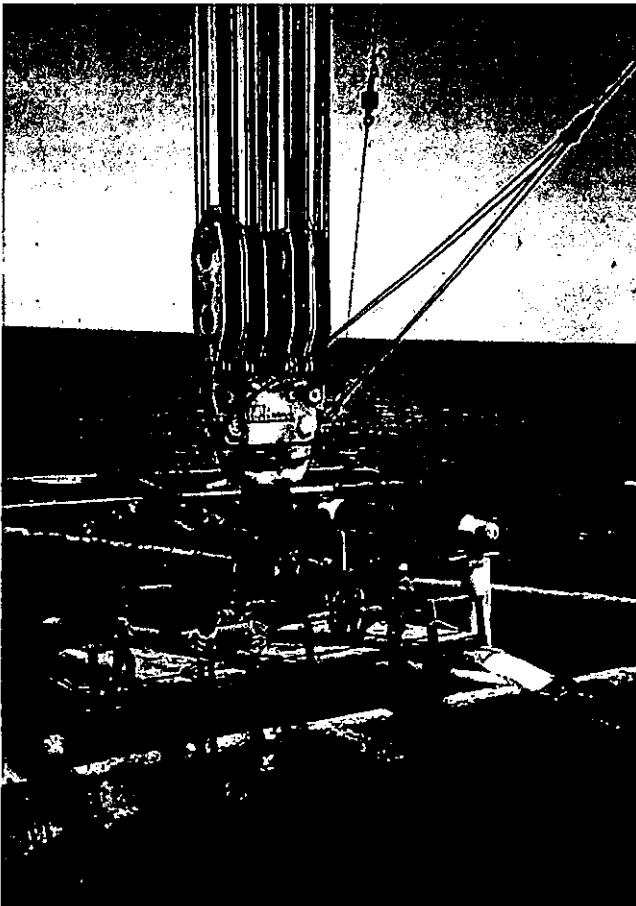
PETROLEOS MEXICANOS	
GERENCIA DE AEROD. DE PROYECTOS ESPECIALES SUPTCIA. GRAL. DE CONSE. D.S.C.	
DIAGRAMA GENERAL EN EL IZAJE DE UNA SUBESTRUCTURA DIRECTAMENTE DEL CHALAN — ELEVACION —	
SIP-100-013	PROCESO DE INSTALACION DE PLATAFORMAS MARINAS DE OIL GARDEN CAMP. ANDINO - B

Izaje desde el chalan.

4.3.3 Colocación de la subestructura en posición vertical

Para ambas alternativas mencionadas previamente, el proceso de colocación de la subestructura en posición vertical comienza por el aseguramiento de la estructura al barco grúa. Posteriormente se sigue el proceso mencionado

1. Una cuadrilla de maniobristas aborda la plataforma de maniobras para colocar los estrobos en los ganchos principales de la grúa.



Maniobristas atando los estrobos a la grúa.



Estructura flotando en el mar.

2. Si la plataforma de maniobras no queda lo suficientemente separada de la superficie del mar, se conecta el arreglo de los estrobos de arrastre al gancho auxiliar de la grúa la cual al hacerse hacia arriba permite que la estructura quede en posición tal que la plataforma de maniobras esté arriba del nivel del mar y sea fácilmente alcanzable para los maniobristas.

3. Se cortan los cables de manila que sostienen los estrobos a la plataforma de maniobras y se colocan los 4 estrobos en los 4 soportes del gancho principal de la grúa.

4. Se conectan a las piernas intermedias de la subestructura dos cables de los winches de la grúa para poder maniobrar la pieza en dirección vertical.

5. Una vez colocados los estrobos a la grúa se regresa a la tripulación del barco y se tensionan los estrobos.

6. El remolcador que sujeta la estructura con las galgas de retenida coloca a la estructura a 90° del plano del barco grúa.

7. Se inicia el izaje de la estructura aplicando tensión a la pieza que comienza a girar suavemente hasta que alcanza su posición vertical lo cual se logra incrementando la tensión del bloque de la grúa. Durante el izaje los winches están en tensión para controlar la pieza. Las válvulas de inundación se mantienen cerradas.

8. Una vez en posición vertical se lastra la estructura abriendo las válvulas de inundación de las piernas centrales en uno de sus lados.

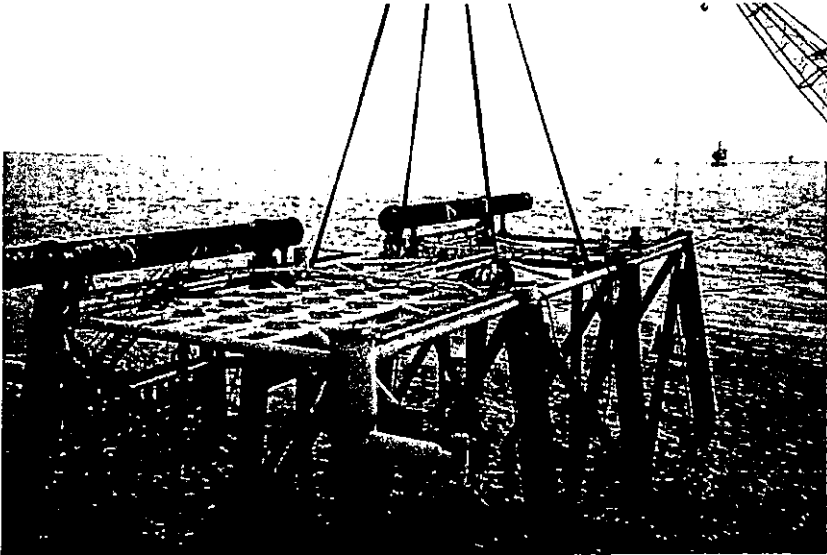
9. Ya lastrada la estructura se abren las válvulas opuestas para lastrar completamente la parte central. Hecho esto se sube la pieza de 30 a 40 pies del lecho marino para ser colocada en posición.

10. El barco grúa se mueve a la posición donde va a colocar la estructura, por medio de las anclas del propio barco.

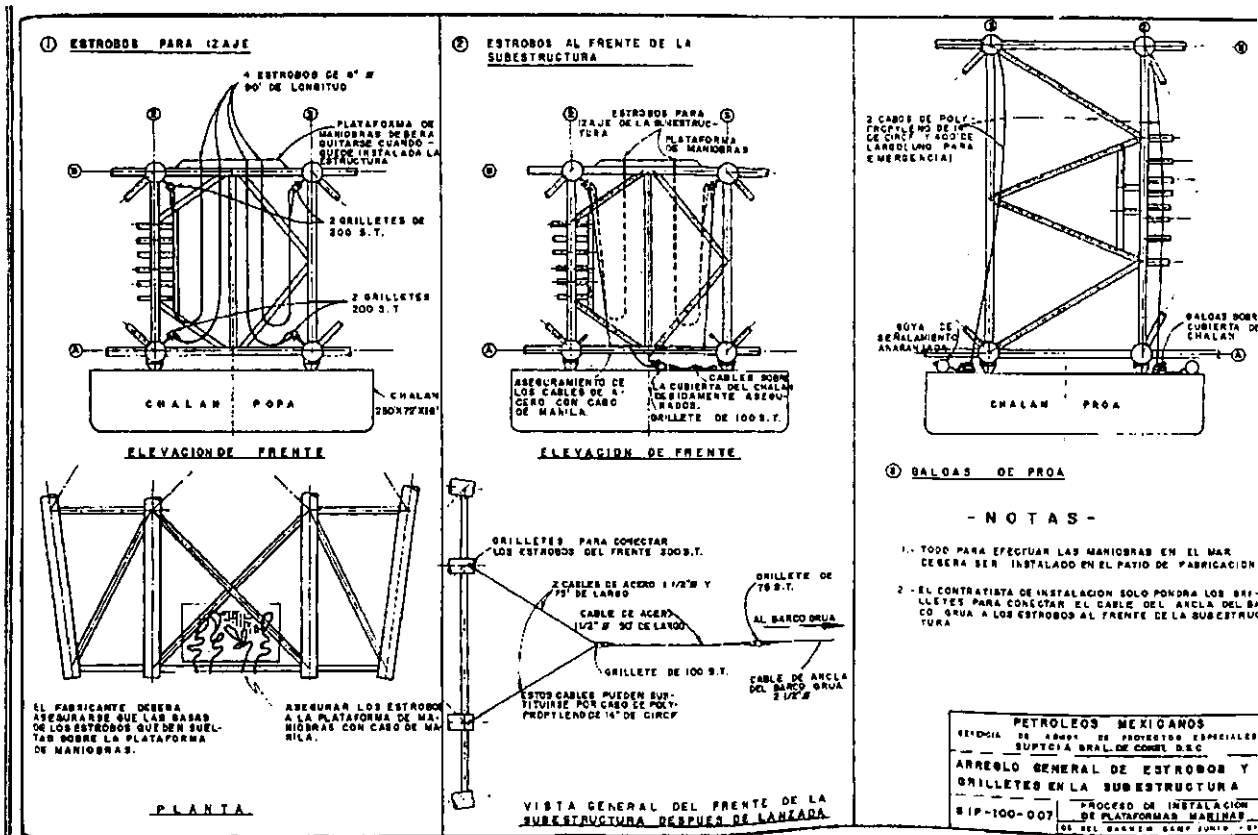
11. Se preparan los buzos para bajar la estructura y colocarla sobre el pozo exploratorio de ser necesario. De no serlo, no se necesitan buzos. Se baja la estructura guiada por los buzos y con los winches de la grúa se coloca la subestructura según se marca en los planos de orientación de la plataforma.

12. Cuando la estructura se encuentra en el lecho marino debidamente orientada, con una tolerancia de 2° de error, se lastran completamente las otras 4 piernas de la pieza y se abren las válvulas de venteo para dejar salir el aire de las 4 piernas previamente lastradas.

