



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL SIMPLIFICADO Y DE
CONFIABILIDAD DE UNA PLATAFORMA TLP (TENSION LEGS
PLATFORMS) EN EL GOLFO DE MÉXICO."

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :
E D D Y T R E V I Ñ O A G U I L A R

Acompañada de un disquete

DIRECTOR DE TESIS: :DR. DAVID DE LEON ESCOBEDO

MEXICO, D.F.

FEBRERO 2004





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/155/02

Señor
EDDY TREVIÑO AGUILAR
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. DAVID DE LEON ESCOBEDO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ANALISIS ESTATICO NO LINEAL SIMPLIFIADO Y DE CONFIABILIDAD DE UNA PLATAFORMA TLP (TENSION LEGS PLATFORMS) EN EL GOLFO DE MEXICO

- INTRODUCCION
- I ESTADO DEL ARTE
- II PRINCIPIOS EN LOS QUE SE BASA EL FUNCIONAMIENTO LA PLATAFORMA TLP
- III MODELADO DE LAS ACCIONES DE DISEÑO
- IV NORMAS DE DISEÑO (API)
- V MODELADO Y ANALISIS DE LA ESTRUCTURA FLOTANTE
- VI ANALISIS SIMPLIFICADO DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL
- VII 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 18 Noviembre 2003.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Treviño Aguilar

Eddy

FECHA: 19/02/04

FIRMA: 

Agradecimientos

Con esta hoja concluyo esta etapa. Con estas líneas que, curiosamente, serán las más leídas de este trabajo; quiero agradecer infinitamente a los “causantes” de este hecho a mis padres Jesús A. Treviño Castillo y Eustolia Aguilar Govea que en conjunto con la gloriosa Universidad Nacional Autónoma de México han hecho lo que soy.

A mi hermano Erick Treviño Aguilar por sus enseñanzas y apoyo, además de ser mi ejemplo a igualar.

Al Instituto Mexicano del Petróleo por su apoyo y facilidades otorgadas.

Al Dr. David De León Escobedo por su apoyo y tiempo dedicado, al Ing. Gregorio Inda Sarmiento por su apoyo y al M. C. José Daniel Muñoz Espinosa porque siempre tuvo un tiempo dedicado.

Un agradecimiento especial al Ing. Víctor Manuel Valdés Rubio por su ayuda incondicional y haberme dado a conocer la Ingeniería Civil Costa Fuera

A toda mi familia que en algún momento me apoyo.

A mis compañeros que, por no olvidar alguno me refiero al “Grupo Puente”, por esos buenos y malos momentos, que al fin y al cabo se da en toda sociedad.

A Leonardo Treviño García que reclamaba mi ausencia e Irma García Narváez por su apoyo y comprensión.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. Estado del Arte	3
1.1 Aspectos Generales	3
1.1.1 Logros	4
1.1.2 Retos	7
1.2 Geometría	8
1.2.1 Clasificación	8
1.2.1.1 Plataforma fija (Fixed Platform- FP)	8
1.2.1.2 Torre dócil (Compliant Tower- CT)	9
1.2.1.3 Plataforma de piernas tensionadas (Tension Legs Platform-TLP)	9
1.2.1.4 Mini-plataforma de piernas tensionadas (Mini-TLP)	9
1.2.1.5 Plataforma de soporte (Spar - SP)	10
1.2.1.6 Sistema de producción flotante (Floating production system- FPS)	10
1.2.1.7 Sistema submarino (Subsea System- SS)	11
1.2.1.8 Sistema flotante de producción, almacenaje y descarga (Floating, production, storage & offloading- FPSO)	11
1.2.2 Elementos de una plataforma TLP	12
1.3 Criterio de selección para plataformas en aguas profundas	14
2. Principios en los que se basa el funcionamiento de las plataformas TLP	
2.1 Principio de Flotación (Arquímedes)	18
2.1.1 Presión	19
2.1.2 Variación de la presión con la profundidad	19
2.2 Estabilidad	22
3. Modelado y análisis de las acciones de diseño	
3.1 Oleaje	28
3.1.1 Teoría lineal de la ola de Airy	30
3.1.2 Ecuación de Morison	35
3.2 Viento	38
3.2.1 Fuerza del viento	38

3.2.2	Distribución de velocidad	40
3.3	Corriente	41
3.4	Sismo	43
4	Normas de diseño (Norma API RP 2T)	
4.1	Requisitos de operación	47
4.2	Requisitos de estabilidad	47
4.3	Criterios ambientales	48
4.3.1	Viento	48
4.3.2	Oleaje	48
4.3.3	Corriente	49
4.3.4	Sismo	49
4.3.5	Crecimiento marino	49
4.3.6	Propiedades físicas	49
4.4	Fuerzas ambientales	49
4.4.1	Viento	50
4.4.2	Corriente	52
4.4.3	Fuerza de oleaje	53
4.4.3.1	Teoría de difracción	53
4.4.3.2	Ecuación de la fuerza de ola	53
4.4.4	Sismo	54
4.5	Respuestas extremas	54
4.5.1	Análisis estadístico	55
4.5.2	Parámetros ambientales	56
4.5.3	Máximo desplazamiento	57
4.5.4	Máxima tensión en el tensor	57
4.6	Respuesta por análisis de fatiga	59
4.7	Consideraciones estructurales de la TLP	59
4.7.1	Interacción con otros sistemas	60
4.7.2	Seguridad	60
4.7.3	Ingeniería de pesos	60
4.8	Casos de diseño	60
4.8.1	Condiciones de diseño de carga	61
4.9	Análisis estructural	61
4.9.1	Modelado	61
4.9.2	Análisis de esfuerzos	62
4.9.3	Análisis de fatiga	62
4.10	Diseño estructural	64
4.11	Condiciones de cargas de diseño en tensores	64
4.12	Métodos de análisis de cargas	65

4.12.1	Análisis del dominio de frecuencias	66
4.12.2	Análisis del dominio del tiempo	66
4.12.3	Vibración axial	66
4.12.4	Vibración transversal	66
4.13	Métodos de análisis estructural	67
4.14	Análisis y diseño de la cimentación de una TLP	67
4.14.1	Requerimientos de una cimentación e investigación del lugar	67
4.14.2	Cargas	68
5.	Modelado y análisis de la estructura flotante	
5.1	Diagrama de cuerpo libre	69
5.2	Método de análisis	71
5.3	Resultados	74
6.	Análisis simplificado de confiabilidad estructural	
6.1	Bases de Confiabilidad	78
6.1.1	Conceptos y antecedentes	80
6.1.2	Variable aleatoria	80
6.1.3	Distribución de Gumbel	82
6.1.4	Distribución lognormal	84
6.2	Aplicación a plataformas TLP	88
6.3	Índice de confiabilidad	92
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
	REFERENCIAS	97
	ANEXOS	
	Anexo I. Perfil y cinemática de la ola	99
	Anexo II. Fuerzas ambientales	106
	Anexo III. Descripción del proceso para la obtención de la distribución de altura máxima de ola	112
	Anexo IV. Cálculo de fuerzas en tendones y desplazamientos	117

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Producciones en aguas profundas	5
Tabla 1.2 Records en aguas profundas	6
Tabla 1.3 Clasificación de tirantes	7
Tabla 5.1 Desplazamiento de ola	75
Tabla 5.2 Fuerzas ambientales en columnas y tendones	76
Tabla 5.3 Fuerzas de flotación en columnas y tendones	77
Tabla I.1 Datos de la ola para el perfil	99
Tabla I.2.1 Perfil de la ola	100
Tabla I.2.2 Perfil de la ola	101
Tabla I.3 Datos de ola para la velocidad	102
Tabla I.4 Velocidad de la ola	103
Tabla I.5 Datos de ola para la aceleración	104
Tabla I.6 Aceleración de la ola	105
Tabla II.1 Datos para el cálculo de la fuerza de oleaje	106
Tabla II.2 Fuerza de oleaje	106
Tabla II.3 Datos para el cálculo de la fuerza del viento	107
Tabla II.4 Perfil del viento	108
Tabla II.5 Datos para el cálculo de la fuerza de corriente	109
Tabla II.6 Perfil de la corriente	110
Tabla II.7 Fuerzas debido a la corriente	111
Tabla III.1 Alturas significativa y máxima de ola para periodos de retorno dados	112
Tabla III.2 Alturas significativa y máxima de ola para 44 huracanes	114
Tabla III.3 Prueba de bondad de ajuste para distribuciones lognormal y de Gumbel.	116

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Tipos de plataformas fijas y flotantes	10
Fig. 1.2 Tipos de plataformas flotantes y producción submarina	11
Fig. 1.3 Partes de la TLP	13
Fig. 2.1 Principio de Arquímedes	18
Fig. 2.2 Presión hidrostática en un plano	19
Fig. 2.3 Gradiente de Presión en función de la profundidad	20
Fig. 2.4 Presión absoluta	21
Fig. 2.5 Fuerza de empuje	21
Fig. 2.6 Equilibrio del cuerpo flotante	22
Fig. 2.7 Equilibrio con un hundimiento diferencial	23
Fig. 2.8 Equilibrio estable	24
Fig. 2.9 Equilibrio de cuerpo flotante sujeto a movimiento	25
Fig. 3.1 Tipos de olas	29
Fig. 3.3 Perfil, cinemática y dinámica de la ola	35
Fig. 3.4 Coeficiente de arrastre de Reynolds	37
Fig. 3.5 Perfil de velocidad	38
Fig. 3.6 Variación de la velocidad del viento	39
Fig.3.7 Velocidad de la corriente debido al viento y marea	42
Fig. 7.1 Análisis de diseño	55
Fig. 5.1 Modelo de análisis	71
Fig. 6.1 Funciones distribución de densidad de probabilidad y distribución acumulada	81
Fig. 6.2 Probabilidad de evento	85
Fig. 6.3 Región de falla	86
Fig. 6.3 Intersección de las distribuciones carga-resistencia	85

Fig. 6.4 Función densidad de las fuerzas permisibles	89
Fig. 6.5 Función de densidad de las fuerzas actuantes	89
Fig. 6.6 Probabilidad de falla	90
Fig. 6.7 Función de densidad de desplazamientos actuantes	90
Fig. 6.8 Función de densidad de desplazamientos permisible	91
Fig. 6.9 Probabilidad de falla	91
Fig. 6.10 Detalle del área	92
Fig. I.1 Perfil de ola en función del tiempo	100
Fig. I.2 Perfil de ola en función de la posición	101
Fig. I.3 Velocidad de la ola en función del tiempo	103
Fig. I.4 Aceleración de la ola en función del tiempo	105
Fig. II.1 Aceleración de la ola en $f(t)$	107
Fig. II.2 Perfil de velocidades a la altura "z"	108
Fig. II.3 Velocidad de la corriente en función de la profundidad	110

Introducción

México, diferencia de Cuba, tiene menos posibilidades de conocer el tamaño de la riqueza que se encuentra en el "Hoyo de Dona", en las aguas profundas del Golfo de México, pues la Constitución le prohíbe recurrir a contratos de riesgo o de asociación con compañías extranjeras que cuentan con la tecnología y los recursos necesarios para hacer la exploración, mientras la isla socialista los adoptó sin mayor problema. Esa región marina está dividida en dos partes: el "Polígono Occidental" y "El Polígono Oriental". El primero, de 17 mil 190 kilómetros cuadrados, se lo repartieron México y Estados Unidos, sus propietarios, en junio de 2000. Es la zona más prometedora en materia de recursos petrolíferos. El segundo, de alrededor de 20 mil kilómetros cuadrados, deberá dividirse entre México, Estados Unidos y Cuba. Por el momento, no hay negociaciones para repartírselo.

México y Estados Unidos convinieron no explotar los recursos petrolíferos del Polígono Occidental en los siguientes diez años. En este tiempo, se estudiará la zona para definir y ubicar sus yacimientos, que se encuentran a más de 2 kilómetros de profundidad, y cuyo potencial se desconoce con precisión. Esto permitirá a ambos países tomar las decisiones apropiadas para proteger sus recursos. En el libro "Los espacios marinos y su delimitación" (publicado por la Secretaría de Energía, en 1999)

Se asegura que la tecnología para la perforación y explotación de yacimientos petroleros en aguas profundas existe y es económicamente rentable, y es de esperarse que el actual límite teórico para situar instalaciones de producción, en tirantes de agua de más de 2 mil metros, sea superado en corto tiempo. Sin embargo, continúa, en México debemos considerar los prolongados periodos de maduración que requieren

esos proyectos. "Iniciar ahora la exploración podrá permitirnos perforar en un lapso de tres a cuatro años, y la evaluación y desarrollo podrá tomar cinco a ocho años adicionales, considerando el diseño y construcción de los elementos específicos que se requieran. Esto es, en el mejor de los casos estamos a ocho o diez años de disponer de los recursos petroleros que puedan encontrarse en aguas profundas del Golfo de México".

1. Estado del Arte

1.1 Aspectos Generales

Buena parte del futuro de la industria petrolera y gasífera se encuentra en el fondo del mar. Así lo demuestran las inversiones que realizan, para exploración y desarrollo de campos marinos, las grandes compañías petroleras. México, donde en la actualidad se adelantan trabajos de exploración en la plataforma del Golfo de México, cuenta con un gran potencial para convertirse en uno de los grandes protagonistas de esta industria. Una exploración de recursos energéticos disponibles en un país depende de varios factores, entre ellos, de la naturaleza y la localización, del grado de desarrollo técnico - científico. La industria costa afuera nace verdaderamente en los años 50's en el Golfo de México. Desde entonces se ha extendido para el Mar del Norte que se ha tornado la principal zona petrolera costa fuera. El desarrollo de esta industria también ha ido acompañado por el aumento de profundidades o mejor dicho por el aumento de los tirantes de agua. El descubrimiento de nuevos yacimientos en la costa fuera está ocurriendo en aguas cada vez mas profundas, las principales zonas productoras son el Golfo de México, Mar del Norte, América del Sur y Asia. Por lo tanto el aumento de potencial de producción de petróleo requiere que se desarrollen tecnologías capaces de producir a grandes profundidades. Dichas tecnologías desempeñarán un importante papel en la introducción de innovaciones a bajos costos. El desarrollo de producción costa fuera inicia en gran medida a partir de las plataformas fijas. Esta tecnología fue desarrollada entre las décadas de los 30's y 50's primero en Venezuela y después en el Golfo de México. Estas plataformas consisten en grandes estructuras metálicas que reposan sobre el fondo marino. Otras tecnologías complementarias fueron desarrolladas paralelamente para desarrollar la producción de hidrocarburos, las más importantes eran las de colocar ductos. El inconveniente de las plataformas fijas es que no pueden ser utilizadas en aguas profundas por razones de economía ya que si se

instalaran este tipo de estructuras, y se graficara la profundidad contra el costo, el comportamiento será de tipo exponencial. Entonces, se tienen que buscar nuevos conceptos capaces de sustituir a la plataforma fija. La idea debe ser un nuevo tipo de plataforma capaz de tener una cierta flexibilidad de movimiento en la superficie del agua o en el fondo del océano.

1.1.1 Logros

Las metas que las empresas se plantean en exploración marina son concretar la producción en aguas ultraprofundas, aumentar la recuperación de petróleo de los diferentes yacimientos, extender las fronteras de prospección, minimizar el impacto ambiental y reducir las diferencias de costos de extracción entre agua y tierra. Las tendencias en este campo y las fluctuaciones de los precios del petróleo obligan a este sector a estar preparado para salir adelante en mercados inestables. Sólo así podrán desarrollarse campos cada vez más complejos en aguas ultraprofundas, sin importar su profundidad o distancia a la costa.

En este cuadro se puede observar el progreso en cuanto la producción en aguas profundas en el Golfo de México, por parte de algunas empresas.

Proyecto	Empresa	Profundidad (m)	Producción
King Complex	Amoco	1646	50 mbpd 250 mmpc/d
Magnolia Field	Conoco	1432	150 mmb/d
Boomvang	Kerr Mcgee	1052-1121	40,000 bd
Allegheny Field	British-Borneo	1009	25,000 b/d 45,000 mmpc/d
Genesis	Chevron	789	55,000 b/d 72,000 mmpc/d
Medusa	Murphy	678	40 Mbps 110 mmpc/d
Neptune	Oryx	588	25,000 bd 30,000 mpc/d
Julliet	Conoco	536	50,000 b/d 150000 mmpc/d

Tabla 1.1 Producciones en aguas profundas

Por otro lado están las empresas Shell y Petrobras que son líderes en el ramo de aguas profundas y son las que tienen mayores y más significativos logros.

Proyecto	Empresa	Profundidad (m)	Lugar
Marimba East	Petrobras	700	Brasil
Barracuda	Petrobras	850	Brasil
Auger	Shell	872	G. de México
Mars	Shell	896	G. de México
Brutus	Shell	914	G. de México
Carantiga	Petrobras	922	Brasil
Albacora	Petrobras	953	Brasil
Ram Powell	Shell	980	G. de México
Marlin	Shell	988	G. de México
Frade	Petrobras	1141	Brasil
Albacora Leste	Petrobras	1200	Brasil
BS 500	Petrobras	1219	Brasil
Ursa	Shell	1220	G. de México
Marlim East	Petrobras	1250	Brasil
Mensa	Shell	1615	G. de México
Roncador	Petrobras	1853	Brasil

Tabla 1.2 Records en aguas profundas

1.1.2 Retos

Es importante considerar la diferencia entre los diversos rangos de profundidades en los que se llevan a cabo los trabajos de exploración y explotación, ya que en ellos radica uno de los principales retos de la industria. Cuando empezó el trabajo de exploración en el mar, las compañías nunca se imaginaron que alcanzarían profundidades superiores a los 1.800 metros de profundidad de agua en etapas de producción y de más de 2.700 metros en etapas de exploración. En los años setenta, los procesos exploratorios no pasaban de los 50 metros de profundidad.

Hay una diferencia muy clara entre las categorías de tirantes de agua, y se clasifican de acuerdo a la siguiente tabla:

Categoría	Profundidad en metros
Somera o poco profundas	50 – 400
Profundas	400 – 1500
Ultraprofundas	1500 – 3000

Tabla 1.3 Clasificación de tirantes

Mantenidos a flote por los adelantos de la tecnología, la industria ha hecho varios descubrimientos significantes a lo largo de la superficie del fondo marino de aguas profundas y ultraprofundas. Los desafíos para la ingeniería del país son que las actividades de exploración y producción de aguas poco profundas, tal como se realizan ahora, no pueden llevarse a cabo de la misma manera en aguas profundas; por ello se tienen que recurrir a otras técnicas y/o métodos.

Algunos puntos importantes que hay que considerar son:

- Los desafíos en el área de exploración que consiste en aumentar la confiabilidad de predicción de nuevas reservas con una reducción de costos.

- La posibilidad de diferentes tipos de roca o el caso de litologías similares, diferenciar parámetros tales como porosidad, permeabilidad, y tipo de fluido, dará como resultado una enorme reducción de costos exploratorios y de producción.
- La necesidad de contar con una predicción de nuevas acumulaciones de petróleo, los grandes avances tecnológicos

En resumen las aguas profundas son lugares de grandes retos. El reto es de tipo físico, ambiental, y tecnológico. Las aguas profundas se caracterizan por que no hay luz, es frío y la presión es intensa y constante por nivel de lámina; en la superficie los vientos son muy fuertes, las olas de más de 20 metros de altura y la fuerte corriente hace difíciles las operaciones.

1.2 Geometría

1.2.1 Clasificación

Las estructuras costa fuera pueden clasificarse según sean estructuras rígidas que se extienden desde la superficie hasta el fondo marino o si flotan cerca de la superficie del agua. Pero se tiene una mejor clasificación de acuerdo a su anclaje o tipo de apoyo en el lecho marino.

1.2.1.1 Plataforma fija (Fixed Platform- FP)

Consiste en un jacket (es una sección vertical con una inclinación, construida con miembros tubulares de acero, apoyados con pilotes en el fondo marino) con una cubierta encima de la estructura, que provee ya sea de espacio para alojamiento, equipo para perforar, para producción etc. La plataforma fija es económicamente factible para la instalación en tirantes someros.

1.2.1.2 Torre dócil (Compliant Tower- CI)

Consiste en una torre estrecha, flexible y con una base apilada, que puede soportar una cubierta convencional para operaciones de perforación y producción. En contraste de la plataforma fija, la torre resiste grandes fuerzas laterales por medio de desplazamientos laterales muy significantes. Este tipo de estructuras utilizan para profundidades de entre 300 y 600 metros.

1.2.1.3 Plataforma de piernas tensionadas (Tension Legs Platform- TLP)

Esta plataforma consiste en una estructura flotante sostenida por unos tendones verticales tensionados, conectados al lecho marino con plantillas aseguradas con pilotes. Los tendones tensionados son lo que mantienen a las plataformas TLP en un rango de profundidad grande además de que proporcionan un movimiento vertical limitado. Se ha desplegado una TLP hasta 1220 metros de profundidad, con éxito.

1.2.1.4 Mini-plataforma de piernas tensionadas (Mini-TLP)

Esta estructura es una pequeña plataforma de piernas tensionadas de costo relativamente bajo, fue desarrollado para la producción de pequeñas reservas en aguas profundas. Estas mini-plataformas se seleccionan debido a que el uso de sistemas de producción más convencionales resulta económicamente inconveniente. Este tipo de plataforma tiene algunas ventajas como el ser utilizada en la producción temprana de grandes yacimientos. La primera mini-TLP se instaló en el Golfo de México en 1998.

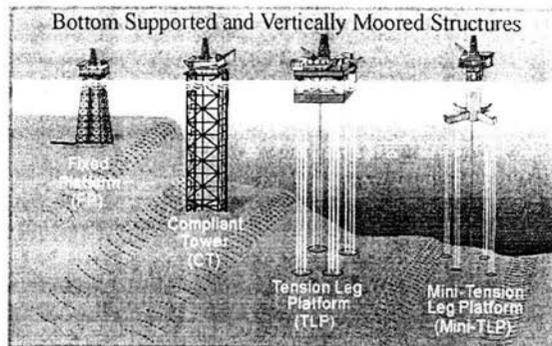


Fig. 1.1 Tipos de plataformas fijas y flotantes

1.2.1.5 Platform Plataforma de soporte (Spar - SP)

Consiste en un cilindro largo vertical de gran diámetro que soporta una cubierta, siendo una plataforma fija típica lo que se encuentra en la cubierta (equipo de perforación y producción). Generalmente tiene tres tipos de risers: producción, perforación y exportación. También tiene un casco el cual se amarra al lecho marino por medio de un sistema de catenarias tensas con entre seis a veinte líneas fijas en el lecho marino. Este tipo de estructuras se utiliza en profundidades de 900 metros pero ya se tiene tecnología para desarrollarse en tirantes mayores.

