



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de Fatiga de los Tendones de una
Plataforma de Piernas Atirantadas (TLP)

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

Mario Alberto Isiordia Valdez

DIRECTOR DE TESIS: DR. FEDERICO BARRANCO CICILIA



MEXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2008



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/108/05

Señor
MARIO ALBERTO ISIODIA VALDEZ
Presente

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

"ANÁLISIS DE FATIGA DE LOS TENDONES DE UNA PLATAFORMA DE PIERNAS ATIRANTADAS (TLP).

- INTRODUCCIÓN
- I. PLATAFORMAS DE PIERNAS ATIRANTADAS (TLP)
 - II. CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO
 - III. ANÁLISIS DE FATIGA DE LOS TENDONES
 - IV. APLICACIÓN PARA UNA TLP EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO
 - V. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA

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 HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 28 de junio de 2007
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA

GGZ/RSU*crc.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I PLATAFORMAS DE PIERNAS ATIRANTADAS (TLP)	6
1.1 Concepto estructural	6
1.2 Componentes principales	8
1.3 Ventajas y desventajas	12
1.4 Aplicaciones en aguas profundas de México	15
CAPÍTULO II CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO	18
2.1 Acciones ambientales	19
2.2 Análisis estructural hidrodinámico	38
2.3 Diseño de los tendones	43
2.3.1 Estado límite último	43
2.3.2 Estado límite de servicio	46
2.3.3 Estado límite accidental	47
2.3.4 Estado límite de fatiga	48
2.4 Vida a la fatiga de los tendones	50
CAPÍTULO III ANÁLISIS DE FATIGA DE LOS TENDONES	51
3.1 Metodología basada en curvas S-N y la regla de Miner	55
3.2 Descripción probabilística de los estados del mar	57
3.3 Método Rainflow para conteo de los ciclos de esfuerzos	63





CAPÍTULO IV	APLICACIÓN PARA UNA TLP EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO	68
4.1	Descripción del modelo estructural	70
4.2	Estados de mar para el análisis	73
4.3	Análisis estructural	76
4.4	Análisis por fatiga de los tendones	77
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES	88
	BIBLIOGRAFÍA	92





INTRODUCCIÓN

La perforación de pozos para la exploración y/o explotación de hidrocarburos en el mar continúa con pasos sorprendentes, alcanzando tirantes de agua superiores a los 2,000 m. Los tipos de infraestructura existentes en el ámbito internacional para dar soporte a las actividades de producción fuera de la costa incluyen a las plataformas fijas, las torres flexibles y a los sistemas flotantes. Dentro de estos últimos se encuentran los barcos de producción, almacenamiento y descarga (FPSO's, del inglés Floating, Production, Storage and Offloading), las plataformas semisumergibles, las plataformas de piernas atirantadas (TLP's, del inglés Tension Leg Platform) y las SPAR's. Estos sistemas son mostrados en la Figura 1.

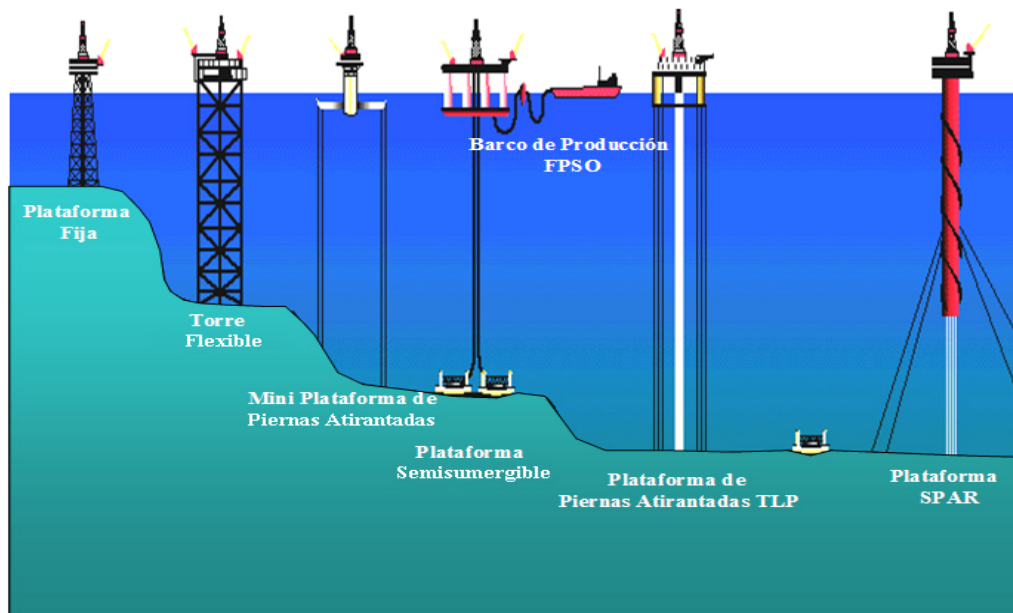


Figura 1. Sistemas estructurales para la explotación de hidrocarburos en el mar.



A la fecha, la mayoría de los campos petroleros costa afuera se han desarrollado con plataformas fijas del tipo “jacket”, sin embargo, a medida que se incrementa la profundidad también lo hace su costo. La alternativa en estos casos son las estructuras flotantes, cuyo costo tiene poca variación con la profundidad y dado que son reutilizables pueden amortizarse empleándose en varios campos.

En años recientes, la industria petrolera ha puesto mucho interés en la aplicación de este tipo de sistemas, debido a que en determinados casos sus ventajas representan una alternativa técnica y económica factible. En su papel de sistemas autónomos, la mayoría de las veces las unidades flotantes se han utilizado en yacimientos pequeños o en sitios alejados donde no existe infraestructura de apoyo para la producción y transporte de los hidrocarburos. Sus desventajas más notorias respecto a las plataformas fijas son su limitada capacidad de carga y la susceptibilidad al paro de operaciones por condiciones ambientales extremas. Cuando se usan como instalaciones de producción, estos sistemas están formados típicamente por cinco partes: una estructura flotante para soportar el equipo de producción y servicios, un sistema de anclaje para el posicionamiento de la plataforma sobre los pozos, un sistema de conductores para enviar a la superficie el producto del pozo localizado en el lecho marino, una plantilla submarina y una estación de control de flujo de los hidrocarburos. Éstos tienen la ventaja de que la producción puede comenzar casi inmediatamente después de la perforación de los pozos.

Actualmente, México ocupa el tercer lugar mundial en la producción de crudo con un promedio de 3.2 millones de barriles por día (PEMEX, 2006). De esta producción, el 80% proviene de las diferentes regiones marinas (PEMEX, 2006). Para llevar a cabo sus actividades de explotación de hidrocarburos en el mar,



PEMEX posee alrededor de 250 plataformas fijas tipo jacket, localizadas en tirantes de agua de hasta 100 m.

Actualmente, PEMEX cuenta solamente con un barco de almacenamiento y descarga (FSO), de nombre TaKuntah (Figura 2), en operación en el campo Cantarell en un tirante de agua de 75 m (MODEC web, 2007), y un FPSO para el campo Ku-Maloob-Zap en un tirante de 85 m. Asimismo, PEMEX es propietario de 1 plataforma semisumergible que utiliza para actividades de apoyo para el mantenimiento de las plataformas fijas y para alojamiento de personal.



Figura 2. FSO Takuntah de PEMEX en operación en el campo Cantarell.

Todos los sistemas flotantes propiedad de PEMEX están operando en aguas someras (tirantes de agua menores a 100 m), por lo que la experiencia de la industria petrolera nacional en Aguas Profundas es nula. Sin embargo, cabe mencionar que actualmente PEMEX está perforando pozos exploratorios en aguas intermedias (profundidades entre 100 y 500 m) y aguas profundas (tirantes mayores a 500 m) a través de la contratación de los servicios de empresas como Perforadora Dolphin Mexicana y Mexdrill Offshore, quienes son propietarias de las plataformas Semisumergibles con el equipo de perforación.



La razón principal para esta gran actividad de exploración y de explotación de la zona costa afuera es el rápido aumento de la demanda mundial de energía, y la probada capacidad de las plataformas continentales para suministrar una parte sustancial de hidrocarburos. Aun cuando se espera que las plataformas continentales satisfagan una parte significativa de los futuros requerimientos petroleros, la industria ya está recurriendo a las zonas de aguas más profundas de los taludes continentales para la provisión del petróleo, y posiblemente, en los próximos años se llegará a trabajar en las regiones todavía más profundas con tirantes de agua superiores a los 3,000 m.

La industria internacional continúa preparándose para enfrentar los desafíos que impone la producción de petróleo en aguas profundas y ultra profundas, muestra de ello son los programas de Investigación y Desarrollo Tecnológico para extender y/o generar las tecnologías existentes para la explotación de campos en profundidades de 3,000 m, como son el DeepStar (JIP, joint industry Project, entre 10 compañías lideradas por Chevron), el PROCAP 3000 (Petrobrás) y el DEMO (JIP entre 5 compañías lideradas por BP Norway).

Dentro de los diversos conceptos estructurales para la explotación de petróleo en aguas profundas, las plataformas de piernas atirantadas tipo (TLP) constituyen una opción viable y prometedora. Una TLP es una estructura híbrida que con relación a los grados de libertad horizontales, es concebida como un sistema flotante y en los grados de libertad verticales, es rígida como una plataforma fija. Estas características representan ventajas técnicas y económicas, como la sustitución de algunos equipos submarinos por superficiales y la intervención de los pozos desde la cubierta de la misma plataforma.



La rigidez vertical de la TLP es proporcionada por su sistema de anclaje formado por tubos verticales de acero de alta resistencia denominados tendones. Los tendones se mantienen siempre en tensión por el exceso de flotación del casco de la plataforma y constituyen un elemento estructural crítico ya que su falla significaría el colapso de toda la plataforma, conllevando a la pérdida de vidas humanas, económicas y a daños al medio ambiente. En su diseño, se consideran diferentes estados límite conocidos como de servicio (relacionados con desplazamientos laterales y rotaciones de sus uniones), de carga última, de colapso progresivo, accidental (considerando la inundación del casco de la plataforma o de una de las líneas de amarre) y de fatiga. Este último estado límite es de suma importancia en las estructuras marinas sujetas a cargas cíclicas constantes debido al oleaje, principalmente.

El objetivo del presente trabajo es la identificación y la aplicación de una metodología para evaluar la vida a la fatiga de los tendones de una plataforma flotante de tipo TLP, tomando en cuenta la acumulación de los daños generados por los diferentes estados de mar que pueden presentarse durante la vida operacional de la plataforma.



CAPÍTULO I

“PLATAFORMAS DE PIERNAS ATIRANTADAS”

1.1 Concepto estructural.

Las plataformas tipo TLP son muy parecidas a las plataformas semisumergibles, excepto en su sistema de anclaje y su cimentación. Una semisumergible es anclada a través de líneas en catenaria o inclinadas, formadas por cadenas, cables de acero o poliéster, presentando fuerzas de restauración en el plano horizontal y poca rigidez en el plano vertical. Las líneas de anclaje de una TLP son tubos de acero colocados verticalmente, y son comúnmente referenciados como *tendones*. Otra característica importante de las TLP's es que la flotación que aporta su casco (compuesto por columnas y pontones) es mayor que su peso. Con esto, el equilibrio vertical de la plataforma es obtenido ligando su base al fondo marino a través de los tendones. Los tendones proporcionan alta rigidez al sistema en el plano vertical y son tensados por el exceso de flotación del casco, minimizando los desplazamientos en este plano producidos por la operación de la plataforma o por los diferentes estados del mar. Una TLP es un sistema flexible en la dirección del oleaje, lo cual permite la disipación de la energía del mar y reduce los requisitos estructurales para mantener la plataforma sobre la ubicación deseada.

El concepto de plataforma de piernas atirantadas aparece en los años setenta y desde entonces se han publicado una gran cantidad de estudios acerca de su comportamiento estructural, la evaluación de cargas, el análisis de modelos a escala y más recientemente, sobre la confiabilidad de sus componentes. Los resultados de esta serie de estudios culminaron en la instalación con éxito de 13



TLP's y 9 mini-TLP's (ver Figura 1-1). Los datos de la instalación, tirante de agua y desplazamientos de las 13 TLP's se indican en la Tabla 1.1.

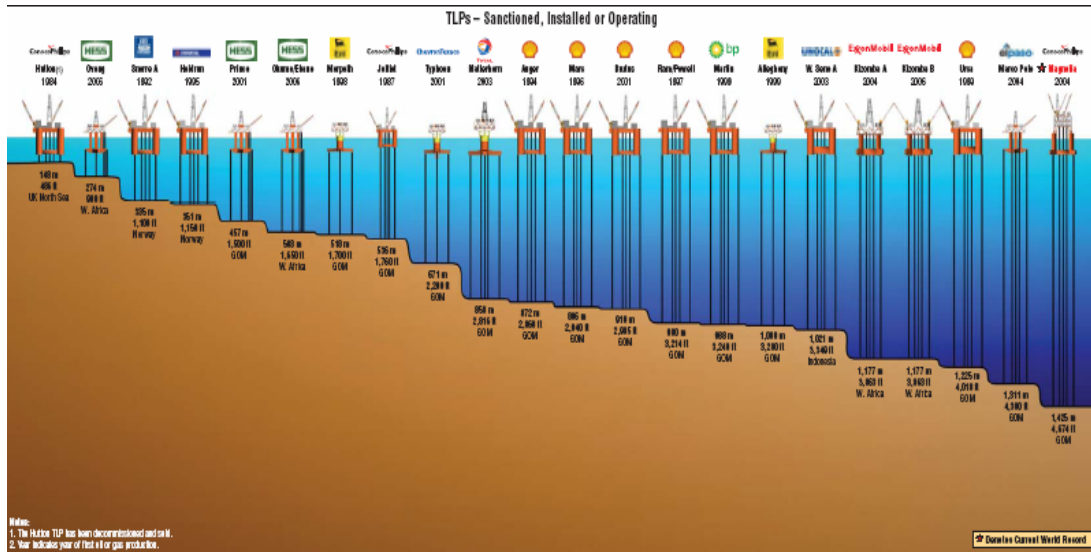


Figura 1-1. Records de aplicación de las TLP's en el mundo (Offshore Magazine, 2005).

Tabla 1.1. Características principales de las TLP's en operación.

Nombre de la TLP	Año de instalación	Localización	Tirante de agua (m)	Desplazamiento (ton)
Hutton	1984	Mar del Norte	150	63300
Jolliet	1989	Golfo de México	536	16600
Snorre	1992	Mar del Norte	309	106500
Auger	1993	Golfo de México	872	66200
Heidrun	1995	Mar del Norte	350	288000
Mars	1996	Golfo de México	894	48000
Ram Powell	1997	Golfo de México	980	48000
Ursa	1998	Golfo de México	1219	97500
Merlin	1999	Golfo de México	1051	26000
Brutus	2000	Golfo de México	915	48000
Sunday	2001	Golfo de México	450	12000
Kizomba A	2003	Angola	1250	58000
Magnolia	2004	Golfo de México	1425	19000





1.2 Componentes principales.

Los componentes principales de una TLP son la cubierta con los equipos para producción, el casco de flotación, las líneas de amarre, los risers y su cimentación. En la Figura 1-2 se muestran estos componentes.

- ✦ *Cubierta:* La cubierta de una TLP de producción y de perforación, es similar a la de una plataforma fija o flotante convencional. En el caso de una TLP, su cubierta tiene que soportar toda la carga de los risers y de los equipos necesarios para sujetarlos. El área de la cubierta proporciona principalmente el espacio para el alojamiento del personal y para las necesidades funcionales de la misma plataforma, incluyendo área de trabajo, cuarto de control, instalaciones de procesamiento, la torre de perforación, aire acondicionado, bomba de lodos, la grúa, el quemador y el helipuerto, entre otros.
- ✦ *Casco de flotación:* El casco de flotación es la estructura que proporciona el apoyo a la cubierta y a la tracción de los tendones. Generalmente, el casco está constituido por columnas, pontones y algunos elementos diagonales de refuerzo. La sección transversal de las columnas y los pontones, puede ser de forma circular, rectangular o cuadrada. El espacio en el interior de las columnas es utilizado para la colocación de elevadores, escaleras, el sistema de sustento de los tendones y para lastrar, por si es necesario. Los compartimentos dentro de los pontones pueden ser utilizados para lastrar y para la colocación de algunas máquinas. Los pontones son elementos colocados en forma horizontal que forman parte del casco de flotación, los cuales están interconectados con las columnas por debajo del nivel del agua.



- ✦ *Sistema de tendones:* El sistema de amarre está compuesto por elementos en tensión, tubos de acero, conectores intermedios, juntas flexibles en los puntos de conexión con el casco de la plataforma y la cimentación, y el equipo para su monitoreo. Los tendones pueden ser dimensionados con una relación diámetro/espesor alrededor de 30 para generar elementos con flotación neutra, o sea que su peso sea igual al empuje por flotación producido por el agua. Esta característica hace posible la verticalidad del tendón en un único tramo durante su instalación. Para aguas profundas son necesarias relaciones diámetro/espesor menores que 30 para resistir la presión hidrostática. Los tendones pueden ser fabricados en un tramo único para profundidades de hasta 500 metros o en tramos de 50 a 70 metros conectados entre sí durante la instalación para aguas más profundas. El sistema de tendones constituye un componente básico en una TLP, ya que ellos aportan la fuerza de restauración horizontal y la restricción vertical a los movimientos, facilitando la conexión de los risers y demás operaciones de producción y mantenimiento de los pozos.
- ✦ *Risers:* Un riser puede ser descrito como la extensión del pozo de producción a la plataforma flotante. Actualmente, los risers utilizados en TLPs son de dos tipos: risers rígidos verticales y risers de acero en catenaria (SCR, del inglés *Steel Catenary Risers*). Los componentes verticales de un riser vertical son los tubos de conducción del fluido, una junta articulada inferior, una junta articulada superior y una junta telescópica. Las articulaciones tienen como objetivo absorber las rotaciones del sistema debido al desplazamiento lateral del sistema flotante, mientras que la junta telescópica tiene la función de absorber los movimientos verticales. En el caso de los risers del tipo SCR, la junta articulada inferior y la junta telescópica no son necesarias.



- ✦ **Plantilla Base:** La estructura de la base es necesaria para mantener la plataforma en su lugar de operación. La base actúa como un ancla para el sistema de tendones y es fijada al lecho marino a través de pilotes o con grandes bloques de concreto.