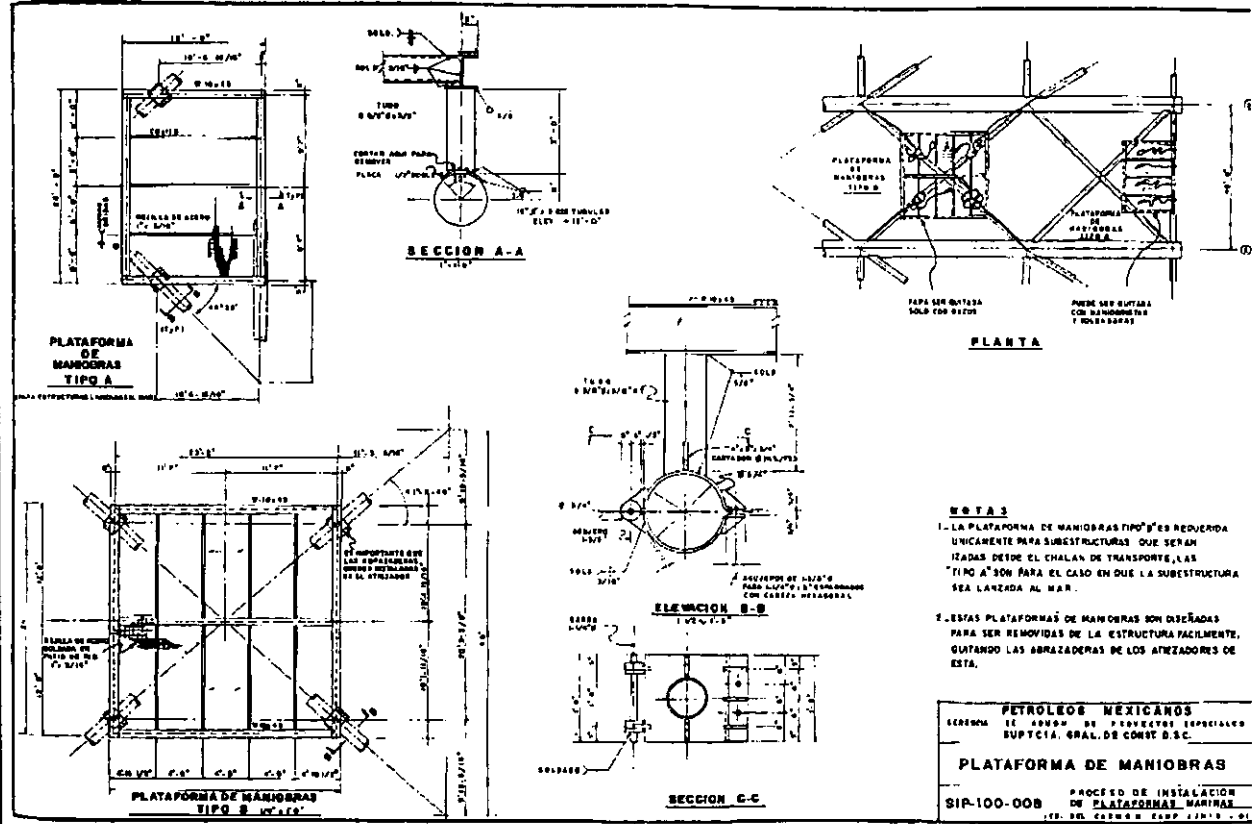
13. Se deja la subestructura libre de estrobos, se retira la grúa y se cortan las tapas de las piernas una vez abiertas las válvulas de venteo.



Subestructura en su posición vertical.

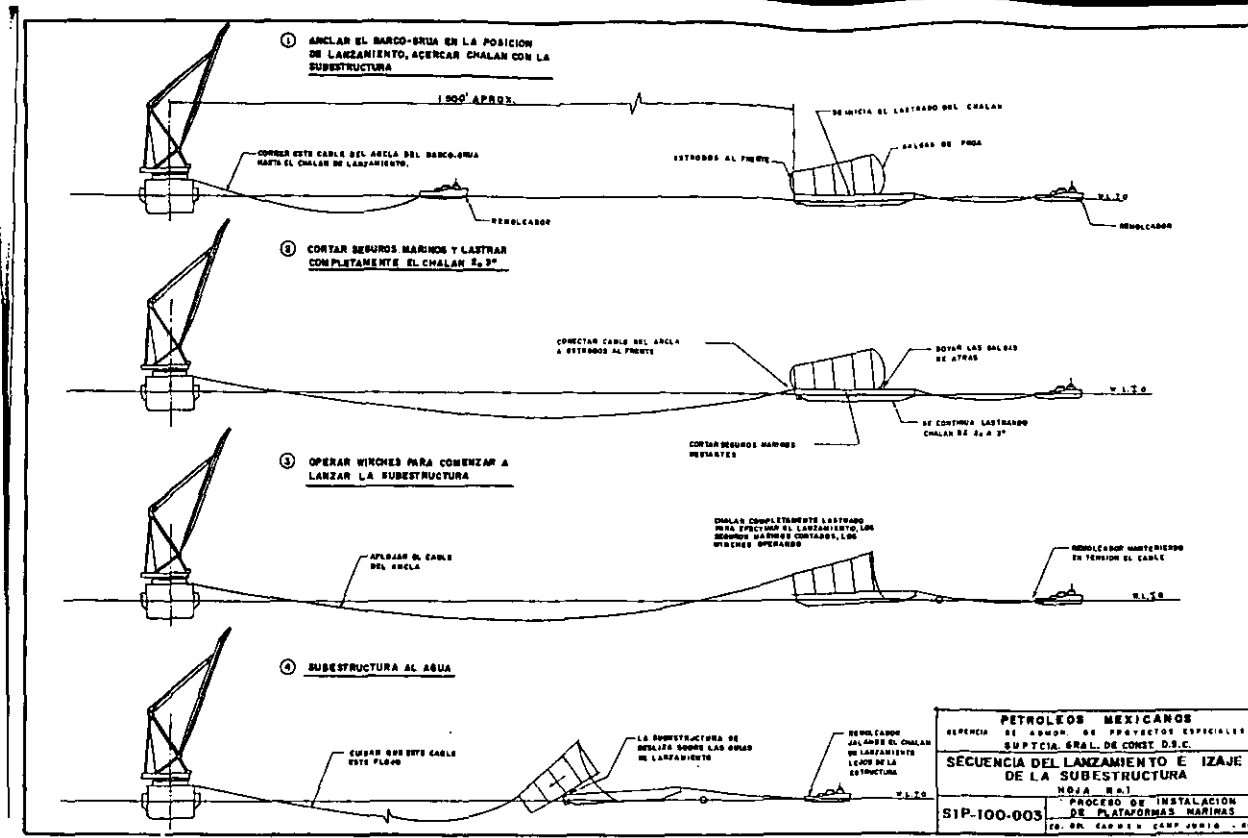


Arreglo de Estrobo y Grilletes en la subestructura.



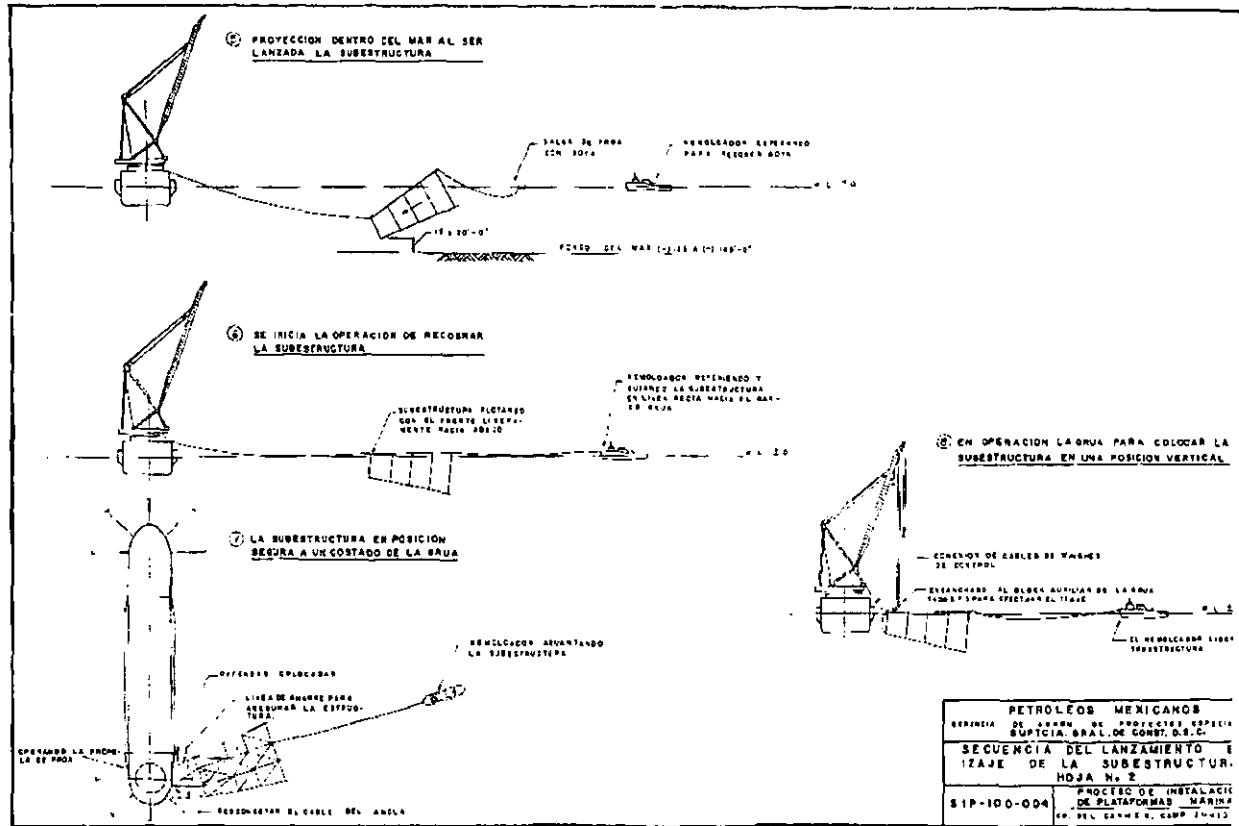
89

Plataforma de maniobras.