1.2.1.6 Sistema de producción flotante SPF (Floating production system- FPS)

Consiste en una unidad semi-sumergible la cual está provista de equipo de perforación y producción. Se ancla con cables y cadenas o puede posicionarse dinámicamente con propelas. La producción del subsuelo es transportada a la cubierta a través de risers de producción diseñados para los movimientos de la plataforma. El SPF puede usarse en un rango de profundidades de 180 a 2300 metros.

1.2.1.7 Sistema submarino (Subsea System- SS)

Los sistemas submarinos producen de pozos directamente a plataformas cercanas ya sea SPF o TLP, producen a través de un colector y un sistema de tuberías a lejanas instalaciones de producción. Estos sistemas actualmente se usan en profundidades mayores de 1500 metros.

1.2.1.8 Sistema flotante de producción, almacenaje y descarga (Floating, production, storage & offloading- FPSO)

Consiste en un gran tanque tipo embarcación sujetado al lecho marino. Un FPSO esta diseñado para procesar y guardar producción de pozos cercanos al fondo marino y para transportar periódicamente el petróleo almacenado a pequeños transbordadores. Después el pequeño transbordador lleva el petróleo a instalaciones a tierra firme para procesos posteriores. Un FPSO puede ser ubicado en campos marginados en áreas de aguas profundas alejadas donde no existe infraestructura de tubería

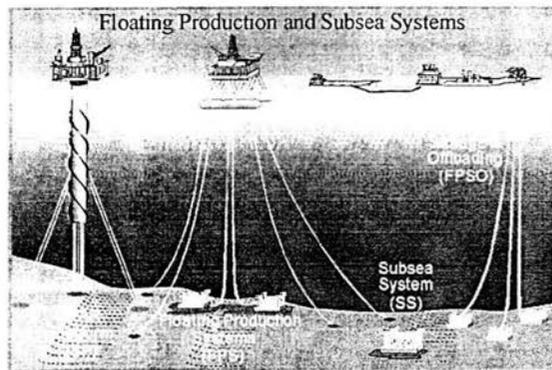


Fig. 1.2 Tipos de plataformas flotantes y producción submarina

1.2.2 Elementos de una plataforma TLP (Ref. norma API)

- 1 Flotador.- consiste en columnas flotantes, flotadores rectangular y estructuras rigidizantes intermedias
- 2 Estructura de cubierta.- Es una instalación multinivel, que consiste en bragueros, largueros y vigas para soportar las cargas de operación
- 3 Plataforma.- Es la estructura que consiste en el flotador y la estructura de cubierta.
- 4 Cimentación.- Consiste en plantillas y pilotes o en un sistema gravitatorio.
- 5 Sistema de amarre.- Consiste en tendones y cimentaciones.
- 6 Conductores ascendentes (risers).- Dentro de este sistema se incluyen las líneas de perforación, producción y conducción.
- 7 Sistema de pozos.- Se refiere a conductores ascendentes, conductores tensionados, cabeza de pozo, y plantilla de pozos.
- 8 Cubierta inferior.- Se refiere al nivel de cubierta más bajo, consiste en vigas y placas.
- 9 Cubierta superior.- Es el nivel de cubierta superior, consiste en vigas y placas.
- 10 Pierna tensionada.- Es el elemento que forma el sistema de vínculo entre la plataforma y la cimentación submarina con el propósito de sujetar la TLP
- 11 Cubierta de perforación.- Es el nivel en donde se encuentra el equipo de perforación.
- 12 Pontón.-Es el flotador horizontal, cilíndrico o rectangular que une las columnas.
- 13 Columna.- Es el flotador vertical

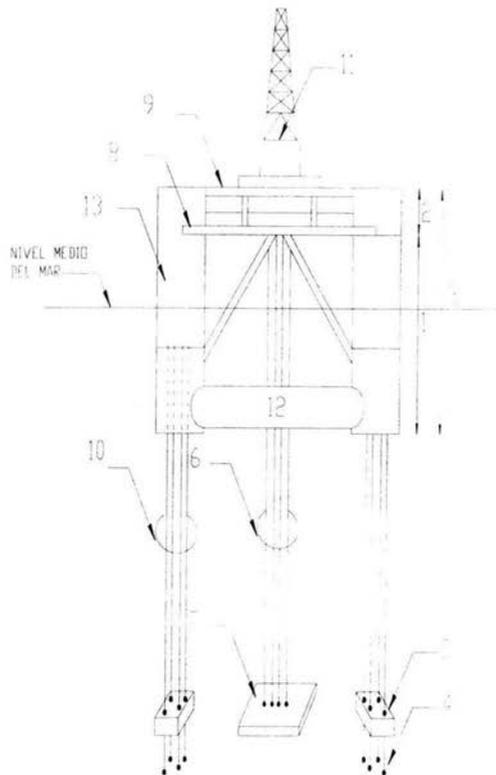


Fig. 1.3 Partes de la TLP

Cabe señalar algunos dispositivos secundarios de la plataforma TLP.

- Abrazadera.- miembro estructural que sirve para dar rigidez a la estructura del flotador y proporcionar apoyo a la cubierta.
- Equipo de flotación.- Dispositivos adicionados a los tendones o líneas ascendentes para reducir su peso en el agua

- Conectores.- Dispositivos en los tendones usados para abrir o cerrar los tendones al sistema de cimentación y conectar el tendón a la plataforma.
- Viga de cubierta.- Elemento estructural secundario, colocado entre las vigas intermedias y/o vigas principales.
- Elemento flexible.- Una variedad de dispositivos que permiten el movimiento angular de los conductores ascendentes o tendones para reducir el esfuerzo por torsión.
- Equipo guía.- Este equipo es usado para guiar y orientar los conductores ascendentes o herramientas al fondo marino.
- Columnas intermedias.- Miembros flotantes verticales de la estructura del flotador.
- Cubiertas intermedias.- Cubiertas existentes entre la cubierta superior e inferior.
- Columnas principales.- Cilindros flotantes verticales de la estructura del flotador los cuales proporcionan la estabilidad a la plataforma.

1.3 Criterio de selección para plataformas en aguas profundas

Cuando se descubre un campo costa fuera en aguas profundas, es desafortunado que el valor del petróleo y gas para el consumidor no está afectado por la profundidad del agua encima de la reserva, pero para el costo de la explotación de la reserva y transporte sí es muy importante la profundidad.

En las reservas en aguas profundas siempre van a ser mayores los costos de producción que en aguas poco profundas, por lo tanto los campos explotados deben tener una economía a escala, esto es, aguas más profundas requieren reservas más grandes así como altos índices de producción para poder permanecer factible. Hay costos de pre-desarrollo tales como exploración, delineación de perforación, etc. Estas actividades no tienen ningún efecto en decisiones posteriores al plan de desarrollo de

la reserva, pero después viene la inversión fuerte canalizada a la investigación y estudio de la reserva para reducir el orden de riesgo. La relación de costos es muy diferente para diferentes tipos de plataformas, y algunas opciones de transporte están determinadas intrínsecamente para el tipo de plataforma que se elija.

El proceso de selección del tipo de plataforma se define a partir de los datos, los diferentes pasos en el proceso de selección se encuentran descritos a continuación:

- Determinar las necesidades de las instalaciones de la plataforma
- Estimar el tamaño de cubierta y peso
- Determinar las opciones del sistema de exportación
- Selección de la estructura soporte
- Conclusiones

El tamaño del sistema de proceso, con sus correspondientes equipos, sistema de energía y habitaciones son los datos que influyen en la selección. De los datos de la plataforma considerados, es bastante obvio que se requiere una estabilidad cuando se tenga a toda capacidad la producción, así como el sistema de compresión de gas que es necesario para la inyección. Por consiguiente la plataforma va necesitar un área de cubierta y una capacidad de carga. A continuación se ofrecen algunos datos de una reserva para poder ejemplificar:

- Reserva para 150,000 B/D de crudo
- 15 mmpc con una primera fase de inyección
- Gran complejo de crudo, con algunas fracturas y compartimentos aislados
- Tirante de agua de 500 m

Con un análisis preliminar económico, en donde la ventaja de alcanzar la altiplanicie de producción rápidamente mediante pozos exploratorios se pesa contra el riesgo de

perder estos pozos a futuro, se demuestra que es preferible el crecimiento lento de la infraestructura. De las consideraciones anteriores se concluye que se debe tener un buen equipo de perforación con pocos pozos de exploración. El peso de las instalaciones está estimado entre 12000 y 20000 toneladas de carga de operación. La única plataforma con almacenamiento propio es la plataforma tipo Spar. Sin embargo la carga directa al Spar no es factible y el crudo puede ser transferido del almacén a un tanque contenedor. En general las opciones para considerar la exportación de crudo: sistema de boyas transferir el producto a un vaso de almacenamiento con descarga directa a un tanque contenedor y producir directamente a un tanque contenedor. El tamaño del tanque contenedor disponible determina el tamaño del almacén requerido. En el mar del Norte el almacenaje anda alrededor de 110-120 mmpc, el cual para este yacimiento corresponde a 4 o 5 días de producción. En el caso de un Spar con almacenaje, la transferencia del producto a un tanque contenedor se hace en menos de un día; esto indica que el tamaño de las líneas de conducción varía entre 30 y 36 pulgadas tratando de evitar la caída de presión. Con respecto a las opciones mencionadas, ambos casos necesitan líneas de transferencia de 14 pulgadas, las cuales están en posibilidad de satisfacer los vasos. Las opciones dependen de los costos de los dos sistemas, incluyendo el incremento de la capacidad de producción. Entonces, para el presente ejemplo, concluimos que no tiene mayores ventajas la plataforma Spar, lo aconsejable es el sistema de boyas.

Las estructuras de soporte que permanecen factibles son la TLP, Spar y semisumergible las cuales satisfacen los requerimientos: carga de 20000 toneladas, 36 perforaciones debajo de la plataforma y capacidad para sostener 36 líneas de pozos, más dos de ductos de exportación de crudo y uno de gas. Las tres opciones cubren estas necesidades. Siguiendo con el propósito de este ejercicio la preferencia eventual es por una plataforma semisumergible por las siguientes razones:

- El tamaño de la cubierta esta dentro de las necesidades (óptima)
- Aunque las plataformas TLP tienen mayores cubiertas y mayor capacidad de pozos la diferencia de costos es muy notoria en comparación con una semisumergible
- A 500 metros de profundidad, 36 pozos pueden ser acomodados fácilmente en una plataforma semisumergible con capacidad para más líneas pozos
- 500 metros de profundidad no es excesivo con respecto al costo de los sistemas de amarre tradicional, comparado con el costo de lograr una seguridad adecuada.

2. Principios en los que se basa el funcionamiento de las plataformas TLP

2.1 Principio de Flotación (Arquímedes)

El principio de Arquímedes afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso del fluido desalojado.

La explicación del principio de Arquímedes consta de dos partes como se indica en la figura 2.1 :

1. El estudio de las fuerzas sobre una porción de fluido en equilibrio con el resto del fluido.
2. La sustitución de dicha porción de fluido por un cuerpo sólido de la misma forma y dimensiones.

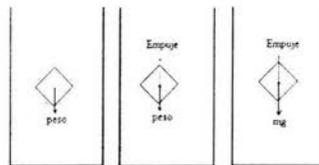


Fig. 2.1 Principio de Arquímedes

Porción de fluido en equilibrio con el resto del fluido.

Se consideran, en primer lugar, las fuerzas sobre una porción de fluido en equilibrio con el resto de fluido. La fuerza que ejerce la presión del fluido sobre la superficie de separación es igual a $p dS$, donde p solamente depende de la profundidad y dS es un elemento diferencial de superficie.

2.1.1 Presión

Se define presión como el cociente entre la componente normal de la fuerza sobre una superficie y el área de dicha superficie.

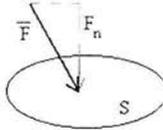
$$p = \frac{F_n}{S}$$


Fig.2.2 Presión hidrostática en un plano

La fuerza que ejerce un fluido en equilibrio sobre un cuerpo sumergido en cualquier punto es perpendicular a la superficie del cuerpo. La presión es una magnitud escalar y representa una característica del punto del fluido en equilibrio, que dependerá únicamente de sus coordenadas.

Puesto que la porción de fluido se encuentra en equilibrio, la resultante de las fuerzas debidas a la presión se debe anular con el peso de dicha porción de fluido. A esta resultante la denominamos empuje y su punto de aplicación es el centro de masa de la porción de fluido, denominado centro de empuje.

2.1.2 Variación de la presión con la profundidad

Consideremos una porción de fluido en equilibrio de altura dy y de área en planta S , situada a una distancia “ y ” del fondo del recipiente que se toma como origen

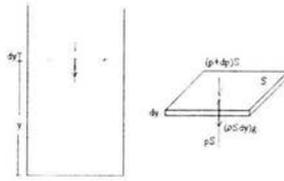


Fig.2.3 Gradiente de Presión en función de la profundidad

Las fuerzas que mantienen en equilibrio a dicha porción de fluido son las siguientes:

- El peso, que es igual al producto de la densidad del fluido, por su volumen y por la aceleración de la gravedad, $(\rho S dy)g$
- La fuerza que ejerce el fluido sobre su cara inferior, pS
- La fuerza que ejerce el fluido sobre su cara superior, $(p + dp)S$

La condición de equilibrio establece que

$$-(\rho S dy)g + pS = (p + dp)S \quad \text{ec.2.1}$$

$$dp = -\rho g dy \quad \text{ec.2.2}$$

Integrando esta ecuación entre los límites que se indican en la figura

$$\int_{y_A}^{y_B} dp = \int_{y_A}^{y_B} -\rho g dy \quad p_B - p_A = -\rho g y_A - (-\rho g y_B) \quad \text{ec.2.3}$$

Si el punto B se ubica en la superficie y el punto A se localiza a una profundidad h , la expresión anterior se escribe de forma más cómoda como se muestra en la Ec. 2.4 donde p_0 es la presión en la superficie del fluido (la presión atmosférica) y p la presión a la profundidad h .

$$p = p_0 + \rho gh \quad \text{ec. 2.4}$$

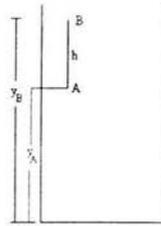


Fig. 2.4 Presión absoluta

De este modo, para una porción de fluido que está en equilibrio con el resto se cumple $Empuje = peso = \rho_f g V$

El peso de la porción de fluido es igual al producto de la densidad del fluido ρ_f por la aceleración de la gravedad g y por el volumen de dicha porción V .

Se sustituye la porción de fluido por un cuerpo sólido de la misma forma y dimensiones.

Las fuerzas debidas a la presión no cambian, por tanto, su resultante, la cual se ha denominado empuje, es la misma y actúa sobre el mismo punto, es decir, sobre el centro de empuje.

Lo que cambia es el peso del cuerpo y su punto de acción, que es su propio centro de masa, que puede o no coincidir con el centro de empuje.

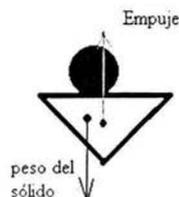


Fig. 2.5 Fuerza de empuje

Por tanto, sobre el cuerpo actúan dos fuerzas: el empuje y el peso del cuerpo, que no tienen en principio el mismo valor ni están aplicadas en el mismo punto. En los casos más simples, supondremos que el sólido y el fluido son homogéneos y por tanto, coinciden el centro de masa del cuerpo con el centro de empuje.

2.2 Estabilidad

La teoría de estabilidad involucra causas, efectos, y aceptación de un cambio de posición de un cuerpo flotante. La aplicación de una fuerza/momento puede ser de tal magnitud como para causar una nueva posición de estabilidad sin un cambio completo de disposición del cuerpo o sin provocar que la estructura vuelque. Un cuerpo flotando libremente está afectado por las fuerzas de empuje de flotación y por la fuerza descendente del peso.

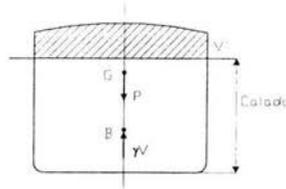


Fig. 2.6 Equilibrio del cuerpo flotante

Para un cuerpo en equilibrio la fuerza de empuje de flotación es igual al peso del cuerpo. Si el cuerpo experimenta un desplazamiento pequeño a partir de su posición de equilibrio, en su eje de translación y la fuerza es retirada, entonces el cuerpo retorna a su posición de equilibrio, con estabilidad positiva. Si el cuerpo desplazado permanece en la misma posición sin regresar a su posición original, se dice que el cuerpo está en equilibrio neutral. Si el cuerpo desplazado se mueve mas allá de su posición de equilibrio, éste está en equilibrio inestable. El comportamiento puede ser expresado matemáticamente por

$$W + F = \gamma(V + dV)$$

ec.2.5

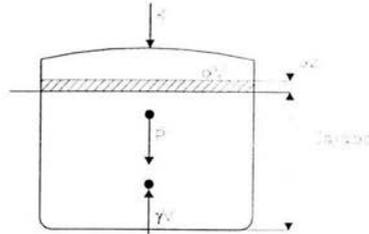


Fig. 2.7 Equilibrio con un hundimiento diferencial

En donde “ W ” es el peso del cuerpo flotante, “ F ” es una fuerza externa que causa un desplazamiento “ dz ”, V es el volumen inmerso del cuerpo, “ dV ” es el incremento de volumen debido a la fuerza F , y “ γ ” es el peso específico del agua. Cuando F varía o se hace cero, hay tres posibles estados de equilibrio que se pueden expresar con:

$$W < \gamma(V + V') \dots \dots \dots \text{Equilibrio estable} \quad \text{ec.2.6}$$

$$W = \gamma(V + V') \dots \dots \dots \text{Equilibrio neutral} \quad \text{ec.2.7}$$

$$W > \gamma(V + V') \dots \dots \dots \text{Equilibrio inestable} \quad \text{ec.2.8}$$

En donde $V + V'$ representa el volumen total de un cuerpo flotante, siendo V' el volumen de la porción por encima del agua.

Cuando un cuerpo flotante experimenta una rotación, se nota un comportamiento similar. Para aclarar, cuando se presenta una rotación en el eje longitudinal, a dicha inclinación se le llama giro, (si la rotación es respecto al eje transversal la inclinación se llama volteo).

Mientras que el peso del cuerpo flotante actúa a través del centro de gravedad, la fuerza de flotación actúa a través del centro de flotación el cual es el centro de gravedad del líquido desplazado. La posición del cuerpo flotante está determinada por la interacción de fuerzas de peso y flotación, si únicamente están actuando el peso y la flotación la estructura se asienta y se mueve hasta que la fuerza de flotación es igual al peso, estos se encuentran en una misma línea vertical. (Ver fig. 2.6)

Por otro lado, cuando se presenta una rotación pequeña a partir de esta posición, como la de WL a $W'L'$ la cual se muestra en la figura 2.8, las fuerzas de flotación y peso generan un momento llamado momento de enderezamiento que tiende a hacer girar el objeto regresándolo a su posición de flotación en el eje WL .

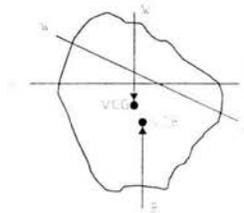


Fig. 2.8 Equilibrio estable

Un cuerpo flotante está diseñado para flotar en una posición vertical. El momento de enderezamiento tiende a restaurar el cuerpo hacia la posición vertical estable mientras que el momento de giro (momento externo causa rotación) actúa para mover el cuerpo fuera de su posición vertical estable hacia una posición inestable. Considerando que el cuerpo experimenta un pequeño giro " $d\phi$ " como se muestra en la figura 2.9, el centro de flotación " B " se mueve a " B' ", mientras que la fuerza de flotación permanece igual ($= \gamma V$) permitiendo a la línea vertical de acción por conducto de " B' " llegue al plano de simetría del cuerpo en el punto M .

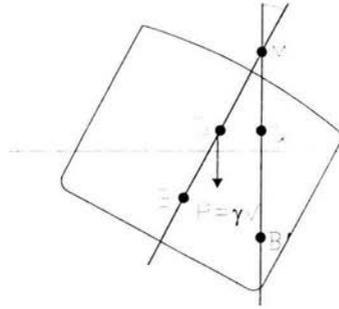


Fig. 2.9 Equilibrio de cuerpo flotante sujeto a movimiento

Cuando " $d\phi \rightarrow 0$ " el punto M tiende a alcanzar una posición más cercana a G , ésta posición de M es llamada meta-centro y la elevación MG es llamada elevación metacéntrica. El momento de enderezamiento o de restauración que actúa en el cuerpo en esta pequeña inclinación " $d\phi$ " se muestra en la figura 2.9.

$$M_R = \gamma V G Q = \gamma V M G \text{ sen } d\phi \quad \text{ec.2.9}$$

$$= \gamma V M G d\phi \quad \text{ec.2.10}$$

La elevación metacéntrica MG es una propiedad característica del cuerpo flotante y, de la figura 2.9, es claro que para tener un momento de enderezamiento M_R , M debe estar por encima de G ; ya que el cuerpo flota en equilibrio estable (con respecto a la rotación) si M está por encima de G . Cuando M coincide con G el cuerpo flota en equilibrio neutral; si M está por debajo de G , entonces el cuerpo está en equilibrio inestable. Con el fin de determinar las distancias metacéntricas se ha adoptado el siguiente procedimiento. Cuando la estructura flotante gira un ángulo " $d\phi$ ", la fuerza de flotación " γV " se desplaza sobre el segmento " BB_1 " y el momento causado por este movimiento está dado por:

Momento debido al movimiento de fuerza de flotación

$$= \gamma V BB_1 \cos \frac{d\phi}{2}$$

$$= \gamma V BB_1$$

ecs. 2.11

$$= \gamma V BB_2$$

puesto que $BB_1 = BB_2$ para un ángulo “ $d\phi$ ” muy pequeño. Aunque este momento puede ser causado por dos fluidos

$$= 2 \int \gamma \frac{1}{2} y^2 d\phi dx \frac{2}{3} y$$

ecs.2.12

$$= \frac{2}{3} \gamma d\phi \int y^3 dx = \gamma d\phi I_x$$

En donde I_x es el momento transversal de inercia de la línea de agua de la estructura flotante. De las ecuaciones 2.11 y 2.12

$$BB_2 = d\phi \left(\frac{I_x}{V} \right)$$

ec.2.13

De la figura 2.9 se puede observar que:

$$BB_2 = MB \text{sen } d\phi$$

$$= MB d\phi$$

ec. 2.14

entonces

$$MB = \frac{I_x}{V}$$

ec.2.15

La elevación metacéntrica MG se obtiene como:

$$MG = MB - GB = MK - GK$$

ec. 2.16

Donde MK es la elevación del meta-centro desde el punto mas bajo de la estructura flotante, y GK es la elevación del centro de gravedad por encima de K . Similarmente para la rotación longitudinal

$$MB_x = \frac{I_x}{V}$$

ec.2.17

En donde I_L es el momento longitudinal de inercia de la línea de agua de la estructura.