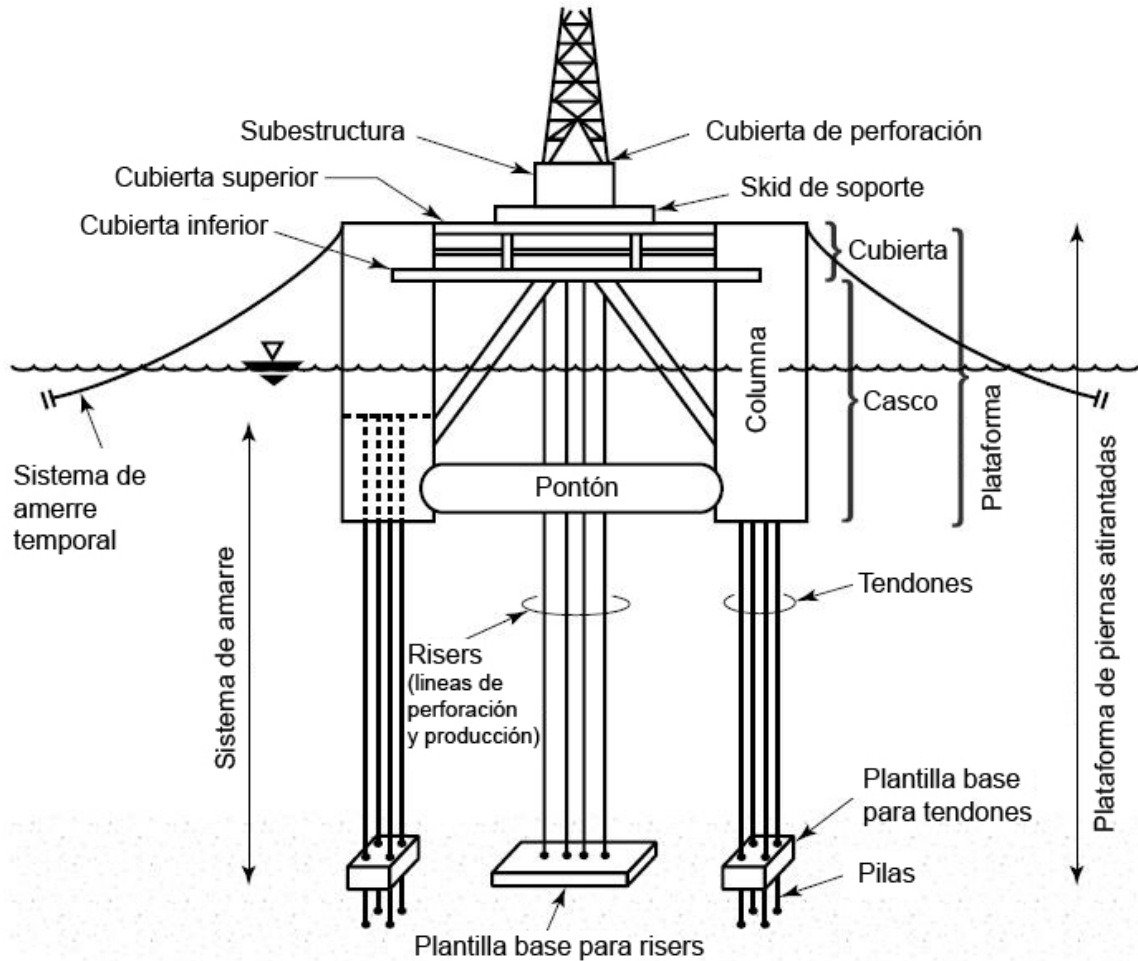


Figura 1-2. Componentes principales de una TLP, (adaptada del API-RP 2T)

Debido a su naturaleza flexible en el plano horizontal, las plataformas de piernas atirantadas tienen la libertad de moverse con las acciones ambientales, y como resultado de esto su respuesta presenta una gran gama de frecuencias de



vibración. Una característica particular y muy atractiva de una TLP es la capacidad de evitar cualquier resonancia con la energía del oleaje. Sus frecuencias naturales en los grados de libertad de retraso (*surge*), deriva (*sway*) y rotación alrededor del eje vertical (*yaw*) están por debajo de las frecuencias de primer orden del oleaje, reduciendo el movimiento horizontal y por consiguiente los esfuerzos en el sistema de amarre. En la Figura 1-3 se muestran los grados de libertad de una TLP. En la Figura 1-4 se muestran los periodos naturales de diferentes conceptos estructurales para la explotación de petróleo en el mar. Por ejemplo, los periodos naturales en *surge*, *sway* y *yaw*, de las estructuras ancladas como los FPSOs, las TLP's y las semi-sumergibles, son generalmente mayores a 70 segundos. Los periodos naturales en sustentación (*heave*), balanceo (*roll*) y cabeceo (*pitch*), de plataformas semisumergibles son de alrededor 25 segundos, mientras que para las TLP's estos periodos están próximos a 3 segundos, donde la energía del oleaje de primer orden es generalmente menor.

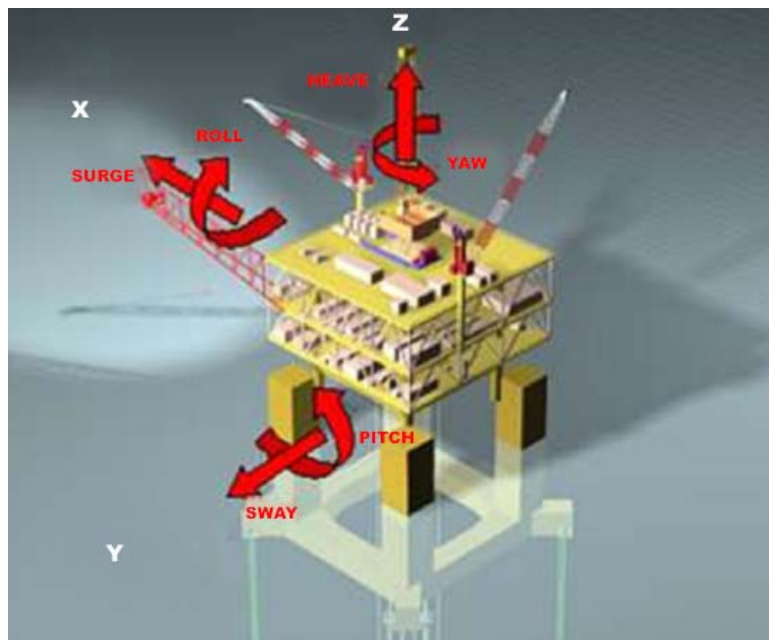


Figura 1-3. Grados de libertad de una TLP.

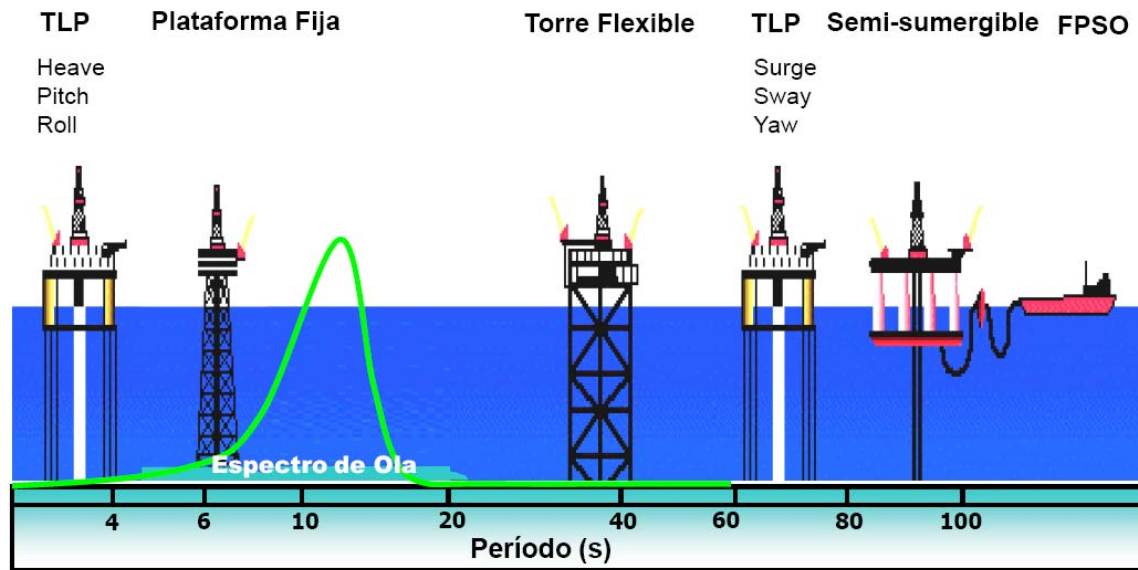


Figura 1-4. Periodos de vibración típicos de estructuras marinas.

1.3 Ventajas y desventajas.

Las características de movimiento de una TLP presentan un número de ventajas para su uso como sistema de producción costa fuera. La reducción de los movimientos verticales de la plataforma proporciona una base estable para su operación y facilita el acceso a los cabezales de los pozos y al equipo localizado en el fondo del mar. La tensión en el sistema de amarre hace que el costo de la plataforma tenga poca variación con el incremento del tirante de agua, permitiendo la producción temprana de hidrocarburos y la reducción de los costos de abandono del campo. El diseño de una TLP permite que la construcción y la integración del equipo en su cubierta se efectúen, previamente a su instalación, en patios de fabricación en tierra.



La utilización de tecnología de TLP's para el desarrollo en aguas profundas, causa ventajas operacionales no necesariamente encontradas con otras formas de casco. Algunas de las ventajas más importantes son las siguientes:

- ✦ Uso de árboles secos - Las características del movimiento vertical de la TLP (debido principalmente a la restricción impuesta por los tendones) permite el apoyo seguro y eficiente de risers rígidos tensados en su parte superior (TTR's, del inglés Top Tension Riser) y por consiguiente el uso de árboles superficiales (secos) para control de pozos. La plataforma es capaz de permanecer operando en condiciones meteorológicas y oceanográficas (metoceanicas) severas. Debido a los desplazamientos laterales y verticales (offset y setdown) por efecto de los tendones, mostrados en la Figura 1-5, la deformación del riser es grandemente reducida comparada con otros sistemas flotantes. Los risers de acero en catenaria SCR's utilizados con fines de exportación de los hidrocarburos, son también soportados eficientemente por la TLP.

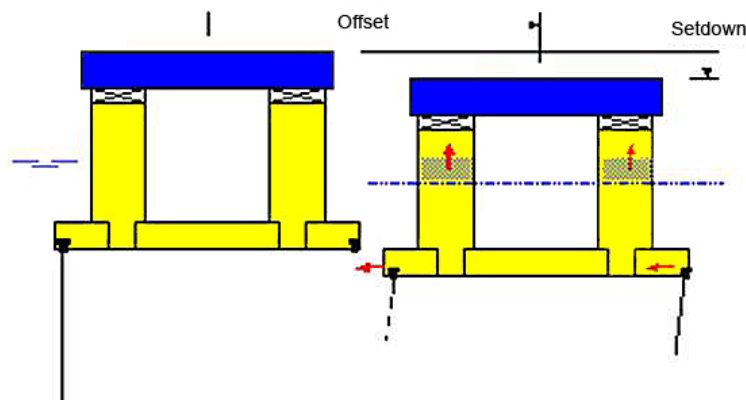


Figura 1-5. Definición de offset y setdown de la TLP.



- ✦ Configuración de la bahía de pozos – En el caso de las TLP's son utilizadas bahías de pozos convencionales, similares a las utilizadas en las plataformas fijas. Los TTR's son soportados por una rejilla centrada entre las columnas de la TLP. Los risers se encuentran libres a lo largo de toda su longitud, excepto en la conexión localizada en el lecho marino.
- ✦ Perforación y mantenimiento de pozos – La TLP puede soportar equipos de perforación en su propia cubierta y con ellos efectuar la perforación de pozos de producción y su mantenimiento.
- ✦ Funcional y versátil – Las TLP's han desempeñado muchas funciones y combinaciones diferentes, como las siguientes:
 - ✦ Las TLP's además de tener la capacidad de producción (tener todos los equipos para recibir, separar el aceite, agua y gas, dar compresión y mandar a un punto de exportación o almacenamiento) pueden tener el equipo de perforación de pozos incluido en sus cubiertas. O puede sólo producir y ser auxiliada mediante otro sistema flotante (generalmente semisumergibles) para perforar nuevos pozos.
 - ✦ Pequeña área de influencia de su cimentación – Debido a que el sistema de amarre de los tendones es vertical, el área de influencia en el lecho marino es pequeña. Contrario a otras formas de plataformas flotantes que utilizan un sistema de amarre en catenaria, el sistema TLP no interferirá con instalaciones adyacentes como FPSO's, barcos de producción, ductos, etc.



- ✦ Instalación del sistema completo – la naturaleza compacta del casco de la TLP (altura, ancho y calado pequeños) permite efectuar la integración de la cubierta en un muelle del patio de fabricación. Las pruebas de los sistemas se efectúa en patios de fabricación o en muelles cercanos a la costa, lo cual resulta en un menor tiempo de ejecución, el costo y el riesgo se reducen comparado con las operaciones costa afuera.

Algunas de las desventajas de una Plataforma de Piernas Atirantadas incluyen el requerimiento de cimentaciones capaces de resistir grandes fuerzas verticales ascendentes y un diseño y mantenimiento minuciosos de los tendones. También, una TLP es más sensible a los cambios en la distribución de las masas y tiene límites operacionales bien establecidos sobre la carga total en las cubiertas. Actualmente el uso de las TLP's para explotar yacimientos en tirantes de agua superiores a los 1500 m se encuentra limitado debido al colapso por presión externa de su sistema de tendones.

1.4 Aplicaciones en aguas profundas de México.

La producción proveniente de los yacimientos marinos localizados en aguas someras en México está declinando y en el mediano y largo plazos se requerirán nuevos desarrollos en aguas cada vez más profundas para satisfacer las demandas de consumo interno y cubrir las cuotas de exportación. Los yacimientos mexicanos de potencial desarrollo se localizan en tirantes de agua que van de los 300 a los 2 000 m. Dada la capacidad de carga y superficie disponible para alojar los diversos sistemas de perforación-producción, las plataformas de piernas atirantadas son uno de los sistemas con aceptación en la industria petrolera para su aplicación en aguas profundas y un sistema atractivo para su aplicación en



México. En vista de lo anterior, es importante iniciar esfuerzos para definir criterios de diseño congruentes con la importancia de este tipo de instalaciones y que tomen en cuenta la incertidumbre de las solicitaciones, capacidades y modelos de comportamiento, entre otros. Dichos criterios deberán tomar en cuenta que los costos, peligros y consecuencias de la falla de una estructura en aguas profundas, difieren considerablemente de aquellas estructuras para la explotación petróleo en aguas someras.

De acuerdo con las publicaciones de los avances en el ámbito mundial, los yacimientos localizados en aguas profundas se han logrado explotar a través de los sistemas de producción flotantes. El caso más notable en el uso de TLP's lo constituye el desarrollo de campo *Magnolia*, localizado en la parte Norte del Golfo de México, en un tirante de casi 1500 m. En la Figura 1-6 se muestra la TLP Magnolia.

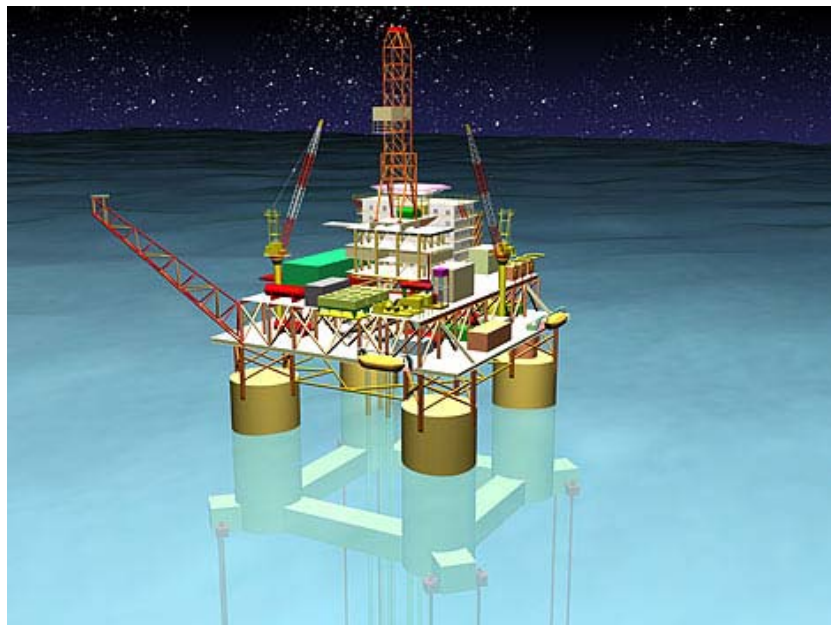


Figura 1-6. TLP Magnolia.



Indudablemente la tecnología TLP es aplicable a la parte mexicana del Golfo de México. Sin embargo, a pesar de tener cierto conocimiento de sus características, es una tecnología de punta que requiere un mayor esfuerzo de asimilación.





CAPÍTULO II

“CRITERIOS DE ANÁLISIS Y DISEÑO”

La estructura de una plataforma marina tiene la función de soportar los equipos de perforación, para el procesamiento de los hidrocarburos, las instalaciones para el alojamiento del personal y sistemas auxiliares, necesarios para la extracción, adecuación y transporte de los hidrocarburos, en un medio tal que la expone al efecto de diversos procesos físicos del medio ambiente oceánico, como el viento, el oleaje, las corrientes marinas y la marea. Estos procesos físicos se denominan condiciones meteorológicas y oceanográficas. A cada conjunto de parámetros de estos procesos se denomina estado de mar.

Con el paso del tiempo y a medida que contamos con mayor información, la estimación de los parámetros que definen a un estado de mar, el cálculo de sus acciones y las consideraciones de diseño han experimentado una evolución significativa. Basta mencionar que los criterios de diseño para plataformas marinas han cambiado significativamente en los últimos años. Las primeras plataformas marinas fueron diseñadas para oleajes con periodo de retorno de 25 años; sin embargo, desde 1969 la mayoría de las plataformas marinas han sido diseñadas para oleajes con periodo de retorno de 100 años (Curso de Ingeniería Civil Costa Afuera, Apuntes de Clase Tomo I, Ing. Víctor M. Valdés).





2.1 Acciones ambientales.

2.1.1 Oleaje

El oleaje es un fenómeno generado principalmente por el viento que, al soplar sobre la superficie del mar, transmite su energía, provocando que la superficie se deforme y produzca ondas que se mueven en la dirección de acción del viento.

En general, una ola es una onda, y una onda es una perturbación producida por una fuerza generadora en un medio continuo. Asimismo, sobre esta perturbación actúan fuerzas que tratan de reestablecer la condición de equilibrio inicial, o fuerzas restauradoras.

Las fuerzas generadoras y restauradoras pueden ser de muy diversa índole, y dependiendo de sus magnitudes y características tendrán campos de acción perfectamente definidos.

Como principales fuerzas generadoras podemos citar:

- ✦ La fuerza del viento.
- ✦ Sismos, derrumbes y atracción gravitatoria.

Como principales fuerzas restauradoras podemos citar:

- ✦ La tensión superficial.
- ✦ La atracción gravitatoria.
- ✦ La fuerza de Coriolis.