PETROLEOS MEXICANOS	
AGENCIA DE ADMON. DE PROYECTOS ESPECIALES SUBD. CIA. GEN. DE CONST. D.S.C.	
SECUENCIA DEL LANZAMIENTO E IZAJE DE LA SUBESTRUCTURA	
NOJA N.º 1	
PROCESO DE INSTALACION DE PLATAFORMAS MARINAS	
SIP-100-003	20. 88. 24. 15. 18. 24. JUNIO 68 . 88

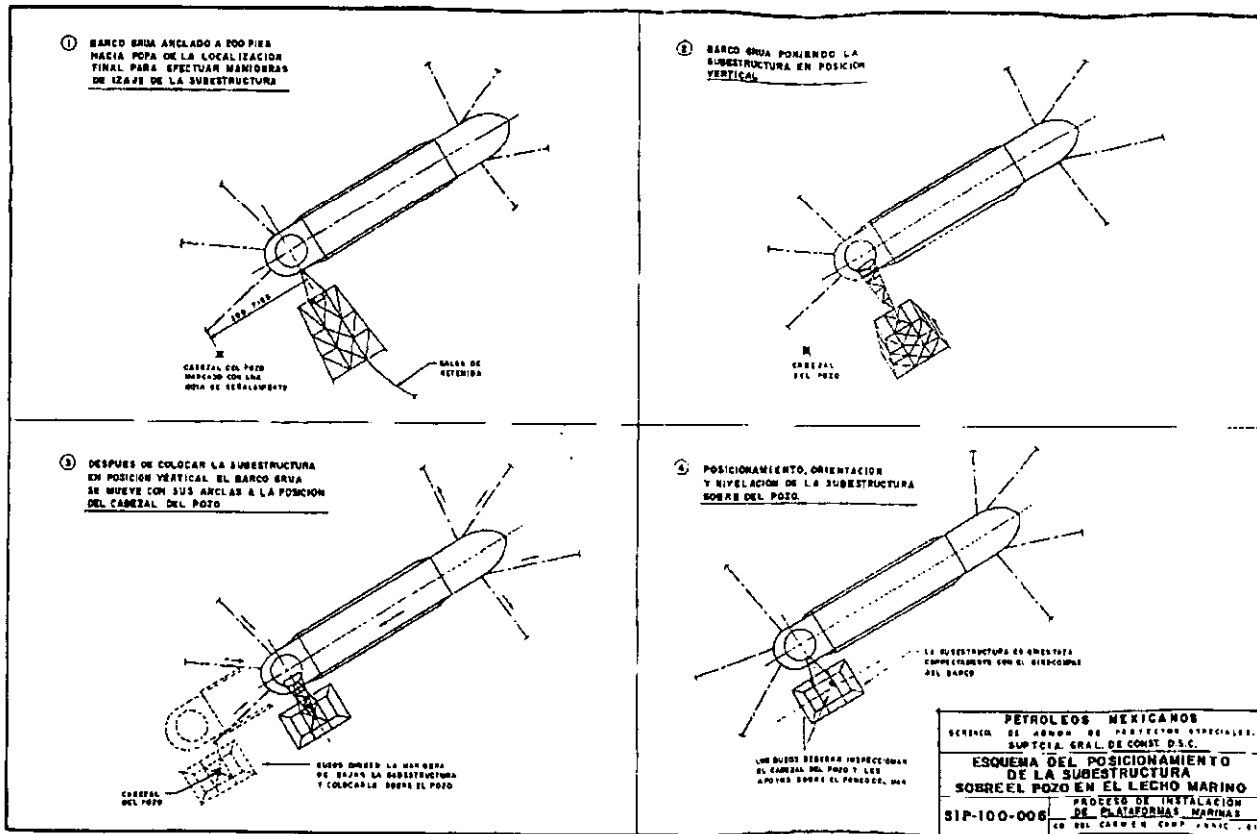
Lanzamiento de la subestructura al mar.



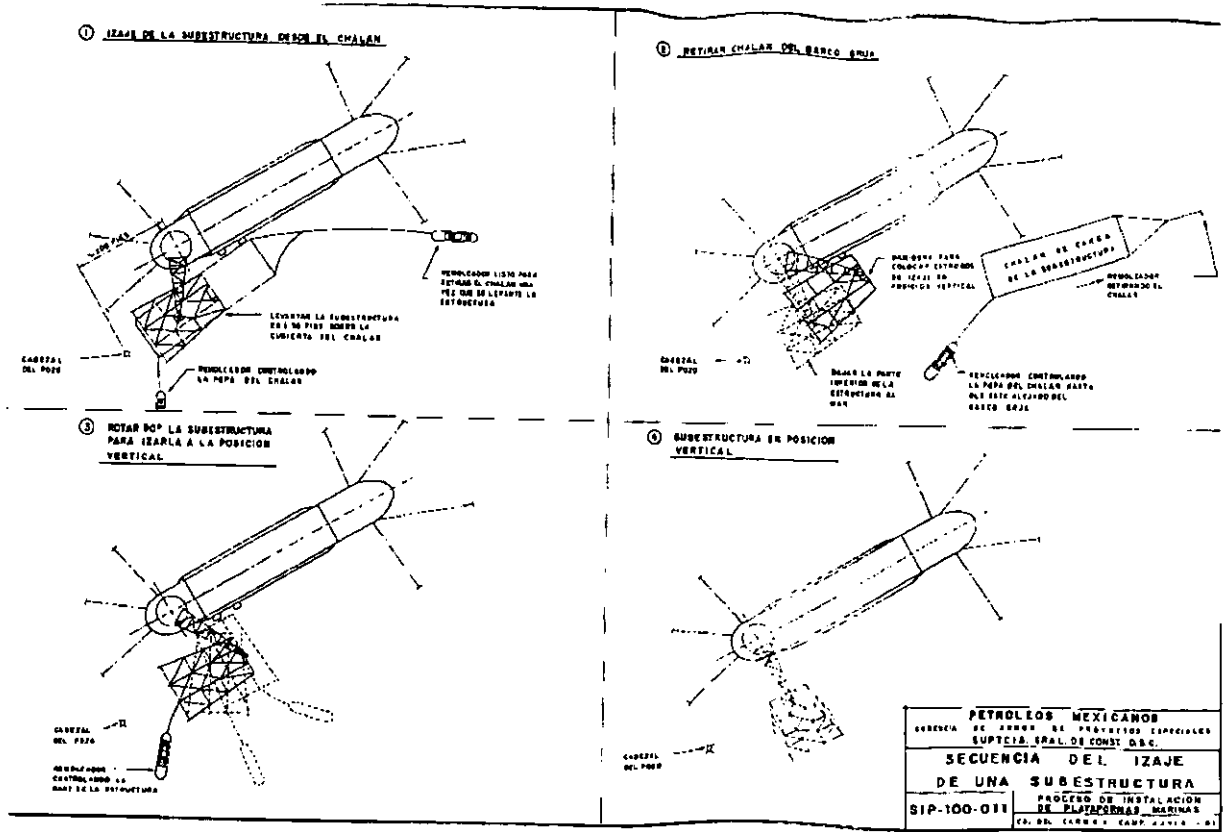
PETROLEOS MEXICANOS GERENCIA DE OBRAS DE PRODUCTOS ESPECIALES SUPTCIA. BRAL. DE COMB. D.S.C.	
SECUENCIA DEL LANZAMIENTO E IZAJE DE LA SUBESTRUCTURA HOJA N. 2	
SIP-100-004	PROYECTO DE INSTALACION DE PLATAFORMAS MARITIMAS EP. DEL CAMPELLO, CAMP. 20-113

70

Lanzamiento de la subestructura al mar.



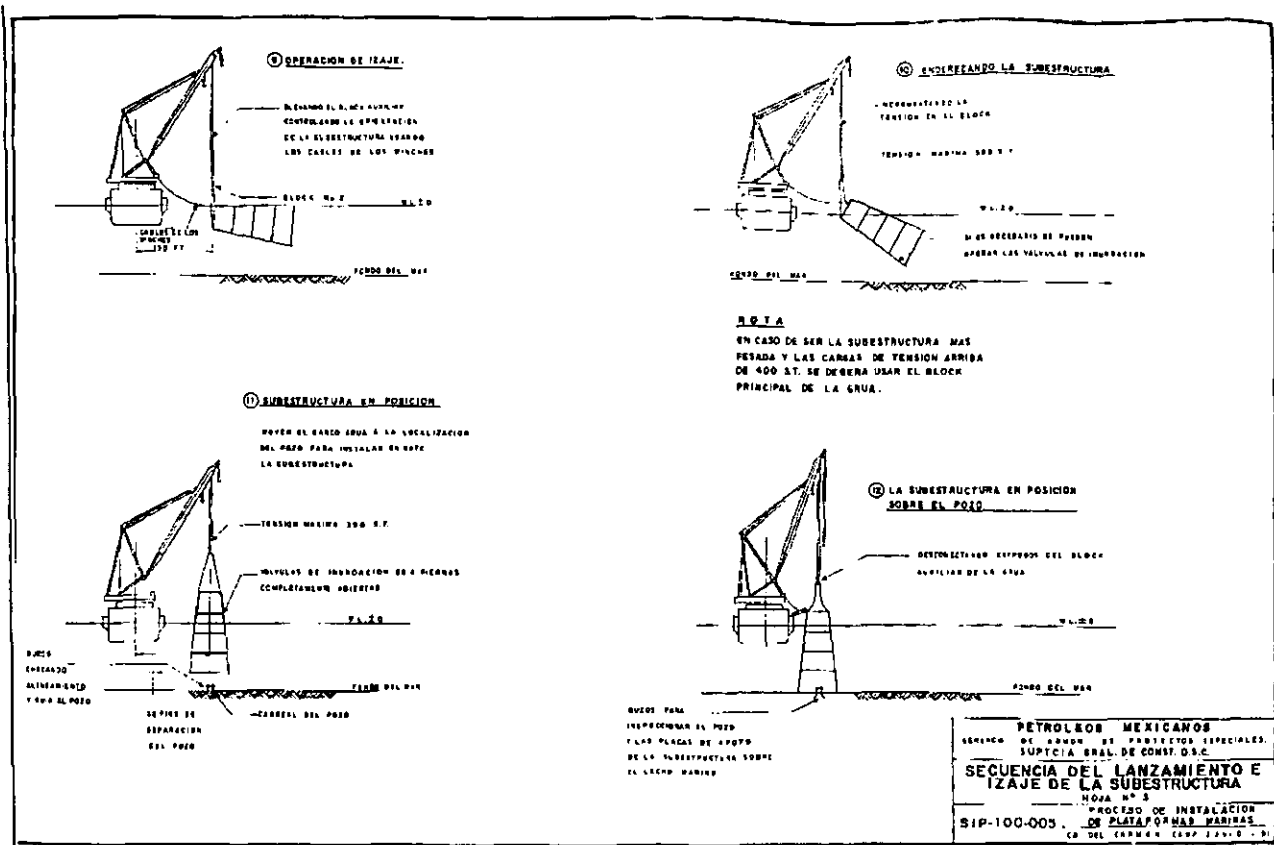
Posicionamiento de subestructura sobre el pozo.