Las magnitudes de los momentos de giro dependen de las varias posibles situaciones que podrían causar movimientos rotatorios en una estructura flotante. Los movimientos rotatorios son causados por las siguientes posibles situaciones:

1. Por viento, la presión de viento actúa en una porción del cuerpo, por encima de la línea de agua
2. Que una grúa eleve un peso por fuera de su área en planta
3. Cuando grandes pesos se muevan a bordo de los cuerpos
4. Cuando el cuerpo maniobre una vuelta
5. Cuando el cuerpo encalle

3. Modelado de las acciones de diseño

Para realizar el diseño adecuado y seguro de una plataforma en aguas profundas, es de gran importancia contar con datos ambientales confiables y realistas. El primer paso al iniciar un diseño debe ser el examen riguroso de la información ambiental disponible y requerida, es decir, las características generales, riesgos, y condiciones meteorológicas, oceanográficas y sísmicas del sitio de instalación. Lo anterior, para cuantificar las fuerzas que se presentarán en la vida útil de la plataforma.

3.1 Oleaje

Es necesario hacer énfasis en el hecho de que el modelado matemático es tan sólo uno de los aspectos que abarca el estudio de la propagación del oleaje en el campo de la Ingeniería de Costas, dado que otras consideraciones como la definición de la batimetría, selección de los datos de partida relativos al clima marítimo, tratamiento de los contornos, etc. condicionan completamente el resultado final.

Cualquier estudio de ingeniería de costas o portuaria tal como el diseño de una regeneración de playa o de una puerto requiere la estimación de las condiciones del oleaje en el área de interés. En general, las condiciones de oleaje son importantes en mar abierto, teniendo varias formas de obtener estos datos por lo cual es necesario transferir la información disponible, instrumental, visual o de predicción, de alturas y direcciones a la zona de estudio. Por ello, la necesidad de determinar el oleaje de diseño, o de datos para alimentar modelos de transporte de sedimentos o de circulación en la zona de rompientes, ha dado lugar, en las dos últimas décadas, a avances importantes en el modelado de los procesos de transformación de las ondas.

Numerosas teorías de olas se han desarrollado en diferentes sitios dependiendo de los parámetros ambientales locales como son: profundidad, altura y periodo de ola. Muchas teorías están basadas en estos tres parámetros.

Hay que hacer las suposiciones de que las olas están en el plano XY , que el suelo está llano y que las olas son progresivas en la dirección X . Aquí hay que mencionar la diferencia entre un tren de ola progresiva y una ola estable.

La ola progresiva viaja a lo largo del eje X con una velocidad dada, la cual se llama celeridad. Por el otro lado la superficie de agua de la ola estable oscila verticalmente entre un conjunto de puntos sin progresión.

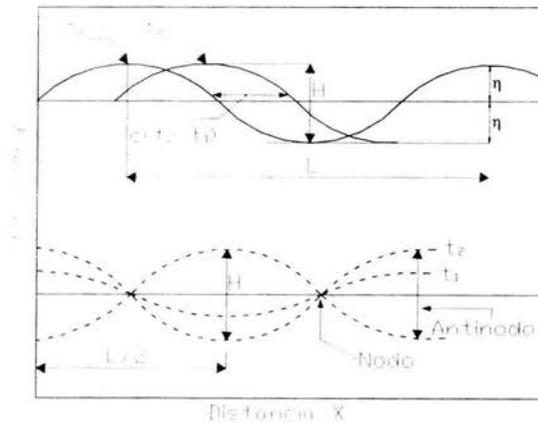


Fig. 3.1 Tipos de olas

3.1.1 Teoría lineal de la ola de Airy

La más simple y usual de las teorías es la teoría de la ola solitaria. Esta teoría de oleaje es también conocida como teoría de Airy o teoría senoidal. Esta teoría se basa en la suposición de que la altura de ola es pequeña comparada con la profundidad o la longitud de ola. El problema para cualquier teoría de oleaje es determinar el potencial de velocidad Φ relacionada a la región de flujo. El problema de valores de frontera en el caso de dos dimensiones puede resumirse a:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{ec.3.1}$$

condición de frontera superior

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad \text{en } y = -d \quad \text{ec.3.2}$$

con la condición cinemática de superficie libre

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad \text{en } y = \eta \quad \text{ec.3.3}$$

y con la condición dinámica de la superficie libre

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad y = \eta \quad \text{ec.3.4}$$

Además de que el potencial Φ , debe satisfacer la ecuación de Laplace ec.3.1. La solución de este problema es complejo porque las condiciones de frontera son no lineales y deben satisfacer la superficie libre la cual está en constante cambio.

Para Airy, la solución al potencial toma la forma de serie en términos de un parámetro adimensional de perturbación ε , el cual está definido en términos de la inclinación de la ola (altura de ola / longitud de ola)

$$\varepsilon = \frac{kH}{2} \quad \text{ec.3.5}$$

donde k es el número de ola, definido como $k = 2\pi / L$.

Entonces

$$\Phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \Phi_n \quad \text{ec.3.6}$$

donde Φ_n es la n -ésima solución para Φ . Similarmente el perfil de la ola η está definido como:

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \eta^n \quad \text{ec.3.7}$$

Cabe mencionar que la teoría lineal se dirige a la solución de primer orden, únicamente el primer término de la serie Φ y η está contenido en la substitución de las condiciones de frontera de la superficie libre (ecs. 3.3 –3.4). Entonces estas ecuaciones se reducen a:

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial t} - \frac{\partial \Phi_1}{\partial y} = 0 \quad \text{en } y = 0 \quad \text{ec.3.8}$$

y

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + g \eta_1 = 0 \quad \text{en } y = 0 \quad \text{ec.3.9}$$

de la ecuación 3.9 el perfil de la superficie libre está dado por:

$$\eta_1 = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} \right) \quad \text{en } y = 0 \quad \text{ec.3.10}$$

Para la ola progresiva con velocidad c , la periodicidad esta dada por $\alpha = x - ct$. Esta presentación de α supone que la ola está viajando en dirección negativa de x (la dirección de la propagación de la ola es en el eje x positivo). Como una alternativa, si el tiempo se toma en la misma dirección que el eje positivo x (y la dirección de propagación de la ola en el eje x negativo) entonces $\alpha = x + ct$.

Este tipo de problemas con valores en la frontera se resuelve por la técnica de la separación de variable. El potencial Φ_1 , suponemos que tiene la forma

$$\Phi_1 = Y(y)\Lambda(\alpha) \quad \text{ec.3.11}$$

la cual cuando se sustituye en la ecuación diferencial parcial produce dos ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} - k^2 Y = 0 \quad \text{ec.3.12}$$

$$\frac{d\Lambda}{d\alpha} + k^2 \Lambda = 0 \quad \text{ec.3.13}$$

donde k^2 es una constante. Después se mostrará que k es el número de ola. Las soluciones generales son:

$$Y = A_1 \cosh ky + A_2 \sinh ky \quad \text{ec.3.14}$$

$$\Lambda = A_3 \cos[k(x-ct)] + A_4 \sin[k(x-ct)] \quad \text{ec.3.15}$$

El punto de referencia $x=0$ está considerado para la ola tal que el perfil de la superficie η_1 se vuelve igual a $H/2$, cuando el tiempo t , es igual a cero. Entonces $A_3 = 0$. La condición de frontera superior da que $A_2 = A_1 \tanh kd$. Refiriéndonos a la ecuación 3.11, Φ debe escribirse:

$$\Phi = A_5 \frac{\cosh k(y+d)}{\cosh kd} \sin[k(x-ct)] \quad \text{ec.3.16}$$

donde $A_5 = A_1 A_4$. Nuevamente aplicando $\eta = H/2$ de la ecuación 3.9 en $x=0$, $y=0$, en el tiempo $t=0$, se obtiene $A_5 = gH/2kc$. También de la ecuación 3.16, la longitud de ola $L = 2\pi/k$, el periodo de ola $T = 2\pi/kc$, también $c = L/T$, $kc = \omega$, k es el número de ola y ω es la frecuencia de ola.

Entonces substituyendo $s = y+d$ y $\theta = k(x-ct)$, la expresión para el primer orden de la velocidad potencial, $\Phi(= \varepsilon\Phi_1)$ es:

$$\Phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh ks}{\cosh kd} \sin \theta \quad \text{ec.3.17}$$

de la ecuación 3.10 se tiene:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta \quad \text{ec.3.18}$$

substituyendo Φ en la combinación de condiciones de frontera de la superficie libre (ec.3.11) la relación de dispersión lineal se obtiene:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad \text{ec.3.19}$$

A lo que se quiere llegar es a la forma alternativa de Φ en función de las ecuaciones 3.17 y 3.19

$$\Phi = \frac{\pi H}{kT} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta \quad \text{ec.3.20}$$

Mientras que la longitud de ola se obtiene de la fórmula :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \quad \text{ec.3.21}$$

De la ecuación 3.21 se puede observar que la longitud L es dependiente de T y d . Puesto que $k = 2\pi / L$, la longitud de ola no puede calcularse directamente, y puede usarse una técnica iterativa puede ser utilizada con valores de aguas profundas para longitud de la ola. En aguas poco profundas, sin embargo, es más eficiente empezar la iteración aproximación de aguas someras. En el rango intermedio de aguas profundas, una fórmula sencilla de longitud de ola es:

$$L = L_0 [\tanh(2\pi d / L_0)]^{1/2} \quad \text{ec.3.22}$$

donde L_0 es la longitud de ola en aguas profundas.

Para la velocidad de la partícula de agua en las direcciones X y Y se obtienen de las expresiones:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad \text{ec.3.23}$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad \text{ec.3.24}$$

Diferenciando la ecuación 3.20 con respecto a x y y respectivamente, la velocidad horizontal de la partícula es:

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \cos \theta \quad \text{ec.3.25}$$

La velocidad vertical de la partícula es:

$$v = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \sin \theta \quad \text{ec.3.26}$$

Las aceleraciones de la partícula en las direcciones x y y , están dadas por :

$$\text{Horizontal: } \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta \quad \text{ec.3.27}$$

$$\text{Vertical: } \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos \theta \quad \text{ec.3.28}$$

De las expresiones de las velocidades vertical y horizontal, se observa que la velocidad horizontal de una partícula es máxima (o mínima) cuando la velocidad vertical es cero y viceversa. Puesto que la amplitud, de dos velocidades es generalmente diferente, se puede inferir que una partícula de agua describe una órbita elíptica sobre su posición media en un ciclo de ola completo. El desplazamiento de una partícula de agua sobre su posición media se obtiene integrando u y v con respecto al tiempo, t , y aplicando la condición de frontera apropiada para la constante de integración.

Los desplazamientos ξ y η , horizontal y vertical, respectivamente están dados por:

$$\xi = \frac{H}{2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta \quad \text{ec.3.29}$$

$$\eta = \frac{H}{2} \frac{\sinh ks}{\sinh kd} \cos \theta \quad \text{ec.3.30}$$

Note que el máximo desplazamiento vertical de una partícula de agua es igual a la amplitud de $H/2$.

Las afirmaciones anteriores se pueden entender mejor en las siguientes gráficas

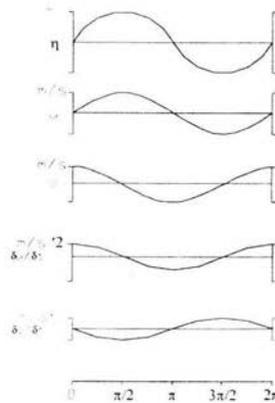


Fig. 3.3 Perfil, cinemática y dinámica de la ola

3.1.2 Ecuación de Morison

El cálculo de las fuerzas de oleaje en una estructura costa fuera es una de las labores primarias en el diseño de estructuras. Es también una labor, de las más difíciles dado que involucra la complejidad de la interacción de las olas con la estructura.

La ecuación de Morison (Morison 1950) ha sido desarrollada para describir las fuerzas horizontales de la ola sobre un cilindro vertical el cual se extiende de la parte más baja a la superficie libre del agua. La expresión tiene dos componentes que son la de arrastre y la de inercia. El principio involucra en el concepto de la fuerza de inercia que el movimiento de la partícula de agua en una ola lleva un momentum consigo. Como la partícula pasa alrededor del cilindro, ésta se acelera y después se desacelera.

Esto requiere que el trabajo sea realizado a través de la aplicación de una fuerza en el cilindro para incrementar este momentum. El incremento de fuerza en un pequeño segmento de cilindro, dl , es proporcional a la aceleración de la partícula del agua en el centro del cilindro, entonces:

$$df_1 = C_M \rho \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\partial u}{\partial t} ds \quad \text{ec.3.31}$$

donde

df_1 es la fuerza de inercia en el segmento ds del cilindro vertical

D es el diámetro del cilindro

$\frac{\partial u}{\partial t}$ aceleración local de la partícula en el eje del cilindro (ec.3.27)

C_M es el coeficiente de inercia

En un flujo uniformemente acelerado el coeficiente de inercia puede ser igual a 2 (Lamb 1945). Por otro lado la causa principal de la componente de la fuerza de arrastre es la presencia de una región de estela en la parte frontal del cilindro. La estela es una región de bajas presiones comparadas con las presiones de la parte frontal así que la diferencia de presión es creada por la estela del elemento. Note que el movimiento de la partícula bajo una ola es oscilatorio. La diferencia de presiones causa una fuerza que es ejercida en la dirección de la velocidad instantánea de la partícula de agua. En un flujo continuo la cara aguas arriba es fija y la fuerza de arrastre es proporcional al cuadrado de la velocidad de la partícula. En un flujo oscilatorio el valor absoluto de la partícula de agua se inserta para garantizar que la fuerza de arrastre está actuando en la misma dirección que la velocidad.

$$df_D = \frac{1}{2} C_D \rho D u u ds \quad \text{ec.3.32}$$

donde

df_D es la fuerza de arrastre en un incremento de segmento

ds es el diferencial del cilindro

C_D es el coeficiente de arrastre. En un flujo uniforme el valor del coeficiente es dependiente del número de Reynolds y la rugosidad del elemento. Este coeficiente se puede obtener de la siguiente gráfica.

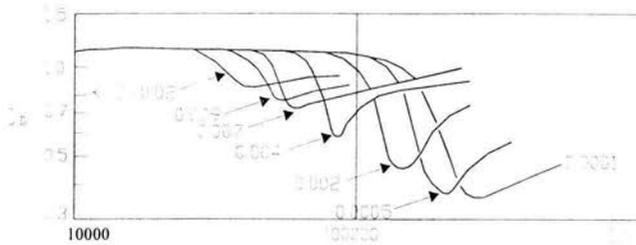


Fig. 3.4 Coeficiente de arrastre de Reynolds

Cabe mencionar que el coeficiente se incrementa directamente con la rugosidad del elemento.

Combinando la fuerza de inercia y de arrastre, la ecuación de Morison se escribe:

$$f = C_M A_I \frac{\partial u}{\partial t} + C_D A_D u u \quad \text{ec.3.33}$$

donde f es la fuerza por unidad de longitud del elemento vertical. Además

$$A_I = \rho \frac{\pi}{4} D^2 \quad \text{ec.3.34}$$

y

$$A_D = \frac{1}{2} \rho D \quad \text{ec.3.35}$$

No hay que olvidar que el elemento va desde el fondo marino hasta la superficie libre del agua, entonces la fuerza total está dada por la integral:

$$F = \int_0^d f ds = \int_0^d \left[C_M A_I \frac{\partial u}{\partial t} + C_D A_D u u \right] ds \quad \text{ec.3.36}$$

Recordando que la velocidad y aceleración de la partícula son, respectivamente:

(ecs.3.27 y 3.28):

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh ks}{\sinh kh} \cos \theta$$

y

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \sin \theta$$

3.2 Viento

Severos vientos y olas pueden ocurrir simultáneamente durante un huracán u otros niveles de tormenta. El diseño de estructuras costa fuera ha experimentado un gran avance en la línea con la necesidad de un mejor entendimiento de las fuerzas de viento y oleaje. Aunque ha habido un gran interés y estudio de dinámica de viento en tierra, las características especiales del movimiento y la irregularidad de la superficie del océano han agregado complicaciones a los estudios.

3.2.1 Fuerza del viento

En el problema de las fuerzas de viento en elementos estructurales es importante considerar la variabilidad en el tiempo así como la variabilidad de las velocidades en el espacio. Haciendo referencia a la figura 3.5, es evidente que la velocidad promedio

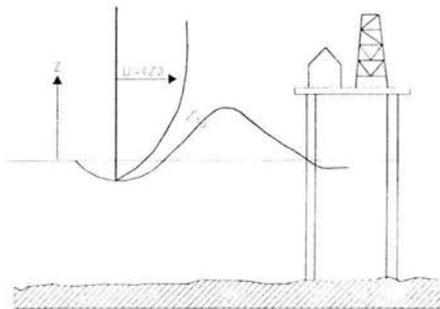


Fig. 3.5 Perfil de velocidad

describe en esta figura la variación con la elevación “ z ” por encima del nivel medio del agua; la variabilidad del tiempo en alguna elevación “ z_1 ”, está registrada en la figura 3.6.

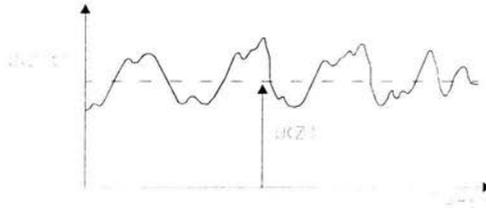


Fig. 3.6 Variación de la velocidad del viento

El significado de la magnitud de la velocidad del viento es evidente en la bien conocida ecuación de Morison o fuerza de arrastre:

$$F_D(z) = C_D \frac{\rho_a A_p}{2} U^2(z) \quad \text{ec.3.37}$$

Donde:

$F_D(z)$ es la fuerza de arrastre a la altura “ z ” por encima del nivel medio de la superficie del agua

C_D es un coeficiente de forma empírico del elemento

ρ_a es la densidad de masa del aire

A_p es el área proyectada del elemento estructural en un plano perpendicular al vector de velocidad

$U(z)$ es la velocidad a la altura “ z ” por encima del nivel medio de la superficie del agua

3.2.2 Distribución de velocidad

Un análisis de viento dinámico es mucho más complejo de lo que puede parecer; se iniciará con el nivel superior del campo de presiones. La distribución de velocidad está basada en razonables consideraciones físicas de fatiga del cortante uniforme dentro de los primeros cien pies de elevación (30.48 m) y una longitud de mezclado que se incrementa linealmente por encima de la superficie media del agua. El resultado de la distribución de velocidad es:

$$U(z) = \frac{u^*}{K} \ln \left(\frac{z+z_0}{z_0} \right) \quad \text{ec.3.38}$$

donde K es la constante de Karman ($K=0.4$), y z_0 es la elevación de rugosidad característica de las olas. La cantidad u^* es la velocidad de fricción la cual es proporcional a la raíz cuadrada del valor del cortante en la superficie del agua

Con esta fuerza obtenida de la ecuación se puede modelar en la ecuación dinámica del movimiento

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F_{\text{viento}} \quad \text{ec.3.39}$$

Donde

M incluye la masa de la estructura y masa añadida

C incluye el amortiguamiento estructural y el hidrodinámico

K es la rigidez de la estructura

y \ddot{x} , \dot{x} , x son la aceleración, velocidad y desplazamiento de la estructura, respectivamente

Y esta ecuación se resuelve por cualquier método ya conocido.

3.3 Corriente

Las fuerzas adicionales aplicadas a las estructuras costa fuera son debido a las corrientes existentes en el medio del océano. Cuando las corrientes actúan en conjunto con las olas cuando coinciden con la dirección, entonces las fuerzas ejercidas son mucho mayor que cuando actúan por separado. La velocidad de la corriente horizontal en el plano vertical se reduce directamente con la profundidad; en aguas poco profundas, la reducción de la velocidad no es tan pronunciada como en las aguas profundas. Un posible perfil de la variación de la velocidad de la corriente es el que se muestra en la figura 3.7.

Las corrientes oceánicas se clasifican en corrientes de viento, corrientes de marea y corrientes de densidad. La velocidad de corriente se supone con una variación lineal con la profundidad y es representada por la combinación de efectos de la marea y viento generadores de corrientes. La variación de la velocidad de corriente V'_s esta expresada por:

$$V' = V_m \left(1 + \frac{z\alpha}{d} \right) \quad \text{ec.3.40}$$

y la velocidad de corriente $V_c(z)$ en cualquier elevación por encima del fondo marino esta dado por

$$V_c(z) = V_m \left(1 + \frac{z\alpha}{d} \right) + V_w \left(\frac{z}{d} \right) \quad \text{ec.3.41}$$

donde

V_m valor constante de la velocidad de la corriente en el nivel medio del agua

V_w velocidad del viento que genera la corriente = $\frac{V_{\text{viento}}}{100}$

d profundidad del agua

α constante

El viento produce corrientes que disminuyen rápidamente con la profundidad. En la figura 3.7 muestra la suma vectorial de velocidades de la marea y del viento, para obtener el perfil final.

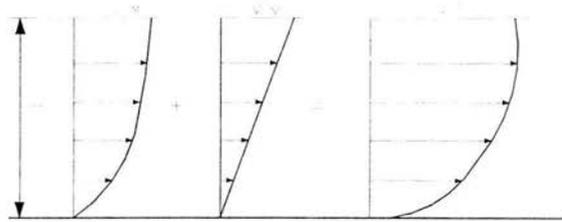


Fig.3.7 Velocidad de la corriente debido al viento y marea

En las profundidades de aguas poco profundas con corrientes rápidas, la posibilidad de vórtices y/o vibraciones ya están considerados para el diseño. Para corrientes paralelas a la dirección de las olas, la velocidad de la corriente se suma vectorialmente a la velocidad de las partículas de la ola.

La componente de arrastre en algún elemento inmerso de una plataforma es:

$$F_{DC} = \frac{1}{2} C_D \rho A V_c(z)^2 \quad \text{ec.3.42}$$

donde

F_{DC} es la fuerza de arrastre o empuje

C_D es el factor de forma del elemento en el que se aplica la fuerza

ρ es la densidad del agua

A es el área proyectada del elemento estructural en un plano perpendicular a la acción de la fuerza

$V_c(z)$ es la velocidad de la corriente en un punto específico

3.4 Sismo

Las estructuras costa fuera en zonas sísmicas deben tener rigidez y suficiente ductilidad para prevenir la falla o el colapso durante un gran sismo que pueda ocurrir en la vida de la estructura. En el análisis sísmico de una plataforma costa fuera puede utilizarse cualquier método de modelado de carga sísmica. La masa utilizada en el análisis consiste en la masa de la plataforma, la masa del fluido que rodea la estructura y la masa agregada.