Desde un punto de vista general, las ondas pueden clasificarse según sus características y las fuerzas que las generan y las restauran, con relación a su periodo o frecuencia, a los agentes que intervienen en su formación y a su capacidad energética. Por ejemplo, la onda de capilaridad está caracterizada por periodos cortos, siendo el menor del orden de 0.07 s, con longitud de 1.7 cm y alturas máxima entre 1 y 2 mm; la fuerza generadora es el viento, mientras que la fuerza restauradora es la tensión superficial. Para las ondas de gravedad, la principal fuerza generadora es el viento, mientras que la principal fuerza restauradora es la asociada a la gravedad, es decir, el peso. Se sabe que el oleaje posee mayor energía en cuanto mayor sea su periodo, por lo que las denominadas ondas de periodo largo poseen una carga energética importante. Entre estas últimas ondas pueden identificarse las producidas por tormentas de invierno, huracanes y las debidas a sismos.

Descripción del fenómeno

El oleaje es una onda o perturbación en un medio continuo, originada por la acción de una fuerza generadora y tendiente a sus condiciones iniciales por medio de una fuerza restauradora. Esta onda posee ciertas características particulares, que para su estudio pueden dividirse en dos grupos:

1. Oleaje en aguas profundas, que se caracteriza por no estar influenciado por el fondo marino, moviéndose independientemente de él; y
2. Oleaje de aguas someras u oleaje costero, que es aquel en el que su forma y movimiento se ven afectados por el fondo marino.

Ambas condiciones repercuten en la generación de velocidades de las partículas de agua en la columna vertical, según se aprecia en la Figura 2-1.

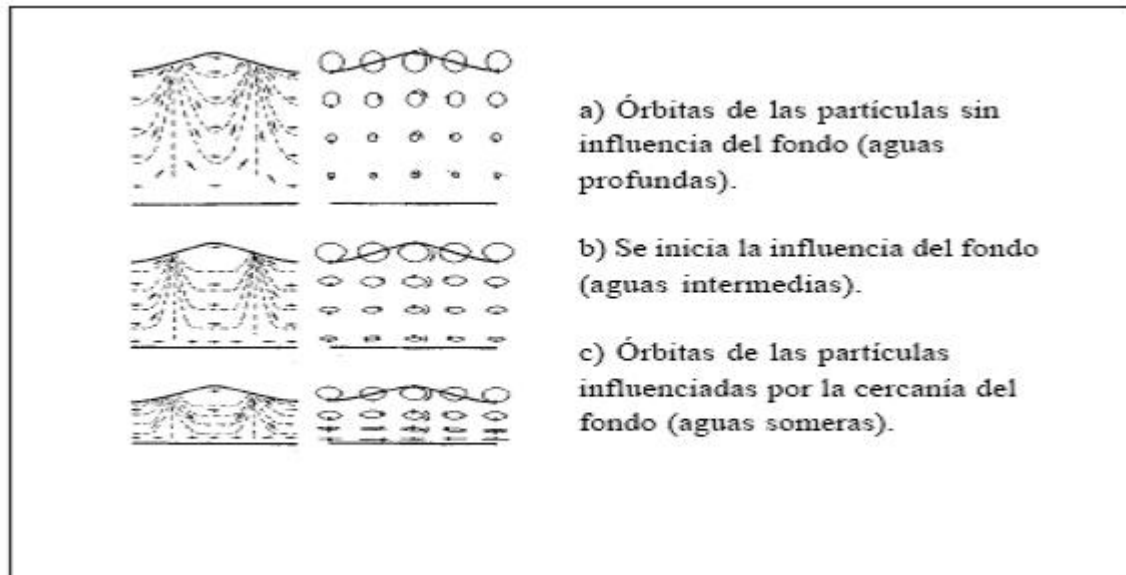


Figura 2-1. Influencia del fondo del océano sobre el perfil de las olas
(Silvestre, 1974)

Los principales parámetros que definen a una ola son los siguientes:

- ✦ Altura de ola (H): Se define como la distancia vertical entre la cresta y el valle o seno de una ola determinada.
- ✦ Longitud de ola (L): Es la distancia horizontal medida entre dos crestas o valles consecutivos.
- ✦ Periodo de ola (T): Se define como el tiempo que tardan en pasar por un punto fijo dos crestas o dos valles consecutivamente.
- ✦ Celeridad de ola (C): Es la velocidad con la cual se desplaza la ola, es decir $C = L/T$.
- ✦ Relación de esbeltez ($\gamma = H/L$): Define el perfil de la ola.
- ✦ Frecuencia de ola: Se determina mediante el inverso del periodo $f = 1/T$.



Las ondas en el océano son de una amplia gama de periodos. Las energías asociadas a cada tipo de onda son proporcionales a la altura H .

Fundamentalmente, la definición de las características de una ola parte de considerar tres parámetros básicos, que son: la altura de la ola, su periodo y su dirección de propagación. Estos parámetros se determinan a partir de dos técnicas generales:

- a) Medición del oleaje, que puede hacerse desde apreciación visual, hasta con instrumentos sofisticados que permiten la medición y caracterización del oleaje en tiempo real, es decir, en el momento en que suceden.
- b) Pronóstico a través de métodos indirectos, como pueden ser los métodos de caracterización del oleaje generado por viento, o la caracterización estadística del oleaje, a partir de registros existentes.

Conociendo estas características básicas, es posible determinar el resto de las características, tales como la longitud de la onda, su celeridad, etc., a partir de teorías orientadas a esa caracterización, según se explica más adelante.

Generación del oleaje

Como se ha mencionado anteriormente, el viento constituye una de las fuerzas básicas generadoras de oleaje, por lo tanto, una manera de caracterizar y determinar las condiciones del oleaje es a partir de los datos de viento. Las características del sistema oleaje-viento quedan determinadas por la distancia en la cual actúa el viento (*fetch*) y el tiempo de acción (duración).



La zona donde el viento transmite su energía al mar se llama zona de generación, dentro de los límites de esta zona el oleaje no tiene aún toda la energía que le puede transmitir el viento; fuera de la zona de generación, el oleaje sí tiene toda esa energía, pero empieza a transformarse en pérdidas, en un comportamiento del oleaje en la zona de decaimiento. Al oleaje dentro de la zona de generación se le denomina oleaje local o Sea. Al oleaje fuera de la zona de generación se le denomina oleaje distante o Swell (ver Figura 2-2).

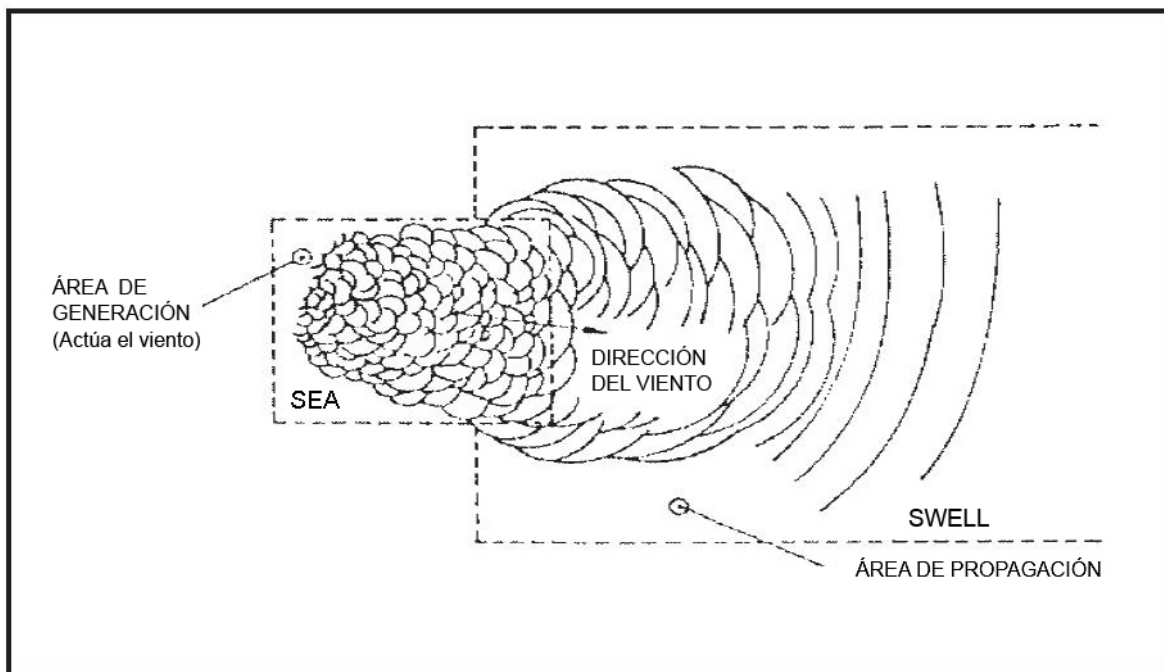


Figura 2-2. Generación de oleaje por viento.

La Tabla 2.1 muestra la clasificación del fenómeno del oleaje según la profundidad en que se encuentre viajando la ola y su relación con la función

$$\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right).$$



Tabla 2.1 Clasificación del fenómeno del oleaje de acuerdo con la profundidad en que viaja la ola (SPM, 1984).

Clasificación	$\frac{d}{L}$	$\frac{2\pi d}{L}$	$\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$
Aguas profundas	$> \frac{1}{2}$	$> \pi$	Aprox. 1 (0.9964)
Aguas Intermedias	$\frac{1}{25} \text{ a } \frac{1}{2}$	$\frac{1}{4} \text{ a } \pi$	$\tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$
Aguas Someras	$< \frac{1}{25}$	$< \frac{1}{4}$	Aprox. $\frac{2\pi d}{L}$

Las olas generadas por el viento son la mayor fuente de fuerzas ambientales sobre plataformas costa afuera. Dicho oleaje es de forma irregular, puede variar en altura y longitud y puede aproximarse a una plataforma con una o más direcciones simultáneamente.

Comúnmente, las fuerzas que ejerce el oleaje sobre los elementos estructurales se pueden obtener con dos métodos: análisis de difracción y la ecuación de Morison (Morison, 1950). El análisis de difracción calcula las fuerzas de oleaje integrando el campo de presión del agua actuando sobre un cuerpo. Este método es apropiado cuando el cuerpo es suficientemente grande en relación con la amplitud del movimiento del oleaje, de tal forma que las fuerzas viscosas son relativamente poco importantes y cuando el cuerpo flotante es suficientemente grande con relación a la longitud de la ola, de tal manera que pueda modificar el campo del oleaje mediante difracción y radiación. Cuando los miembros de un cuerpo son relativamente esbeltos, con un diámetro menor que un quinto de la longitud de la ola, o tienen un corte afilado, los efectos viscosos pueden ser



importantes y la fuerza de oleaje puede ser expresada como la suma de la fuerza de arrastre más la fuerza de inercia. La ecuación de Morison calcula la fuerza de oleaje a partir de la velocidad y la aceleración relativa entre las partículas de agua y los elementos estructurales (API, 1987):

$$F = \frac{1}{2} \rho_w C_D D u \cdot \dot{x} (u - \dot{x}) + \frac{\pi}{4} \rho_w C_A D^2 (\ddot{u} - \ddot{x}) + \frac{\pi}{4} \rho_w D^2 \dot{u} \quad (2.1)$$

Donde:

F = fuerza por unidad de longitud normal al eje del cilindro

ρ_w = densidad del agua de mar

D = diámetro del miembro

C_D = coeficiente de arrastre

C_A = coeficiente de masa adherida

u = velocidad del agua normal al eje del cilindro

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

\dot{x} = velocidad del miembro estructural normal a su eje

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

Las velocidades y aceleraciones del agua pueden obtenerse de las teorías de oleaje aplicables a aguas profundas, por ejemplo, la Teoría Lineal. Generalmente, el valor de los coeficientes de arrastre varía de 0.6 a 1.2 y el coeficiente de masa adherida para cilindros como los de las columnas de una TLP se puede considerar igual a 1.



2.1.2 Viento

El movimiento de las masas de aire se define como *viento*. También, el viento se puede definir como corriente horizontal de aire que circula con relativa proximidad a la superficie terrestre. Aunque también existen los vientos orográficos con dirección ascendente.

De acuerdo con su dirección, los vientos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ✦ Constantes o regulares (actúan todo el año).
- ✦ Periódicos (se invierten; en el día y noche o en épocas del año).
- ✦ Irregulares (no periódicos).

Por su extensión en:

- ✦ Locales.
- ✦ Generales o planetarios (brisas y monzones).

El viento es la principal fuerza generadora de oleaje teniendo un efecto permanente en la costa, además produce marea de viento y fuerzas sobre las estructuras.

Los elementos que caracterizan al viento son tres:

- a) Dirección: Para definir su dirección se utiliza la rosa de vientos.
- b) Intensidad o velocidad con que sopla: Para su medición se utiliza la escala internacional Beaufort modificada (ver Tabla 2.2), la cual relaciona la intensidad del viento con las condiciones de mar.



c) Frecuencia o número de veces que se presenta con determinadas características durante un lapso cualquiera, utilizándose normalmente el día, mes, estación o año.

Tabla 2.2. Escala de Beaufort.

ESCALA DE BEAUFORT				
GRADO	NOMBRE	VELOCIDAD		CONDICIONES DEL MAR
		m/s		
		mín.	máx.	
0	Calma	0	0.2	Mar lleno.
1	Ventolina	0.3	1.5	Ondulación pequeña en la superficie sin producción de espuma
2	Flojito	1.6	3.3	Olas cortas y bajas que no rompen; mar rizado.
3	Flojo	3.4	5.4	Olaeaje que empieza a romper: poca espuma; mar rizado.
4	Bonacible	5.5	7.9	Olas de poca altura pero de mayor longitud; borregos de espuma; marejadilla.
5	Fresquito	8	10.7	Se acentúa la longitud de las olas; generalización de borregas de espuma; marejada.
6	Fresco	10.8	13.8	Se inicia la formación de grandes olas, que rompen; rociones de espuma al aire; mar grueso.
7	Frescachón	13.9	17.1	Crece el mar, mar muy grueso.
8	Duro	17.2	20.7	Olas de altura notable; las crestas despiden espuma pulverizada; mar arbolado.
9	Muy duro	20.8	24.4	Olas muy grandes; balance pronunciado, la espuma empieza a afectar la visibilidad.
10	Temporal	24.5	28.4	Olas considerables; mar blanco de espuma, balances fuertes.
11	Borrasca	28.5	32.6	Olas extraordinariamente altas; visibilidad escasa a causa de la espuma.
12	Huracán	32.7	36.9	Atmósfera y mar completamente lleno de espuma; visibilidad casi nula.

Cuando el viento actúa sobre un obstáculo genera presiones que varían según la intensidad de la velocidad, la variación de ésta conforme a la altura, la dirección del viento, el área y la forma de la estructura expuesta. La velocidad del viento puede ser extrapolada a otras alturas a partir de la altura donde son registrados en campo los datos de velocidad (API, 1987):



$$\frac{V_z}{V_H} = \left(\frac{z}{H} \right)^{1/n} \quad (2.2)$$

Donde:

H = altura de referencia (30 ft o 10 metros) sobre el nivel medio del mar

z = altura de interés

V_z = velocidad promedio del viento de una hora a la elevación z, sobre el nivel medio del mar

V_H = viento de referencia (velocidad media del viento de una hora a la elevación H)

n = exponente típico igual a 8 para viento sostenido

La variación natural del viento puede ser descrita por dos componentes, una componente constante y una componente de ráfaga. La fuerza instantánea de viento sobre una TLP puede calcularse sumando las fuerzas instantáneas en cada miembro sobre la línea del agua:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a C_s A |V_z + u' - \dot{x}| (V_z + u' - \dot{x}) \quad (2.3)$$

Donde:

F = fuerza del viento

ρ_a = densidad de la masa del aire

C_s = coeficiente de forma

A = área expuesta del objeto

u' = intervalo dinámico de la velocidad del viento

\dot{x} = velocidad instantánea del miembro estructural

z = elevación del centroide del miembro



El coeficiente de forma C_s puede variar desde 0.5 para secciones cilíndricas hasta 1.5 para vigas y secciones rectangulares planas.

2.1.3 Corrientes Marinas

De manera general, las corrientes pueden definirse como el desplazamiento de una masa de agua, determinada por dos características: dirección y velocidad.

La dirección de una corriente es el rumbo hacia el cual se dirigen. La velocidad de una corriente se expresa tradicionalmente en nudos, cuando se trata de aspectos relativos a la navegación, o bien en m/s. Un nudo se define como la velocidad correspondiente a una milla náutica por hora, por lo cual su equivalencia es $1 \text{ m.n./hora} = 1860 \text{ m}/3600 \text{ s} = 0.52 \text{ m/s}$.

Las corrientes pueden ser de los siguientes tipos:

- a) Corrientes oceánicas
- b) Corrientes inducidas por viento
- c) Corrientes por marea
- d) Corrientes producidas por oleaje
- e) Corrientes de densidad
- f) Corrientes de lazo



a) *Corrientes oceánicas*

Las causas de las corrientes oceánicas son fundamentalmente dos:

- ✦ El viento, que opera como elemento de arrastre de las moléculas superficiales, las cuales a su vez, por rozamiento, actúan sobre las moléculas más profundas (este tipo de corrientes son superficiales y de poca profundidad). Adicionalmente, coinciden en dirección con los vientos generales.
- ✦ El gradiente como elemento productor de corrientes está determinado por la diferencia de densidad de las masas de agua, la cual es función de la temperatura y la salinidad.

Otros elementos influyen en el comportamiento de las corrientes, como son la configuración del litoral, la topografía del fondo marino, la inercia de la corriente y la fuerza de Coriolis.

En función de la temperatura se clasifican en calientes y frías (importancia de carácter biológico).

b) *Corrientes locales inducidas por el viento*

Cuando el viento sopla sobre la superficie del mar produce un esfuerzo cortante sobre el agua, y las partículas líquidas de trayectoria circular, originadas por el oleaje, ahora tendrán una componente de traslación importante.



Existen las ecuaciones de Ekman y tablas de otros autores como Rossby y Montgomery, con las cuales se puede determinar la velocidad de la corriente a partir de la velocidad en la superficie, pero se deberán considerar meramente como una orientación. En la realidad son muchos los parámetros que intervienen en la generación de corrientes por vientos locales y los modelos matemáticos simplifican muchos de éstos.

Considerando la acción de un viento ideal, de velocidad constante soplando sobre una superficie o plano de agua de extensión infinita, y tomando en cuenta las fuerzas de fricción y Coriolis, se dedujeron las siguientes expresiones válidas para el Hemisferio Norte (Ekman 1905):

$$U = U_s e^{-az} \cos(45^\circ - az) \quad (2.4)$$

$$V = U_s e^{-az} \text{sen}(45^\circ - az)$$

Donde:

U , velocidad del viento

V , componente de la velocidad de la corriente en la dirección del viento

U_s , velocidad absoluta de la corriente en la superficie

z , coordenada vertical con desarrollo positivo hacia abajo.

$$a = \pm \sqrt{\frac{\rho \omega \Omega \text{Sen } \phi}{\mu}} \quad (2.5)$$

$\rho \omega$, densidad del agua

Ω , velocidad angular de la Tierra

ϕ , grados latitud

μ , viscosidad del agua



Si se aplican las expresiones para determinar U y V para la superficie del agua ($Z=0$), se observará que la corriente en su dirección presenta una desviación de 45° con respecto a la del viento. Para valores crecientes de Z, esta diferencia de dirección se incrementa, mientras que la velocidad de la corriente decrece; para una profundidad $Z=\pi/\alpha$, el sentido de la corriente es opuesto al correspondiente en la superficie. A la representación gráfica de este comportamiento se le llama "espiral de Ekman".

c) Corrientes inducidas por marea

La elevación y descenso periódico del nivel del agua genera movimientos notables en las masas líquidas, sobre todo en las zonas costeras, en donde la comunicación con el mar abierto está relativamente restringida, generando las llamadas corrientes de marea.