PETROLOS MEXICANOS DIRECCION DE OBRAS DE PUERTOS Y CANALES SUPLENTE, SEAL DE CONST. D.C.	
SECUENCIA DEL IZAJE DE UNA SUBESTRUCTURA	
SIP-100-011	PROCESO DE INSTALACION DE PLATAFORMAS MARINAS CD. DR. CARLOS G. GARCIA - 81

Secuencia de izaje.

72



PETROLEOS MEXICANOS
 SERVICIO DE ARMAO DE PROYECTOS ESPECIALES.
 SUPTCIA. BRAL. DE CONST. D.S.C.

SECUENCIA DEL LANZAMIENTO E IZAJE DE LA SUBESTRUCTURA

HOJA No. 3

PROCESO DE INSTALACION

SIP-100-005. DE PLATAFORMAS MARINAS

CA DEL CARBON CAMP. 1.24.0. 91

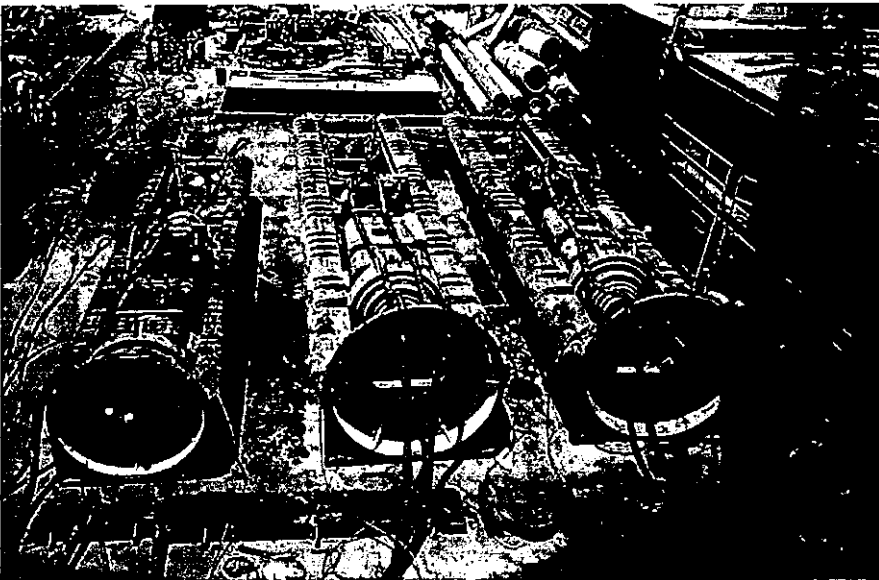
Izaje de la subestructura.

4.3.4 Piloteo de la subestructura

Para el piloteo de la subestructura es importante definir el tipo de martillos que se emplearán, así como las características de los pilotes y conductores. Una vez definidas estas características, se procede al piloteo, nivelación e hincado de conductores.

a) *Martillos*

Básicamente se utilizan tres tipos de martillo: los de 30 000 lb-pié, 180 000 lb-pie y 300 000 lb-pie de energía. Estos martillos son de vapor con un peso no mayor a 130 T.C. el más grande. La máxima cantidad de golpes para éstos no excederá los 250 por pie de penetración en 5 pies seguidos ya que en el caso contrario el martillo puede ser dañado.



Martillos.

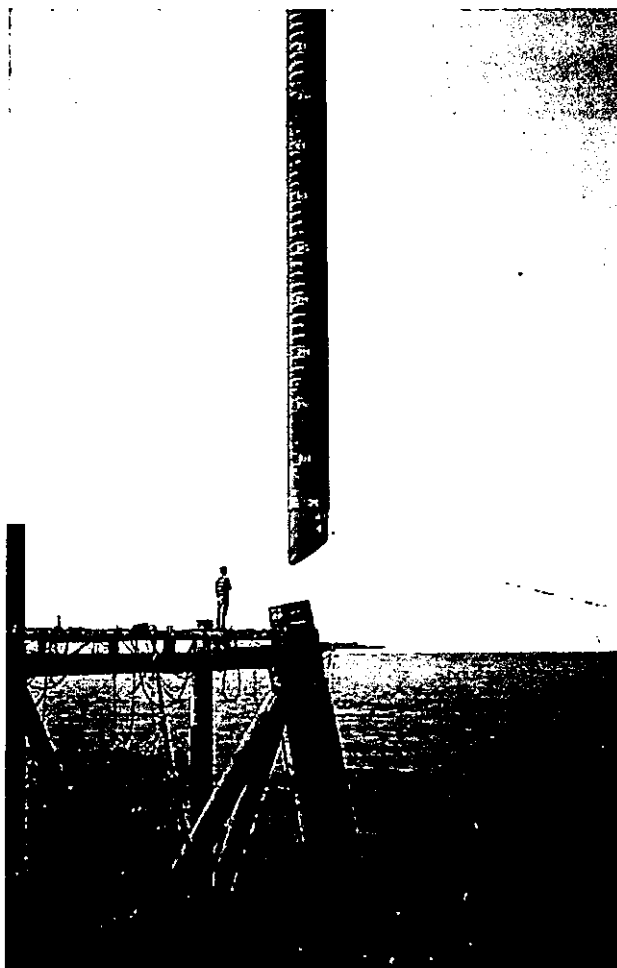
b) Características de los pilotes

Los pilotes vienen en secciones de longitud variable, un pilote generalmente se compone de 3 o 4 secciones de acuerdo con el tirante de agua y la penetración de diseño. Los pilotes se pueden dividir en tres tipos: internos, de esquina y de prueba.

c) Piloteo

Los pilotes son hincados hasta alcanzar la penetración de diseño por las piernas de la subestructura. Cuando existe alta resistencia por parte del suelo, se remueve el tapón de la punta de la pierna a base de chorro de agua. Antes de comenzar el piloteo se verifica la nivelación a partir de la cual se decide que pierna interna se va a pilotear. Generalmente se comienza por la que queda en el lado que se encuentra más bajo.

El primer pilote es el de prueba el cual se pilotea y se va checando paralelamente el registro del número de golpes por pié de penetración con las gráficas de resistencia de penetración del estudio de mecánica de suelos. Una vez terminado éste pilote de prueba y alcanzada su penetración de diseño se proceda a pilotear el opuesto y así sucesivamente. Después de terminar de hincar cada pilote es necesario hacer una nivelación con una tolerancia de desnivel de 2 pulgadas. Una vez terminados los 4 pilotes interiores se proceden a pilotear los de esquina.

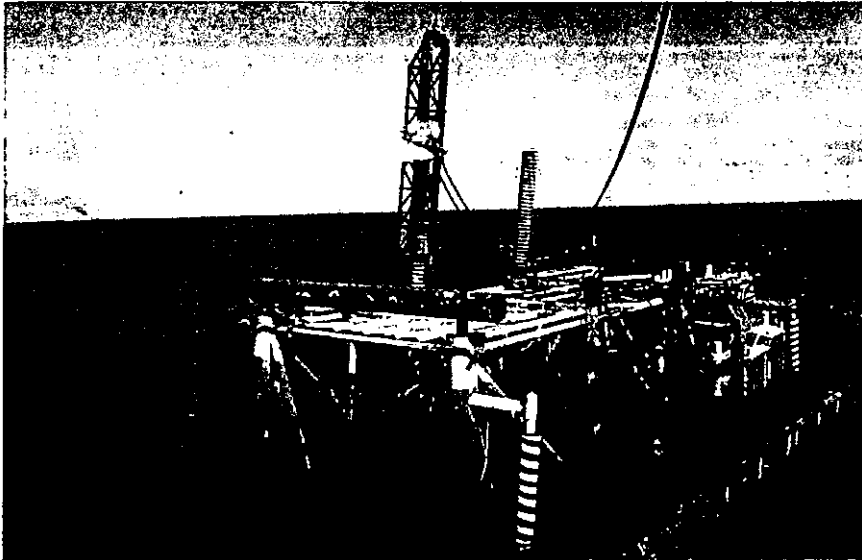


Entrada de pilote por pierna de subestructura.

Es importante que durante el piloteo se tome en cuenta lo siguiente:

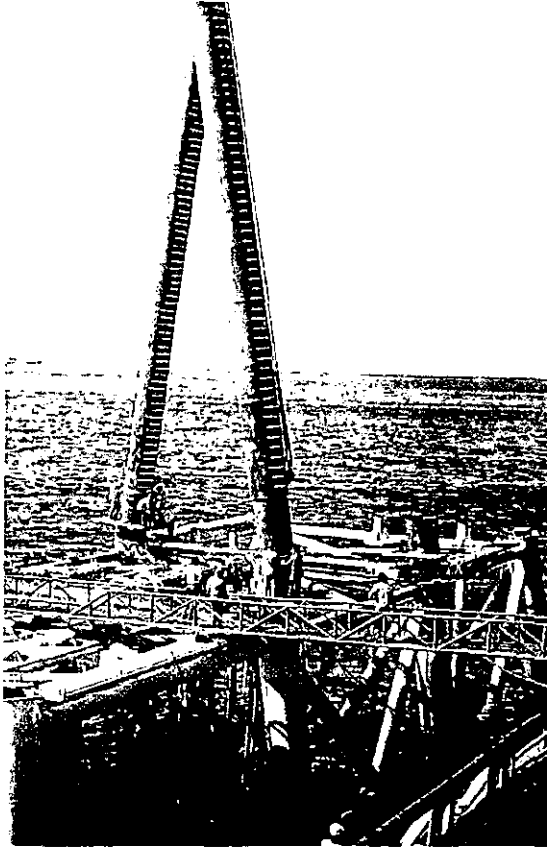
- Cada sección de pilote cuenta con dos agujeros de 5 pulgadas en la punta par poder ser engrilletado, estrobado e izado.
- Las primeras secciones de los pilotes tienen topes de protección para evitar que se vayan dentro de la pierna en caso de que el suelo no proporcione mucha resistencia.

- Las primeras secciones de los pilotes son más largas que las piernas de la subestructura, por lo tanto para lograr romper el diafragma de la pata se suelta éste tramo de pilote en caída libre desde una altura de 40 pies.



Piloteo con martillo.

- Las secciones complementarias del pilote tienen guías de acoplamiento para facilitar la soldadura entre una sección y la siguiente.
- Se corta la parte superior de las secciones de los pilotes 2 pies abajo del extremo ya que éste tramo sufre deformaciones por el impacto.



Unión entre dos secciones de pilote.