Método de análisis paso a paso

El procedimiento de integración paso a paso es el método más conveniente para evaluar la respuesta de estructura costa fuera en un sismo. La historia de respuesta es dividida en incrementos muy cortos. Durante cada incremento, la estructura se supone que tiene elasticidad lineal; sin embargo, entre incrementos las propiedades se modifican de acuerdo con la condición actual. Considérese un intervalo de tiempo muy corto $\Delta t = t_{n+1} - t_n$. El sistema va ser considerado como sistema lineal y las correspondientes aceleración, velocidad y desplazamiento van a ser $\Delta \ddot{x}$, $\Delta \dot{x}$, Δx respectivamente. La ecuación de incremento correspondiente al movimiento está expresada como:

$$[M]\{\Delta \ddot{x}\} + [C]\{\Delta \dot{x}\} + [K]\{\Delta x\} = -[M]\{\Delta \ddot{x}_g\} \quad \text{ec.3.43}$$

donde

M incluye la masa de la estructura y masa añadida

C incluye el amortiguamiento estructural y el hidrodinámico

K es la rigidez de la estructura

$\Delta \ddot{x}_g$ es la aceleración de la base sobre la que se encuentra la estructura

$\Delta \ddot{x}$ es la aceleración relativa a la base

Los corchetes indican que se esta trabajando con matrices

Utilizando $\beta = \frac{1}{6}, \gamma = \frac{1}{2}$ del método de Newmark (referencia1) nos lleva a las siguientes ecuaciones:

$$\left\{ \dot{x} \right\}_{t+\Delta t} = \left\{ \dot{x} \right\}_t + \frac{1}{2} \Delta t \left\{ \ddot{x} \right\}_t + \frac{1}{2} \Delta t \left\{ \ddot{x} \right\}_{t+\Delta t} \quad \text{ec.3.44}$$

$$\left\{ x \right\}_{t+\Delta t} = \left\{ x \right\}_t + \Delta t \left\{ \dot{x} \right\}_t + \frac{1}{3} \Delta t^2 \left\{ \ddot{x} \right\}_t + \frac{1}{6} \Delta t^2 \left\{ \ddot{x} \right\}_{t+\Delta t} \quad \text{ec.3.45}$$

Entonces se tiene

$$\Delta \ddot{x} = \left\{ \ddot{x} \right\}_{t+\Delta t} - \left\{ \ddot{x} \right\}_t$$

$$\left\{ \Delta \dot{x} \right\} = \left\{ \dot{x} \right\}_{t+\Delta t} - \left\{ \dot{x} \right\}_t$$

$$\left\{ \Delta x \right\} = \left\{ x \right\}_{t+\Delta t} - \left\{ x \right\}_t$$

$$\left\{ \Delta \dot{x} \right\} = \frac{1}{2} \Delta t \left\{ \ddot{x} \right\}_t + \frac{1}{2} \Delta t \left\{ \ddot{x} \right\}_{t+\Delta t} \quad \text{ec.3.46}$$

$$\left\{ \Delta x \right\} = \Delta t \left\{ \dot{x} \right\}_t + \frac{1}{3} \Delta t^2 \left\{ \ddot{x} \right\}_t + \frac{1}{6} \Delta t^2 \left\{ \ddot{x} \right\}_{t+\Delta t} \quad \text{ec.3.47}$$

Con operaciones algebraicas de las ecuaciones 3.46 y 3.47 obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\left\{ \Delta \dot{x} \right\} = \frac{3}{\Delta t} \left\{ \Delta x \right\} - 3 \left\{ \dot{x} \right\}_t - \frac{1}{2} \Delta t \left\{ \ddot{x} \right\}_t \quad \text{ec.3.48}$$

$$\left\{ \Delta \ddot{x} \right\} = \frac{6}{\Delta t^2} \left\{ \Delta x \right\} - \frac{6}{\Delta t} \left\{ \dot{x} \right\}_t - 3 \left\{ \ddot{x} \right\}_t \quad \text{ec.3.49}$$

vamos a suponer

$$A = -3\{x\}_t - \frac{1}{2} \Delta t \{\dot{x}\}_t$$

$$B = -\frac{6}{\Delta t} \{x\}_t - 3\{\dot{x}\}_t$$

Entonces las ecuaciones 3.48 y 3.49

$$\{\Delta x\} = \frac{3}{\Delta t} \{\Delta x\} + A \quad \text{ec.3.50}$$

$$\{\Delta \dot{x}\} = \frac{6}{\Delta t^2} \{\Delta x\} + B \quad \text{ec.3.51}$$

Introduciendo las ecuaciones 3.50 y 3.51 a la ecuación incremental de movimiento 3.43 obtenemos el resultado

$$[K']\{\Delta x\} = \{R\} \quad \text{ec.3.52}$$

donde

$$[K'] = \frac{6}{\Delta t^2} [M] + [K] + \frac{3}{\Delta t} [C]$$

$$\{R\} = -[M]\{B\} - [C]\{A\} - [M]\{\Delta \dot{x}_g\}$$

$$\text{entonces } \{\Delta x\} = [K']^{-1} \{R\} \quad \text{ec.3.53}$$

considerando que la estructura esta en reposo, inicialmente

$$\{x\}_0 = \{x\}_0 = 0$$

$$\{\dot{x}\}_0 = -\{\dot{x}_g\}_1$$

calculando la inversa de K' , y siguiendo el proceso numérico puede ejecutarse repetitivamente:

$$A = -3\{x\}_t - \frac{1}{2} \Delta t \{\dot{x}\}_t$$

$$B = -\frac{6}{\Delta t} \left\{ \dot{x} \right\}_i - 3 \left\{ \ddot{x} \right\}_i$$

$$\{R\} = -\Delta x_k [M] - [M]\{B\} - [C]\{A\} \quad \text{ec.3.54}$$

$$\{\Delta x\} = [K']^{-1} \{R\} \quad \text{ec.3.55}$$

$$\{x\} = \{x\} + \{\Delta x\} \quad \text{ec.3.56}$$

$$\left\{ \dot{x} \right\} = \left\{ \dot{x} \right\} + \frac{3}{\Delta t} \{\Delta x\} + \{A\} \quad \text{ec.3.57}$$

$$\left\{ \ddot{x} \right\} = \left\{ \ddot{x} \right\} + \frac{6}{\Delta t^2} \{\Delta x\} + \{B\} \quad \text{ec.3.58}$$

$$\{\Delta F\} = [K]\{\Delta x\} \quad \text{ec.3.59}$$

$$\{F\} = \{F\} + \{\Delta F\} \quad \text{ec.3.60}$$

La selección del incremento de tiempo Δt puede basarse en considerar las propiedades estructurales. Pero en general el incremento no debe ser mayor al diez por ciento del periodo natural de la estructura. Y si el periodo natural de la estructura no es conocido, el procedimiento más simple es tratar con varios incrementos hasta obtener el grado de precisión deseado.

4. Normas de diseño (Norma API RP 2T)

En esta sección se definen los criterios comúnmente requeridos para el diseño de una plataforma TLP. Los cálculos de análisis y diseño de una TLP y los subsistemas relacionados requieren que sus diseños sean especificados perfectamente por las normas de construcción, transportación, instalación y operación conjugados con la identificación de eventos ambientales y asociados esfuerzos permisibles y/o factores de seguridad. La especificación de cada condición requiere establecer valores máximos de viento, olas, corriente y variación de marea con los rangos de variación de peso y centro de gravedad.

4.1 Requisitos de operación (API 5.2)

Una TLP puede realizar varias funciones tales como perforación, producción, almacenaje, manejo de producción, habitaciones o la combinación de algunas de estas funciones. La configuración de la plataforma debe determinarse con los estudios de diseño de equipo de la cubierta, así como dirigir estos aspectos de diseño para asegurar las funciones hidrodinámicas y aerodinámicas, estabilidad, consideraciones de peso y construcción. Ejemplos de requerimientos usualmente involucrados:

- Perforación y producción simultánea

4.2 Requisitos de estabilidad (API 5.3)

La estabilidad debe establecerse para operaciones relevantes y condiciones pre-operacionales para ambos estados de integridad y daños de la estructura. La condición de integridad debe incluir un rango completo de la posible variación del centro de gravedad permitida por procedimientos de operación durante condiciones extremas. Hay varias condiciones de estabilidad con daños como la inundación de un

compartimento de un pontón teniendo como consecuencia que se le sume peso a la plataforma y que se modifique la fuerza de tensión de los tensores, por tanto el flotador debe subdividirse para superar estos daños accidentales. Para condiciones de estabilidad en sitio la tensión de los tensores debe ser suficiente para asegurar la integridad de la plataforma y los tensores.

4.3 Criterios ambientales (API 5.3)

Los criterios ambientales se asocian con un intervalo de recurrencia y a la respuesta de la estructura. Por ejemplo, el diseño de eventos en 100 años debe ser el que produzca la respuesta más crítica de la plataforma en 100 años. Hay diferentes eventos de diseño que producen la respuesta más crítica para diferentes componentes de la estructura. Cabe mencionar que la respuesta máxima de una TLP no necesariamente es producida por la condición de altura máxima de ola.

4.3.1 Viento (API 5.3.2)

La fuerza del viento es significativa en el diseño y análisis de una plataforma TLP. Perfiles y espectros de vientos, ambos, representan la variación del viento y las componentes que se usan normalmente.

4.3.2 Oleaje (API 5.3.3)

Las olas originadas por el viento y el viento mismo son los mayores causantes de fuerzas en plataformas costa fuera. Tales olas son irregulares en forma, pueden variar en altura y longitud y pueden aproximarse a una plataforma en una o más direcciones simultáneamente.

4.3.3 Corriente (API 5.4.4)

Datos recolectados de corrientes del lugar pueden incluirse en los criterios de diseño si están disponibles. En aguas profundas, la corriente puede producir grandes cargas en la estructura, específicamente en los tensores.

4.3.4 Sismo (API 5.4.9)

Las aceleraciones sísmicas deben ser consideradas para áreas que se identifican con gran actividad sísmica. Ambas aceleraciones, tanto la componente vertical como la horizontal, son importantes para el diseño de una plataforma TLP.

4.3.5 Crecimiento marino (API 5.4.10)

Se necesita conocer el tipo y la tasa de acumulación del crecimiento marino en el sitio de diseño para determinar la tolerancia de diseño de peso, diámetro hidrodinámico y coeficiente de arrastre.

4.3.6 Propiedades físicas (API 5.4.7)

Hay varias propiedades físicas del agua de mar, tales como, temperatura, salinidad y contenido de oxígeno, esto es muy importante para los requerimientos del acero, corrosión, y cálculo de flotación.

4.4 Fuerzas ambientales (API 6.1)

El propósito de esta sección es describir los métodos del cálculo de las fuerzas que actúan en una plataforma TLP debido a los efectos ambientales. Las fuerzas debido a la respuesta de la plataforma también son significativas e incluso discutidas. Las fuerzas ambientales pueden calcularse por medio de cuatro distintas bandas de frecuencia para evaluar los efectos en el sistema. Las cuatro frecuencias son:

- Fuerzas continuas tales como viento, corriente y ola son constantes en magnitud y dirección para la duración de interés.
- Cargas cíclicas de baja frecuencia pueden excitar a la plataforma en su periodo natural
- Cargas cíclicas de oleaje son grandes en magnitud y son las mayores contribuidoras de fuerzas a un miembro de la plataforma y a los sistemas de amarre.
- Cargas cíclicas de alta frecuencia pueden excitar a la plataforma en su periodo natural en volteo, cabeceo y giro.

4.4.1 Viento (API 6.2)

Las condiciones de viento utilizadas en un diseño deben determinarse mediante el uso de medios apropiados para recolectar datos los cuales deben ser consistentes, en términos de puntos de ocurrencia, con otros parámetros ambientales que podrían ocurrir simultáneamente. La velocidad y dirección del viento varían en espacio y tiempo, la variación de la velocidad y duración así como la intensidad y la forma del espectro no han sido establecidos con absoluta certeza. Las siguientes expresiones son para obtener parámetros de viento para ser utilizados en el diseño.

- Perfil medio (API 6.2.2.1)

El perfil medio de la velocidad promedio durante una hora en una elevación z puede aproximarse por:

$$V_z = V_H \left(\frac{z}{H} \right)^{0.125} \quad \text{ec.4.1}$$

donde

V_H = Velocidad media durante una hora en un punto específico

z = Punto de interés

H = elevación de 33 ft o 10 m

- Factor ráfaga (API 6.2.2.2)

El factor ráfaga puede definirse como:

$$G(t, z) \equiv V(t, z) / V_z = 1 + g(t)I(z) \quad \text{ec.4.2}$$

donde

$I(z)$ = Intensidad de turbulencia descrita más adelante

t = La duración de la ráfaga en unidades de segundo

El factor $g(t)$ puede calcularse con la expresión:

$$g(t) = 3.0 + \ln[(3/t)^{0.6}] \quad \text{para } t \leq 60 \text{seg}$$

ec.4.3

- Intensidad de turbulencia

La intensidad de turbulencia es la desviación estándar de la velocidad normalizada del viento. La intensidad de turbulencia puede aproximarse con:

$$0.15(z/z_s)^{-0.125} \quad \text{para } z \leq z_s$$

$$Iz \equiv \sigma(z) / V_z =$$

ec.4.4

$$0.15(z/z_s)^{-0.275} \quad \text{para } z > z_s$$

donde $z_s = 66 \text{ ft (20 m)}$

- Fuerza del viento (API 6.2.3)

La fuerza instantánea del viento en una TLP puede calcularse sumando las fuerzas instantáneas, en cada miembro, que estén por encima del nivel medio del agua. Esta fuerza puede estimarse por:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_s A V_z + u' - \bar{x} (V_z + u' - \bar{x}) \quad \text{ec.4.5}$$

donde

F fuerza del viento

ρ_a densidad de masa del aire

C_s coeficiente de forma

A área proyectada del objeto

\dot{x} velocidad instantánea del miembro estructural

z elevación del centroide del miembro

- Coeficientes de forma

Se recomiendan los siguientes coeficientes de forma:

<i>Coeficiente de formas</i>	<i>Objetos</i>
1.5	vigas
1.5	secciones rectangulares
0.5	secciones cilíndricas
1.0	áreas proyectadas de plataforma

4.4.2 Corriente (API 6.3)

La velocidad de la corriente utilizada en el diseño, debe ser consistente con otros parámetros de diseño tales como altura de ola, y velocidad de viento.

- Arrastre de corriente (API 6.3.2)

En la ausencia de movimientos inducidos por ola, la fuerza de arrastre ejercida en un miembro cilíndrico por una corriente es proporcional al cuadrado de la velocidad de la corriente. La fuerza de arrastre actúa en la dirección de la componente de la corriente que es normal al eje del miembro. La fuerza de arrastre puede determinarse utilizando la siguiente fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D A V^2 \quad \text{ec.4.6}$$

donde

F_D Fuerza de arrastre normal al miembro

- ρ_w Densidad de la masa del agua
 C_D Coeficiente de arrastre
 A Area proyectada
 V Velocidad de la corriente normal al eje del miembro

4.4.3 Fuerza de oleaje (API 6.4)

Existen dos métodos para calcular la fuerza del oleaje. Estos se basan en la teoría de difracción y la ecuación de la fuerza de ola.

4.4.3.1 Teoría de difracción (API 6.4.2.1)

La fuerza de oleaje es calculada en la teoría de difracción, por la integración de un campo de presión actuando en un cuerpo. El método es apropiado cuando el cuerpo es relativamente grande respecto a la amplitud del movimiento del agua, de tal modo que las fuerzas de viscosidad son relativamente insignificantes y el cuerpo es suficientemente grande respecto a la longitud de la ola para modificar el campo de la ola a través de la difracción y la radiación.

4.4.3.2 Ecuación de la fuerza de ola (API 6.4.3)

Cuando los miembros del cuerpo son relativamente esbeltos o tienen bordes u orillas agudas, los efectos de la viscosidad deben de ser muy importantes y la fuerza de oleaje se expresa como la suma de la fuerza de arrastre y fuerza de inercia. La ecuación de la fuerza de oleaje es una fórmula empírica para calcular fuerzas en un miembro dadas las condiciones de velocidad y aceleraciones del agua (Morison 1950). Lo anterior supone que la presencia del miembro no altera apreciablemente la forma de la ola. La ecuación de la fuerza de ola que a continuación se presenta ha sido modificada para considerar la velocidad y la aceleración de la estructura:

$$F = F_d + F_i \quad \text{ec.4.7}$$

donde

F es el vector de fuerza por unidad de longitud que actúa normal al eje del miembro

F_d es el vector de la fuerza de arrastre

$$= \frac{1}{2} \rho_w C_D D |u - \dot{x}| (u - \dot{x}) \quad \text{ec.4.8}$$

F_i es el vector de la fuerza de inercia

$$= \frac{\pi}{4} \rho_w D^2 (C_M \ddot{u} - C_A \ddot{x}) \quad \text{ec.4.9}$$

D diámetro del miembro

C_D coeficiente de arrastre

C_A coeficiente de masa adherida para la aceleración del cuerpo

C_M coeficiente de masa virtual $= C_A + 1$

u velocidad del agua normal al eje del cilindro

\ddot{u} aceleración del agua normal al eje del cilindro

\dot{x} velocidad del miembro normal al su propio eje

\ddot{x} aceleración del miembro normal a su propio eje

4.4.4 Sismo (API 6.7)

Para localizaciones de TLP's donde el sismo es una fuente de fuerzas significativas, se deben obtener historias de aceleraciones del suelo. Para las respuestas de tensión de los tensores, el movimiento vertical del suelo es mucho más crítico que el movimiento horizontal.

4.5 Respuestas extremas (API RP 2T 7.2)

Las respuestas extremas son aquellas respuestas que gobiernan el diseño de una TLP. Generalmente incluyen desplazamiento, giro y máxima y mínima tensión en los

tensores. Los eventos de diseño son aquellos eventos ambientales que producen respuestas extremas, dichos eventos están asociados con varios casos de cargas.

4.5.1 Análisis estadístico (API RP 2T 7.2.1)

Los métodos anteriores se basan en un análisis determinísticos y pueden utilizarse como parte de un trabajo de diseño los criterios de diseño basados en un análisis probabilístico en combinación con confiabilidad, pueden proporcionar una forma más versátil para el desarrollo de un diseño óptimo pero esto requiere un análisis extenso.

Los diferentes caminos para el cálculo de respuestas de diseño están dados esquemáticamente en la siguiente figura.

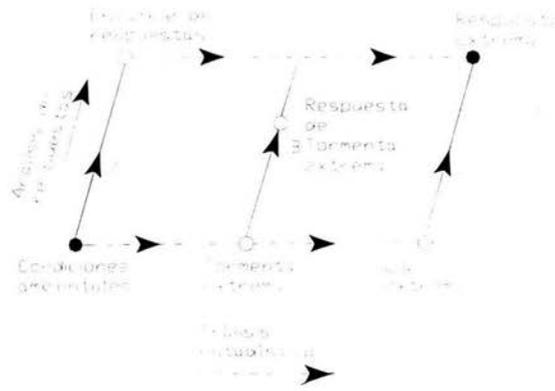


Fig. 7.1 Análisis de diseño

Los caminos alternativos son similares en que ambos involucran dos componentes:

- a) Análisis determinísticos de respuesta del sistema en el ambiente
- b) Análisis probabilísticos de las respuestas extremas

- Análisis determinístico de respuesta

Observe el camino C de la figura. El análisis determinístico involucra análisis de representaciones del ambiente, como primer paso. El segundo paso es el cálculo de la

respuesta estructural ante el evento. Cabe mencionar, que la combinación de máxima ola, máximo viento, máxima corriente, máxima tormenta y máxima marea no necesariamente produce el caso más crítico diseño para todos los parámetros de interés. Y el mismo evento no proporciona las mayores respuestas de diseño.

- Análisis probabilísticos

Observe el camino A en la figura. Un análisis probabilístico completo involucra el cálculo de respuestas para una serie completa de posibles condiciones ambientales. El análisis estadístico de estas respuestas se realiza con el fin de predecir un dato apropiado de condición extrema para cada respuesta.

- Análisis semi-probabilístico

Observe el camino B de la figura. El procedimiento determinístico es frecuentemente inadecuado. Un análisis probabilístico completo requiere más datos que de los que comúnmente se dispone. El camino intermedio es un método semi-probabilístico, el cual involucra la reducción de datos ambientales para identificar más condiciones severas y la combinación de eventos.

4.5.2 Parámetros ambientales (API RP 2T 7.2.2)

Parámetros ambientales importantes a la respuesta:

- Viento
 1. Velocidad media del viento
 2. Dirección media del viento
 3. Función densidad espectral de la fuerza del viento
- Oleaje
 1. Altura significativa de ola
 2. Periodo medio de ola

3. Función densidad espectral de la amplitud de ola
 4. Dirección media de ola
 5. Función dirección de propagación de la ola
- Corriente
 1. Velocidad de la corriente
 2. Dirección de la corriente
 3. Perfil de la corriente (velocidad y dirección)
 - Marea
 1. Marea astronómica
 2. Ola de tormenta

4.5.3 Máximo desplazamiento (API RP 2T 7.2.3)

La predicción del desplazamiento horizontal es importante para el análisis del sistema de ductos y del sistema de tendones y para especificar los equipos de los mismos. El desplazamiento máximo gobierna parcialmente los requerimientos de altura de la plataforma. El diseñador puede considerar las distribuciones direccionales de las condiciones ambientales. La suposición de linealidad en el viento, oleaje y corriente es apropiada en la ausencia de datos. Si la información disponible es suficiente, resulta apropiado utilizar análisis no-lineales y puede obtenerse una estimación más exacta para el desplazamiento máximo.