Este tipo de corrientes se dividen en:

- ✦ Corrientes rotatorias
- ✦ Corrientes pendulares (flujo o reflujo)
- ✦ Corrientes hidráulicas (represamiento)

La característica de este tipo de corrientes es su periodicidad, que puede ser diurna o semidiurna-mixta, según sea la marea astronómica. Las características de las corrientes de marea cambian de un lugar a otro, dependiendo principalmente del carácter de la marea pero en función también de la profundidad y configuración del terreno. Aunque es en regiones cercanas o inmediatas al litoral donde se presentan problemas con estas corrientes ya que



provocan transporte de sedimentos (asolvamientos y socavación), y en aguas profundas sus velocidades son relativamente bajas.

d) Corrientes inducidas por oleaje

El proceso del oleaje, sobre todo al aproximarse a aguas poco profundas, genera un patrón de corrientes asociado a la dirección predominante de incidencia. La importancia de este tipo de corrientes radica en que son las que originan y regulan, en su mayor parte, el movimiento de sedimentos costeros.

Estas corrientes se clasifican en dos tipos:

- 1) Corrientes normales a la costa
- 2) Corrientes paralelas a la costa

1) Corrientes normales a la costa. Son generadas por la necesidad de evacuación del volumen de agua sobrante que ha sido empujado y acumulado contra la playa en el estrán (ver Figura 2-3) debido a la acción del oleaje y del viento; este exceso de volumen se manifiesta con una sobre-elevación del nivel del mar en la zona de rompientes.

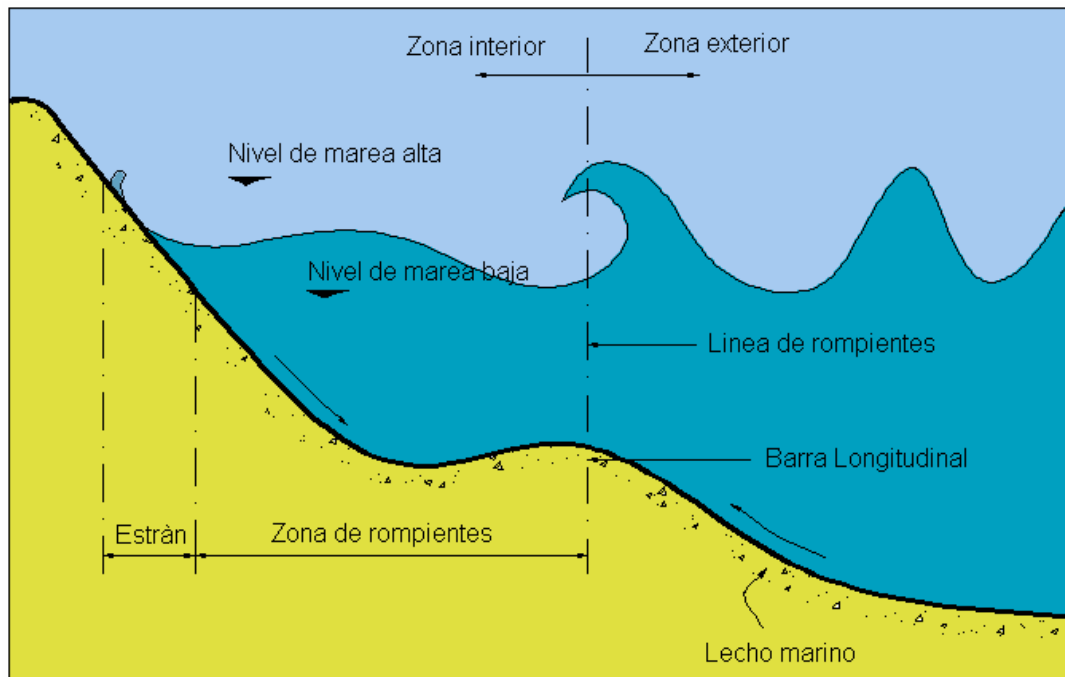


Figura 2-3. Zona de Rompientes y Estrán.

Este tipo de corrientes a su vez puede tomar dos formas. La primera se denomina resaca (*undertow*) y se manifiesta como un flujo difuso que arranca del estrán desplazándose próximo al fondo hacia mar adentro, a lo largo de prácticamente toda la playa. Esta corriente desaparece a la altura de la línea de rompientes sin producir, entonces, ninguna renovación apreciable del agua.

La segunda forma se denomina corriente de retorno (*rip-current*) y se presenta en forma de chorro concentrado, atravesando la línea de rompientes para expandirse luego. La importancia de este tipo de corriente estriba en que producen una clasificación en los sedimentos de las playas, la cual interviene en su balance o estabilidad.



2) Corrientes paralelas a la costa. Lo más común en una playa es que el oleaje incida formando un cierto ángulo con ella, es decir, oblicuamente, bien sea debido a la refracción que sufre en su acercamiento o por la dirección con que fue generado; por ello se formará una corriente paralela a la costa localizada entre la línea de rompientes y la orilla. Esta corriente recibe el nombre de "corriente litoral" o corriente a lo largo de la costa (*long shore current*).

Se considera generalmente que esta corriente es la principal responsable de transportar los sedimentos a lo largo de la costa, una vez que el sedimento ha sido puesto en suspensión en la rotura de la ola. Por tal razón, es muy importante dentro de la ingeniería de costas conocerla cuantitativa y cualitativamente.

Por otra parte, la fuerza de arrastre ejercida por las corrientes marinas sobre un miembro cilíndrico escarpado es proporcional al cuadrado de la velocidad de la corriente. La fuerza de arrastre actúa en la dirección normal al eje del miembro y puede calcularse con la siguiente expresión (API, 1987):

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w C_D A V^2 \quad (2.6)$$

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre por unidad de longitud normal al eje del miembro

ρ_w = densidad de masa del agua.

C_D = coeficiente de arrastre del elemento

A = área proyectada por unidad de longitud

V = velocidad de la corriente, normal al eje del miembro.



e) Corrientes de densidad

Debido a diferencias de temperatura y salinidad entre dos masas de agua situadas en distintos lugares o profundidades se produce una variación de densidad. La tendencia natural es a compensar esta diferencia de densidad, por lo que una de las masas se desplaza hacia la otra a una velocidad en nudos proporcional a la diferencia de densidad. Por ejemplo, el agua de superficie puede sufrir un aumento de salinidad por evaporación. Estas corrientes no suelen ser muy intensas.

f) Corrientes de lazo

Las costas orientales de México están circundadas por el Golfo de México (G. de M.) y el Mar Caribe (M. C.). La morfología de tales áreas es la clave de su definición y de la posible simplificación en su estudio al sólo considerar comunicaciones e intercambios localizados con el resto de los océanos.

Estos intercambios no son exactamente condiciones de frontera que se puedan imponer sobre el sistema, pues dependen de variaciones en el Océano Atlántico, y de forzamientos atmosféricos e intercambios de calor y sal por la superficie y en el interior.

Las expresiones más representativas de la dinámica en este sistema son la corriente de Lazo y grandes remolinos anticiclónicos. Las corrientes de Lazo tienen forma de herradura y fluyen en el sentido de las manecillas del reloj transportando aguas superficiales a través del canal de Yucatán desde el M.C. hacia el G. de M. con gastos del orden de $20 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$, se mantiene relativamente



angosta (30 km) formando un meandro hacia el interior del G. de M. antes de salir por el estrecho de Florida. En su transcurso por el canal de Yucatán esta corriente tiende a estar adyacente a la península de Yucatán y existe una contracorriente con posición por debajo de ella y hacia las costas cubanas. Los grandes remolinos en el G. de M. están generados por el crecimiento del mencionado meandro al punto que la corriente se encierra en sí misma, separándose de la corriente de Lazo que mantiene su continuidad. Los grandes remolinos en el M. C. están asociados a los flujos de entrada a través de las islas que lo limitan al sureste.

El G. de M. es definitivamente una cuenca más estudiada teórica y experimentalmente que el M. C. Se sabe que hay una fuerte dependencia de las fluctuaciones de la corriente de Lazo con el forzamiento atmosférico en las dos áreas. Se considera ventajoso en varios aspectos el estudiar al sistema en conjunto por su gran interdependencia.

Las corrientes del Lazo se extienden profundamente hacia el Golfo de México durante la estación de huracanes. Típicamente, las corrientes en esta época del año se vuelven inestables y provocan remolinos cálidos y profundos. El agua cálida se hace ideal entonces para los huracanes en proceso de intensificación.

Los científicos han sabido durante mucho tiempo que los huracanes se forman sobre las aguas oceánicas más cálidas del mundo. Este estudio agrega información nueva sobre el viaje de los huracanes hasta su impacto sobre tierra, y ayudará a predecir mejor sus trayectorias y cambios de intensidad durante sus horas finales sobre mar abierto.



Es también sabido que estas corrientes son una forma importante de distribuir calor y energía en el océano, pero hasta ahora, los meteorólogos no tenían muchos datos sobre el papel que desempeñan en la intensificación de los huracanes.

2.2 Análisis estructural hidrodinámico.

Debido a su naturaleza flexible, las TLP's presentan grandes desplazamientos en su plano horizontal con componentes de alta y baja frecuencia. Cuando las TLP's son excitadas dinámicamente su respuesta es altamente no-lineal y las fuerzas de inercia son predominantes. Dentro de las principales fuentes de no linealidad en la respuesta de una TLP bajo acciones ambientales, se pueden mencionar: 1) fuerzas del oleaje de segundo orden (*slow drift* y *springing*), 2) la rigidez geométrica de los tendones debida al desplazamiento lateral (*offset*) y vertical descendiente (*setdown*) de la plataforma y 3) el término de arrastre, con variación cuadrática de la velocidad de las partículas de agua, de la ecuación de Morison para evaluar el intervalo viscoso de las fuerzas de onda. Para incluir las no-linealidades del sistema es necesario efectuar análisis estructurales paso a paso en el dominio del tiempo.

Basados en las características dinámicas de una TLP, el análisis estructural del casco de flotación de los tendones y risers, puede efectuarse de varias maneras. En aguas someras e intermedias, inicialmente los movimientos de la plataforma, considerándola como un cuerpo rígido, son evaluados sin tomar en cuenta el comportamiento dinámico tanto de los tendones como de los risers. Después de esto, los tendones y los risers son evaluados uno a uno a través de



un análisis dinámico. Este análisis es efectuado usando el método de los elementos finitos, considerando los movimientos calculados de la plataforma como desplazamientos prescritos en la parte superior de estos componentes estructurales. Esta metodología es conocida como análisis desacoplado (SONG y KAREEM, 1994).

En aguas profundas, la longitud y las dimensiones de los tendones y de los risers son tales que sus masas y las cargas que actúan sobre ellos son de magnitud significativa cuando se comparan con la masa y las fuerzas actuantes en la plataforma. Más allá de esto, esos elementos con gran flexibilidad presentan deformaciones axiales y laterales (curvaturas) significativas. La importancia relativa de la dinámica de los tendones aumenta con la profundidad del sitio en que se encuentra instalada la plataforma. En estos casos es recomendable efectuar un análisis acoplado del conjunto plataforma-tendones-risers. En esta filosofía, el análisis del sistema estructural es efectuado simultáneamente, tomándose en cuenta las propiedades dinámicas de las líneas esbeltas (tendones, risers), las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre ellas y su interacción con el cuerpo flotante. De esta forma, los movimientos de la plataforma y las fuerzas en los tendones son obtenidos conjuntamente.

2.2.1 Ecuaciones de movimiento.

En el análisis acoplado la plataforma flotante es considerada como un cuerpo rígido con 6 grados de libertad (GDL), tres traslaciones (*surge*, *sway* y *heave*) en las direcciones de los ejes X, Y y Z, respectivamente, y tres rotaciones (*roll*, *pitch* y *yaw*) alrededor de los ejes anteriores. La unidad flotante es conectada a los tendones que a la vez son modelados como elementos finitos



tridimensionales (3D) de tipo viga no lineal. La unión de los tendones tanto con la plataforma como con la cimentación en el lecho marino es efectuada a través de una junta flexible (*flex joint*) que permite rotaciones alrededor de los tres ejes. En la Figura 2-4 se puede observar el modelo acoplado para el análisis estructural de la TLP con sus 6 grados de libertad.

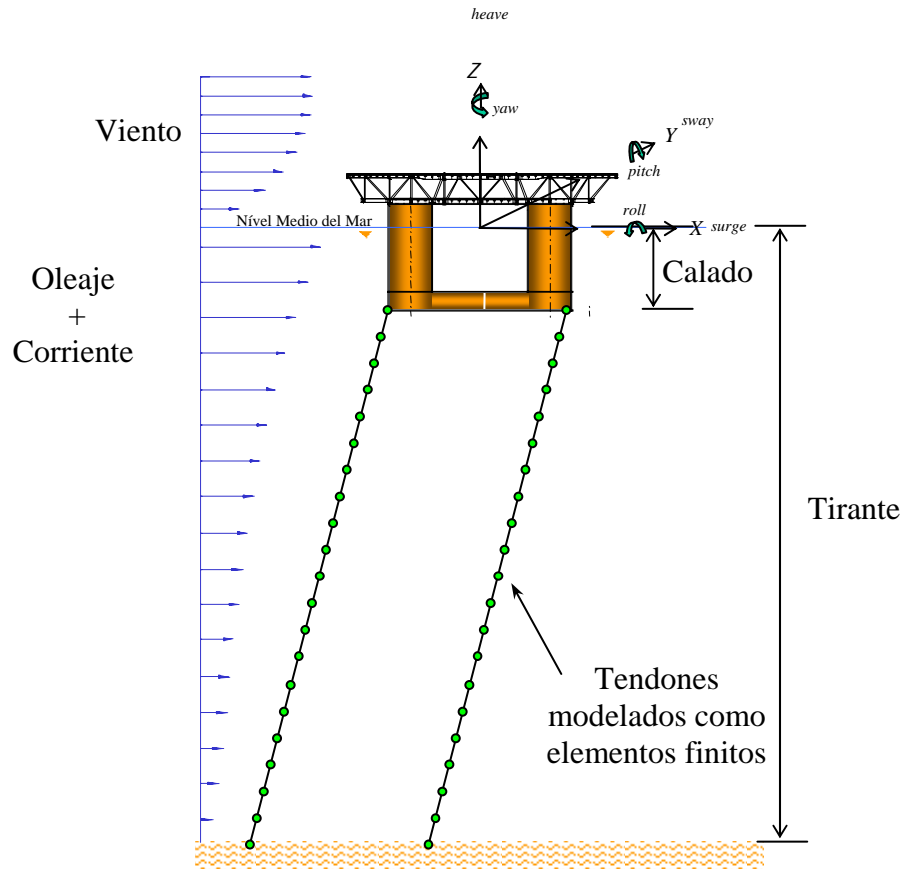


Figura 2-4. Modelo acoplado para el análisis estructural de una TLP.

De la aplicación del método de los elementos finitos al sistema estructural resulta un sistema 3D de ecuaciones no lineales que describen el equilibrio dinámico entre las fuerzas de inercia, de amortiguamiento, de restauración y de las acciones actuantes sobre la TLP. Estas ecuaciones de movimiento pueden ser establecidas en forma matricial, genéricamente como:



$$\vec{M} \cdot \ddot{\vec{X}} + \vec{C} \cdot \dot{\vec{X}} + \vec{K} \cdot \vec{X} = \vec{F}(\vec{X}, \dot{\vec{X}}, \ddot{\vec{X}}, t) \quad (2.7)$$

Donde:

\vec{X} es el vector de desplazamientos de los GDL de la estructura,

$\dot{\vec{X}}$ es el vector de velocidades de los GDL de la estructura,

$\ddot{\vec{X}}$ es el vector de aceleraciones de los GDL de la estructura,

\vec{M} es la matriz de masas del sistema,

\vec{C} es la matriz de amortiguamiento del sistema,

\vec{K} es la matriz de rigidez del sistema, y

$\vec{F}(\cdot)$ es el vector de las fuerzas actuantes en la TLP.

Debe observarse que las matrices \vec{M} , \vec{C} , \vec{K} y el vector $\vec{F}(\cdot)$, incluyen dos componentes: la primera relacionada con el cuerpo rígido de la unidad flotante y la segunda con las estructuras esbeltas de los tendones y los risers. De esta forma, se obtienen matrices que pueden ser expresadas como:

$$\vec{M} = \vec{M}_P + \vec{M}_E$$

$$\vec{C} = \vec{C}_P + \vec{C}_E \quad (2.8)$$

$$\vec{K} = \vec{K}_P + \vec{K}_E$$

$$\vec{F}(\cdot) = \vec{F}(\cdot)_P + \vec{F}(\cdot)_E$$



Donde:

el subíndice P hace referencia a la plataforma flotante, y

el subíndice E se refiere a los miembros esbeltos (risers y tendones).

El cuerpo rígido de la plataforma, constituido por las columnas y los pontones, generan los siguientes términos: la masa estructural, \vec{M}_{PE} , y la masa adherida, \vec{M}_{PA} , componen la matriz de masas de la plataforma flotante, $\vec{M}_P = \vec{M}_{PE} + \vec{M}_{PA}$. \vec{M}_{PE} debe tomar en cuenta los equipos permanentes y variables. Los términos de la masa adherida pueden ser evaluados con las fórmulas presentadas por HOOFT (1971) o a través de un análisis de difracción de oleaje. \vec{C}_P es el amortiguamiento debido al potencial lineal del oleaje (FALTINSEN, 1993); la matriz de rigidez \vec{K}_P representa las fuerzas de restauración (CHOU et al., 1983); y el vector de fuerzas sobre la plataforma es compuesto por las fuerzas hidrodinámicas debidas al oleaje y a las corrientes marinas, $\vec{F}_{POeC}(\cdot)$, y por el vector de cargas de viento, $\vec{F}_{PV}(\cdot)$, $\vec{F}_P(\cdot) = \vec{F}_{POeC}(\cdot) + \vec{F}_{PV}(\cdot)$.

La modelación de los tendones y los risers a través de elementos finitos, produce los siguientes componentes: las matrices de masa estructural, \vec{M}_{EE} , y de masa adherida no lineal, \vec{M}_{EA} , $\vec{M}_E = \vec{M}_{EE} + \vec{M}_{EA}$; la matriz de amortiguamiento, \vec{C}_E ; la matriz de rigidez no lineal, \vec{K}_E ; y el vector de fuerzas en los nodos, $\vec{F}_E(\cdot)$, incluyendo el peso propio, las cargas del oleaje y corriente (normalmente calculadas con las fórmulas de Morison) y el empuje por flotación en los elementos.