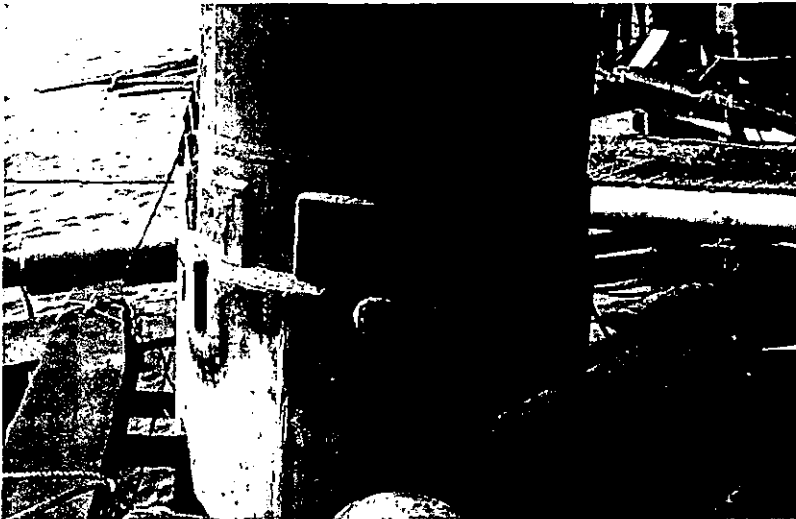
- Una vez terminada la soldadura entre dos secciones del pilote se efectúa una inspección de la calidad de ésta mediante un ultrasonido.
- Al iniciar la colocación de un pilote se trabaja en forma continua sin dejar ninguna etapa a medio concluir debido a que de no alcanzar la profundidad de diseño el pilote puede sufrir los efectos de congelamiento del suelo y ocasionarse daños al volverse a pilotear.
- Una vez terminado el piloteo y comprobado el nivel de la subestructura se fijan los pilotes con la pierna de la subestructura con la ayuda de placas de ajuste de diferentes espesores, las cuales van soldadas a todo alrededor de la pierna.

d) Nivelación de la subestructura

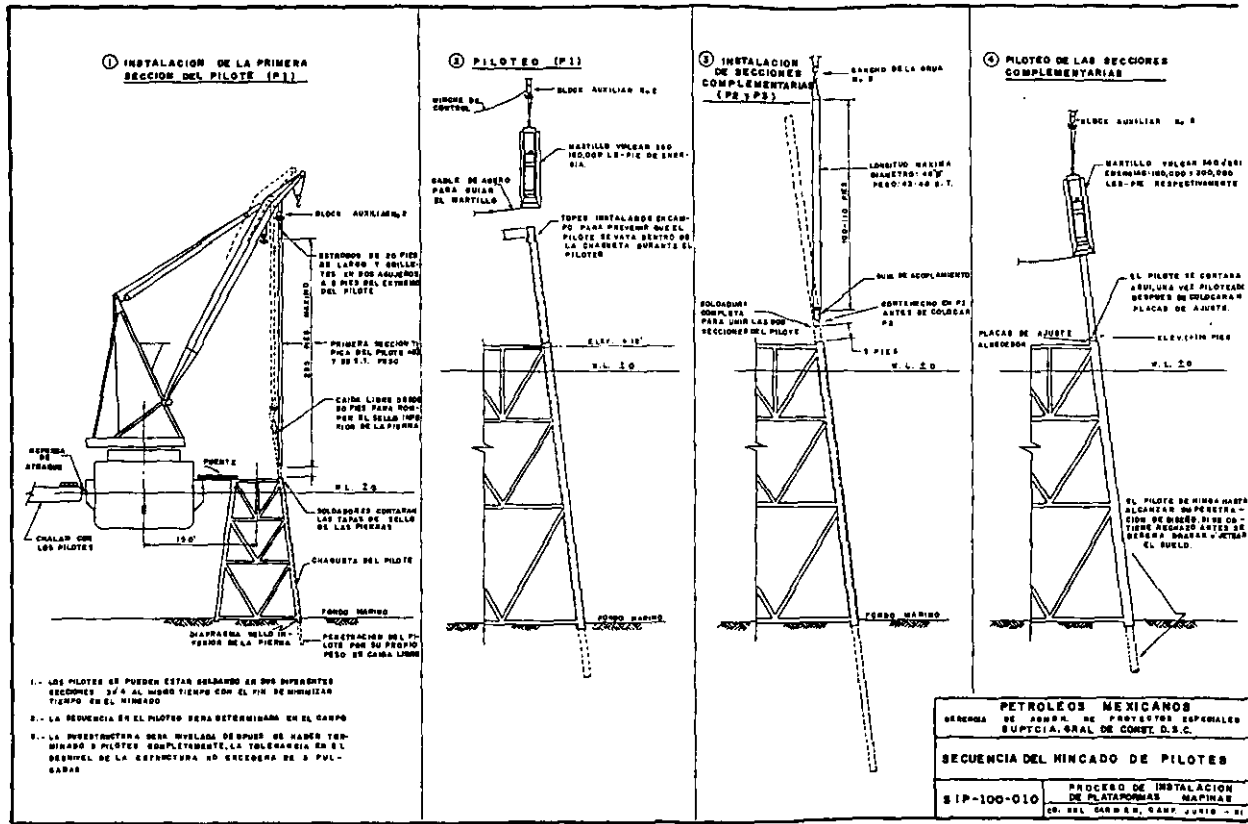
El nivelado es uno de los detalles más importantes que se deben cuidar al instalar la subestructura ya que de ésta depende el buen funcionamiento de nuestra plataforma. El nivelado de la estructura se va haciendo conforme se van colocando los pilotes, corrigiéndose los errores en el momento. Existen diversos métodos para esto, el más común es el pilotear el lado más bajo para ir levantando el lado opuesto de la estructura.

e) Piloteo de conductores

Los conductores son tubos de acero que contienen a los pozos de perforación. Debido a que éstos carecen de guía para su colocación es necesario utilizar un dispositivo conocido como beap case para acoplar las secciones y efectuar la soldadura. Dada su gran importancia dentro del funcionamiento de la plataforma, su piloteo debe de realizarse con sumo cuidado verificando la manera en que va penetrando el suelo de acuerdo a la estratigrafía resultado del estudio de mecánica de suelos.



Beap case para conductores.



Hincado de pilotes.

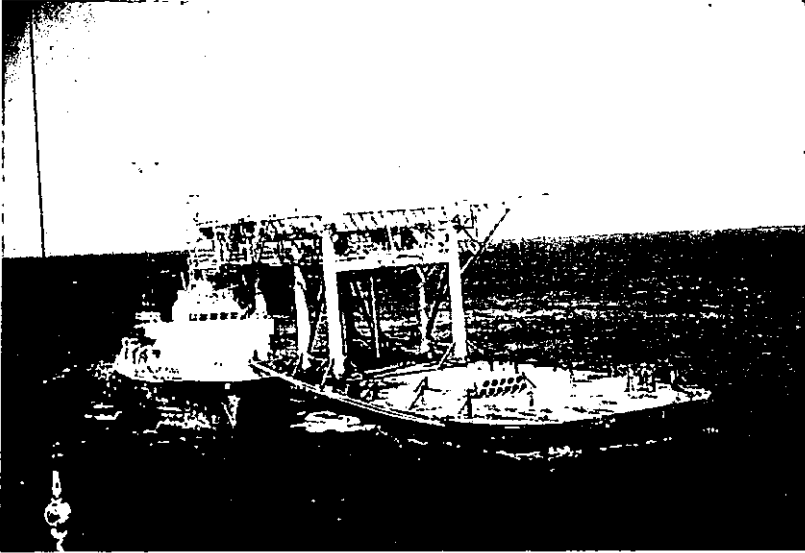
4.4 Equipos especiales

Los equipos especiales que comprenden la instalación de obras marítimas tales como las plataformas incluye la instalación de la superestructura, los paquetes de perforación y tendido de líneas. También es importante el mencionar los trabajos topográficos realizados para la correcta identificación de las estructuras y su posicionamiento.

La superestructura de una plataforma marina consiste de 8 columnas de las cuales saldrán los pisos proyectados según del diseño. Para su construcción es importante el realizar maniobras perfectamente coordinadas por las grúas. Generalmente se componen por un piso de atracamiento, uno de producción y de perforación, un piso habitacional y finalmente el helipuerto.

Antes de su transporte se deben de hacer en los patios de construcción las siguientes preparaciones:

- Se instala la grúa de la plataforma cuidando de no correr el centro de gravedad de la superestructura. La pluma se coloca en el pedestal de descanso y asegurarse en posición horizontal buscando que no sea un obstáculo al momento de instalar la superestructura o los paquetes de perforación.
- Es necesario conocer la información sobre el peso de la superestructura y el centro de gravedad.
- La superestructura va reforzada con elementos estructurales que rigidizen las columnas, para evitar que éstas se abran durante el izaje y el asentamiento en la subestructura.

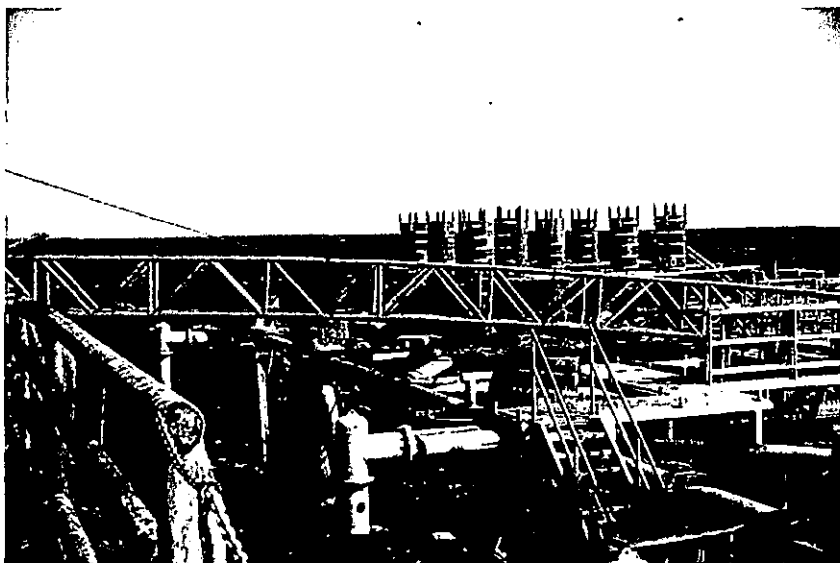


Traslado de la superestructura a donde será instalada.