4.5.4 Máxima tensión en el tensor (API RP 2T 7.2.5)

Las cargas del tensor surgen de la pretensión y efectos ambientales. La pretensión se aplica para el control de la tensión mínima, o del límite del desplazamiento máximo. Las siguientes componentes deben considerarse para la determinación de la tensión máxima del tensor:

- a. Cuasi-estática

1. T_o pretensión al nivel medio del agua
 2. T_l variación del nivel medio del agua debido a la marea, oleaje y/o tormenta
 3. T_l condición de carga y lastre, variación de peso
 4. T_m tensión debido a los momentos de volteo producidos por el viento y corrientes
 5. T_s tensión producida por fijar la estructura debido a la estática y la lenta variación del desplazamiento
- b. El oleaje produce tensión
1. T_w variación de la tensión debido a la fuerza del oleaje
 2. T_f cargas por pequeños errores de posicionamiento y desplazamientos instantáneos
 3. T_r cargas debido al giro, volteo y cabeceo
- c. Efectos en tensores individuales
1. T_i distribución diferencial de cargas
 2. T_v tensión inducida por un vórtice en un tendón

Entonces la tensión máxima en un tensor puede estimarse usando una superposición lineal que incorpore los efectos antes mencionados

$$T_{\max} = T_o + T_l + T_l + T_m + T_s + T_w + T_f + T_r + T_i + T_v \quad \text{ec.4.10}$$

Como en la tensión máxima, la tensión mínima está determinada por una superposición lineal de efectos de pretensión y efectos ambientales

$$T_{\min} = T_o - [T_l + T_l + T_m - T_s + T_w + T_f + T_r + T_i] \quad \text{ec.4.11}$$

4.6 Respuesta por análisis de fatiga (API RP 2T 7.3)

Para este análisis se requiere la estimación de historias de respuestas. La predicción de la vida de fatiga o daños se realiza mediante un sencillo procedimiento estadístico. En el pasado, se han usado análisis determinísticos con altos factores de seguridad. Actualmente, se han desarrollado alternativas probabilísticas más exactas.

Los tres siguientes métodos son adecuados:

1. Altura de ola discreta y periodo

Las estadísticas de altura y periodo de ola son operadas por una función de transferencia apropiada la cual produce estadísticas de fuerza y de movimiento que son periodos dependientes. Debido a la sensibilidad del periodo de ola, métodos tradicionales que utilizan una media del periodo para cada altura de ola, no son aplicables.

2. Dominio de la frecuencia

Estadísticas de espectros de ola, son utilizados por operadores apropiados de amplitud de respuesta, los cuales producen estadísticas de espectros de movimiento y fuerza. Las estadísticas de respuesta de oleaje, viento y corriente y cargas de plataforma se estiman utilizando el primer método.

3. Dominio de tiempo aleatorio

Se realiza una simulación de respuesta del ambiente por un periodo extenso de tiempo. La estadística de respuestas se genera a partir de esta historia de tiempo.

4.7 Consideraciones estructurales de la TLP (API RP 2T 8.2)

Las estructuras de la cubierta y el flotador deben ser diseñadas para cargas que ocurren durante todas las fases del proyecto incluyendo construcción, transportación, instalación y fases en el lugar. El diseño estructural debe considerar la posibilidad de eventos accidentales como son colisión, fuego, explosión o inundación. La capacidad

de la estructura para redistribuir cargas debe considerarse cuando se seleccione la configuración de la estructura.

4.7.1 Interacción con otros sistemas (API RP 2T 8.2.5)

El diseño estructural de la estructura debe considerar interacciones críticas con otros sistemas, tales como puntos de anclaje de un tensor o un conductor (raiser), equipo de instalación de tensores y conductores (raisers), equipo de producción y perforación, etc.

4.7.2 Seguridad (API RP 2T 8.2.6)

El arreglo de la estructura principal debe estar coordinada con los requerimientos de operación y equipos. Deben considerarse la influencia de la estructura en la ventilación de las áreas de riesgo, accesos para extinguir fuego, protección contra fuego y rutas de evacuación.

4.7.3 Ingeniería de pesos (API RP 2T 8.2.3)

Debido a sus efectos en la flotación de la plataforma y requerimientos de la tensión del tensor, todos los pesos y centros de gravedad deben ser monitoreados continuamente y con precisión durante el diseño, construcción, y fases del proyecto en sitio. Prácticas de diseño deben minimizar pesos estructurales siempre que sea posible.

4.8 Casos de diseño (API RP 2T 8.3)

Un caso de diseño es una combinación de cargas debido a las fases del proyecto, condiciones del sistema, y al ambiente con un criterio de seguridad apropiado (API RP 2T 5.5.5).

4.8.1 Condiciones de diseño de carga (API RP 2T 8.3.3)

Para cada caso de diseño, la plataforma debe diseñarse para condiciones de cargas que van a producir los efectos más severos en la estructura. Cargas ambientales, con la excepción del sismo, deben combinarse de manera consistente con la probabilidad de su ocurrencia simultánea.

4.9 Análisis estructural (API RP 2T 8.4)

La plataforma debe analizarse para la aplicación de cargas utilizando una variedad de métodos de computación. Se recomienda un análisis elástico lineal. Específicamente el análisis de elemento finito es necesario para lograr una mayor precisión en la determinación de la distribución de esfuerzos en estructuras complejas.

4.9.1 Modelado (API RP 2T 8.4.2)

- Modelo de marco espacial

Este tipo de modelos generalmente consiste en elementos barras mas otros elementos necesarios para modelar características específicas de estructuras. Todos los elementos estructurales primarios deben ser modelados en análisis espacial. Los efectos en miembros secundarios deben considerarse para un análisis local específico.

- Elemento finito

Este análisis se recomienda para puntos complejos y otras subestructuras complicadas para determinar de manera mas precisa la distribución de esfuerzos local y para verificar la rigidez del modelo. Las cargas que se aplican en el modelo de elemento finito se obtienen del análisis del modelo espacial y de las cargas locales actuando sobre la estructura. Las columnas y pontones con complejos atiesadores o elementos

de rigidez requieren un análisis de elemento finito a menos que un cálculo manual sea suficiente para determinar con precisión la distribución de esfuerzos.

- Cálculos manuales

Un cálculo manual se realiza donde un análisis específico de elemento finito no sea necesario y donde se pueden utilizar fórmulas empíricas o principios básicos de ingeniería.

- Factores de concentración de esfuerzos deben determinarse por medio de un análisis específico de elemento finito, con modelos físicos, o por otros métodos razonables de análisis o por fórmulas.

4.9.2 Análisis de esfuerzos (API RP 2T 8.4.3)

Pueden realizarse análisis estructurales cuasiestáticamente cuando la estructura no responde dinámicamente. Los periodos referidos para esto son aquellos de vibración elástica de la plataforma y no se refiere a los periodos del cuerpo rígido de la plataforma y el sistema de tensores.

4.9.3 Análisis de fatiga (API RP 2T 8.4.4)

La vida de fatiga aceptable es una función de la inspección, la rehabilitación, la redundancia, predicción de daños por fatiga, consecuencias por falla de elementos estructurales. En general, se recomienda que el diseño de la vida de fatiga de cada elemento estructural de la plataforma sea tres veces más pequeño que la vida útil de la plataforma. La fatiga puede ser causada por cargas cíclicas del ambiente y por vibración de maquinaria, la más usual es la carga cíclica por oleaje. Rangos de esfuerzos pueden ser asociados con el estado del mar. Se calculan historias de esfuerzos cíclicos debido a otros tipos de cargas y se incluyen con los esfuerzos inducidos por el oleaje para el análisis de fatiga.

Las estimaciones de la vida de fatiga están hechas por comparación de la carga cíclica a largo plazo en un detalle estructural con la resistencia del detalle a daños por fatiga. Existen dos procedimientos distintos para determinar los daños por fatiga:

1. Procedimiento S-N

El procedimiento S-N utiliza una curva S-N la cual proporciona el número de ciclos para que falle un elemento estructural o material como función de un rango constante de esfuerzos, basado en resultados de experimentos. Se usa la distribución de esfuerzos a largo plazo para calcular la relación de daños por fatiga acumulada:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad \text{ec.4.12}$$

Donde n_i es el número de ciclos dentro del rango de esfuerzos y N_i es el número de esfuerzos para que falle un elemento en el rango de esfuerzos “ i ” proporcionado por la apropiada curva S-N. D no debe exceder la unidad para el diseño por fatiga.

2. Fractura mecánica

Este procedimiento puede ser utilizado para predecir la tasa de crecimiento de una grieta por fatiga. La fuerza de fatiga de un modelo en particular se calcula utilizando la expresión de la ley de Paris

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad \text{ec.4.13}$$

donde

$\frac{da}{dN}$ es la tasa de crecimiento de la grieta

ΔK es el rango de intensidad de esfuerzos que ocurren en los extremos de las grietas

C y m son las constantes de un material en particular y la condición de carga. Estas constantes de material dependen del tipo de material y condiciones ambientales.

4.10 Diseño estructural (API RP 2T 8.5)

Los componentes estructurales de una TLP deben diseñarse de acuerdo con la aplicación provisional de las prácticas recomendadas del API que contiene el código API RP 2A y los boletines del API 2U y 2V. En general los cuerpos cilíndricos deben diseñarse con el boletín API 2U, las placas de los pisos de acuerdo al boletín API 2V y todos los demás elementos estructurales de acuerdo al API RP 2A .

4.11 Condiciones de cargas de diseño en tensores (API RP 2T 9.3)

Las cargas en los tensores incluyen cargas axiales, flexión, cortante, torsión y carga radial. Las cargas axiales pueden determinarse por superposición de las componentes de cargas descritas en el punto 4.5.4. La flexión y el cortante pueden surgir por las siguientes causas:

- Respuesta dinámica a los movimientos de la plataforma
- Flexión inducida por flexionar elementos rígidos
- Arrastre hidrodinámico y fuerzas de inercia
- Vórtices inducidos por vibración
- Cargas inusuales durante la instalación

Mientras que el diseño de los tensores es característicamente dominado por la carga axial, los otros tipos de cargas deben ser evaluados apropiadamente para garantizar márgenes de diseño adecuados.

La selección de condiciones ambientales y la configuración de una TLP para cada caso de carga debe calcularse para la probabilidad de ocurrencia de eventos simultáneos los cuales podrían incluir la ocurrencia de cargas extremas.

Las condiciones de la vida de operación de los tendones deben considerar un rango de combinación de viento, oleaje y condiciones de corrientes que comúnmente puedan

ocurrir. Estas cargas son particularmente importantes en la evaluación de fatiga del tensor e inspección.

Las cargas durante la instalación de los tensores pueden ser el resultado de cualquier condición ambiental. Debe considerarse la dinámica de tensores antes y durante la colocación para minimizar el riesgo de daños al tensor debido a la respuesta de resonancia con parte de los tensores instalados.

Durante la vida útil de la estructura, los tensores pueden dañarse. Por lo tanto, los tensores deben ser diseñados para ser removidos y reemplazados. Daños a la plataforma tales como hundimiento de compartimentos pueden afectar a las cargas y respuestas de las fuerzas dinámicas del tensor. Algunos factores causantes son: pérdida del tensor, daño a un compartimento del pontón, daños al tensor.

Las cargas por sismo en los tensores deben fundamentarse en condiciones de un sitio geotécnico específico, y el espectro de diseño debe incluir la componente vertical y dos componentes ortogonales horizontales de la aceleración del suelo.

4.12 Métodos de análisis de cargas (API RP 2T 9.4)

Las cargas en los tensores consisten en ambas componentes tanto estáticas como dinámicas. Las cargas estáticas surgen de la pretensión del tendón, marea desplazamiento de la plataforma debido a las fuerzas ambientales y errores de colocación de las cimentaciones. Las cargas dinámicas surgen de la plataforma y movimientos sísmicos, ráfagas de viento y fuerzas hidrodinámicas. El cálculo de estas cargas y fuerzas se describen a continuación.

4.12.1 Análisis del dominio de frecuencias

Las soluciones del dominio de frecuencias para respuestas de tensores pueden obtenerse por medio de soluciones numéricas de elementos finitos o ecuaciones diferenciales finitas para tensores. Este procedimiento requiere un modelo de arrastre hidrodinámico así como un término de amortiguamiento lineal y supone un desplazamiento de su posición media. La solución adquiere la forma de una función de transferencia relacionando la respuesta del tensor con una función de frecuencia.

4.12.2 Análisis del dominio del tiempo

Las soluciones del dominio del tiempo ofrecen las ventajas de permitir directamente la inclusión de los efectos no lineales y la determinación de la relación de combinación de cargas (tensión, flexión, y cortante) bajo una condición máxima de diseño.

4.12.3 Vibración axial

El periodo de sustentación y la frecuencia de cabeceo y de giro pueden determinarse por el análisis o por la teoría de oscilación armónica simple. Generalmente los periodos naturales estan en el rango de 2 a 5 segundos. Mientras que estos periodos sean similares a los de olas predominantes, la amplificación de la resonancia puede conducir a oscilaciones significantes de tensión en el periodo natural de sustentación o volteo.

4.12.4 Vibración transversal

Los modos de vibración transversal de los tensores pueden tener periodos naturales en el rango de periodos de olas primarias. Análisis tipo riser tales como los mencionados anteriormente y los del API RP 2Q deben incluir un número suficiente de nodos e

intervalos de tiempo para incluir modos con frecuencias naturales en el rango de olas primarias.

4.13 Métodos de análisis estructural (API RP 2T 9.5)

El diseño de las componentes del sistema de tensores para una TLP requiere un conocimiento detallado de los esfuerzos en cada componente. Para los demás componentes la distribución de los esfuerzos debe obtenerse de un análisis apropiado de elemento finito.

4.13.1 Análisis de fatiga (API RP 2T 9.5.3)

En el diseño de las componentes de los tensores, debe darse consideración al daño por fatiga que es el resultado de una gran serie de ciclos de esfuerzos. La vida de fatiga de un tensor está definido como la vida total hasta la falla del tensor.

4.14 Análisis y diseño de la cimentación de una TLP (API RP 2T 10.2)

El término de sistema de cimentación se refiere al sistema de sujeción utilizada para anclar los tensores al lecho marino. Un sistema de cimentación puede consistir en estructuras tales como plantillas de piernas o una pieza de cimentación aislada soportada o anclada por pilas, gravedad, colchón de lodo o la combinación de estos.

4.14.1 Requerimientos de una cimentación e investigación del lugar (API RP 2T 10.2)

- La principal función de un sistema de cimentación es la de anclar los tensores
- La transferencia de cargas a la tierra puede cumplirse por varios caminos:
 - a. a través de tendones directamente sujetos a los pilotes
 - b. a través de plantillas las cuales distribuyan las fuerzas de los tensores a la tierra por medio de pilotes

c. o a través de una base gravitatoria

- El uso de estructuras requiere considerar varios factores incluyendo: configuración de plantilla, fuerza estructural, posibilidad de instalación, tolerancias requeridas de posicionamiento y alineamiento, etc.
- El diseño del sistema de cimentación debe asegurar que los límites de esfuerzos permisibles, desplazamientos, y fatiga no se excedan durante y después de la instalación.

4.14.2 Cargas (API RP 2T 10.3)

La definición básica de tipos de cargas y condiciones de cargas se aplican al diseño de la cimentación.

Todos los tipos de cargas deben ser cuantificados e incluidos para cada caso de diseño para ser consideradas como estáticas o dinámica aplicadas a la cimentación. Una carga estática es una fuerza aplicada externamente de magnitud constante. Algunas cargas que varían relativamente en un tiempo prolongado pueden considerarse también constantes. Por ejemplo las fuerzas de equipo móvil de perforación o fuerzas debido a mareas astronómicas y de viento, así como corrientes son consideradas constantes. Las cargas dinámicas son debido a fuerzas aplicadas externamente o desplazamientos los cuales con el transcurso del tiempo pueden cambiar y producir fuerzas externas y/o de inercia. Las fuerzas dinámicas pueden clasificarse como:

- Cíclicas: estas fuerzas tienen variabilidad y son repetitivas, son inducidas por olas, viento o sismos
- Impacto: Estas fuerzas son no cíclicas, son inducidas por dejar caer objetos, colisión de botes, etc.
- Temporales: Estas son inducidas por un evento de corta duración como son lanzamiento, levantamiento, movimiento, o conducción de equipo

5. Modelado y análisis de la estructura flotante

5.1 Diagrama de cuerpo libre

El presente análisis se hace para un modelo de una plataforma similar a la Snorre, situada en el bloque 34/7 del Mar del Norte, en Noruega. A diferencia que se va modelar con características ambientales del mar del Golfo de México.

Las características de la plataforma son:

• Diámetro de la columna	25.0 m
• Altura de columna	63.0 m
• Altura del pontón	11.5 m
• Ancho del pontón	11.5 m
• Calado de la plataforma	37.5 m
• Distancia entre ejes de columna (longitudinal)	76.0 m
• Distancia entre ejes de columna (transversal)	76.0 m
• Altura de columnas	63.0 m
• Altura de cubierta	15.0 m
• Dimensión de cubierta	124.5 x 92.0 x 15 m
• Carga muerta	25000 t
• Desplazamiento	106500 t
• Tensión inicial	25000 t
• Tirante	310 m
• Número de tendones	16
• Diámetro del tendón	812.8 mm
• Espesor de la pared del tendón	38.1 mm

El modelo a estudiar, se va a analizar en el plano, con libertad de desplazamiento en el eje "x". Con el objetivo de obtener respuesta en los tendones y respuesta de desplazamiento debido a la flotación y a las condiciones ambientales. Las fuerzas ambientales ejercen fuerzas, que a su vez producen desplazamiento en la plataforma y por causa de este desplazamiento se producen las reacciones en los tendones.

Para modelar se consideran de la plataforma Snorre, las siguientes características:

- Desplazamiento
- Carga muerta
- Diámetro de la columna
- Altura de columna
- Calado
- Número de tendones
- Tensión inicial

Las acciones de las condiciones ambientales, a considerar, son causados por:

- Oleaje (Anexo I y II)
- Viento (Anexo II)
- Corriente (Anexo II)

La siguiente figura ilustra el modelo idealizado.

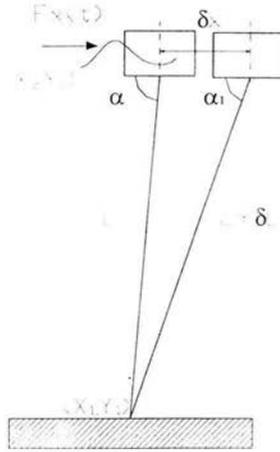


Fig. 5.1 Modelo de análisis

5.2 Método de análisis

El modelo de la plataforma se inicia con la obtención de una rigidez derivada de la suposición de que cada tendón es perfectamente elástico con una tensión inicial conocida, rigidez elástica y despreciando su peso propio.

Cada tendón tiene una tensión constante T , una rigidez elástica λ y está alineado entre las coordenadas (x_1, y_1, z_1) en el fondo marino y con las coordenadas (x_2, y_2, z_2) en la parte baja de la plataforma, ambos referencias al eje principal del sistema de la plataforma.

Los cosenos directores son:

$$\cos \alpha = \frac{x_2 - x_1}{L} \quad \text{y} \quad \cos \beta = \frac{y_2 - y_1}{L} \quad \text{ecs.5.1}$$

donde L es la longitud del tendón que se obtiene con la ecuación:

$$L = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad \text{ec.5.2}$$

Vamos a considerar que la plataforma excursiona en dirección positiva del eje "x" una distancia δx . Entonces la nueva longitud L está dada por

$$L + \delta L = \frac{a}{L} \delta x \quad \text{ec.5.3}$$

Por tanto la tensión adicional δT en el tendón debido a la extensión δx , está dado por

$$\delta T = \lambda \delta L = \frac{\lambda(x_2 - x_1)}{L} \delta x \quad \text{ec.5.4}$$

La componente de la fuerza de restauración resultante a lo largo del eje x puede escribirse como

$$\delta T_x = (T + \delta T) \cos \alpha^1 - T \cos \alpha \quad \text{ec.5.5}$$

donde T es la tensión del tendón y α^1 está dado por:

$$\cos \alpha^1 = \frac{x_2 + \delta x - x_1}{L + \delta L} \quad \text{ec.5.6}$$

$$\therefore \delta T_x = T \cos \alpha \left(\frac{\delta x}{x_2 - x_1} - \frac{\delta L}{L} + \frac{\delta T}{T} \right) \quad \text{ec.5.7}$$

Cabe señalar que $\delta L = \delta x \cos \alpha$

$$\delta T_x = \frac{T}{L} \cos \alpha \left(\frac{L \delta x}{x_2 - x_1} - \delta x \cos \alpha + \frac{\lambda(x_2 - x_1)}{T} \delta x \right) = \left(\lambda \cos^2 \alpha + \frac{T}{L} \sin^2 \alpha \right) \delta x \quad \text{ec.5.8}$$

y cuando $\delta x \rightarrow 0$

$$\frac{\delta T_x}{\delta x} = k = \lambda \cos^2 \alpha + \frac{T}{L} \sin^2 \alpha \quad \text{ec.5.9}$$

Recordando que se tiene un grado de libertad, la ecuación para la rigidez es:

$$kx = f_x \quad \text{ec.5.10}$$

donde k es el término de la matriz de la matriz de rigidez; cabe mencionar que en esta rigidez se tiene la rigidez lineal del material y la no linealidad geométrica en rigidez, x es el desplazamiento y f_x es la fuerza resultante de entre las fuerzas ambientales y la fuerza de restauración del tendón.

Ahora, ya conociendo la rigidez k , y determinando las fuerzas externas f_x , se trabaja con la ecuación de rigidez lineal, de donde se despeja el desplazamiento x . Posteriormente se revisa la rigidez, ya que la rigidez $k'(x)$, está en función del desplazamiento; esto se hace mediante el método iterativo de Newton-Raphson.

Para las fuerzas en los tendones se hizo una gran simplificación que es el considerar un calado constante, entonces la fuerza de flotación en los pontones de la plataforma se distribuye en el grupo de tendones de manera uniforme.

5.3 Resultados

Archivo de datos, unidades en tonelada, metro y segundos.