El número de ecuaciones contenidas en la expresión matricial (Eq. 2.7) es definido principalmente por la malla de elementos finitos utilizada en el modelo de



las líneas esbeltas. En el análisis estructural del sistema se debe tomar en cuenta el comportamiento no lineal de los tendones y risers (MATHISEN, 1990) a través de un método de integración de las ecuaciones de movimiento paso a paso, por ejemplo el método de Runge Kutta de cuarto orden (PAULLING, 1992) o el método de Newmark con el esquema Newton-Rapson (MOURELLE, 1993).

2.3 Diseño de lo tendones.

El diseño de los tendones de una TLP debe satisfacer una serie de estados límite, dentro de los cuales se encuentra el Estado Límite Último, el Estado Límite de Servicio, el Estado Límite Accidental y el Estado Límite de Fatiga.

2.3.1 Estado límite último.

En este estado límite se lleva a cabo la revisión de la capacidad estructural de los elementos del tendón. La revisión de la capacidad considera tanto la fluencia como la ruptura, para lo cual deberán tomarse en cuenta las siguientes condiciones:

Tensiones extremas en el tendón

Como mínimo deberán considerarse los siguientes componentes de tensión en el elemento estructural:



- ✦ La pre-tensión de los tendones (tensión estática)
- ✦ Tensión debido al desplazamiento vertical de la plataforma (Set down) debido al desplazamiento lateral,
- ✦ Tensiones debidas al oleaje de primer orden (Wave Frequency)
- ✦ Tensiones debidas al oleaje en baja frecuencia (Low Frequency) y a las ráfagas de viento y variaciones lentas del flujo.
- ✦ Tensiones debidas a efectos del oleaje de segundo orden de alta frecuencia (Ringing y springing)
- ✦ Tensiones generadas por la influencia del VIV (Vortex Induced Vibrations) del casco en las respuestas de los tendones
- ✦ Tensiones por el efecto de VIV en el tendón.

Los componentes adicionales que se deben considerar son:

- ✦ Holguras por fabricación, instalación y tolerancias de lectura de tensiones
- ✦ Requerimientos operacionales (flexibilidad operacional de operaciones de lastrado)
- ✦ Tolerancia por mal posicionamiento de la cimentación
- ✦ Hundimiento del suelo marino en el campo (del yacimiento)

La capacidad de esfuerzo último (fluencia y ruptura) de elementos estructurales es evaluada usando un racional y justificable enfoque de ingeniería.

Los esfuerzos por flexión a lo largo del tendón son analizados y tomados en cuenta en el diseño. Para el modo restringido, los esfuerzos por flexión en el tendón por lo general son bajos. Para los tendones, casi flotantes, la combinación



de cargas ambientales (axial y de flexión) y la alta presión hidrostática puede ser una combinación gobernante. Las combinaciones finales (envolventes) de esfuerzos y giros del tendón (elementos flexibles) deben ser tomadas en cuenta en el diseño.

Para componentes del tendón específicos como acoplamientos, elementos flexibles, conexiones superiores e inferiores, etc. la distribución de esfuerzos deberá determinarse por un análisis apropiado de elemento finito.

Si temporalmente (parte de un ciclo de alta frecuencia) la pérdida de esfuerzos en el tendón está permitida, el análisis dinámico del tendón deberá ser conducido para evaluar los efectos en todo el sistema del tendón y estructuras de apoyo. Alternativamente el modelo de prueba debe ser revisado. El razonamiento de esto es que de la pérdida de tensión podría resultar en efectos perjudiciales sobre el tendón, conexiones, o elementos flexibles.

El diseño estructural de tendones puede llevarse a cabo utilizando los códigos DNV-OS-C101, API-RT-2T o NORSOK, N-004.

Determinando los esfuerzos máximos en los tendones, las componentes de los esfuerzos relevantes deberán superponerse a los esfuerzos máximos de tensión del tendón, a la mínima tensión del tendón o al máximo ángulo del tendón, al más crítico.

Tales componentes adicionales de tensión pueden ser:

- ✦ Esfuerzos de flexión debidos a cargas laterales y movimientos del tendón.





- ✦ Esfuerzos por flexión debidos a la rigidez rotacional de las juntas flexibles.
- ✦ Esfuerzos térmicos en el tendón debidos a diferencias de temperatura en la sección transversal.
- ✦ Esfuerzos radiales debidos a la presión hidrostática.

2.3.2 Estado límite de servicio.

El estado límite de servicio para estructuras de acero costa afuera, corresponde al criterio aplicable al uso normal o a la durabilidad de la estructura durante su vida útil.

Los estados límites de servicio que debe cumplir una estructura de este tipo son:

- ✦ Deflexiones que pueden alterar el efecto de acción de las fuerzas.
- ✦ Deformaciones que pueden cambiar la distribución de las cargas entre objetos rígidos apoyados y la estructura que los soporta.
- ✦ Vibraciones excesivas que producen inconformidad o afectan componentes no estructurales.
- ✦ Movimientos que exceden los límites de los equipos.
- ✦ Deformaciones inducidas por temperatura.
- ✦ La prevención de deflexiones con la ubicación final de operación de los equipos.



2.3.3 Estado límite accidental.

En la fase de diseño, se pondrá atención a la disposición y arreglos de los equipos para aminorar los efectos adversos de eventos accidentales.

El diseño estructural con respecto al estado límite accidental implica un procedimiento que considera dos etapas:

- ✦ La resistencia de la estructura para un evento accidental relevante,
- ✦ La capacidad de la estructura después de un evento relevante.

La integridad estructural global se deberá mantener durante y después de un evento accidental. Se deberá garantizar que las cargas que se presentan con un evento accidental de diseño no serán causa del colapso total de la estructura.

Los eventos accidentales más relevantes para los tendones son:

- ✦ Pérdida del tendón
- ✦ Inundación del tendón
- ✦ Dejar caer objetos
- ✦ Inundación de compartimientos del casco de flotación.

La pérdida del tendón requiere de un análisis con cargas ambientales con una probabilidad anual de 10^{-2} de excedencia para satisfacer el estado límite accidental. Lo mismo aplica para la inundación del tendón, si es relevante. Los objetos caídos pueden causar daños a los tendones y en particular a las conexiones superiores e inferiores que están expuestas. La flotación de los compartimientos del casco y los efectos en el diseño serán analizados completamente.



2.3.4 Estado límite de fatiga.

En el diseño de los componentes de los tendones, se debe tomar en cuenta el daño por fatiga generado por la presencia de ciclos de esfuerzos. El análisis de fatiga se lleva a cabo usando las curvas S-N, donde S es la magnitud de los esfuerzos y N es el número de ciclos para la falla. La vida a la fatiga de los tendones está definida por el lapso de tiempo hasta la aparición de grietas. La variación de los esfuerzos en cualquier sección de la línea de amarre es determinada por medio de un análisis estructural dinámico. Estos esfuerzos cambian a lo largo del perímetro de la circunferencia del tendón. Es importante verificar que la curva S-N corresponda a las condiciones que representan los materiales del tendón, ambientales, rangos de ciclos de esfuerzo y frecuencia y esfuerzos promedio.

En general las curvas S-N, están basadas en un 97.6% de probabilidad de subsistencia, correspondientes a las curvas de valor medio menos una desviación estándar de los datos experimentales. La vida por fatiga de componentes estructurales debe estar basada en la vida a la fatiga especificada de la estructura. Si la vida por fatiga no está especificada, comúnmente se puede adoptar un valor de 20 años. (DNV-OS-C101, 2004).

El en Capítulo IV de este trabajo se presenta el procedimiento detallado para evaluar la vida a la fatiga de los tendones de una TLP, utilizando curvas S-N y la regla de Miner para la acumulación de daños.





Factores de diseño por fatiga.

Los factores de diseño por fatiga son aplicados para reducir la probabilidad de falla por fatiga de los tendones durante la vida útil de la plataforma. Estos factores de seguridad son dependientes del tipo de componente, con respecto a la integridad estructural, y a la disponibilidad para la inspección y reparación.

Los requerimientos de diseño se pueden expresar alternativamente como el producto del daño acumulado por el factor del diseño por fatiga (FDF), cuyo resultado deberá ser menor o igual que 1.0.

En la Tabla 2.4 se muestran los factores de diseño por fatiga para elementos estructurales cuya falla tendría consecuencias bajas (DNV-OS-C101, 2004).

Tabla 2.5. Factores de diseño de Fatiga (FDF)

FDF	Elemento estructural
1	Estructura interna, accesible y no soldada directamente a la parte sumergida.
1	Estructura externa, accesible para inspección regular, reparar en seco y condiciones de limpieza.
2	Estructura interna, accesible y soldada directamente a la parte sumergida.
2	Estructura externa no accesible para inspección y reparación en seco, y condiciones de limpieza.
3	Áreas no accesibles, áreas no planas para ser accesadas para inspección y reparación durante la operación.



Los factores de diseño por fatiga están basados en las consecuencias substanciales que traerá consigo la falla estructural, tales como:

- ✦ Peligro de pérdida de vidas humanas.
- ✦ Contaminación significativa.
- ✦ Consecuencias económicas mayores.

2.4 Vida a la fatiga de los tendones.

La vida a la fatiga permisible está en función de la inspección, la habilidad para reparar, la redundancia, la habilidad para predecir el daño por fatiga, y las consecuencias de la falla de un elemento estructural. En general, es recomendable que el diseño de la vida por fatiga de los elementos estructurales sea de al menos tres veces la vida de servicio de la plataforma. Para elementos críticos cuya posible falla pueda ser catastrófica y para un elemento de difícil acceso para inspección o reparación, debe considerarse el uso de un margen adicional de seguridad (API, 1997).

Las soldaduras localizadas debajo de 150 m por debajo de nivel del mar deberán asumirse como inaccesibles para inspección.





CAPÍTULO III

“ANÁLISIS DE FATIGA DE LOS TENDONES”

En la vida real se observa que ciclos repetidos de carga y descarga debilitan los elementos estructurales a lo largo del tiempo, incluso cuando las cargas inducidas están considerablemente por debajo de la tensión de ruptura estática o del límite elástico del material. A este fenómeno se le conoce como *Fatiga*. Cada ciclo de esfuerzos contribuye al deterioro o daño del elemento. Después de un determinado número de ciclos, el elemento está tan debilitado que en sus juntas se inicia la aparición de las grietas y puede romperse por Fatiga. Sin embargo, se observa también que algunos elementos estructurales sujetos a un cierto valor de esfuerzos no alcanzan la ruptura aun ante un número elevado de ciclos de trabajo. Todo esto hace que la Fatiga sea realmente compleja y una de las primeras causas de falla de muchas estructuras construidas con materiales metálicos. Ejemplos de falla por fatiga los tenemos en máquinas rotativas, tornillos, alas de aviones, productos de consumo, ruedas de ferrocarril, plataformas marinas, barcos, vehículos y puentes, entre otros.

La vida a la fatiga puede definirse como la *"falla debida a cargas cíclicas, que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta llegar a la falla final por fractura"* (Fuchs, 1980). El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio.

Los análisis estructurales lineales y no lineales no predicen las fallas por fatiga. Estos análisis calculan la respuesta de un diseño sujeto a un entorno





específico de cargas y restricciones. Si los resultados de desplazamientos y tensiones están por debajo de un cierto nivel admisible, el ingeniero proyectista puede concluir que el diseño es seguro en ese entorno de solicitaciones con independencia de cuantas veces se aplique la carga.

Los resultados de los análisis estructurales dinámicos se usan como los datos básicos de partida para efectuar un estudio de fatiga. El número de ciclos requeridos para que la falla por fatiga ocurra en un punto depende del material y de la fluctuación de los esfuerzos. Esta información, para ciertos tipos de materiales metálicos, nos la proporcionan las llamadas curvas S-N. Las curvas S-N representan la relación de resultados empíricos de una gama de tensiones y sus correspondientes números de ciclos a la falla.

El daño por fatiga al término de un periodo de tiempo está invariablemente presente en cualquier sistema estructural sujeto a ciclos de carga. Esta magnitud depende del número de ciclos de esfuerzos revocables y de la amplitud de los esfuerzos. Evidentemente, las plataformas de piernas atirantadas tipo TLP son altamente vulnerables al daño por fatiga. El sistema de amare al fondo marino de una TLP es formado por un grupo de tendones, los cuales están conformados por una serie de elementos tubulares unidos generalmente con soldadura por sus extremos. Uno de los estados de falla de una TLP está definido como la pérdida de los tendones. La falla en los puntos críticos debe ser estudiada para determinar la confiabilidad a la fatiga del sistema. Los métodos más utilizados para la evaluación del estado límite de fatiga son: a) las curvas S-N y b) la mecánica de la fractura.



En el presente estudio, la falla por fatiga de las uniones de los tendones se ha tomado como la aparición de grietas. Dentro del procedimiento para evaluar la vida a la fatiga de los tendones, inicialmente se debe obtener la respuesta del elemento estructural en el dominio del tiempo bajo condiciones de cargas aleatorias de viento, oleaje y corrientes marinas. Con base en la variación de los esfuerzos en el tendón, las estimaciones del daño por fatiga en las uniones se llevan a cabo con ayuda de curvas S-N y la Regla de Miner. Los rangos de esfuerzos y su número de ciclos son obtenidos a través del método de conteo denominado como Rainflow. El daño total es calculado sumando la acumulación de los daños parciales generados por los estados de mar identificados a ocurrir durante la vida útil de la plataforma. Este procedimiento se describe detalladamente en las siguientes secciones.

A continuación se presenta un esquema donde se describe la metodología a seguir para llevar a cabo la evaluación del daño por fatiga de los tendones (ver Figura 3-1).



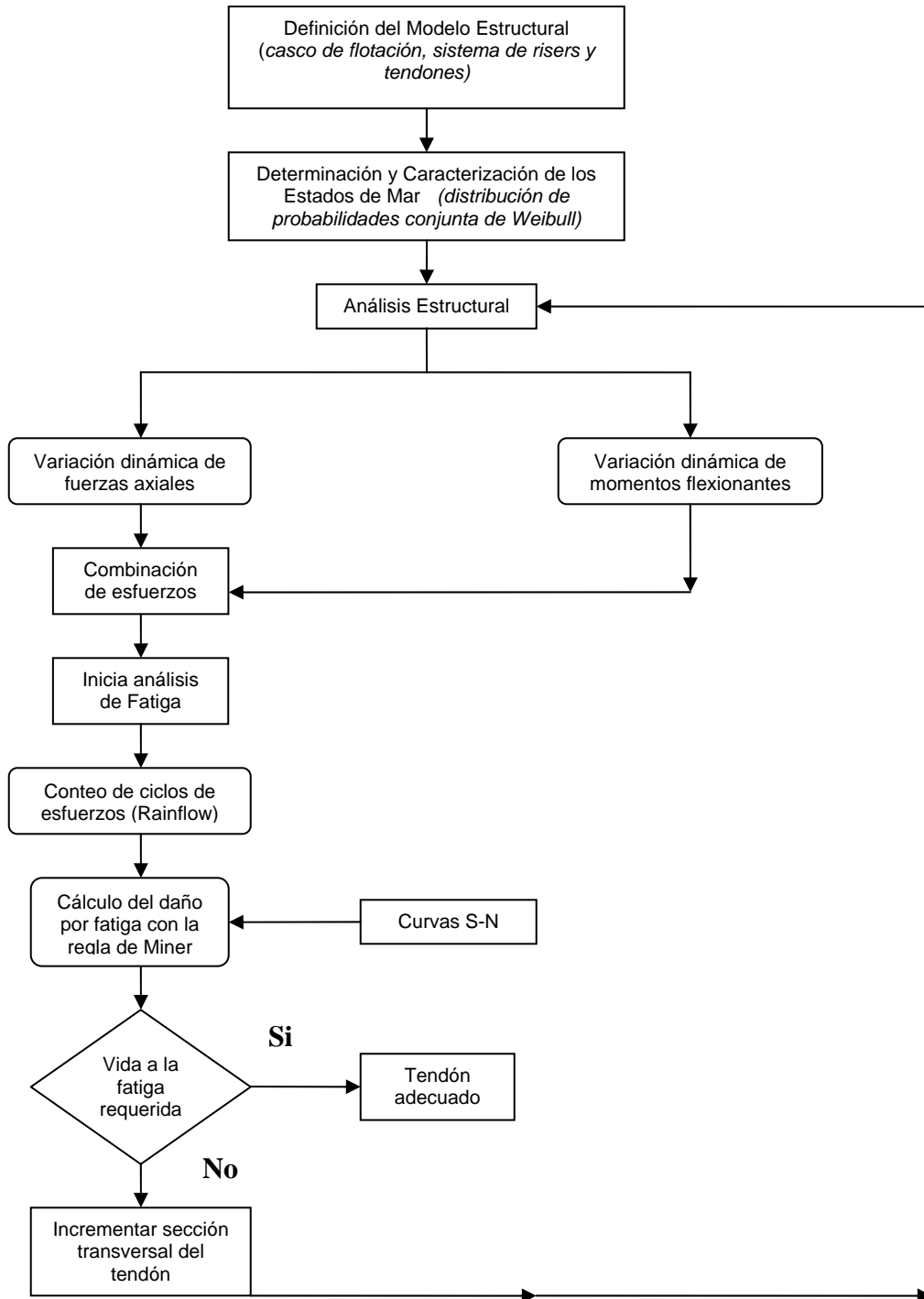


Figura 3-1. Descripción de la metodología para realizar la evaluación del daño por fatiga.



3.1 Metodología basada en curvas S-N y la regla de Miner.

El problema de fatiga puede ser resuelto haciendo uso de las curvas S-N y la regla de Miner. Las curvas S-N de un material definen valores de esfuerzos alternos versus el número de ciclos requeridos para causar la falla del elemento estructural. La Figura 3-2 muestra una curva S-N típica. Las curvas S-N tienen la siguiente expresión matemática:

$$NS^m = A \quad (3.1)$$

Donde S es el rango del esfuerzo; m y A son constantes empíricas que dependen de las propiedades físicas del material y N es el número de ciclos causantes de la falla.

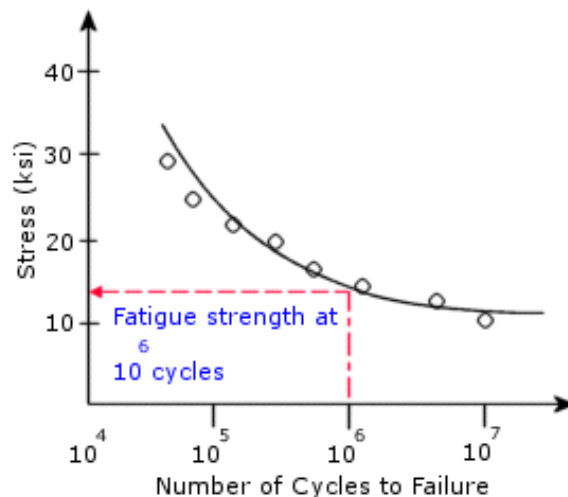


Figura 3-2. Ilustración de un segmento de la curva S-N.