4.4.1 Instalación de la superestructura

Una vez que la subestructura es piloteada y queda cimentada en el mar, sobre los pilotes de ésta se monta directamente la superestructura sin que haya elementos de intersección por lo que es de gran importancia el corte que se haga de los pilotes, ya que de la calidad de éste dependerá el desnivel que tenga la superestructura. Este corte comienza con colocar el nivel en el centro de la estructura de tal manera que se puedan observar los 8 pilotes con claridad. De esta posición, se miden las alturas a ambos lados de cada pilote con la ayuda de un estadal. Posteriormente se calcula la elevación media de la estructura con la cual se reposiciona el nivel de esta altura.

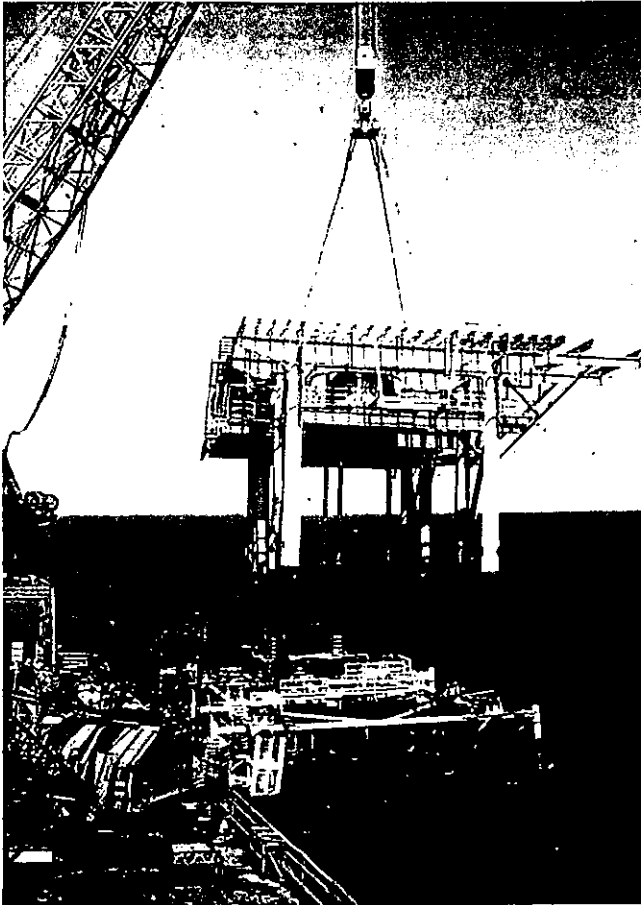
Con esta altura media, se observan los pilotes en un plano horizontal y se marca el centro de cada uno sobre su punto más bajo. Luego se mide hacia arriba una distancia igual a la diferencia entre el punto teórica más bajo y la altura a que se encuentra colocado el instrumento. Se marca este punto en cada uno de los pilotes siendo el punto más bajo para éstos. Después se coloca la plantilla de corte, proporcionada por el fabricante, sobre el pilote a partir del punto más bajo y el punto de trabajo considerando la variación que existe de plantilla para pilotes de esquina e interiores. Finalmente se marcan los puntos siguiendo el declive de la plantilla y se procede a cortar el pilote siguiendo la línea marcada.



Subestructura lista para recibir a la superestructura.

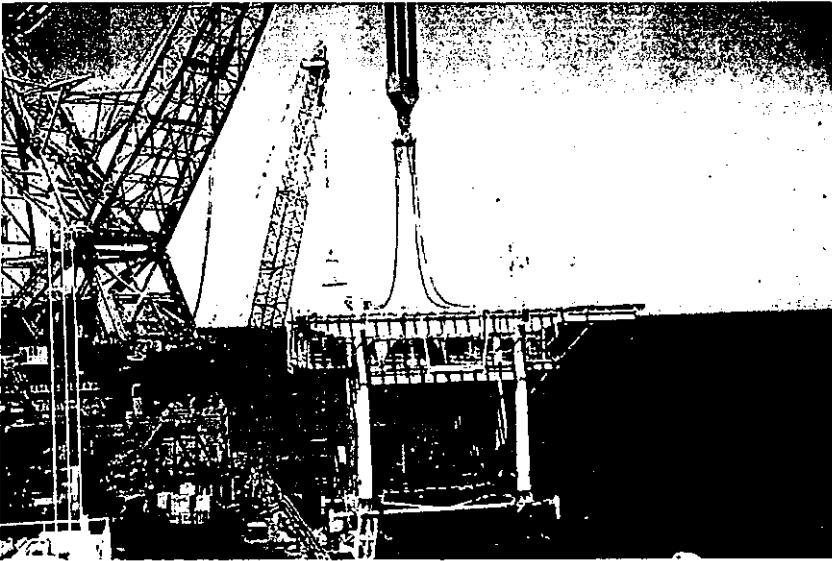
Ya habiendo cortado los pilotes, se procede a la colocación de la superestructura según se menciona:

1. Se acodea el chalán al barco grúa de manera que la pluma de la grúa forme un ángulo de 90° con el centro longitudinal de la superestructura.
2. Se colocan los estrobo y grilletes en el bloque principal de la grúa. Se cuida que el centro geométrico del sistema de izaje coincida con el centro de gravedad de la superestructura, mediante la adecuada longitud de los estrobo.



izaje y colocación de la superestructura.

3. Se cortan los seguros marinos que sujetan a la superestructura en el chalán y se colocan los cables de los winches de gobierno de la grúa a las columnas de la superestructura para izar la pieza y colocarla sobre los pilotes de la subestructura con el mayor control posible.



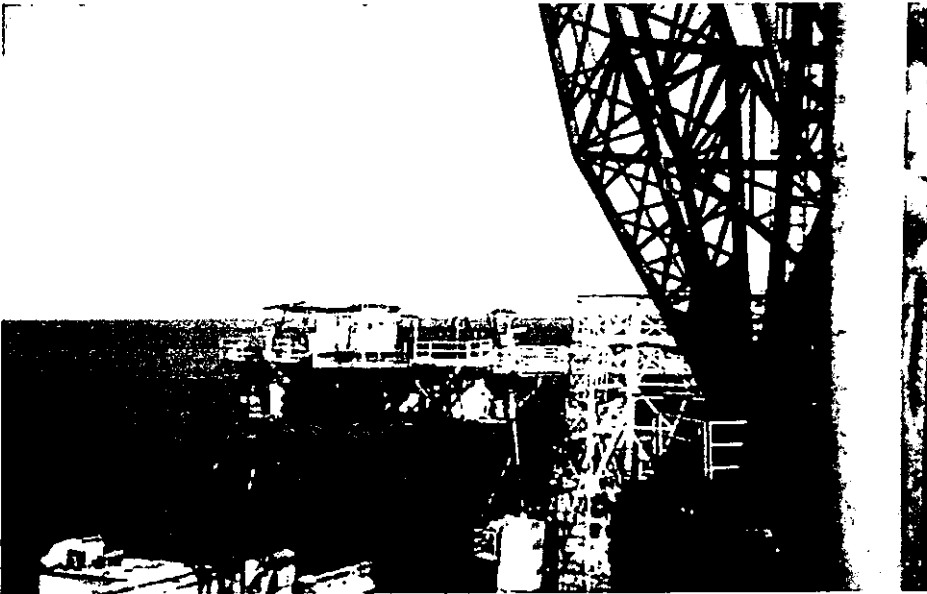
Superestructura ya colocada.

4. Ya colocada la superestructura se efectúan las soldaduras de las juntas pilote-columna y se realiza una nivelación de la cubierta. La tolerancia de desnivel no debe ser mayor de 10 mm.

5. Después de soldada la superestructura se colocan las escaleras retráctiles para tener acceso a ésta y las defensas de los atracaderos. También se sueldan las camisas de las bombas de pozo profundo y se limpia todo el material que haya quedado adherido a las columnas. Finalmente se colocan las últimas secciones de los conductores, se pintan las zonas donde hubo cortes y se hace una limpieza general de la estructura.

4.4.2 Colocación de paquetes de perforación

Ya estando colocada la superestructura, se marca en cubierta la posición de los paquetes de perforación que son distribuidos en tres niveles: inferior, superior e intermedio. Estos paquetes se trasladan sobre un chalán y se colocan de una manera similar a la descrita para la superestructura.

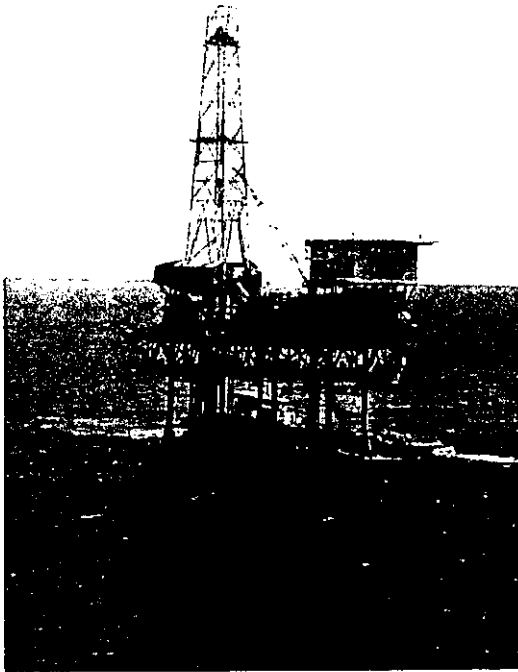


Izaje y colocación de estructuras especiales.