Tirante, periodo de la ola, altura máxima (para $T=1000$), marea, desplazamiento, peso de estructura

741.0, 14.06, 21.4, 0.0, 0.6096, 106500.0, 25000.0

Diámetro de las columnas, altura de columnas, calado, número de tendones, tensión inicial

25.0, 63.0, 37.5, 16, 25000.0

Area expuesta al viento, velocidad de referencia del viento

747.0 ,747.0 ,50.10

Coordenadas de las columnas

-38.0,38.0

-38.0,-38.0

38.0,-38

38.0,38.0

Velocidad de la marea a cada 10% del tirante

0.0 1.2

0.1 1.08

0.2 0.96

0.3 0.84

0.4 0.72

0.5 0.6

0.6 0.48

0.7 0.36

0.8 0.24

0.9 0.12

1.0 0.0

CONDICIONES MAXIMAS DE MAREA

Superficie libre del agua según posición de ola

fase de t tiempo	columna 1	columna 2	columna 3	columna 4	
0	.0000	7.6550	7.6550	7.6549	7.6549
1	.8788	4.2113	4.2113	9.9332	9.9332
2	1.7575	.1265	.1265	10.6993	10.6993
3	2.6363	-3.9776	-3.9776	9.8364	9.8364
4	3.5150	-7.4761	-7.4761	7.4761	7.4761
5	4.3938	-9.8364	-9.8364	3.9776	3.9776
6	5.2725	-10.6993	-10.6993	-.1265	-.1265
7	6.1512	-9.9332	-9.9332	-4.2113	-4.2113
8	7.0300	-7.6550	-7.6550	-7.6549	-7.6549
9	7.9087	-4.2113	-4.2113	-9.9332	-9.9332
10	8.7875	-.1265	-.1265	-10.6993	-10.6993
11	9.6662	3.9776	3.9776	-9.8364	-9.8364
12	10.5450	7.4761	7.4761	-7.4761	-7.4761
13	11.4237	9.8364	9.8364	-3.9776	-3.9776
14	12.3025	10.6993	10.6993	.1265	.1265
15	13.1812	9.9332	9.9332	4.2113	4.2113
16	14.0600	7.6550	7.6550	7.6549	7.6549

Tabla 5.1 Desplazamiento de ola

En esta tabla podemos observar el desplazamiento de la ola a través de las columnas de la plataforma (Ver Anexo IV)

Fuerzas ambientales (oleaje, corriente y viento) según posición de ola

fase de t	columna 1	columna 2	columna 3	columna 4	total	fuehor/tendon
0	-4946.4210	-4946.4210	5713.7110	5713.7110	1534.5800	95.9113
1	-6018.3030	-6018.3030	3650.5260	3650.5260	-4735.5540	-295.9721
2	-5682.5460	-5682.5460	585.5869	585.5869	-10193.920	-637.1199
3	-4489.1280	-4489.1280	-2640.7550	-2640.7550	-14259.7700	-891.2355
4	-3003.2250	-3003.2250	-5046.3510	-5046.3510	-16099.1500	-1006.1970
5	-1499.4150	-1499.4150	-6028.2750	-6028.2750	-15055.3800	-940.9612
6	-41.6540	-41.6540	-5622.0390	-5622.0390	-11327.3800	-707.9615
7	1447.0860	1447.0860	-4401.7480	-4401.7480	-5909.3240	-369.3327
8	3043.0190	3043.0190	-2911.5800	-2911.5800	262.8774	16.4298
9	4660.0370	4660.0370	-1413.0930	-1413.0930	6493.8880	405.8680
10	5945.4330	5945.4330	41.3410	41.3410	11973.5500	748.3467
11	6445.2230	6445.2230	1533.4230	1533.4230	15957.2900	997.3307
12	5795.8680	5795.8680	3134.3330	3134.3330	17860.4000	1116.2750
13	3805.8880	3805.8880	4744.1460	4744.1460	17100.0700	1068.7540
14	778.6929	778.6929	5994.1560	5994.1560	13545.7000	846.6061
15	-2468.3550	-2468.3550	6438.8000	6438.8000	7940.8900	496.3056
16	-4946.4180	-4946.4180	5713.7130	5713.7130	1534.5890	95.9118

Tabla 5.2 Fuerzas ambientales en columnas y tendones

(Ver Anexo IV)

Fuerzas de flotación por columnas según posición de la ola

fase de t	columna 1	columna 2	columna 3	columna 4	total	fue/tendon
0	23026.2400	23026.2400	23026.2400	23026.2400	92104.9500	5756.5594
1	21293.5700	21293.5700	24172.5400	24172.5400	90932.2100	5683.2631
2	19238.3200	19238.3200	24557.9600	24557.9600	87592.5600	5474.5350
3	17173.3800	17173.3800	24123.8300	24123.8300	82594.4300	5162.1519
4	15413.1300	15413.1300	22936.2400	22936.2400	76698.7200	4793.6700
5	14225.5300	14225.5300	21175.9800	21175.9800	70803.0200	4425.1888
6	13791.4000	13791.4000	19111.0400	19111.0400	65804.8800	4112.8050
7	14176.8200	14176.8200	17055.7900	17055.7900	62465.2300	3904.0769
8	15323.1300	15323.1300	15323.1300	15323.1300	61292.5000	3830.7813
9	17055.7900	17055.7900	14176.8200	14176.8200	62465.2300	3904.0769
10	19111.0400	19111.0400	13791.4000	13791.4000	65804.8800	4112.8050
11	21175.9800	21175.9800	14225.5300	14225.5300	70803.0200	4425.1888
12	22936.2300	22936.2300	15413.1200	15413.1200	76698.7200	4793.6700
13	24123.8300	24123.8300	17173.3800	17173.3800	82594.4200	5162.1512
14	24557.9600	24557.9600	19238.3200	19238.3200	87592.5600	5474.5350
15	24172.5400	24172.5400	21293.5700	21293.5700	90932.2200	5683.2634
16	23026.2400	23026.2400	23026.2300	23026.2300	92104.9500	5756.5594

Tabla 5.3 Fuerzas de flotación en columnas y tendones

Máximo desplazamiento horizontal 39.6000 m

Máxima tensión por tendón 5756.5594

Mínima tensión por tendón 3830.7813

Area resultante 4.576347E-01 m

(Ver Anexo IV)

6. Análisis simplificado de confiabilidad estructural

6.1 Bases de Confiabilidad

Un criterio para optimizar el diseño de una estructura se basa en estimar el costo total mínimo (incluyendo el costo inicial, costo de mantenimiento, etc. y el valor esperado del costo de falla). Para estructuras costa fuera, el objetivo fundamental del análisis de confiabilidad y riesgo es balancear la seguridad y la economía a través de la utilización de recursos económicos, propiamente divididos entre la demanda de capacidad estructural, inspección de material, calidad de construcción, mantenimiento y equipo de seguridad.

La seguridad de una estructura es la probabilidad de que no falla. La confiabilidad es la probabilidad de seguridad (o supervivencia); es la probabilidad que la capacidad de resistencia exceda las cargas impuestas en la estructura durante su vida útil. Inversamente, el riesgo está ligado a la probabilidad de falla, como la probabilidad de que las cargas impuestas excedan la capacidad de resistencia. La confiabilidad y la probabilidad de falla pueden evaluarse para los componentes de un sistema estructural, así como para el sistema global, y puede ser definidas para varios estados límite (colapso, servicio, flexión, etc.). La confiabilidad y la probabilidad de falla se pueden relacionar con la siguiente expresión:

$$\text{Confiabilidad} = 1 - \text{probabilidad de falla}$$

El término análisis de riesgo también se usa para referirse al análisis de valuación económica y a la decisión que se hace con respecto a la inversión de capital para las operaciones de exploración y producción.

La confiabilidad y la probabilidad de falla se expresan en términos de probabilidad. La probabilidad se aplica a eventos que han sucedido, que están ocurriendo o que pueden ocurrir todavía. Por otro lado la estadística, la cual en algunos casos se suele confundir con la probabilidad, se aplica únicamente a eventos que ya ocurrieron. El objetivo del análisis de riesgo estructural costa fuera es utilizar toda la información estadística disponible, además de toma de decisiones, para llegar a las descripciones probabilísticas de fuerzas y cargas que predecirán el desempeño estructural real en el lapso de vida útil de la plataforma.

Las variables involucradas en el diseño de plataformas costa fuera están sujetas a la incertidumbre. Las incertidumbres en la predicción de cargas de las plataformas surgen de la variación en la altura de las olas extremas, en los movimientos sísmicos, en los coeficientes de arrastre, en la cinemática de ola y las corrientes, la interpretación de teorías de cálculo de fuerzas, etc.

Los beneficios primarios se atribuyen a la aplicación de análisis de confiabilidad y riesgo a las estructuras costa fuera:

- Evaluación de conceptos alternativos de diseño de plataformas. Este se puede dar únicamente en base a la igualdad de confiabilidad entre unas alternativas de diseño. Factores de seguridad iguales son inexactos dado que los diferentes conceptos de diseño tienen diferentes tipos de modos de falla y grados de incertidumbre.
- Logros de optimización o balance de distribución de material a los elementos tales como cimentación, sección de cubiertas, abrazaderas y otras partes de la estructura.
- Optimización del criterio de cargas de diseño de la plataforma, utilización de análisis, de criterios de evaluación y manejo de equipo.

6.1.1 Conceptos y antecedentes

Si el resultado de un experimento para medir el factor de diseño particular es absolutamente conocido, entonces el factor de diseño se dice que es determinístico, el cual puede caracterizarse como un solo número real. Sin embargo en la práctica los parámetros del esfuerzo de fluencia del acero y la altura de ola extrema, por ejemplo, nunca tienen exactamente el mismo valor, bajo condiciones aparentemente idénticas. En este caso se dice que la variable es aleatoria.

6.1.2 Variable aleatoria

Una variable aleatoria, que se denota con una letra mayúscula, es un conjunto de números reales asignados al resultado de un experimento. La variable puede ser discreta (N = número de tormentas) o continua (X = último esfuerzo del acero A36). La función de masa de probabilidad en el caso discreto y la función de densidad de probabilidad en el caso continuo, completamente definen la probabilidad asociada con la variable aleatoria. La función de masa de probabilidad se define como:

$$P_N(n) = P(N = n), \quad n = n_1, n_2, n_3, \dots \quad \text{ec.6.1}$$

Donde N es la variable aleatoria, $P()$ es la “probabilidad de” y n es el valor específico de la variable aleatoria N .

En el caso continuo, la función de densidad de probabilidad $f_X(x)$ está definida como:

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f_X(x) dx \quad \text{ec.6.2}$$

Por otro lado, la función de distribución acumulativa $F_X(x)$ también conduce a una descripción completa de la probabilidad de X . Su relación con la función densidad esta dado por:

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_X(x) dx \quad \text{ec.6.3}$$

Una función de densidad de probabilidad típica y su relación con la función distribución acumulada se ilustra a continuación.

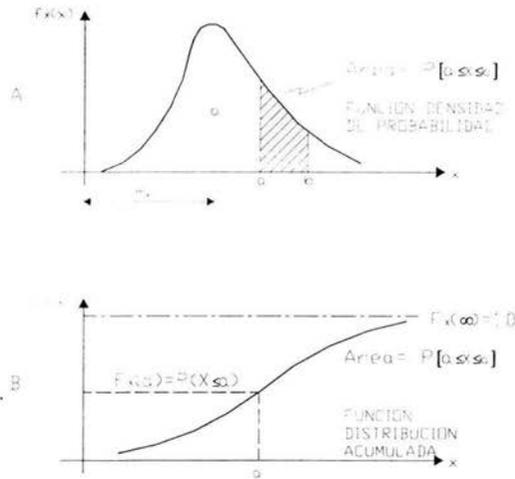


Fig. 6.1 A) Funciones distribución de densidad de probabilidad y B) distribución acumulada

Vale la pena analizar la notación utilizada. La f minúscula denota la función de densidad y la mayúscula F representa la función de distribución acumulada. La X mayúscula denota la variable aleatoria y la x minúscula representa el valor específico de la variable aleatoria X . La media, el promedio o el valor esperado de X , esta definido como:

$$m_X \equiv E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x) dx \quad \text{ec.6.4}$$

Esta es una medida de la tendencia central de X . Geométricamente m_X es el centroide del área bajo la curva $f_X(x)$.

Por otro lado tenemos la varianza definida como:

$$\sigma_X^2 \equiv E[(X - m_X)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_X)^2 f_X(x) dx \quad \text{ec.6.5}$$

Siendo esta una medida de la variabilidad de X .

La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza y tiene las mismas unidades que X y m_X . Una medida adimensional de la variabilidad (dispersión) es el coeficiente de variación, definido como:

$$V_X = \frac{\sigma_X}{m_X} \quad \text{ec.6.6}$$

Para el caso discreto el símbolo de las integrales en las ecuaciones 6.4 y 6.5 cambian por símbolos de sumatoria.

La distribución lognormal ha sido muy popular en el análisis de confiabilidad de estructuras costa fuera, porque representa adecuadamente propiedades de materiales y datos de cargas ambientales. Si la variable aleatoria X es lognormalmente distribuida, sencillamente el significado es que el logaritmo de X es normalmente distribuido. Esto es particularmente relevante para fenómenos físicos, como alturas de ola, esfuerzos de acero, etc., que no pueden tener valores negativos.

6.1.3 Distribución de Gumbel

Se puede decir que la distribución asintótica de los extremos en muchos casos tienden a converger para tamaños grandes de muestra “n” a funciones bien identificadas. Por ejemplo, la función distribución acumulada es la siguiente:

$$F_{X_n}(x) = \exp[-e^{-\alpha(x-U_n)}] \quad \text{ec.6.7}$$

donde U_n y α_n son, respectivamente, los parámetros de localización y de escala definidos como:

U_n : Valor característico de la variable inicial X

α_n : Medida inversa de la dispersión de X_n

La correspondiente función de densidad de probabilidad es:

$$f_{X_n}(x) = \alpha_n e^{-\alpha_n(x-U_n)} \exp[-e^{-\alpha_n(x-U_n)}] \quad \text{ec.6.8}$$

Cola exponencial

Para la distribución con una cola que decae exponencialmente, en la dirección de los extremos, la distribución de sus valores extremos converge a este tipo de curvas de distribución. Gumbel (1958) definió una distribución inicial con una cola exponencial ilimitada en la dirección del extremo y para valores positivos de la variable inicial X .

Extremos característicos

El valor característico de U_n , es una medida de localización central conveniente de los posibles valores. En una muestra de tamaño n de la variable inicial X , el número esperado de los valores de la muestra que son mayores que x es:

$$n[1 - F_X(x)] \quad \text{ec.6.9}$$

El valor característico de U_n está definido como valor particular de X , tal que en una muestra de tamaño n de la muestra inicial X , el número esperado de valores mayores que U_n es:

$$n[1 - F_X(U_n)] = 1.0 \quad \text{ec.6.10}$$

Otra forma de expresarlo, para poder entender que U_n es el valor de X con una excedencia de probabilidad de $\frac{1}{n}$, es:

$$F_X(U_n) = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{ec.6.11}$$

6.1.4 Distribución lognormal.

Función densidad de probabilidad

$$f_Y(y) = \frac{1}{y \cdot 2\pi\sigma_{\ln Y}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{1}{\sigma_{\ln Y}} \ln\left(\frac{y}{\bar{m}_Y}\right)\right]^2\right\} \quad \text{ec.6.12}$$

$$\text{Mediana de } Y: \bar{m}_Y = Y_{50} \text{ (50\% de su valor)} \quad \text{ec.6.13}$$

$$\text{Desviación estándar de } \ln Y: \sigma_{\ln Y} = 0.39[\ln Y_{90} - \ln Y_{10}] \quad \text{ec.6.14}$$

donde Y_{90} y Y_{10} son el 90% y 10% respectivamente

$$\text{Media de } Y: m_Y = \bar{m}_Y \exp\left(\frac{1}{2}\sigma_{\ln Y}^2\right) \quad \text{ec.6.15}$$

$$\text{Desviación estándar de } Y: \sigma_Y = \bar{m}_Y \sqrt{\exp(\sigma_{\ln Y}^2) - 1} \quad \text{ec.6.16}$$

$$\text{Coeficiente de variación de } Y: V_Y = \sqrt{\exp(\sigma_{\ln Y}^2) - 1} \quad \text{ec.6.17}$$

$$\sigma_{\ln Y} \text{ en términos de } V_Y: \sigma_{\ln Y} = \sqrt{\ln(1 + V_Y^2)} \quad \text{ec.6.18}$$

$$\text{Regla de producto: si } Z = XY^{\xi} \quad \text{ec.6.19}$$

$$\text{Entonces } \bar{m}_Z = \bar{m}_X (\bar{m}_Y)^{\xi} \quad \text{ec.6.20}$$

$$\text{Y } \sigma_{\ln Z}^2 = \sigma_{\ln X}^2 + (\xi \sigma_{\ln Y})^2 \quad \text{ec.6.21}$$

Utilizando la variable normal estandarizada U

$$F_Y(y) = F_U(u) \quad \text{ec.6.22}$$

$$\text{donde } u = \frac{\left[\ln\left(\frac{y}{\bar{m}_Y}\right)\right]}{\sigma_{\ln Y}} \quad \text{ec.6.23}$$

Análisis de confiabilidad (Sarpkaya 1976)

Si la carga en una estructura también se considera como aleatoria, la probabilidad de falla de la estructura puede calcularse. Las variables aleatorias de carga y resistencia

comprenden los elementos de análisis de rehabilitación. Esto se puede entender utilizando la conexión en la función de densidad y probabilidad de las cargas y resistencias.

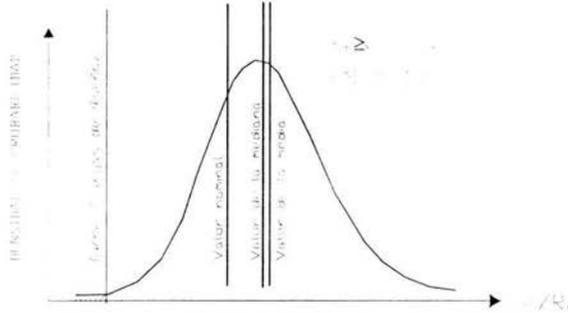


Fig. 6.2 Probabilidad de evento

Debido a la independencia estadística supuesta entre las variables de carga y resistencia, la función de densidad de probabilidad conjunta puede escribirse como el producto de las funciones de densidad individuales.

$$f_{R,L}(r,l) = f_R(r)f_l(l) \quad \text{ec.6.24}$$

La probabilidad de falla se obtiene evaluando la probabilidad del evento en el que la carga excede la resistencia. Esto se da por la integración de todos los valores de r y l donde la carga es mayor que la resistencia, como se muestra en la región sombreada de la figura 6.3.

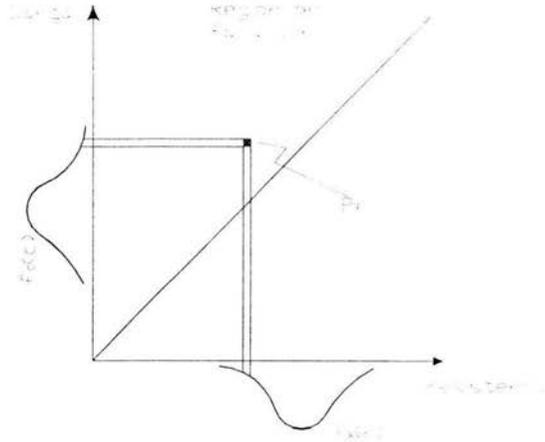


Fig. 6.3 Región de falla

$$= \iint_{l>r} f_{R,L}(r,l) dr dl \quad \text{ec.6.25}$$

Substituyendo la ecuación 6.24, los resultados se pueden escribir de diferentes formas dependiendo el orden de integración sobre la región de falla:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(r) [1 - F_L(r)] dr \quad \text{ec.6.26}$$

ó

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_L(l) F_R(l) dl \quad \text{ec.6.27}$$

Dado que las distribuciones de carga y resistencia se consideran estadísticamente independientes, el cálculo de la probabilidad de falla se puede ilustrar como se muestra en la gráfica 6.3

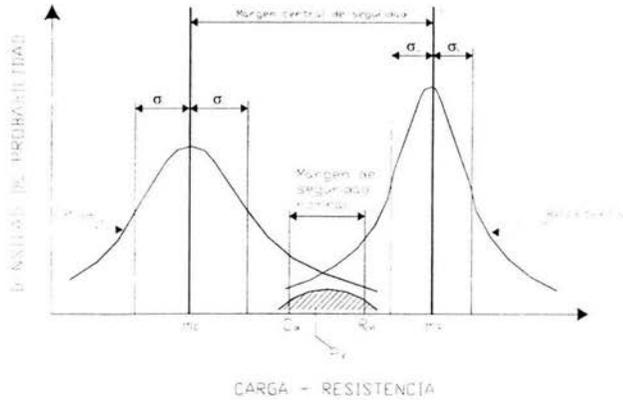


Fig. 6.3 Intersección de las distribuciones carga-resistencia

Específicamente para el caso de las variables distribuidas normalmente.

La probabilidad de falla P_f se muestra como la región achurada bajo las colas de ambas distribuciones. La función que delimita la región achurada es la integral de las ecuaciones 6.26 ó 6.27. La región achurada mayor es la probabilidad de falla. Las dispersiones de la carga y la resistencia están indicadas por σ_L y σ_R . Aproximadamente dos terceras partes del valor de área dentro de los límites de $\pm\sigma$ se muestra en las regiones punteadas. Cabe resaltar que la carga de diseño L_d y el valor de la resistencia nominal R_n , se encuentran en el lado seguro de los valores medios de m_L y m_R , respectivamente. También puede verse que se incrementa el margen de seguridad por el cambio de distribución, además de que se reduce el área achurada bajo las colas de la distribución y en consecuencia se reduce la probabilidad de falla.

6.2 Aplicación a plataformas TLP

Se utilizó información de la base de datos Ocean Weather del punto GPT 415, con los cuales se realizó una regresión lineal para obtener la correlación entre la altura de ola máxima y la altura significativa de ola, involucrando el periodo de retorno.

Se realizó un análisis estadístico de bondad de ajuste (Anexo III) entre la distribución Lognormal y la distribución de Gumbel. Se calculó de la siguiente manera: se generaron intervalos para las alturas máximas de correspondientes a los periodos de retorno dados, obteniéndose sus frecuencias. Posteriormente se obtuvo su función de densidad de probabilidad y su función acumulada. Se procedió a estimar la χ^2 (parámetro estadístico para medir errores de ajuste) para ambas distribuciones, que es la medida de bondad; la medida que sea menor nos indica que la función ensayada tiene menor error y mejor ajuste. En este caso el menor error correspondió a la χ^2 de Gumbel. El siguiente paso es obtener los parámetros de Gumbel, para aplicar la distribución. Posteriormente a la distribución de Gumbel se le introducen números aleatorios que son con los que generan alturas de olas, las cuales a su vez se introdujeron al programa de diseño "Tendones" (Anexo IV) para obtener las fuerzas en los tendones y el desplazamiento de la plataforma. El objetivo de producir estos últimos parámetros es que se requiere obtener la media y desviación estándar, de las fuerzas actuantes y aplicando la metodología para construir una función de densidad, se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 6.4.