La curva S-N se basa en un nivel de esfuerzos medio σ_m . Para cada material se pueden definir múltiples curvas S-N con diferentes valores de esfuerzo medio.

El análisis de fatiga se basa en la regla de Miner de daño acumulado para estimar la vida a fatiga a partir de la historia de esfuerzos. La estimación se realiza reduciendo los datos de carga dinámica a una secuencia de picos y valles, identificando la magnitud de los rangos de esfuerzos presentes en la respuesta estructural y contando sus ciclos. Para realizar un análisis de Fatiga se debe proporcionar la siguiente información:

- ✦ Propiedades a fatiga de los materiales.
- ✦ Variación de las cargas cíclicas.
- ✦ Opciones de análisis de fatiga.

Las TPL's están sujetas a cargas ambientales que se presentan de forma aleatorias en la naturaleza. Consecuentemente, los esfuerzos en los tendones también se presentan de forma aleatoria. La estimación del daño por fatiga bajo cargas estocásticas se lleva a cabo por la regla de Miner. En esta regla se asume que el daño D_j en la estructura es constante en un rango de esfuerzos S_j , y es igual a:

$$D_j = \frac{1}{N(S_j)} \quad (3.2)$$

Donde $N(S_j)$ es el número de ciclos para la falla en el rango de esfuerzos S_j . El daño total acumulado en el tiempo T_s está dado por:



$$D = \sum_{j=1}^{N(T_s)} \frac{1}{N(S_j)} \quad (3.3)$$

Donde $N(T_s)$ es el número total de ciclos de esfuerzo en un tiempo T_s . En esta ecuación se asume que la acumulación del daño D es independiente de la secuencia de ocurrencia de cada ciclo de carga.

Usando las curvas S-N, el daño acumulado D se obtiene como:

$$D = \sum_{j=1}^{N(T_s)} \frac{S_j^m}{A} \quad (3.4)$$

3.2 Descripción probabilística de los estados del mar.

Definición de estado de mar.

Un estado de mar se define como aquella situación o periodo de tiempo en que, y debido a la inercia del fenómeno, se considera que existe un cierto equilibrio entre las fuerzas generadoras y las fuerzas restauradoras que intervienen, lo cual produce que su manifestación permanezca aproximadamente en estado estacionario.



Procesos ambientales de corto plazo.

Las características ambientales, como las alturas de ola y la velocidad del viento, en una localidad específica, constituyen procesos aleatorios estrictamente no estacionarios con variaciones lentas en sus propiedades estadísticas. No obstante, los procesos ambientales pueden ser divididos en periodos de corto plazo, generalmente con una duración de 3 horas, en donde son aproximadamente estacionarios. Cada proceso ambiental de corto plazo es llamado estado de mar.

Cada estado de mar de corto plazo es normalmente definido por los parámetros del oleaje, viento, corriente y marea, contenidos en el vector \vec{Y} :

$$\vec{Y} = \{H_s, T_p, \theta_o, V_v, \theta_v, V_c, H_m\}^T \quad (3.5)$$

Donde:

- H_s es la altura significativa de las olas,
- T_p es el periodo pico de las olas,
- θ_o es la dirección de incidencia de las olas,
- V_v es la velocidad del viento,
- θ_v es la dirección del viento,
- V_c es la velocidad de la corriente marina superficial,
- θ_c es la dirección de la corriente, y
- H_m es la altura de la marea (marea astronómica, H_{ma} , más la marea debida al estado de mar, H_{ms}).



Las variables en la expresión (3.5) constituyen los datos principales de cada condición ambiental necesarios para evaluar las cargas dinámicas en los elementos estructurales de una estructura marina cualquiera.

Procesos ambientales de largo plazo.

En periodos de tiempo largos, los estados del mar presentan variación y constituyen procesos no estacionarios. Generalmente, para obtener las características de los parámetros ambientales de largo plazo se hacen muestreos por lo menos durante un año varias veces al día. Por ejemplo, la medición de las alturas de ola se hace normalmente a cada tres horas durante un periodo de 10 a 20 minutos para así producir un registro sin sesgo del comportamiento de las olas del mar.

Un proceso ambiental de largo plazo es definido completamente por la función de densidad de probabilidades (FDP) conjunta de sus parámetros $f_Y(\bar{y})$. Debido al hecho de que esa distribución conjunta es raramente disponible, la información estadística de largo plazo es establecida a través de un conjunto de distribuciones condicionadas. Por ejemplo, BITNER GREGERSEN y HAVER (1991) propusieron la siguiente función de probabilidades, condicionada a la variable de dirección $\Theta=\theta_i$, para una localidad en el Mar del Norte en las costas de Noruega:

$$f_{H_s, T_p, V_c, V_v, H_{ms}}(h_s, t_p, v_c, v_v, h_{ms} | \theta_i) = f_{H_s | \Theta}(h_s | \theta_i) \cdot f_{V_c | H_s, \Theta}(v_c | h_s, \theta_i) \cdot f_{V_v | H_s, \Theta}(v_v | h_s, \theta_i) \cdot f_{H_{ms} | H_s, \Theta}(h_{ms} | h_s, \theta_i) \cdot f_{T_p | H_s, \Theta}(t_p | h_s, \theta_i) \quad (3.6)$$



- Donde: $f_{V_c|H_s,\Theta}(v_c|h_s,\theta_i)$ es la FDP de la velocidad de corriente condicionada a las alturas significantes del oleaje,
- $f_{V_v|H_s,\Theta}(v_v|h_s,\theta_i)$ es la FDP de la velocidad del viento condicionada a las alturas significantes del oleaje,
- $f_{H_{ms}|H_s,\Theta}(h_{ms}|h_s,\theta_i)$ es la FDP de la marea debida el estado del mar condicionada a las alturas significantes del oleaje,
- $f_{T_p|H_s,\Theta}(t_p|h_s,\theta_i)$ es la FDP de los periodos pico condicionada a las alturas significantes del oleaje, y
- $f_{H_s|\Theta}(h_s|\theta_i)$ es la FDP de las alturas significantes del oleaje condicionada a la dirección de incidencia $\Theta = \theta_i$.

Las funciones que definen a un estado de mar de largo plazo son obtenidas a través del ajuste de modelos de probabilidades a las tablas de frecuencia de ocurrencia conjunta de los parámetros ambientales. La elección de los modelos está en función del comportamiento estadístico de los datos registrados. Generalmente, las funciones de altura de ola significativa y de velocidades de viento condicionadas a las alturas de ola siguen una distribución de Weibull, mientras que la función condicionada de los periodos de ola es aproximada ya sea a través de una distribución del tipo Lognormal o del tipo Weibull, como se puede ver en la Figura 3-3. Debido a la versatilidad de la función de Weibull para representar distribuciones de probabilidad, este modelo es descrito en la siguiente sección.

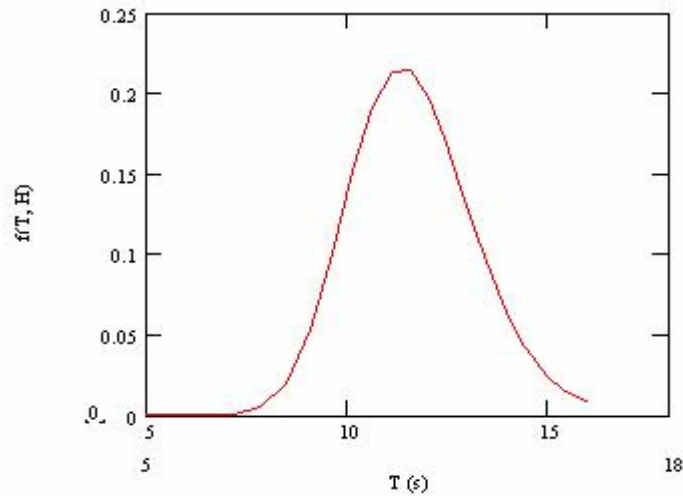


Figura 3-3. Función de distribución de probabilidades de Weibull.

La caracterización de largo plazo de los estados de mar puede representar adecuadamente muchos de los fenómenos ambientales de una localidad dada. Por ejemplo, en el Golfo de México, los estados de mar extremos son generados por eventos ambientales excepcionales con baja tasa anual de ocurrencia, tal como huracanes y tormentas de invierno. De esta forma, la población de los estados de mar de tormentas puede ser caracterizada también por una distribución de probabilidades conjunta de los parámetros ambientales $f_y(\bar{y})$, similar a la ecuación (3.6), ajustada a los datos referentes a estos eventos ambientales extraordinarios.



Modelo de Weibull

La distribución de probabilidades de Weibull es el modelo más simple usado para representar procesos no Gaussianos. La distribución de Weibull tres parámetros se define como (BARRANCO, 2004):

$$f(H_{SIG}) = \frac{\lambda_w}{\alpha_w} \left(\frac{H_{SIG} - u_w}{\alpha_w} \right)^{\lambda_w - 1} \exp \left(- \left(\frac{H_{SIG} - u_w}{\alpha_w} \right)^{\lambda_w} \right) \quad (3.7)$$

Donde: H_{SIG} es la altura significativa del oleaje
 U_w es el parámetro de localización
 α_w es el parámetro de escala, y
 λ_w es el parámetro de forma de la distribución de probabilidades.

La media ($\mu_{H_{S-m\acute{a}x}}$), la desviación estándar ($\sigma_{H_{S-m\acute{a}x}}$) y los coeficientes de *skewness* ($\zeta_{H_{S-m\acute{a}x}}$) y *kurtosis* ($k_{H_{S-m\acute{a}x}}$) de la distribución son definidos respectivamente como (BURY, 1975):

$$\mu_{H_{S-m\acute{a}x}} = u_w + \alpha_w \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\lambda_w} \right) \quad (3.8)$$

$$\sigma_{H_{S-m\acute{a}x}} = \alpha_w \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\lambda_w} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\lambda_w} \right)} \quad (3.9)$$



$$\zeta_{Hs_{\max}} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\lambda_w}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)\Gamma\left(1 + \frac{2}{\lambda_w}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\lambda_w}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3.10)$$

$$k_{Hs_{\max}} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{4}{\lambda_w}\right) - 4\Gamma\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)\Gamma\left(1 + \frac{3}{\lambda_w}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\lambda_w}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)\right]^2} + \frac{6\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)\Gamma\left(1 + \frac{2}{\lambda_w}\right) - 3\Gamma^4\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\lambda_w}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\lambda_w}\right)\right]^2} \quad (3.11)$$

Donde: $\Gamma ()$ es la función Gamma.

3.3 Método Rainflow para conteo de los ciclos de esfuerzo.

El método de Rainflow determina el número “n” y la amplitud “S_i” de las gamas de esfuerzos de una señal dinámica. El método recibe su nombre de la analogía de la caída de una gota de agua a lo largo de un tejado.

Éste es el método de conteo de ciclos más empleado en la práctica, asociado a la variación de esfuerzos, propuesto originalmente por MATSUSHI y ENDO en 1968 y presentado en su forma lógica para aplicaciones en fatiga debido al efecto de cargas de amplitud variable por WIRSHIN & SHEHATA (1977).



Para trabajar con el método Rainflow, la señal de esfuerzos debe ser expresada por máximos y mínimos de la señal, o sea, el proceso de conteo debe ser caracterizado por una secuencia de extremos locales, combinando máximos y mínimos para formar medios ciclos.

El método consiste en contar ciclos asociados a una variación de esfuerzos (ΔS_i) a partir de una señal, con los máximos locales considerados (picos y valles) como puede verse en la Figura 3-4. El eje del tiempo es orientado verticalmente con el sentido positivo hacia abajo. Los picos son numerados con números pares y los valles con números impares, la gota de agua o el flujo de lluvia puede escurrir tanto de derecha a izquierda, como de izquierda a derecha de la señal. El inicio y el fin de cada recorrido de escurrimiento define las extremidades de la mitad de un ciclo, pudiendo el recorrido ser indicado en los picos como en los valles.

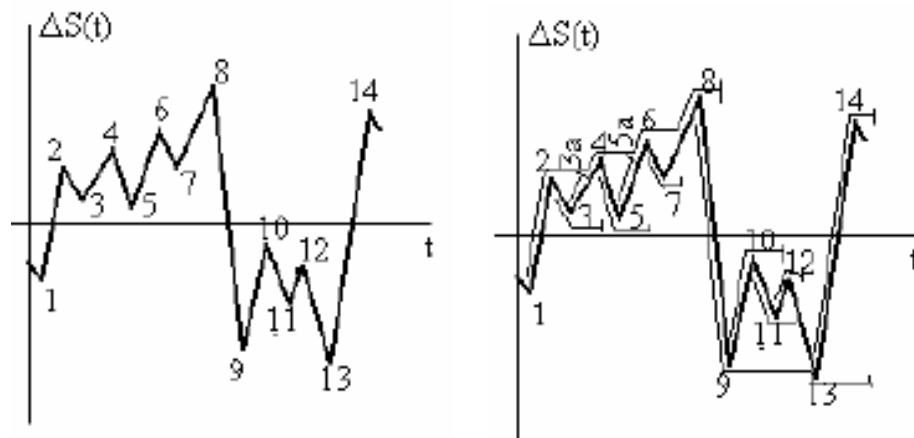


Figura 3-4. Señal de esfuerzos para conteo de ciclos por el método del flujo de gotas de lluvia (RAINFLOW)



Las reglas del método son las siguientes:

- a) El flujo de una gota de lluvia moviéndose a lo largo de un tejado finaliza su recorrido cruzándose con el flujo que cae de un tejado más alto, por ejemplo en la Figura 3-4 el recorrido 12-13 intercepta el recorrido del flujo de lluvia que cae del pico 11, y el recorrido 8-9 intercepta el recorrido del flujo que cae de 7.
- b) Un flujo que cae de la punta de un tejado termina su recorrido si el flujo, al caer, pasa del lado opuesto a un pico que es más positivo que el correspondiente al inicio del recorrido en estudio, o un valle que es más negativo que el del inicio del recorrido, ver en la Figura 3-4 los recorridos 3-3a y 5-5a.
- c) Un nuevo recorrido no es iniciado mientras el anterior no ha concluido.
- d) Cada recorrido completo, por ejemplo 1-8 en la Figura 3-4, es considerado medio ciclo, medios ciclos con variación de esfuerzo igual son combinados para formar ciclos completos.



Factor de concentración de esfuerzos.

El factor de concentración de esfuerzos puede definirse como una amplificación de los esfuerzos en una junta debido a la junta misma o debido a una tolerancia de fabricación con el esfuerzo nominal como un valor de referencia. El esfuerzo máximo es común mencionarlo como el esfuerzo (hot spot) que es usado en la relación S-N para el cálculo de la vida a la fatiga. Este (hot spot stress) se deriva como el factor de concentración de esfuerzos tantas veces el esfuerzo nominal.

Algunas grietas por fatiga tienden a ocurrir en el perímetro del cordón de soldadura, en la capa que refuerza a los elementos estructurales, mostrando la importancia de efectuar un buen diseño de este tipo de conexiones.

El factor de concentración de esfuerzos representa la geometría real del elemento tubular en términos de la relación diámetro/espesor, pero no representa la longitud de transición entre tubulares con diferentes espesores.

El factor de concentración de esfuerzos para transiciones cónicas puede ser deducido de la expresión para esfuerzos locales en juntas, dada por el API-RP 2T, 1997.

La desviación del ángulo entre segmentos de tubulares consecutivos en risers y tendones de una plataforma del tipo TLP dan lugar a concentraciones de esfuerzos no lineales en función de la pre-tensión. Tales efectos pueden ser evaluados mediante un análisis de elemento finito no lineal, más simple, pueden ser evaluados por un método analítico.



Por ejemplo, el esfuerzo máximo cerca de una grieta se produce en una zona de menor radio de curvatura. En una grieta elíptica de longitud $2a$ y ancho $2b$, bajo un esfuerzo externo aplicado σ , el esfuerzo en los extremos de los ejes principales está dado por:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right) = 2 \sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (3.12)$$

donde ρ es el radio de curvatura de la grieta. El factor de concentración de esfuerzos es la relación del esfuerzo máximo (σ_{\max}) a un esfuerzo de referencia (σ) de la sección transversal bruta. Como el radio de curvatura tiende a cero, el esfuerzo máximo tiende a infinito. El factor de concentración de esfuerzos está en función de la geometría de la grieta, y no del tamaño de la misma. Estos factores son usados para predecir los esfuerzos que por otra parte no pudieran ser analizados basándose en materiales semejantes.





CAPÍTULO IV

“APLICACIÓN PARA UNA TLP EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO”

La bahía de Campeche está situada al sur del Golfo de México y en ella están localizadas las reservas de hidrocarburos más importantes hasta ahora descubiertos en aguas someras mexicanas (ver Figura 4-1). Esta región contribuye actualmente con el 75% de la producción total del país y se espera que en un futuro próximo sean incorporadas las reservas de yacimientos localizados en tirantes superiores a los 200 metros.

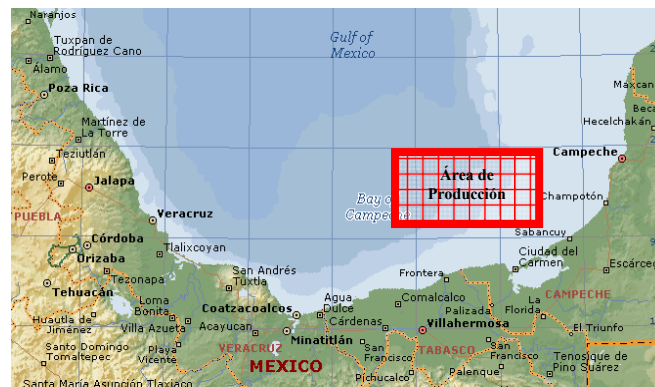


Figura 4-1. Área actual de la producción petrolera en la bahía de Campeche, México.

Debido a su posición geográfica, el Golfo de México es frecuentemente atacado por fenómenos meteorológicos (huracanes y tormentas de invierno) que constituyen condiciones ambientales extremas que deben ser tomadas en cuenta en el diseño de estructuras marinas. La Figura 4-2 presenta imágenes de satélite de dos huracanes aconteciendo en el Norte del océano Atlántico



y en el Sur del Golfo de México, respectivamente. La tormenta más intensa sobre las plataformas mexicanas aconteció en el año de 1995 con el paso del huracán Roxanne, generando vientos con velocidad media horaria de 140 km/hr y alturas de ola alrededor de 16 metros. Posterior al paso de la tormenta tropical, fueron reportados daños en estructuras menores (escaleras, soportes de equipo y tuberías) y en tuberías submarinas (SORIANO *et al.*, 1998). Sin embargo, en otras situaciones todavía más críticas, los huracanes pueden generar el colapso de las estructuras como fue el caso de la plataforma Unical durante el paso del huracán Hilda en la costa oriental de los Estados Unidos (BEA, 1997) y las decenas de plataformas en la parte estadounidense del Golfo de México durante los huracanes Katrina y Rita (Buffington, 2007).