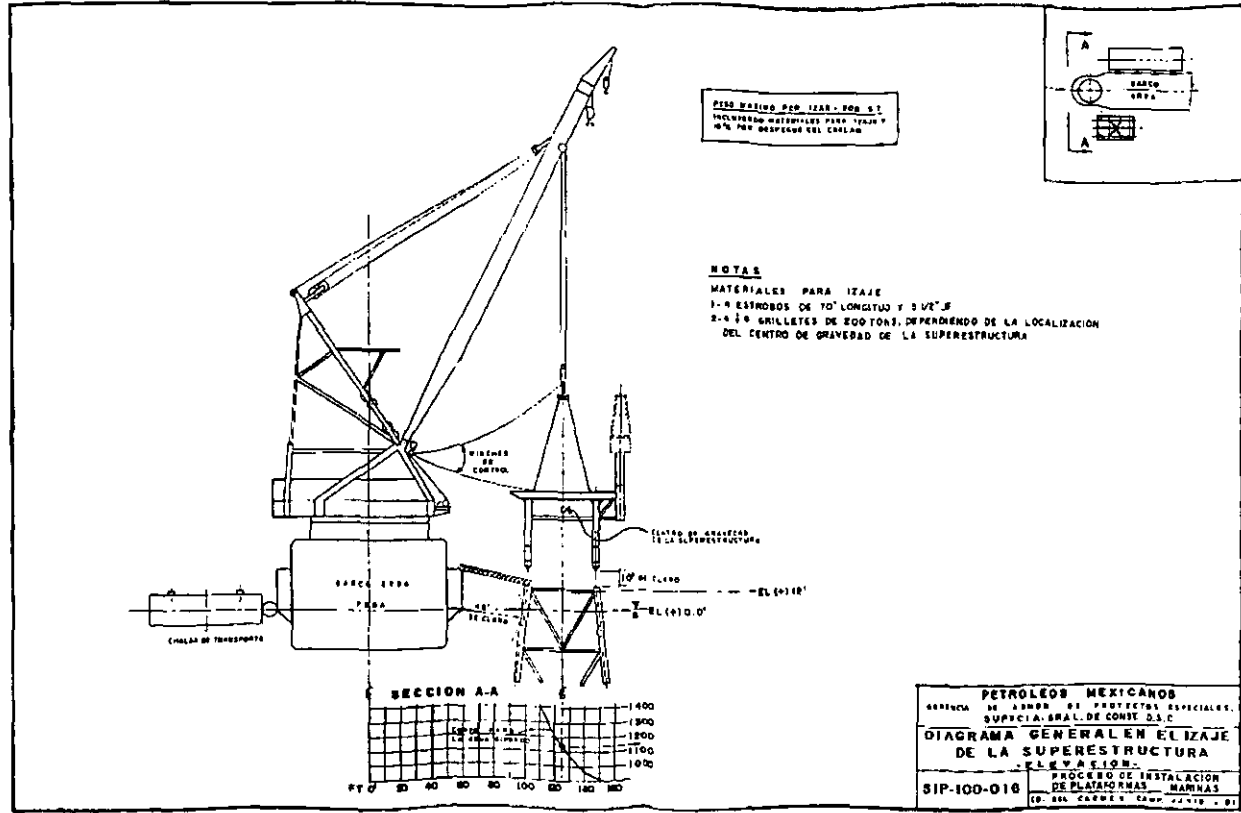
Finalmente un grupo de técnicos se dispone a realizar las interconexiones mecánicas, eléctricas, de tuberías, instrumentación, pintura y armado de la torre de perforación; lo cual permitirá poder dar por terminado el proceso de construcción e instalación de una plataforma.



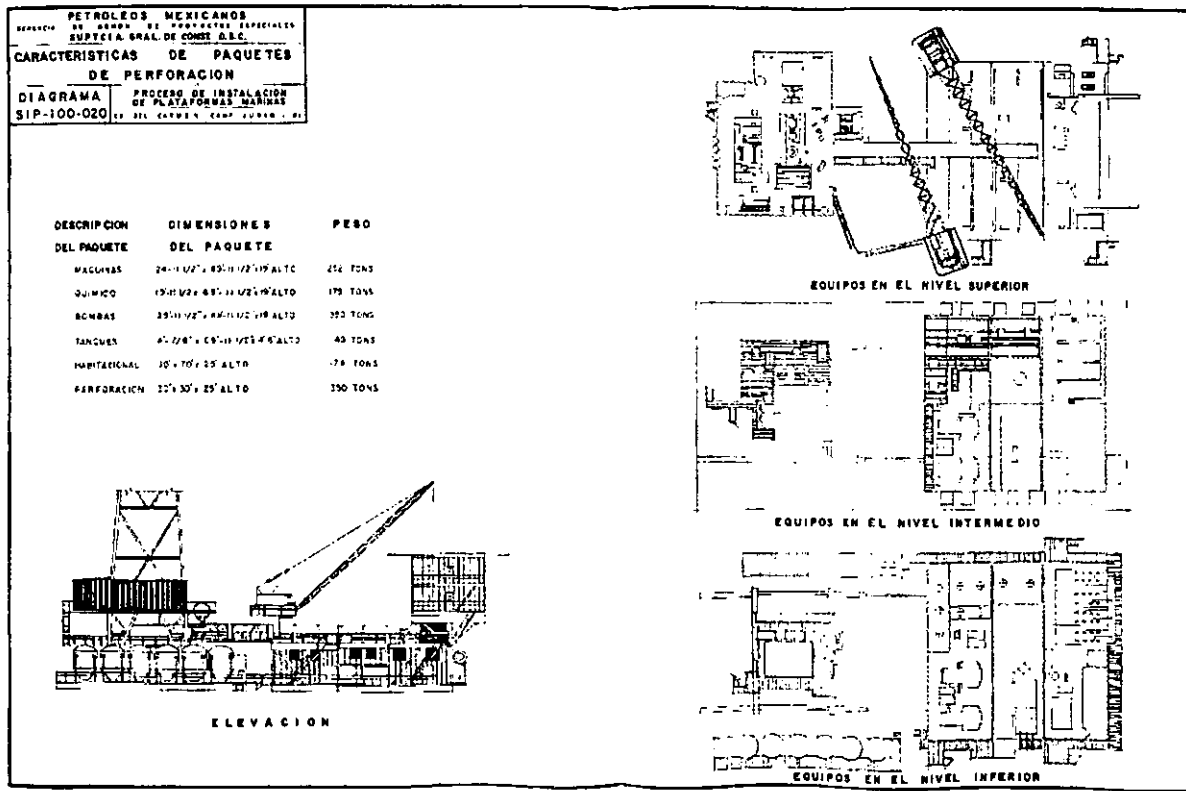
Técnicos realizando conexiones finales.



Plataforma terminada e instalada.



Izaje de la superestructura.



76

Plantas en los equipos

4.4.3 Tendido de líneas submarinas

Existen diversos métodos para el tendido de líneas submarinas dependiendo generalmente del tipo y diámetro de la línea de conducción, de la profundidad de tendido y por motivos obvios de la economía de la maniobra. Algunos de éstos son el tendido desde tierra, el arrastre de líneas mediante flotadores para su posterior lastrado, la colocación en fondo de los tramos para luego soldarse, etc. Sin embargo, para tuberías de gran diámetro situadas en aguas profundas que es el caso que más nos importa, se utiliza el tendido mediante un chalán con rampa de deslizamiento.

Este procedimiento radica en la utilización de un chalán de tendido auxiliado por un lanchón que transporta y suministra las secciones de la tubería; ambos siendo transportados por un remolcador. El método consiste en que por medio de una grúa montada en el chalán de tendido se van llevando las secciones de tubería a éste en donde son soldadas. Posteriormente, se van tendiendo las tuberías mediante la rampa de deslizamiento que con la ayuda de un pontón o stinger y el anclaje del chalán, ayudan a ir controlando la curvatura de las tuberías en su tendido.

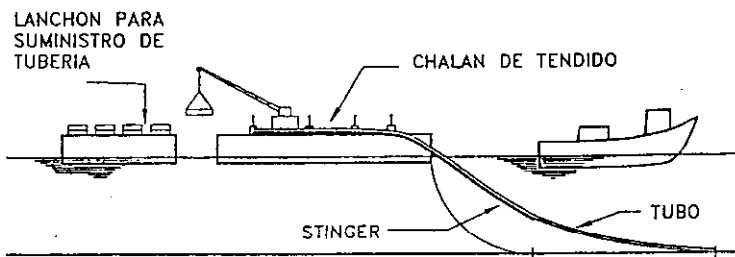


Diagrama de tendido de tuberías submarinas.⁷⁷

⁷⁷ Idem 58.

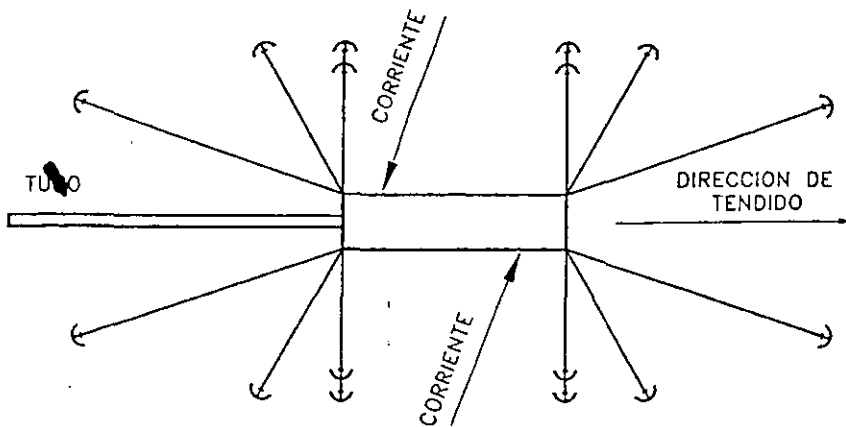


Diagrama del anclaje del chalán durante el tendido de tuberías.⁷⁸

4.4.4 Trabajos topográficos

Gran parte de la operación adecuada de nuestras obras marítimas concierne a los trabajos topográficos. Mediante éstos nosotros aseguraremos la correcta ubicación y orientación sin lo cual no se podría tener la eficiencia en operación proyectada. Los trabajos que realizan los topógrafos marinos son la selección de puntos de control, obtención de información de coordenadas, propagación de los puntos de control, orientación de estructuras y la medición de tirantes de agua así como la batimetría de la zona.

Para poder realizar estas tareas, se auxilian de equipos de posicionamiento, sistemas de radiolocalización, microondas para medir distancias, ecosondas, distanciómetros, giroscopios, tránsito, y sistemas vía satélite.

⁷⁸ Idem 58.

La obtención de puntos consiste en ubicar puntos en las obras marinas con el objetivo de posteriormente adquirir su información de coordenadas. Toda estructura marina debe de estar debidamente identificada mediante su situación geográfica y su altura sobre el nivel medio del mar. En la actualidad esto es fácilmente realizable con la ayuda de los sistemas de localización vía satélite.

De estos sistemas el más utilizado es el sistema conocido como *Transit*, el cual es un sistema de rastreo que se auxilia de satélites que tienen órbitas polares con lo cual se logra que con los cinco satélites que hay en uso se tengan 20 pasos por cualquier punto en la tierra en un intervalo de aproximadamente 90 minutos. Además de que debido a la altura en la que se mueven, ya no se dan interferencias por la atmósfera lo cual proporciona las configuraciones favorables para la ubicación de puntos.

Una vez obtenidos los puntos principales en cada plataforma, los topógrafos realizan lo que se denomina propagación de puntos que consiste básicamente en trasladar los valores de las coordenadas a cada una de las patas de las esquinas de los conductores y centro de la plataforma con la ayuda de quipos de medición y tránsito.