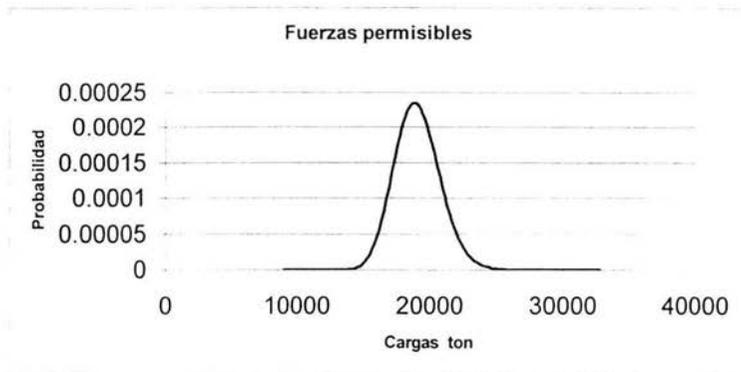


Fig. 6.4 Función densidad de las fuerzas permisibles

Se prosiguió con la obtención de las fuerzas permisibles, las cuales se generaron a partir de datos conocidos como el esfuerzo de fluencia medio y su coeficiente de variación, y también se graficó su función de densidad obteniendo la curva de la figura 6.5

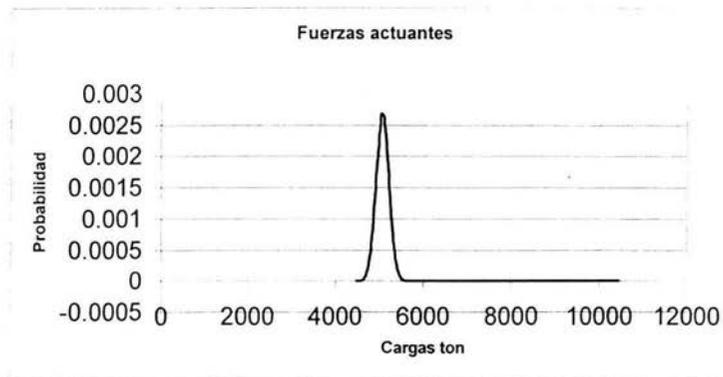


Fig. 6.5 Función de densidad de las fuerzas actuantes

El último paso fue traslapar estas dos gráficas y se puede observar que es inapreciable el área encerrada entre ambas gráficas, lo que es obvio ya que la fuerza permisible media es mucho mayor que las fuerzas actuantes.

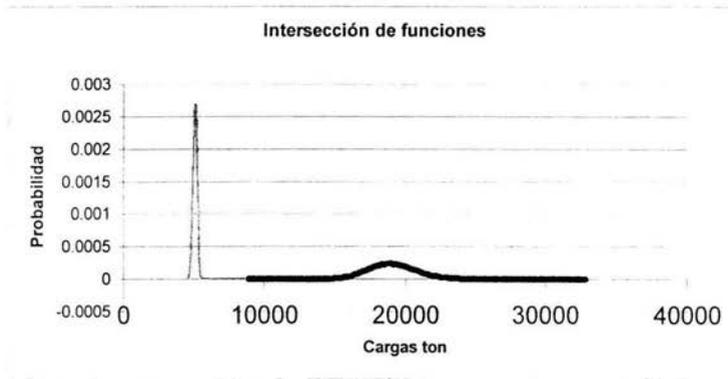


Fig. 6.6 Probabilidad de falla

Para el caso de la probabilidad de falla por desplazamiento se procedió de manera análoga. La diferencia es que en lugar de utilizar las fuerzas en los tendones, se utilizaron los desplazamientos calculados. Se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 6.7.

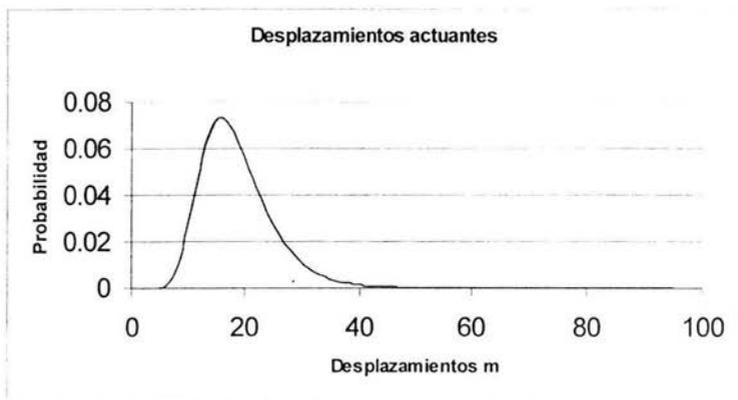


Fig. 6.7 Función de densidad de desplazamientos actuantes

La distribución de los desplazamientos permisibles también se obtuvo con datos conocidos: desplazamiento permisible medio y su coeficiente de variación. Se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 6.8.

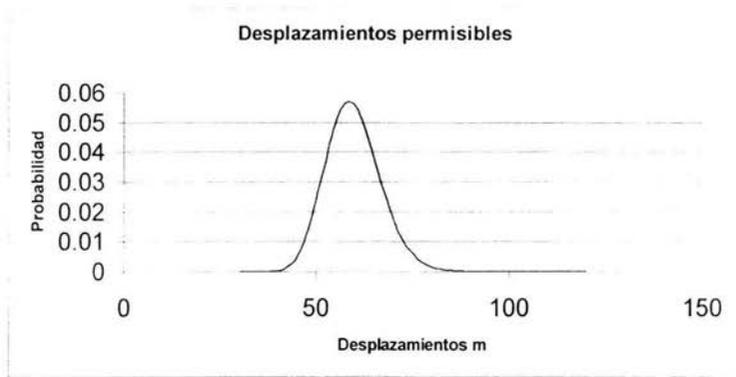


Fig. 6.8 Función de densidad de desplazamientos permisible

De igual forma se procedió a traslapar ambas gráficas. El resultado se observa en la figura 6.9.

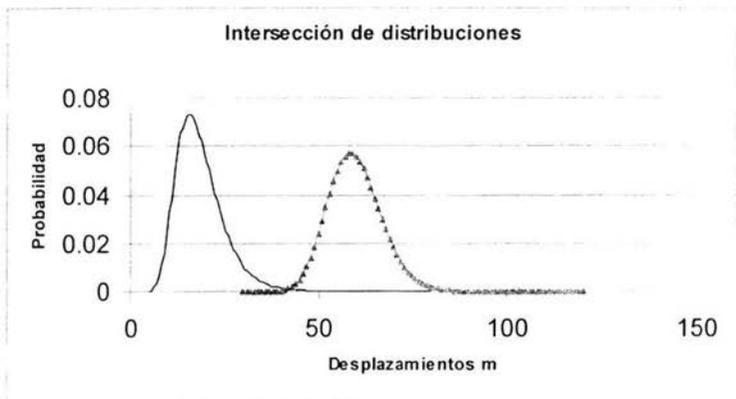


Fig. 6.9 Probabilidad de falla

En el detalle mostrado en la figura 6.10 se puede observar claramente el área que se encuentra entre ambas curvas que corresponde a la probabilidad de falla

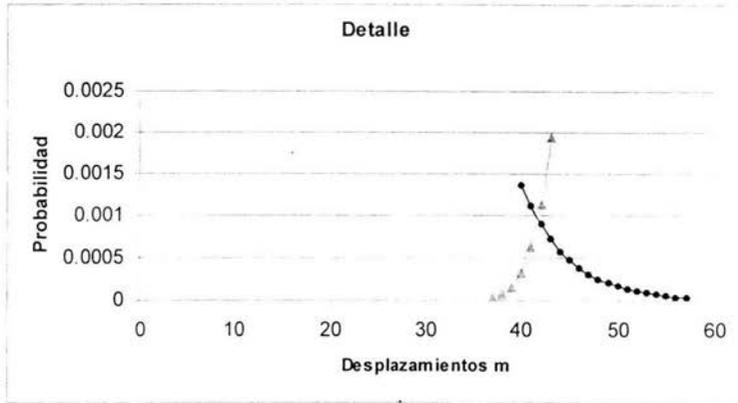


Fig. 6.10 Detalle del área

6.3 Índice de confiabilidad

Cálculo de β

El cual se obtiene con la expresión

$$\beta = \frac{\mu_p - \mu_a}{\sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_a^2}}$$

ec.6.28

donde

μ_p es la media de los datos permisibles

μ_a es la media de los datos actuantes

σ_p es la desviación estándar de los datos permisibles

σ_a es la desviación estándar de los datos actuantes

- Para las fuerzas en los tendones

$$\beta = \frac{19000 - 5052.6}{\sqrt{1710^2 + 145.69^2}} = 8.1$$

$$\beta = 8.1$$

- Para los desplazamientos

$$\beta = \frac{59.28 - 18.11}{\sqrt{7.11^2 + 6.27^2}} = 4.3$$

$$\beta = 4.3$$

(Ver Anexo III y IV)

Conclusiones y recomendaciones

Es importante estudiar el comportamiento de estructuras costa fuera, sobre todo por las metas que se ha planteado PEMEX para la explotación de hidrocarburos en aguas profundas en el Golfo de México.

En este trabajo se realizó un análisis estático simplificado de una plataforma TLP, la cual es tema de estudio en el IMP, para la explotación de hidrocarburos en el Golfo de México. Las propuestas realizadas en el presente trabajo para el análisis de excursión o desplazamiento y de fuerzas en los tendones tienen simplificaciones, pero los resultados que se obtienen son aproximaciones razonables para fines de este tipo de análisis.

El análisis de sistemas flotantes en el dominio del tiempo tiene muchos factores que lo hacen no lineal. Por ejemplo, el orden del potencial de velocidades si se utiliza un análisis Quinta de Stokes para el análisis de oleaje, los términos no lineales de arrastre de la ecuación de Morison, el gradiente de velocidades del viento, etc. Puede decirse de este análisis que es estático no lineal simplificado porque la respuesta de los tendones depende de la deformación axial, lo que significa que los tendones tienen rigidez no lineal.

Esta rigidez no lineal es causada por cambios geométricos que sufren los tendones debido a los desplazamientos. Por lo tanto se desarrolló un modelo matemático apoyado en la expresión de Patel y Lynch, 1983, que tiene la ventaja de que involucra tanto la rigidez lineal, como la rigidez no lineal. En el diseño se obtuvo un diámetro de tendones menor que en el modelo original, a pesar de que el modelo original está en un tirante menor (310 m) que el utilizado en el análisis de la estructura empleada en la presente tesis (741 m). Esto se puede justificar con el hecho de que se tienen

condiciones ambientales más desfavorables (en el Mar del Norte), que con los registros (en el Golfo de México) usados para este trabajo. Por tanto el desplazamiento es, también menor, muy por debajo de lo permitido. Obteniéndose en los análisis, el resultado de que primero la plataforma fallaría por desplazamiento antes que por esfuerzos en los tendones.

Por otra parte se realizó el análisis de confiabilidad que es una herramienta para optimizar el diseño de una estructura, después de realizar el diseño determinístico, se procede a utilizar este tipo de análisis probabilístico que es el equilibrio entre la seguridad y la economía. Este análisis se realiza debido a la gran importancia de la estructura costa fuera, debido a lo que significa para la economía del país, y a la necesidad de utilizar este tipo de estructuras. Se llegó a la conclusión que el mejor modelo de alturas máximas de ola, ajustado a nuestro análisis es el de Gumbel, esto por el análisis estadístico de bondad de ajuste, y se obtuvo menor error que otros modelos. Realizado el diseño y el análisis de confiabilidad, se llega a la conclusión, de que es factible hacer uso de este tipo de estructuras en las aguas profundas correspondientes al Golfo de México. Lo más importante es generar un diseño que produzca un sistema confiable y que no genere fallas costosas o peligrosas al operar en condiciones de seguridad adecuadas y razonables.

Las **aportaciones** de este trabajo son:

- Dar un panorama de lo que es este tipo de estudios de ingeniería costa fuera
- La necesidad e importancia que tienen estos estudios
- Describir los tipos de instalaciones utilizadas en aguas profundas
- Dar a conocer la aplicación de las fuerzas ambientales y la forma en que intervienen en estos estudios
- Mostrar un ejemplo del análisis estructural y de confiabilidad de estas estructuras
- Ilustrar la aplicación del análisis simplificado de confiabilidad a estructuras costa fuera
- Resaltar qué es más importante y necesario desde el punto de vista de confiabilidad estructural

Recomendaciones

- Profundizar y analizar los efectos dinámicos para las estructuras utilizadas en aguas profundas
- Evaluar la importancia de los efectos de interacción entre las fuerzas ambientales y la estructura
- Detallar el análisis de confiabilidad para considerar otros posibles modos de falla

REFERENCIAS

1. Carneiro, F. L. L., Batista, R. C., Ebecken, N. F. F., Ferrante, F. L. L. Septiembre 1995. **International Offshore Engineering**. Wiley Jonh.
2. Chakrabarti, S. K. 1987. **Hydrodynamics of Offshore Structures**. Computational Mechanics Publications.
3. Denise, J-P-F. y Heaf, N. J. 1979. **A comparasion between linear and non-linear response of a proposed Tension Leg Production Platform**. Offshore Technology Conference.
4. Hudspeth, Robert T. Noviembre 1992. **Civil Engineering in the Ocean**. American Society of Civil Engineering.
5. McCracken, Daniel. 2da. edición 1977. **Programación Fortran**. Limusa.
6. Patel, M. H., Jefferys, E. R. 1981. **Dynamics of the Tensioned Buoyant Platform**. International Symposium on Hydrodynamics in Ocean Engineering. Noriegan Institute of Technology.
7. Patel, M. H., Lynch, E. J. 1983. **Couple Dynamics of the Tensioned Buoyant Platforms and Mooring Tethers**. Eng. Struct., Vol. 5. Octubre 1983.
8. Rowson, K. J., Tupper, E. C. 3era edición 1983. **Basic Ship Theory, Vol. 1**. Longman Group.
9. Rowson, K. J., Tupper, E. C. 3era edición 1983. **Basic Ship Theory, Vol. 2**. Longman Group.
10. Readdy, D. V. 1991. **Offshore Structures**. Krieger Publishing Company.
11. Sarpkaya, T. 1976. **In-line and transverse forces on cilindres in oscillating flow at high Reynold's numbers**. Proceedings of the Eight Offshore Technology Conference, Huston Texas.
12. Sarpkaya, T., Isaacson, M. 1981. **Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures**. Van Nostrand Reinhold Company.

13. Stahl, Bernhard. 1986. **Reability engineering and risk analysis, Chapter 5 from “Planing and Design of Fixed offshore platform”**. McClelland, B & Reifeld, M. D. Van Nostrand Reinhold Company.
14. Watson, D. G. M. 1998. **Practical Ship Design**. R. Bhattachagga & M. E. McCormick.
15. -Oceanweather Inc. (1996a). Final Report, Update of Meteorological and Oceanographic Hindcast Data and Normals and Extremes Bay of Campeche Report to Brown and Root International inc., Cos cob, CT.
-Oceanweather Inc. (1996b). Final Report, Hurricane Roxanne/1996 Hindcast Study Report to Brown and Root International inc., Cos cob, CT.
-Oceanweather Inc. (1996c). Interim Report Preliminary Estimate of Impact of Hurricane Roxanne on Bay of Campeche Metocean Extremes Report to Brown and Root International inc., Cos cob, CT.
16. http://mailweb.udlap.mx/~tesis/mgd/cuesta_c_aa/capitulo1.pdf
17. http://www.atlantia.com/images1/pdf/seastar_tlp.pdf
18. <http://www.conoco.com/investor/reports/quarterly/tlp.asp>
19. <http://www.dnv.com/ocean/bk/s141.htm>
20. http://www.exxonmobil.com/news/publications/c_spring00_lamp/c_page1.html
21. <http://www.gomr.mms.gov/homepg/offshore/deepwatr/options.html>
22. http://www.imp.mx/publicaciones/prospectiva/prosp_c02.pdf
23. http://www.jraymcdermott.com/projects/grid_depth.asp#
24. http://www.jraymcdermott.com/spartec/spartec_history.htm
25. <http://www.ldeo.columbia.edu/4d4/talks/pei/>
26. <http://www.mms.gov/tarprojectcategories/structur.htm>
27. <http://www.nd.edu/~nathaz/research/Luigi.html>
28. <http://www.oilstates-uk.com/MACSFDA3.htm>

ANEXOS

Anexo I. Perfil y cinemática de la ola

Perfil

Altura de ola	H	21.4	Metros
Periodo	T	14.06	Segundos
Frecuencia	W	0.44	rad/seg
Longitud	L	308.65	Metros
Número	K	0.02	
	π	3.14159265	

Tabla I.1 Datos de la ola para el perfil

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \theta \quad \text{donde} \quad \theta = kx - \omega t$$

Se puede ver que esta es en función de "x" y "t".

Inicialmente se deja fija la posición y se deja en función del tiempo

x	Tiempo		
	0	25	50
0	10.70	9.39	5.78
1	9.68	10.68	9.07
2	6.82	9.94	10.62
3	2.66	7.30	10.16
4	-2.01	3.27	7.76
5	-6.30	-1.38	3.88
6	-9.38	-5.77	-0.74
7	-10.68	-9.06	-5.22
8	-9.94	-10.62	-8.70
9	-7.31	-10.16	-10.52
10	-3.29	-7.77	-10.34
11	1.36	-3.89	-8.19
12	5.75	0.72	-4.48
13	9.05	5.20	0.08
14	10.62	8.69	4.63
15	10.17	10.52	8.30
16	7.78	10.35	10.39
17	3.91	8.21	10.49
18	-0.71	4.50	8.60
19	-5.19	-0.06	5.07
20	-8.68	-4.62	0.58
21	-10.52	-8.29	-4.03

22	-10.35	-10.38	-7.87
23	-8.22	-10.50	-10.21
24	-4.51	-8.61	-10.60
25	0.05	-5.09	-8.98
26	4.60	-0.59	-5.64
27	8.28	4.01	-1.23
28	10.38	7.86	3.41
29	10.50	10.20	7.41
30	8.62	10.60	9.99
31	5.10	8.99	10.67
32	0.61	5.66	9.32
33	-4.00	1.25	6.19
34	-7.84	-3.39	1.89
35	-10.20	-7.39	-2.78
36	-10.61	-9.98	-6.92
37	-9.00	-10.67	-9.73
38	-5.67	-9.33	-10.70
39	-1.27	-6.21	-9.63
40	3.38	-1.90	-6.72
41	7.38	2.76	-2.53
42	9.98	6.90	2.14
43	10.67	9.73	6.40
44	9.34	10.70	9.44
45	6.22	9.63	10.69
46	1.92	6.73	9.89
47	-2.75	2.55	7.22
48	-6.89	-2.12	3.17
49	-9.72	-6.39	-1.49
50	-10.70	-9.44	-5.86
51	-9.64	-10.69	-9.12
52	-6.74	-9.90	-10.63
53	-2.56	-7.23	-10.13
54	0.00	-3.18	-7.69

Tabla I.2.1 Perfil de la ola

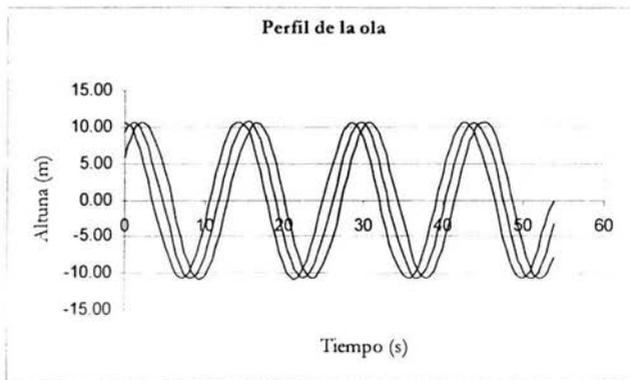


Fig. I.1 Perfil de ola en función del tiempo

Ahora se fija el tiempo y se deja en función de la posición

Posición (x)	T		
	0	1	2
-300	10.27	10.57	8.85
-250	3.04	7.12	9.84
-200	-6.99	-2.88	1.79
-175	-10.02	-7.47	-3.49
-150	-10.59	-10.23	-7.91
-125	-8.57	-10.48	-10.40
-100	-4.45	-8.17	-10.34
-75	0.76	-3.86	-7.74
-50	5.78	1.40	-3.26
-25	9.39	6.31	2.03
0	10.70	9.68	6.82
25	9.39	10.68	9.94
50	5.78	9.07	10.62
75	0.76	5.23	8.71
100	-4.45	0.12	4.66
125	-8.57	-5.03	-0.53
150	-10.59	-8.94	-5.59
175	-10.02	-10.66	-9.28
200	-6.99	-9.78	-10.70
250	3.04	-1.62	-5.97
300	10.27	8.02	4.24

Tabla I.2.2 Perfil de la ola

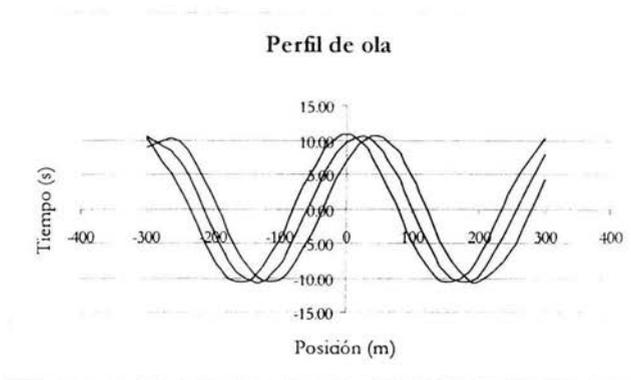


Fig. I.2 Perfil de ola en función de la posición

Velocidad horizontal

Altura de ola	H	21.4	metros
Periodo	T	14.06	segundos
Frecuencia	W	0.44	rad/seg
Tirante	D	741	metros
LongCinemat	Z	+ -10.7	metros
S	D+z	751.7	metros
Longitud	L	308.65	metros
Número	K	0.02	
Teta	θ	=Kx-Wt	
	π	3.14159265	

Tabla 1.3 Datos de ola para la velocidad

$$u = \frac{\pi H \cosh ks}{T \operatorname{senhkh}} \cos \theta$$

Se varia, únicamente en función del tiempo

X	0	25	50
0	5.92	5.20	3.20
1	5.36	5.91	5.02
2	3.77	5.50	5.88
3	1.47	4.04	5.62
4	-1.11	1.81	4.29
5	-3.49	-0.76	2.15
6	-5.19	-3.19	-0.41
7	-5.91	-5.01	-2.89
8	-5.50	-5.88	-4.81
9	-4.05	-5.62	-5.83
10	-1.82	-4.30	-5.73
11	0.75	-2.15	-4.54
12	3.18	0.40	-2.48
13	5.01	2.88	0.05
14	5.88	4.81	2.56
15	5.63	5.82	4.59
16	4.31	5.73	5.75
17	2.16	4.54	5.81
18	-0.39	2.49	4.76
19	-2.87	-0.04	2.81
20	-4.80	-2.55	0.32
21	-5.82	-4.59	-2.23
22	-5.73	-5.75	-4.35
23	-4.55	-5.81	-5.65
24	-2.50	-4.77	-5.87
25	0.03	-2.82	-4.97