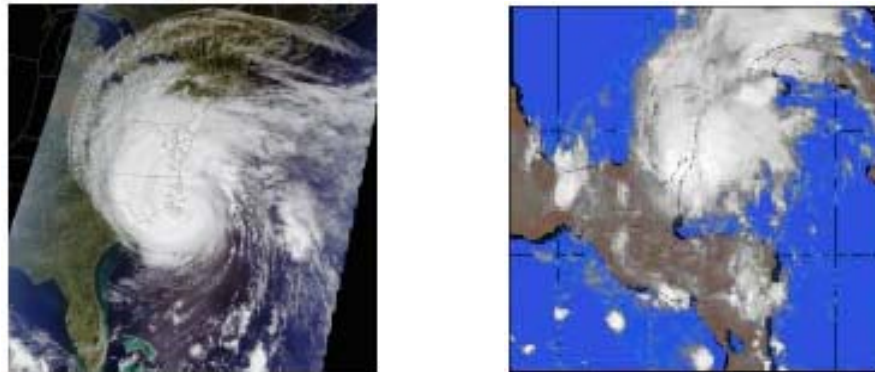


Figura 4-2. Imágenes de satélite de huracanes en el Norte y en el Sur del Golfo de México.

En el presente estudio, se llevó a cabo la evaluación de la vida a la fatiga de los tendones de una TLP localizada en un campo hipotético en la Sonda de Campeche en un tirante de agua de 870 m.



4.1 Descripción del modelo estructural.

La plataforma TLP que será utilizada para la evaluación de la vida a la fatiga de sus líneas de amarre (tendones) está situada en un tirante de agua de 870 m. La TLP tiene un sistema de anclaje compuesto por 8 tendones, dos en cada columna, como se muestran en la Figura 4-3.

El casco de flotación de la TLP está formado por cuatro columnas y cuatro flotadores horizontales (Pontones) que se conectan a las columnas. El peso de la plataforma es de 32070 ton (314500 KN), que tiene correspondencia con un calado de 27.3 m. Las características de la plataforma flotante son descritas a través de la Figura 4-3 y en la Tabla 4.1.

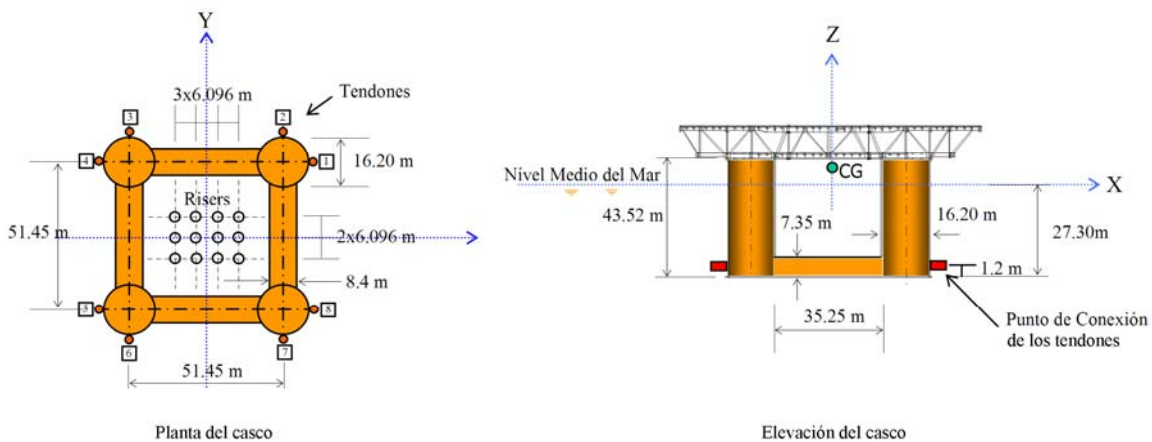


Figura 4-3. Geometría del casco de flotación de la TLP.



Tabla 4.1. Características Principales del Casco de Flotación de la TLP en Análisis.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Columnas	
Número	4
Diámetro	16.2 m
Altura	43.52 m
Espaciamiento (entre ejes)	51.45 m
Pontones	
Número	4
Sección Transversal	8.40 m x 7.35 m
Calado	27.30 m
Peso	32070 ton
Posición Vertical del Centro de Gravedad con relación al Nivel Medio del Mar	5.95 m
Radio de Giro en <i>roll</i>	30.44 m
Radio de Giro en <i>pitch</i>	30.44 m
Radio de Giro en <i>yaw</i>	31.74 m
Área Expuesta al Viento	3000 m ²
Posición del Centróide del Área de Viento con relación a la Base del Casco de Flotación	52.5 m

Los tendones están colocados en el paño exterior de las columnas a una profundidad de 26.1 m con relación al nivel medio del mar. Las características de los tendones se muestran en la Tabla 4.2. El material de los tendones corresponde a un acero tipo API especificación 2W grado 60, con un esfuerzo de fluencia (F_y) con variación de entre 415 MPa a 550 MPa y una resistencia a la tensión última (F_u) con un valor mínimo de 517 MPa (API, 1997).



El sistema de *risers* está compuesto por un grupo de 12 elementos rígidos verticales dispuestos en forma simétrica con relación a los ejes horizontales X y Y en el plano del espejo de agua. En la Tabla 4.3 se describen las características del sistema de *risers*.

Tabla 4.2. Características de los tendones de la TLP en análisis

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Número de Tendones	8
Longitud	843.9 m
Diámetro Exterior	0.81280 m
Diámetro Interior	0.76517 m
Peso Seco	4.5453 kN/m
Rigidez Axial (EA)	12256621.73 kN/m ³
Rigidez a la Flexión (EI)	1907428.58 kN*m ²
Pre- tensión	13239 kN

Tabla 4.3. Características del sistema de risers de la TLP en análisis.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Número de Risers	12
Diámetro	0.261 m
Área de la Sección Transversal	0.02668 m ²
Espaciamento (entre ejes)	6.096 m
Peso Seco	2.054 kN/m
Peso Específico del Aceite	8.34 kN/m ³
Peso del Riser Lleno de Aceite	2.277 kN/m ³



4.2 Estados de mar para el análisis de fatiga.

Para llevar a cabo la evaluación del daño en los tendones de la TLP generado por el oleaje durante su vida de operación, es necesario conocer el diagrama de dispersión del oleaje (alturas de ola Vs. periodo) con sus respectivas probabilidades de ocurrencia. La distribución de probabilidades conjunta de alturas y periodos de ola corresponde a la forma continua de un diagrama de dispersión. Para obtener esta función se llevó a cabo el ajuste de un modelo de probabilidades a una base de datos histórica del oleaje obtenida de modelos numéricos calibrados para la bahía de Campeche (*Oceanweather, 1996*).

La distribución de Weibull tres parámetros, descrita en el Capítulo III, fue utilizada para obtener la función conjunta de probabilidades $f(H_{s_{máx}}, T_p)$ mostrada en la Figura 4-4.

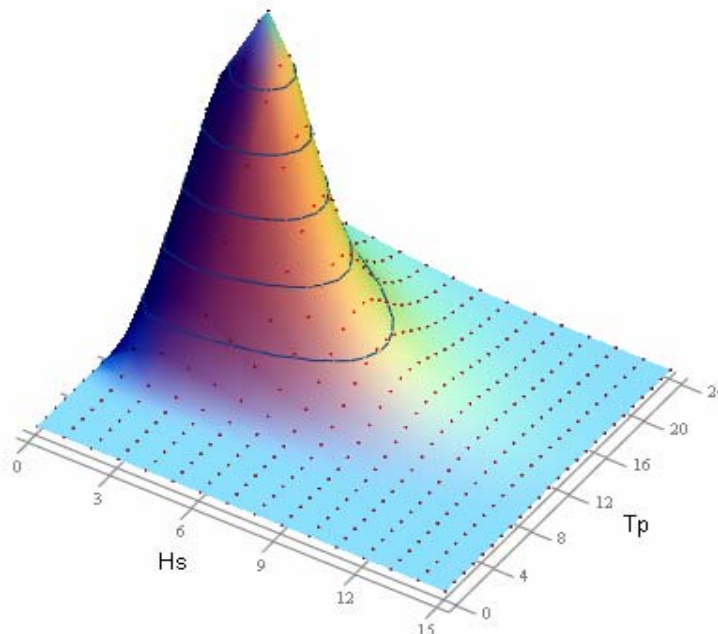


Figura 4-4. Distribución de probabilidades conjunta de alturas y periodos de oleaje.



La Figura 4-4 muestra en el eje “X” la altura de ola significativa H_s , en el eje “Y” el periodo pico de la ola y en el eje “Z” la densidad de probabilidad de ocurrencia conjunta de ambos parámetros.

Para llevar a cabo el análisis estructural de la plataforma se seleccionaron un total de 45 estados de mar con la mayor probabilidad de ocurrencia (ver Tabla 4.4). La función de densidad de probabilidades del oleaje se dividió en intervalos de 2 m de alturas significantes de ola y en intervalos de 2 s. de periodos pico. El volumen debajo de las áreas asociadas a cada conjunto H_s y T_p corresponde a la probabilidad de ocurrencia del respectivo estado de mar. Con base en las alturas de ola significantes de cada estado de mar, se definieron los valores asociados a la velocidad del viento y la velocidad de corriente superficial.

Durante la combinación de alturas y periodos de oleaje se verificó que ambos parámetros correspondieran a oleajes fuera de la región de rompimiento. La formación de olas en el océano generalmente sigue una relación entre altura significativa y su respectivo periodo pico como la siguiente, propuesta para el Mar de Noruega (Haver y Nyhus, 1986):

$$T > 3.5\sqrt{H_s} \quad (4.1)$$

El análisis estructural se efectuó, como descrito en la sección siguiente, para los 45 estados de mar descritos en la Tabla 4.4. En la última columna de la Tabla 4.4 se presenta la probabilidad de ocurrencia de cada estado de mar, la cual corresponde al volumen debajo de la función de densidad de probabilidades conjunta de H_s - T_p asociada a cada par de parámetros.





Tabla 4.4. Parámetros oceanográficos y meteorológicos para cada estado de mar considerado en el análisis de fatiga.

<i>Estado de Mar</i>	<i>H_s (m)</i>	<i>T_p (s)</i>	<i>V_v (m/s)</i>	<i>V_c (m/s)</i>	<i>Probabilidad de ocurrencia</i>
1	1	5	9.13	0.018	3.93E-04
2	1	7	9.13	0.018	7.68E-03
3	1	9	9.13	0.018	3.29E-02
4	1	11	9.13	0.018	6.24E-02
5	1	13	9.13	0.018	6.94E-02
6	1	15	9.13	0.018	5.65E-02
7	1	17	9.13	0.018	3.76E-02
8	3	7	13.08	0.018	1.03E-02
9	3	9	13.08	0.018	4.47E-02
10	3	11	13.08	0.018	8.35E-02
11	3	13	13.08	0.018	9.29E-02
12	3	15	13.08	0.018	7.53E-02
13	3	17	13.08	0.018	4.94E-02
14	5	9	18.23	0.053	2.71E-02
15	5	11	18.23	0.053	4.94E-02
16	5	13	18.23	0.053	5.53E-02
17	5	15	18.23	0.053	4.47E-02
18	5	17	18.23	0.053	2.29E-02
19	7	9	24.58	0.071	1.29E-02
20	7	11	24.58	0.071	2.47E-02
21	7	13	24.58	0.071	2.71E-02
22	7	15	24.58	0.071	2.24E-02
23	7	17	24.58	0.071	1.53E-02
24	9	11	32.13	0.088	1.12E-02
25	9	13	32.13	0.088	1.29E-02
26	9	15	32.13	0.088	1.01E-02
27	9	17	32.13	0.088	6.68E-03
28	11	11	40.88	0.106	4.82E-03
29	11	13	40.88	0.106	5.39E-03
30	11	15	40.88	0.106	4.37E-03
31	11	17	40.88	0.106	2.88E-03
32	13	13	50.83	0.123	2.25E-03
33	13	15	50.83	0.123	1.82E-03
34	13	17	50.83	0.123	1.20E-03
35	15	13	61.98	0.141	9.17E-04
36	15	15	61.98	0.141	7.43E-04
37	15	17	61.98	0.141	4.90E-04
38	17	13	74.33	0.158	3.68E-04
39	17	15	74.33	0.158	2.98E-04
40	17	17	74.33	0.158	1.96E-04
41	19	15	87.88	0.176	1.18E-04
42	19	17	87.88	0.176	7.76E-05
43	21	15	102.63	0.193	4.62E-05
44	21	17	102.63	0.193	3.04E-05
45	23	17	118.58	0.211	1.18E-05
SUMA DE PROBABILIDADES DE OCURRENCIA					1.000





4.3 Análisis estructural.

El análisis estructural de la TLP se efectuó utilizando un modelo acoplado entre la unidad flotante, los tendones y el sistema de *risers* (ver Capítulo II). La plataforma flotante fue modelada como un cuerpo rígido con seis grados de libertad y las líneas de anclaje a través de elementos finitos tipo viga 3D. El análisis dinámico del tipo no lineal, se llevó a cabo en el dominio del tiempo, considerándose la variación aleatoria de las fuerzas ambientales y las fuerzas del oleaje de primer orden.

En los extremos inferiores y superiores de los tendones fueron modeladas juntas flexibles (*flex joints*) a través de resortes con una rigidez rotacional de 4200 kN/rad (ALVES, 1996). Las cargas consideradas en las líneas esbeltas (tendones) incluyen el peso, la flotación y las fuerzas hidrodinámicas. Para el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas se utilizó el modelo de Morison con los coeficientes presentados en la Tabla 4.5 para los diferentes elementos estructurales.

Tabla 4.5. Coeficientes hidrodinámicos para el modelo de Morison.

<i>Parámetro</i>	<i>Tendones</i>	<i>Riser</i>	<i>Unidad Flotante</i>	
		<i>Equivalente</i>	<i>Columnas</i>	<i>Pontones</i>
Diámetro Hidrodinámico	Diámetro Externo	0.904 m	16.20 m	4.603 m
Coefficiente de Arrastre Cd	1.6	3.464	0.7	1.831
Coefficiente de Inercia Cm	2.0	2.0	---	---



Los análisis dinámicos aleatorios tuvieron una duración de 3600 s con un intervalo de tiempo de 0.25 s y una rampa inicial de 360 s. Fue considerado para todos los estados de mar un espectro de alturas de ola del tipo Pierson-Moskowitz y del tipo API para las velocidades de viento. El perfil de corriente marina fue considerado con una variación lineal, con su valor máximo en la superficie de agua y velocidad nula en el fondo del mar.

4.4 Análisis por fatiga de los tendones.

El análisis por fatiga se realizó para cada uno de los tendones de la plataforma tomando en cuenta los resultados de las historias de esfuerzos obtenidas del análisis estructural para cada uno de los estados de mar (Tabla 4.4). A través de este análisis se identificó al tendón No. 5 como el más esforzado, siendo la junta superior, la unión con el casco de flotación, la más crítica. Por tales motivos, con la finalidad de ilustrar la aplicación de la metodología para el análisis de fatiga, ésta será presentada a continuación paso a paso para la junta superior del tendón No. 5.

En la Figura 4-5 se muestra la variación dinámica de la fuerza axial F_x y de los momentos flexionantes M_y y M_z , obtenidos para el tendón No. 5, durante el estado de mar No. 28 (ver Tabla 4.4). El estado de mar 28 fue identificado como aquel que más daño le produce a esta línea de anclaje.

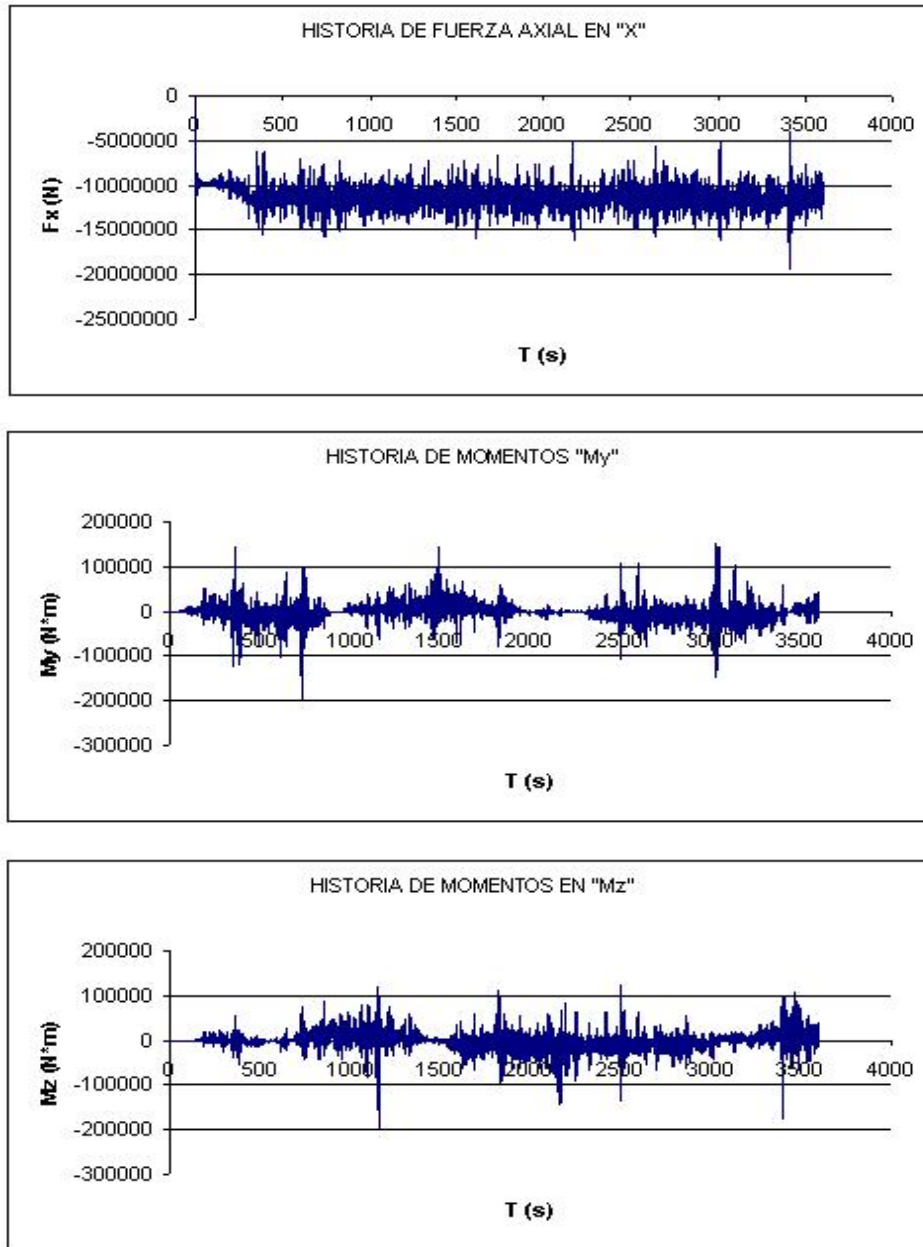


Figura 4-5. Elementos mecánicos para el tendón No. 5.