Otra fase importante del trabajo de topografía consiste en orientar las estructuras de manera que reciban las cargas meteoceánicas para las cuales han sido diseñadas. Generalmente las estructuras en la actualidad colocan sus conductores orientados hacia el suroeste 45° . Para realizar esto se emplea el giroscopio para ubicar la orientación adecuada y realizar la colocación de las estructuras marinas.

Las mediciones de tirante de agua se realizan con la ecosonda. Su importancia radica en conocer la profundidad promedio que predomina en cada zona en la cual se tendrán obras marinas. Aunado al tirante de agua se obtiene la batimetría de las zonas de interés. Con esto se tiene un mapa del fondo marino para la futura proyección y diseño de estructuras marinas. También nos sirve para que las embarcaciones puedan conocer la profundidad de un sitio determinado para un lanzamiento de subestructura, tendido de tubería, etc.

Finalmente los topógrafos nos ayudan en el control del tendido de líneas al determinar los rumbos correctos de la barcaza para que el tendido se realice de acuerdo a los planos de proyecto. Posteriormente con la ayuda de un sonar de barrido lateral, podemos obtener fotografías del fondo marino con las cuales localizamos las tuberías que se encuentran ya tendidas y enterradas.

Tema 5
Conclusiones y Recomendaciones

La complejidad de estas obras ocasiona que tras haber realizado este trabajo se produzcan una gran cantidad de conclusiones de las cuales se mencionarán las más importantes a continuación.

- El proceso que involucra el diseño y construcción de obras marítimas es muy complejo debido a que integra a las diversas áreas de la ingeniería.
- En la actualidad de nuestro país es vital el desarrollo de infraestructura marítima para la explotación de hidrocarburos dada la amplia contribución que su producción provee al PIB de México. Esto justifica las grandes inversiones que resultan de la puesta en operación de obras marítimas.
- La importación de tecnología que se ha dado hasta la actualidad debe ser sustituida por tecnología desarrollada en México para la explotación de nuestros recursos con el objetivo de eficientizar los procesos para las circunstancias que se presentan en nuestro país. Esto es muy marcado en el uso de ingenieros extranjeros en las obras de gran magnitud, para lo cual se sugiere preparar a los ingenieros civiles mexicanos para ocupen estos trabajos.
- En todo el proceso descrito para la puesta en operación de obras marítimas se encuentra la participación del Ingeniero Civil. Desde el diseño (estructural, cimentaciones, oceanográfico, etc.) hasta en la construcción (planeación, construcción, flotabilidad, logística, etc.) la participación del Ingeniero Civil se vuelve crucial para lograr la mayor eficiencia durante el proceso.

- La proyección y desarrollo de una obra marítima se comporta como un sistema, con lo cual resalta la importancia de un Ingeniero Civil en el desarrollo de la misma. Esto se debe a la facilidad que muestran los egresados de esta carrera para poder integrar todos los conceptos mencionados con anterioridad debido a que éstos se encuentran dentro de los conocimientos básicos impartidos durante sus estudios profesionales. Además de que los egresados de esta carrera se encuentran preparados para la integración eficiente de sistemas y el trato humano hacia los demás especialistas de otras ramas.
- Todas las acciones que integran el proyecto de obras marítimas son cruciales; sin embargo considero que es de vital importancia el estudiar a fondo los fenómenos meteoceánicos, ya que de éstos dependerá fundamentalmente el diseño de la estructura.
- Dentro de los fenómenos meteoceánicos que se estudian para el diseño de obras marítimas, resalta la acción del oleaje y las corrientes (efecto de fuerzas de arrastre y de inercia). Sin embargo en nuestro país no existen estaciones suficientes para la medición de estas solicitaciones por lo que es recomendable el invertir en equipo que ayude a determinar con precisión el comportamiento de tales fenómenos. Particularmente por ser una zona de intensa actividad ciclónica.
- Es muy importante el evaluar las condiciones extremas de oleaje, marea de tormenta y vientos que se podrían presentar durante la vida útil de la estructura. Esto es resultado de la recurrencia de Huracanes en la zona del Golfo de México, lo cual por experiencias anteriores (Huracán Gilberto) ha afectado considerablemente a las estructuras marítimas.

- Debido a la falta de estaciones medidoras de las condiciones meteocéánicas en nuestro país, resalta la importancia de la existencia de especialistas que comprendan estos fenómenos. Por este motivo es recomendable el abrir en la U.N.A.M. especializaciones e investigaciones en el estudio de fenómenos meteorológicos y oceánicos con el afán de tener personal que conozca la situación de nuestro país y que comience una transmisión de información con miras hacia mejoras en el futuro.
- El diseño de las plataformas conforma la necesidad de que el proyectista tenga una amplia visión del conjunto de solicitudes que se presentan, no sólo durante la vida útil de la estructura, sino también desde el proceso mismo de fabricación y posteriormente en el manejo para su traslado al sitio de colocación y durante todo el proceso de erección.
- Dentro de todo el proceso de elaboración de las plataformas petroleras, caso particular de las obras marítimas, la acción más compleja es la de la colocación de la estructura en el mar debido a la influencia de los fenómenos oceánicos antes mencionados. Resalta la importancia de una excelente planeación y de las preparaciones previas a la instalación para disminuir el número de maniobras en el mar y por ende los costos.
- Igualmente para el caso de plataformas se debe tener mucho cuidado en la instalación de los pilotes ya que durante este proceso se realiza la nivelación de la estructura. De esta depende que la operación de la plataforma sea con la mayor eficiencia posible.
- Para el tendido de líneas submarinas es muy importante el analizar la curvatura que presentarán estas al ser sumergidas en el mar debido a los esfuerzos tan altos que se generarán. Para esto son importantes los cálculos previos al botado por ingenieros especialistas.

- Finalmente se recomienda como se mencionó algunos párrafos previos, la apertura de cursos de especialización para esta rama de la ingeniería de costas afuera no sólo desde la licenciatura sino hasta nivel de maestría. Esto se debe a que como se pudo observar los fenómenos que se presentan en este tipo de obras son muy complejos y requieren de varios años de especialización para lograr su entendimiento. En el diseño es menester el inculcar a los alumnos el conocimiento de los fenómenos meteocéánicos destacando su importancia de su observación y adecuada interpretación; así como el fenómeno de huracanes que se da tanto en las costas del Golfo como en el Pacífico. Por otro lado en lo que respecta a la construcción se deberá enfatizar sobre la optimización oceanográfica y meteorológica como base para una construcción más eficiente. En la actualidad para lograr tener especialistas en estas áreas es necesario el estudio en otros países, en los cuales no es posible comprender los fenómenos en las condiciones que afectan a nuestras estructuras, además de los altos costos que llevar a cabo estos estudios representan. La importancia de esta apertura de cursos radica en la creación de tecnología propia para el diseño y construcción de obras para la explotación de hidrocarburos que como se vio previamente integra un 14% del PIB de nuestro país.

BIBLIOGRAFÍA

- Guillermo Macdonel Martínez, Julio Pindter Vega, Luis Herrejón de la Torre, Juan Pizá Ortiz, Héctor López Gutiérrez; **“Ingeniería marítima y Portuaria”**, Editorial Alfaomega-Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería-División de Educación Continua, México, 1999.
- Petróleos Mexicanos, **“Plataformas marinas en la sonda de Campeche”**, México 18 de marzo de 1983.
- Petróleos Mexicanos, Exploración y Producción, **“Las reservas de hidrocarburos de México”**, Volumen I Evaluación al 1 de enero de 1999, México, 1999.
- Petróleos Mexicanos, Exploración y Producción, **“Las reservas de hidrocarburos de México”**, Volumen II Los principales campos de petróleo y gas de México, México, 1999.
- Petróleos Mexicanos Exploración y Producción y el Instituto Mexicano del Petróleo-Gerencia de Ingeniería de detalle, **“Taller de aplicaciones del criterio transitorio para el diseño y evaluación de plataformas marinas fijas en la sonda de Campeche”**, México 1° de septiembre de 1997.
- W.J. Graff, **“Introduction to Offshore Structures. Design, fabrication & installation”**, Gulf Publishing Company, 1981.
- R. Stewart Hall, **“Drilling and Producing Offshore”**, Pennwell Publishing Company, U.S.A., 1983.

- Guillermo Macdonel Martínez, **“Apuntes de Instalaciones alejadas de la costa”**, México, 1991.
- Rafael del Moral Carro y José María Berenguer Pérez, **“Planificación y explotación de puertos, ingeniería oceanográfica y de costas”**, M.O.P.U. España-Dirección General de Puertos y Costas, Centro de Estudios y Experimentación de Puertos y Costas “Tamón Iribarren”, Madrid 1980.
- James F. Wilson, **“Dynamics of offshore structures”**, Wiley-Interscience publication, John Wiley & Sons, U.S.A. , 1984.
- Robert L. Wiegel, **“Oceanographical engineering”**, Englewood-Prentice Hall, U.S.A., 1965.
- Roberto Meli Piralla, **“Diseño Estructural”**, Editorial Trillas.
- Armando Frías V. y Gonzalo Moreno C., **“Ingeniería de costas”**, Editorial Limusa-Instituto Politécnico Nacional y Noriega Editores, Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria, México, 1988.
- Petróleos Mexicanos Exploración y Producción y el Instituto Mexicano del Petróleo, **“Criterio transitorio para la evaluación y el diseño de plataformas marinas fijas en la sonda de Campeche”**, Primera edición, México, mayo 1997.
- Enrique Adalberto Heras Rodríguez, Tesis de **“Análisis de fatiga a plataformas marinas fijas tipo jacket”**, Universidad Tecnológica de México, México 1999.

- American Petroleum Institute, Recommended practice 2A-WSD (RP 2A-WSD) **“Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing fixed Offshore Platforms-Working Stress Design”**, Twenty-first edition, December 2000.
- American Petroleum Institute, API-Estandar-1104 **“Estandar para soldadura de líneas de tuberías e instalaciones relacionadas”**, Edición 14, enero 1997.
- Petróleos Mexicanos, **“Posición geográfica de plataformas marinas”**.
- Petróleos Mexicanos, Subdirección de Proyectos y construcción de obra, Gerencia de Administración de proyectos especiales, Dirección del proyecto de instalaciones marinas sonda de Campeche, Superintendencia General de construcción, **“Proceso de Instalaciones de plataformas marinas”** Cd. Del Carmen, Campeche, México 1981.