26	2.55	-0.33	-3.12
27	4.58	2.22	-0.68
28	5.74	4.35	1.89
29	5.81	5.65	4.10
30	4.77	5.87	5.53
31	2.82	4.97	5.91
32	0.34	3.13	5.16
33	-2.21	0.69	3.43
34	-4.34	-1.88	1.04
35	-5.64	-4.09	-1.54
36	-5.87	-5.53	-3.83
37	-4.98	-5.91	-5.39
38	-3.14	-5.16	-5.92
39	-0.70	-3.44	-5.33
40	1.87	-1.05	-3.72
41	4.09	1.53	-1.40
42	5.52	3.82	1.18
43	5.91	5.38	3.54
44	5.17	5.92	5.23
45	3.44	5.33	5.92
46	1.06	3.73	5.48
47	-1.52	1.41	4.00
48	-3.81	-1.17	1.75
49	-5.38	-3.54	-0.82
50	-5.92	-5.22	-3.24
51	-5.34	-5.91	-5.05
52	-3.73	-5.48	-5.89
53	-1.42	-4.00	-5.61
54	0.00	-1.76	-4.26

Tabla I.4 Velocidad de la ola

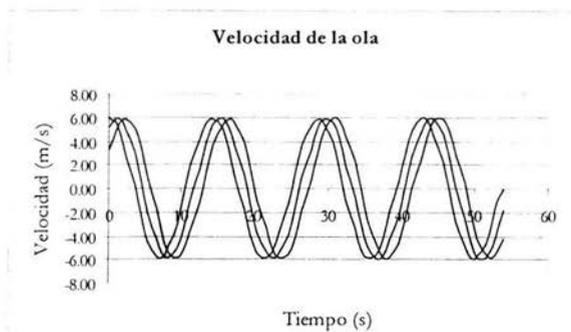


Fig. 1.3 Velocidad de la ola en función del tiempo

Aceleración horizontal

Altura de ola	H	21.4	metros
Periodo	T	14.06	segundos
Frecuencia	W	0.44	rad/seg
Tirante	D	741	metros
LongCinemat	Z	+ -10.7	metros
S	d+z	751.7	metros
Longitud	L	308.65	metros
Número	K	0.02	
Teta	θ	=Kx-Wt	
	π	3.14159265	

Tabla I.5 Datos de ola para la aceleración

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh ks}{\sinh kd} \operatorname{sen} \theta$$

		Tiempo (t)		
X	0	25	50	
	0	0.00	1.27	2.23
	1	-1.13	0.16	1.41
	2	-2.04	-0.98	0.32
	3	-2.56	-1.94	-0.83
	4	-2.60	-2.52	-1.82
	5	-2.14	-2.62	-2.47
	6	-1.27	-2.23	-2.64
	7	-0.16	-1.41	-2.31
	8	0.98	-0.32	-1.54
	9	1.93	0.83	-0.48
	10	2.52	1.82	0.68
	11	2.63	2.47	1.70
	12	2.23	2.64	2.40
	13	1.41	2.31	2.65
	14	0.33	1.54	2.39
	15	-0.82	0.48	1.67
	16	-1.82	-0.67	0.64
	17	-2.46	-1.70	-0.52
	18	-2.64	-2.40	-1.57
	19	-2.32	-2.65	-2.33
	20	-1.55	-2.39	-2.64
	21	-0.49	-1.67	-2.45
	22	0.67	-0.64	-1.79
	23	1.70	0.51	-0.79
	24	2.40	1.57	0.36
	25	2.65	2.33	1.44
	26	2.39	2.64	2.25

27	1.68	2.45	2.63
28	0.65	1.80	2.51
29	-0.51	0.80	1.91
30	-1.57	-0.35	0.95
31	-2.33	-1.44	-0.19
32	-2.64	-2.25	-1.30
33	-2.46	-2.63	-2.16
34	-1.80	-2.51	-2.61
35	-0.80	-1.91	-2.56
36	0.35	-0.95	-2.02
37	1.43	0.19	-1.10
38	2.24	1.30	0.03
39	2.63	2.16	1.16
40	2.51	2.60	2.06
41	1.92	2.56	2.57
42	0.96	2.02	2.59
43	-0.19	1.10	2.12
44	-1.29	-0.03	1.24
45	-2.15	-1.15	0.13
46	-2.60	-2.06	-1.01
47	-2.56	-2.57	-1.95
48	-2.02	-2.59	-2.53
49	-1.11	-2.12	-2.62
50	0.02	-1.25	-2.21
51	1.15	-0.14	-1.39
52	2.05	1.00	-0.29
53	2.57	1.95	0.85
54	2.60	2.53	1.84

Tabla I.6 Aceleración de la ola

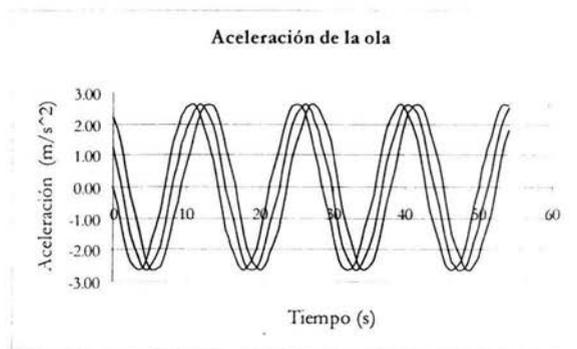


Fig. I.4 Aceleración de la ola en función del tiempo

Anexo II. Fuerzas ambientales

Fuerza debido al oleaje

Coef. Inercia	Cd	1.05	
Coef. Arrastre	Cm	1.2	
Densidad mar	ρ	105.81	kg/m3
Area acción	A	2436.5	m2
Diámetro	D	25	M

Tabla II.1 Datos para el cálculo de la fuerza de oleaje

$$\text{Ecuación de Morison } f = C_M A_l \frac{\partial u}{\partial t} + C_D A_D |u|u$$

Tiempo s	Fuerza Kg	Fuerza t	
0	48714.78	48.71	
1	-308889.28	-308.89	
2	-611316.92	-611.32	
3	-790198.93	-790.20	
4	-805926.75	-805.93	
5	-678881.27	-678.88	
6	-431157.59	-431.16	
7	-98931.37	-98.93	
8	260438.27	260.44	
9	575032.87	575.03	
10	774585.63	774.59	
11	812946.91	812.95	
12	704495.78	704.50	
13	471980.88	471.98	
14	148590.46	148.59	
15	-211108.41	-211.11	
16	-536457.40	-536.46	
17	-755717.88	-755.72	
18	-817244.19	-817.24	
19	-727647.67	-727.65	
20	-510987.58	-510.99	
21	-197509.99	-197.51	
22	161108.59	161.11	
23	495770.88	495.77	
24	733688.83	733.69	
25	818808.84	818.81	MAX
26	748279.08	748.28	
27	548061.37	548.06	
28	245514.76	245.51	
29	-110646.90	-110.65	

Tabla II.2 Fuerza de oleaje

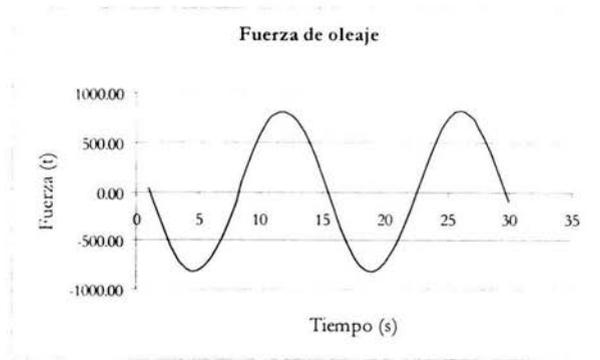


Fig. II.1 Aceleración de la ola en f(t)

Fuerza debido al viento

Velocidad de viento de referencia	U_R	50.1	m/s	164.37	ft/s
Altura de referencia	Z_R	20	M	66	Ft
Parámetro	α	6 - 8.5			
Factor de forma	C_D	1.2		1.2	
Área expuesta	A_P	8040.64	Ft	747	M
Velocidad a la altura h	$U(z)$	159.55	ft/s	48.63	m/s
Densidad del aire	ρ	0.068	lbs/ft ³	0.11031	kg*s ² /m ⁴

Tabla II.3 Datos para el cálculo de la fuerza del viento

$$U(z) = \left(\frac{Z}{Z_R} \right)^\alpha U_R$$

$U(z)$	Z
0	0
98.5609719	1
106.935098	2
112.159713	3
116.020722	4
119.106851	5
121.689241	6

123.916254	7
125.878297	8
127.634712	9
129.226635	10
135.540366	15
140.206236	20
143.935695	25
147.056406	30
149.747659	35
152.118706	40
154.241261	45
156.165034	50
157.925961	55
159.550894	60
161.060448	65
162.470806	70
165.043307	80
167.346202	90
169.433427	100
173.106962	120
176.274962	140
179.066032	160
181.56459	180
183.829154	200
185.902023	220
187.814807	240
189.591773	260
191.251972	280
192.810645	300
194.280183	320
195.670803	340
196.991029	360

Tabla II.4 Perfil del viento

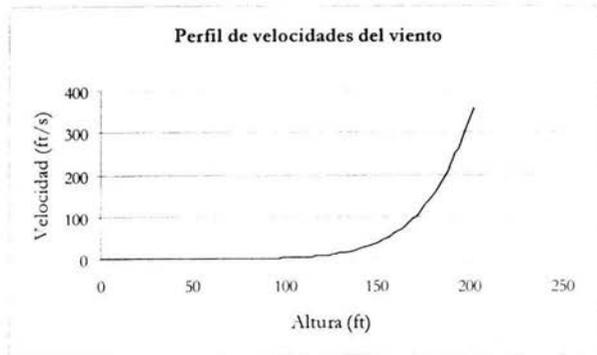


Fig. II.2 Perfil de velocidades a la altura "z"

$$F_D(z) = C_D \frac{\rho_a A_p}{2} U^2(z)$$

Tomando el valor de $U(z) = 159.55$

Obtenemos

	FZAMAX
+175556.87Ft	58460.87 Kg
	58.46 Ton

Velocidad debido a la corriente

Velocidad media

de la corriente V_m 1.2m/s

Velocidad del viento V_w 49.18m/s

Profundidad d 741m

Constante α 1

Profundidad del punto

de interés z

Tabla II.5 Datos para el cálculo de la fuerza de corriente

$$V_c(z) = V_m \left(1 + \frac{z\alpha}{d} \right) + V_w \left(\frac{z}{d} \right)$$

Ecuación de variación de velocidad de la corriente

z	$V(z)$
0	1.200
5	1.539
10	1.877
15	2.216
20	2.554
25	2.893
30	3.232
40	3.909
50	4.586
60	5.263
70	5.940

75	6.279
150	11.358
225	16.437
300	21.516
375	26.595
450	31.674
525	36.753
600	41.832
675	46.911
741	51.380

Tabla II.6 Perfil de la corriente

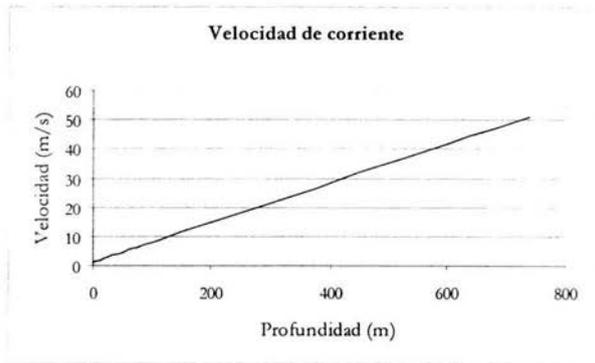


Fig. II.3 Velocidad de la corriente en función de la profundidad

Aplicando la ecuación par un elemento inmerso

$$F_{DC} = \frac{1}{2} C_D \rho A V_c(z)^2$$

Fuerza

Kg	Toneladas
93.845	0.094
154.276	0.154
229.651	0.230
319.968	0.320
425.229	0.425
545.433	0.545
680.580	0.681
995.705	0.996
1370.602	1.371
1805.272	1.805
2299.716	2.300

2569.352	2.569
8407.089	8.407
17607.055	17.607
30169.251	30.169
46093.676	46.094
65380.331	65.380
88029.216	88.029
114040.330	114.040
143413.674	143.414
172043.453	172.043

Tabla II.7 Fuerzas debido a la corriente

Anexo III. Descripción del proceso para la obtención de la distribución de altura máxima de ola

Se realizó inicialmente una regresión lineal para relacionar el periodo de retorno con las alturas de ola significativa y máxima.

1.- Con información de la base de datos de OceanWeather para el punto GPT415 se genera la tabla siguiente:

GPT 415

Retorno (años)	Hsig (m)	Hmax (m)	Hsig*Hmax	Hsig*Hsig	Hmax pred.
5	3.16	5.97	18.8652	9.9856	5.97701981
10	4.76	8.68	41.3168	22.6576	8.67031121
25	6.41	11.45	73.3945	41.0881	11.447768
50	7.56	13.38	101.1528	57.1536	13.3835712
66	8.01	14.14	113.2614	64.1601	14.1410594
100	8.68	15.27	132.5436	75.3424	15.2688751
200	9.78	17.12	167.4336	95.6484	17.120513
500	11.23	19.56	219.6588	126.1129	19.5613083
700	11.76	20.45	240.492	138.2976	20.4534611
1000	12.32	21.4	263.648	151.7824	21.3961131
	8.367	14.742	1371.7667	782.2287	
	Promedio	Promedio	Sumatoria	Sumatoria	
m=	1.68330712				
b=	0.6577693				

Tabla III.1 Alturas significante y máxima de ola para periodos de retorno dados.

Con estas alturas se realiza un análisis de regresión lineal para poder extrapolar las alturas máximas de ola a partir de las alturas significantes para cualquier periodo de retorno. Los valores de m y b representan la pendiente y ordenada en el origen, respectivamente, del ajuste lineal.

$$H_{\max} = b + m * H_{\text{sign}}$$

De la base de datos antes mencionada se extrae información de 44 huracanes ocurridos en un periodo de 66 años. La información es la fecha y altura significativa de ola y, con la relación lineal previamente obtenida, se generan las alturas máximas de ola para todos los registros.

Lo anterior se muestra en la tabla :

44 huracanes

	Fecha aammdd	HSmx	Hmax	Hsorden	Hmax
	550929	7.78	12.97	7.78	13.7538987
	951015	7.23	14.06	7.23	12.8280798
Años	310915	6.54	11.05	6.54	11.6665979
66	440921	6.16	10.29	6.16	11.0269412
	880915	5.95	11.02	5.95	10.6734467
	730821	4.97	9.27	4.97	9.02380569
	800923	4.59	8.55	4.59	8.38414898
	790917	4.08	7.7	4.08	7.52566235
	661008	3.63	6.62	3.63	6.76817415
	740904	3.62	7.22	3.62	6.75134107
	501010	3.6	6.61	3.6	6.71767493
	550918	3.22	5.98	3.22	6.07801823
	930919	3.03	5.68	3.03	5.75818987
	951002	3.01	5.92	3.01	5.72452373
	960822	3	5.64	3	5.70769066
	491001	2.91	5.43	2.91	5.55619302
	670919	2.47	4.88	2.47	4.81553789
	510821	2.45	4.78	2.45	4.78187174
	900807	2.4	4.65	2.4	4.69770639
	880903	2.29	4.48	2.29	4.5125426
	330924	2.17	4.22	2.17	4.31054575
	550905	2.16	4.19	2.16	4.29371268
	340612	2.12	4.16	2.12	4.22638039
	360830	2.12	4.08	2.12	4.22638039
	800809	2.1	3.99	2.1	4.19271425
	610910	2.1	3.9	2.1	4.19271425
	710915	2.04	4.18	2.04	4.09171582
	470814	2.03	4.01	2.03	4.07488275
	450824	2	3.67	2	4.02438354
	891013	1.94	3.82	1.94	3.92338511
	380827	1.77	3.36	1.77	3.6372229
	330707	1.74	3.36	1.74	3.58672369
	490926	1.65	3.24	1.65	3.43522605

330915	1.63	3.12	1.63	3.40155991
420829	1.6	3.05	1.6	3.35106069
540625	1.59	2.98	1.59	3.33422762
671002	1.4	2.64	1.4	3.01439927
570626	1.37	2.74	1.37	2.96390005
330801	1.3	2.7	1.3	2.84606856
770902	1.26	2.39	1.26	2.77873627
380815	1.17	2.11	1.17	2.62723863
700911	1.09	2.1	1.09	2.49257406
750923	1.08	1.96	1.08	2.47574099
590617	1.01	1.99	1.01	2.35790949

Media	7.8020791	Retorno	SIG	Hmaxdatos
DesvEstand	2.79186209	5	5.97	5.97
#Datos	19	10	8.68	8.68
Alfa	0.3776612	25	11.45	11.45
Moda (h)	6.42147661	50	13.39	13.39
		66	14.15	14.15
C1	1.054378	100	15.27	15.27
C2	0.5214	200	17.13	17.13
		500	19.57	19.57
		700	20.46	20.46
		1000	21.41	21.41

Tabla III.2 Alturas significante y máxima de ola para 44 huracanes

En esta tabla se calculan también los parámetros u y a para que las alturas máximas calculadas concuerden con las registradas en la tabla III.1 para los periodos dados de retorno. Esta comprobación aparece en la parte final de la tabla.

De la literatura de modelos probabilistas en Ingeniería, se suele considerar la distribución lognormal como la que representa mejor la variabilidad estadística de parámetros físicos con valores positivos, como la altura máxima de ola. Sin embargo, de acuerdo a la estadística de extremos, la distribución de Gumbel (tema 6.1.3 de la tesis) podría representar mejor series de valores extremos (como los máximos de ola).

A continuación, se realiza el análisis estadístico de bondad de ajuste con el cual recompara el grado de bondad de ajuste de la Distribución de Gumbel con respecto a la lognormal.

Retorno	Hmax			Frecuencia	$i/(n+1)$	fdp	
5	5.97	6-8.5	7.25	1	0.09090909	0.04545455	-1.128508398
10	8.68	8.51-11	9.755	1	0.18181818	0.04545455	-1.128508398
25	11.45	11.01-13.5	12.255	2	0.36363636	0.09090909	-0.874591383
50	13.38	13.51-16	14.755	2	0.54545455	0.09090909	-0.874591383
66	14.14	16.01-18.5	17.255	1	0.63636364	0.04545455	-1.128508398
100	15.27	18.51-21	19.755	2	0.81818182	0.09090909	-0.874591383
200	17.12	21.01-23.5	21.01	1	0.90909091	0.04545455	-1.128508398
500	19.56			10			
700	20.45						
1000	21.4						

LnHmax	Hmax		Frecuencia	$F=i/(n+1)$	fdp	
2.621322325	13.7538987	4.001-5	3	0.15	0.15	4.5
2.551636501	12.8280798	5.001-6	4	0.3	0.15	5.5
2.456729876	11.6665979	6.001-7	4	0.5	0.2	6.5
2.400341475	11.0269412	7.001-8	1	0.7	0.2	7.5
2.367759037	10.6734467	8.001-9	1	0.75	0.05	8.5
2.199866162	9.02380569	9.001-10	1	0.8	0.05	9.5
2.126342897	8.38414898	10.001-11	1	0.85	0.05	10.5
2.018318827	7.52566235	11.001-12	2	0.9	0.05	11.5
1.912231353	6.76817415	12.001-13	1	1	0.1	12.5
1.909741163	6.75134107	13.001-14	1	1.05	0.05	13.5
1.904742102	6.71767493		19		1.05	
1.804678693	6.07801823					
1.750623167	5.75818987					
1.744759355	5.72452373					
1.741814504	5.70769066					
1.714913165	5.55619302					
1.57184775	4.81553789					
1.564832048	4.78187174		1.99524078	Promedio		

1.547074387 4.69770639

0.34692723 Desv. Estan.

		F ln	fdp ln	fdp Gumbel	F Gumbel	χ^2 LN	χ^2 GUMBEL
0.675	0.94107281	0.07842392	0.07842392	0.09884526	0.126677716	0.06532618	0.0042938
0.825	1.84250058	0.201203411	0.12277949	0.12976989	0.242624403	0.04851193	0.01356813
1.3	4.05857113	0.360993193	0.15978978	0.13887331	0.378787407	0.05352703	0.03878823
1.5	6.06047482	0.522598187	0.16160499	0.12918526	0.514050595	0.06022103	0.06726416
0.425	2.11559463	0.661825962	0.13922778	0.10916822	0.633731512	0.01174729	0.02133137
0.475	2.81607055	0.769759245	0.10793328	0.08637503	0.73149856	0.00118804	0.00641484
0.525	3.61654647	0.847681286	0.07792204	0.06532538	0.80709267	6.3425E-06	0.00228108
0.575	4.51702239	0.901259324	0.05357804	0.0479007	0.863374993	1.7596E-06	0.00155366
1.25	11.0349966	0.936880665	0.03562134	0.03438692	0.904205436	0.00425246	0.0101488
0.675	6.61797424	0.960021954	0.02314129	0.02432948	0.933303164	0.00843319	0.01459135
1.99524078	0.34692723					0.25321526	0.18023541
							Menor
		$\mu_{\ln H_{\max}} =$	1.99524078				
		$\sigma_{\ln H_{\max}} =$	0.34692723				
		Evento	u	A			
		Huracán	6.42147661	0.3776612			

Tabla III.3 Prueba de bondad de ajuste para distribuciones lognormal y de Gumbel.

Anexo IV. Cálculo de fuerzas en tendones y desplazamiento (disquete)

En el disquete, se anexan los cálculos efectuados para el análisis de riesgo.

Inicialmente se obtienen números aleatorios y se aplican a estos la distribución de Gumbel, la cual ya se demostró que se ajusta mejor, y se generan las alturas de ola que se introducen en el programa “Tendones” (IMP, departamento de Ingeniería Civil) y se obtienen las fuerzas en los tendones y el desplazamiento de la estructura, que son los puntos de estudio.

Para ambos casos se hace el mismo procedimiento para la construcción de las curvas de distribución.

Con los datos obtenidos se calcula la media, desviación estándar y el coeficiente de variación, que es el cociente de la desviación estándar entre la media. A partir de la media se dan valores hacia los extremos superior e inferior. A estos últimos se aplica la distribución lognormal, utilizando en su ecuación la media, desviación estándar y el coeficiente de variación, para obtener su probabilidad de ocurrencia, y estas forman la curva de distribución de esfuerzos y desplazamientos actuantes, respectivamente.

Para los esfuerzos permisibles se prosigue de la siguiente manera, se obtiene la media del esfuerzo máximo con el área de tendón y el esfuerzo de fluencia del material, el coeficiente de variación se tomó de una tabla (SSPC, 1994) y multiplicándolo por la media se obtuvo la desviación estándar y se aplicó nuevamente la distribución lognormal.

Para los desplazamientos permisibles, la media y el coeficiente de variación se tomó la información de estudios realizados por la “Universidad ...” multiplicándolos se obtuvo la desviación estándar y de igual forma se calcula la distribución lognormal.

Se interseca la curva permisible con su respectiva curva actuante y el área de entre estas proporcionan la probabilidad de falla.