El cálculo de los esfuerzos en la junta superior del tendón se llevó a cabo utilizando la siguiente ecuación:



$$\Delta\sigma = \frac{P_x}{A} \pm \frac{M_y}{S_y} \pm \frac{M_z}{S_z} \quad (4.2)$$

donde:

$\Delta\sigma$ es la magnitud del esfuerzo en la sección transversal del Tendón

P_x es el valor de la fuerza axial actuante en el Tendón

A es el área de la sección transversal del tendón

M_y es el momento flexionante que se presenta alrededor del eje "Y"

M_z es el momento flexionante que actúa alrededor del eje "Z"

S_y es el módulo de sección alrededor del eje "Y"

S_z es el módulo de sección alrededor del eje "Z"

Cada uno de los esfuerzos obtenidos fue afectado por un factor de concentración de esfuerzos (ver Capítulo III), con valor igual a $FCE=1.25$.

En la Figura 4-6 se muestra la historia esfuerzos en la junta superior del tendón No. 5, para el estado de mar No. 28.

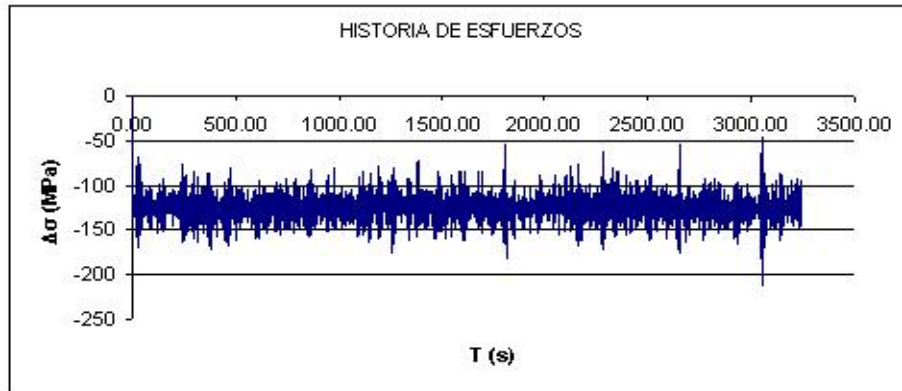


Figura 4-6. Historia de esfuerzos en la junta superior del tendón No. 5.

Para la identificación de las magnitudes de esfuerzos y sus correspondientes números de ciclos se utilizó el Método de Conteo de Ciclos denominado Rainflow (ver Capítulo III). En este trabajo se ha asumido que cada intensidad de esfuerzo identificado en la serie temporal tiene el mismo número de ciclos durante un año, el cual corresponde a nuestro periodo de análisis de fatiga. El número de ciclos anuales correspondiente a todas las magnitudes de esfuerzos identificadas, se calcula a través de la siguiente expresión:

$$n_{CE} = \frac{T_{Anual}}{T_T} * POEM \quad (4.3)$$

donde:

T_{Anual} es el tiempo de un año expresado en segundos

$$\underline{T_{Anual} = 365 * 24 * 3600 = 31536000s}$$



T_T es el tiempo de cada análisis estructural correspondiente a un estado de mar de corto plazo (3 hrs). Debido a que en el análisis estructural se utilizó una rampa de 10% para la estabilidad numérica del análisis dinámico, la duración total de cada análisis estructural es $T_T = 3600 - 0.1 * 3600 = 3240$.

POEM, es la probabilidad de de ocurrencia del estado de mar ($POEM_{28} = 4.82 \times 10^{-3}$, ver Tabla 4.4).

Por lo tanto, el cálculo del número de ciclos de esfuerzos que se presentan durante un año queda como sigue:

$$n_{CE} = \frac{31536000}{3240} * 4.82 \times 10^{-3}$$

$$\underline{n_{CE} = 46.914667}$$

En la Tabla 4.6 se muestran las primeras y las últimas quince intensidades de esfuerzo calculadas con el método Rainflow para el caso de la junta superior del tendón No. 5. El método Rainflow identificó un total de 1133 intensidades de esfuerzo.





Tabla 4.6. Resultados del conteo de ciclos de esfuerzo que se presentan para el tendón No. 5 para el estado de mar No. 28.

N	σ (MPa)	Número de Ciclos de esfuerzos n_{CE}
1	61.1404	46.9146667
2	10.1993	46.9146667
3	10.6531	46.9146667
4	8.6928	46.9146667
5	24.6802	46.9146667
6	27.5309	46.9146667
7	3.2121	46.9146667
8	1.3941	46.9146667
9	58.3494	46.9146667
10	100.9791	46.9146667
11	47.7998	46.9146667
12	43.8696	46.9146667
13	81.7983	46.9146667
14	39.6106	46.9146667
15	44.0303	46.9146667
1119	31.1102	46.9146667
1120	51.9044	46.9146667
1121	25.8498	46.9146667
1122	33.6989	46.9146667
1123	15.6670	46.9146667
1124	28.1117	46.9146667
1125	16.4756	46.9146667
1126	14.5257	46.9146667
1127	19.2102	46.9146667
1128	31.8856	46.9146667
1129	35.0556	46.9146667
1130	56.0576	46.9146667
1131	28.4779	46.9146667
1132	32.4866	46.9146667
1133	42.3411	46.9146667





Con los datos mostrados en la Tabla 4.6 se procedió a evaluar los daños que produce cada nivel de esfuerzo a través de la curva S-N. Los valores resultantes se muestran en la Tabla 4.7. En este caso de estudio se consideró la curva X del API (ver Figura 4-7), aplicable para conexiones expuestas a variaciones de esfuerzos debidos a cargas de operación o ambientales.

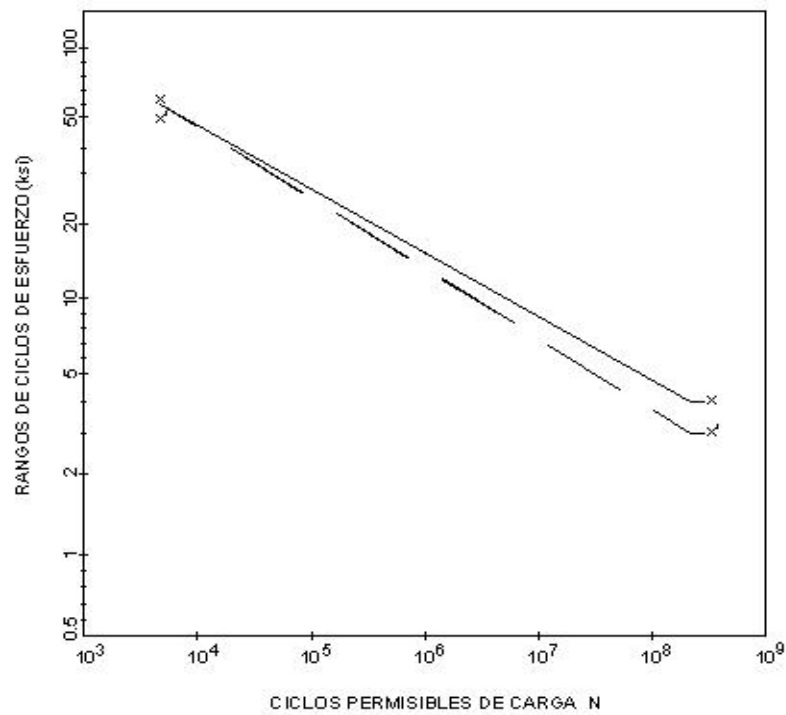


Figura 4-7. Curvas S-N, del API , 1993.

Las curvas S-N del API se representan matemáticamente como:

$$N = 10^{\left(\text{Log}(2 \times 10^6) - m(\text{Log} \Delta \sigma) - \text{Log} \Delta \sigma_{ref}\right)} \quad (4.4)$$





Donde N es el número de ciclos que genera la aparición de grietas en la junta sujeta a un nivel de esfuerzos $\Delta\sigma$, con los siguientes valores característicos $\Delta\sigma_{ref}$ y m :

$$\Delta\sigma_{ref} = 100(MPa) \quad y \quad m = 4.38 \quad (API,1993)$$

Tabla 4.7. Resultados del cálculo de daños parciales y totales para la junta superior del tendón No. 5 para el estado de mar No. 28.

σ (MPa)	n	N	<i>Daño Parcial</i>	<i>Daño Acumulado</i>
61.1404	46.9146667	1.725E+07	2.7191E-06	2.7191E-06
10.1993	46.9146667	4.400E+10	1.0662E-09	2.7202E-06
10.6531	46.9146667	3.637E+10	1.2902E-09	2.7215E-06
8.6928	46.9146667	8.862E+10	5.2946E-10	2.7220E-06
24.6802	46.9146667	9.174E+08	5.1145E-08	2.7732E-06
27.5309	46.9146667	5.684E+08	8.2552E-08	2.8557E-06
3.2121	46.9146667	6.939E+12	6.7616E-12	2.8557E-06
1.3941	46.9146667	2.685E+14	1.7472E-13	2.8557E-06
58.3494	46.9146667	2.117E+07	2.2159E-06	5.0716E-06
100.9791	46.9146667	1.916E+06	2.4482E-05	2.9554E-05
47.7998	46.9146667	5.072E+07	9.2512E-07	3.0479E-05
43.8696	46.9146667	7.385E+07	6.3532E-07	3.1114E-05
81.7983	46.9146667	4.822E+06	9.7304E-06	4.0844E-05
39.6106	46.9146667	1.155E+08	4.0619E-07	4.1251E-05
44.0303	46.9146667	7.268E+07	6.4557E-07	4.1896E-05
31.1102	46.9146667	1.508E+00	1.4100E-07	1.1854E-03
51.9044	46.9146667	9.039E-01	1.3271E-06	1.1867E-03
25.8498	46.9146667	1.815E+00	6.2643E-08	1.1868E-03
33.6989	46.9146667	1.392E+00	2.0011E-07	1.1870E-03
15.6670	46.9146667	2.995E+00	6.9879E-09	1.1870E-03
28.1117	46.9146667	1.669E+00	9.0456E-08	1.1871E-03
16.4756	46.9146667	2.848E+00	8.7112E-09	1.1871E-03
14.5257	46.9146667	3.230E+00	5.0174E-09	1.1871E-03
19.2102	46.9146667	2.442E+00	1.7068E-08	1.1871E-03
31.8856	46.9146667	1.471E+00	1.5706E-07	1.1873E-03
35.0556	46.9146667	1.338E+00	2.3788E-07	1.1875E-03
56.0576	46.9146667	8.370E-01	1.8592E-06	1.1894E-03
28.4779	46.9146667	1.648E+00	9.5732E-08	1.1895E-03
32.4866	46.9146667	1.444E+00	1.7044E-07	1.1896E-03
42.3411	46.9146667	1.108E+00	5.4391E-07	1.1902E-03





Para hacer el cálculo del daño acumulado utilizamos la regla de Miner:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (4.5)$$

donde:

- n_i , número de ciclos de una magnitud de esfuerzos i .
 N_i , número de ciclos para la falla en una magnitud de esfuerzos i .

Utilizando los valores n_i de cada magnitud de esfuerzos en la Tabla 4.7 y los valores de N_i calculados con la curva S-N (también mostrados en la Tabla 4.7) el daño en la junta del tendón producido por el estado de mar No. 28 resultó de 1.1902×10^{-3} . En la Tabla 4.7 se muestran los resultados de daños parciales y acumulados utilizando la ecuación 4.5.

Este procedimiento se aplicó para todos los estados de mar de la Tabla 4.4. En la Tabla 4.8 se muestran los resultados de los daños parciales generados por cada estado de mar y el daño total para la junta superior de cada uno de los tendones de la TLP.



Tabla 4.8. Resultados de los daños parciales y totales en las juntas superiores de los tendones.

<i>Edo de mar</i>	<i>Tendón 1</i>	<i>Tendón 2</i>	<i>Tendón 3</i>	<i>Tendón 4</i>	<i>Tendón 5</i>	<i>Tendón 6</i>	<i>Tendón 7</i>	<i>Tendón 8</i>
	DAÑO ANUAL							
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	3.025E-07	2.802E-06	5.576E-08	2.253E-06	2.887E-06	3.126E-07	2.330E-06	5.725E-08
9	0.0	6.150E-07	0.0	3.789E-07	6.184E-07	0.0	3.781E-07	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	2.443E-07	0.0	0.0	2.448E-07	0.0	0.0	0.0
14	1.211E-05	5.374E-05	1.033E-05	4.596E-05	5.452E-05	1.255E-05	4.719E-05	1.103E-05
15	3.691E-06	1.619E-05	3.417E-06	2.296E-05	1.631E-05	3.765E-06	2.122E-05	3.421E-06
16	6.829E-07	5.547E-06	1.734E-06	9.139E-06	5.552E-06	6.632E-07	8.793E-06	1.731E-06
17	4.527E-06	1.313E-05	2.193E-06	7.842E-06	1.278E-05	4.419E-06	7.797E-06	2.187E-06
18	1.199E-05	2.048E-05	3.476E-06	7.513E-06	2.011E-05	1.147E-05	7.455E-06	3.490E-06
19	9.671E-05	3.611E-04	9.118E-05	3.352E-04	3.696E-04	1.013E-04	3.410E-04	9.333E-05
20	2.916E-05	1.054E-04	3.575E-05	1.280E-04	1.072E-04	3.090E-05	1.263E-04	3.634E-05
21	1.399E-05	4.669E-05	1.646E-05	6.600E-05	4.765E-05	1.350E-05	6.460E-05	1.630E-05
22	2.333E-05	5.268E-05	1.494E-05	3.649E-05	5.182E-05	2.163E-05	3.701E-05	1.477E-05
23	4.368E-05	7.151E-05	1.555E-05	2.741E-05	7.050E-05	4.175E-05	2.746E-05	1.541E-05
24	9.547E-05	3.147E-04	9.247E-05	3.046E-04	3.260E-04	1.003E-04	3.051E-04	9.221E-05
25	4.513E-05	1.524E-04	5.283E-05	1.614E-04	1.539E-04	4.755E-05	1.649E-04	5.503E-05
26	6.164E-05	1.139E-04	3.171E-05	8.057E-05	1.156E-04	6.207E-05	7.995E-05	3.099E-05
27	9.309E-05	1.453E-04	2.794E-05	5.281E-05	1.464E-04	9.270E-05	5.207E-05	2.790E-05
28	3.547E-04	1.160E-03	2.452E-04	8.795E-04	1.190E-03	3.728E-04	8.874E-04	2.557E-04
29	8.335E-05	2.557E-04	1.001E-04	2.916E-04	2.600E-04	8.470E-05	2.944E-04	1.010E-04
30	4.605E-05	1.147E-04	5.043E-05	1.231E-04	1.133E-04	4.510E-05	1.165E-04	4.517E-05
31	1.338E-04	2.317E-04	6.144E-05	1.206E-04	2.320E-04	1.281E-04	1.160E-04	5.869E-05
32	1.216E-04	3.561E-04	1.275E-04	3.615E-04	3.613E-04	1.264E-04	3.627E-04	1.246E-04
33	5.641E-05	1.411E-04	7.291E-05	1.657E-04	1.492E-04	6.594E-05	1.676E-04	7.681E-05
34	7.508E-05	2.439E-04	9.000E-05	1.473E-04	2.193E-04	6.819E-05	1.440E-04	8.760E-05
35	1.796E-04	5.128E-04	1.258E-04	3.861E-04	5.423E-04	1.955E-04	3.991E-04	1.318E-04
36	1.282E-04	2.323E-04	7.332E-05	1.901E-04	2.698E-04	1.546E-04	2.071E-04	8.539E-05
37	7.198E-05	1.639E-04	5.859E-05	1.111E-04	1.621E-04	8.894E-05	1.154E-04	6.216E-05
38	2.375E-04	6.539E-04	1.240E-04	3.760E-04	7.056E-04	2.722E-04	3.748E-04	1.157E-04
39	1.369E-04	3.171E-04	6.926E-05	1.685E-04	3.265E-04	1.502E-04	1.691E-04	6.308E-05
40	1.589E-04	2.966E-04	5.600E-05	1.112E-04	3.238E-04	1.688E-04	1.108E-04	5.832E-05
41	2.065E-04	4.923E-04	7.274E-05	1.776E-04	5.003E-04	2.134E-04	1.721E-04	7.096E-05
42	1.476E-04	3.143E-04	6.291E-05	1.312E-04	3.528E-04	1.782E-04	1.304E-04	5.708E-05
43	2.549E-04	6.226E-04	8.243E-05	2.127E-04	6.625E-04	2.911E-04	2.072E-04	7.470E-05
44	1.472E-04	3.401E-04	6.465E-05	1.399E-04	3.750E-04	1.732E-04	1.219E-04	5.406E-05
45	1.703E-04	4.106E-04	4.729E-05	1.388E-04	4.421E-04	1.933E-04	1.553E-04	4.557E-05
ΣD_i	3.246E-03	8.336E-03	1.985E-03	5.521E-03	8.687E-03	3.516E-03	5.545E-03	1.973E-03





El daño total generado por los 45 estados de mar con probabilidad de ocurrencia durante la vida de operación de la plataforma para el tendón más esforzado es: 8.6873×10^{-3} , por lo que la vida útil de la plataforma resulta de:

$$V_{\text{útil}} = \frac{1}{D_{\text{Total}}} \quad (4.6)$$

$$V_{\text{útil}} = \frac{1}{8.6873 \times 10^{-3}} = 115.08 \text{ Años}$$

Como se establece en el API RP 2T, 1997, la vida a la fatiga mínima requerida es de tres veces la vida de diseño de la plataforma (20 años), y como la vida a la fatiga del tendón más crítico es de 115 años tenemos que el factor de seguridad es de **5.75**, mayor que **3** veces la vida de la plataforma, por lo tanto la vida a la fatiga de los tendones es aceptable.



CAPÍTULO V

“CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES”

En este trabajo se presenta una metodología para llevar a cabo la evaluación del daño y la vida a la fatiga de los tendones de una plataforma flotante de piernas atirantadas tipo TLP. La metodología es aplicable para líneas de amarre conformadas por tubos de acero con juntas soldadas.

La metodología para el análisis de fatiga considera como estado de falla a la aparición de las grietas. La evaluación del daño se efectúa identificando las magnitudes de esfuerzo y los números de ciclos que generan los diferentes estados de mar presentes durante la operación de la plataforma, y utilizando curvas S-N y la regla de Miner.

La metodología fue aplicada para una TLP dimensionada para operar en un tirante de agua de 870 m, con dos tendones colocados en cada una de sus cuatro columnas (8 en total), considerando las condiciones meteorológicas y oceanográficas de la Sonda de Campeche.

Debido a la importancia de la interacción entre el casco de flotación y el sistema de tendones con el aumento del tirante de agua, fue efectuado un análisis estructural acoplado del sistema unidad flotante-risers-tendones. La unidad flotante fue modelada como un cuerpo rígido con seis grados de libertad y las líneas esbeltas (tendones) como elementos finitos tipo viga 3D. El análisis dinámico del tipo no lineal para cada estado de mar de corto plazo se efectuó en el dominio del tiempo, considerándose la variación irregular de las fuerzas ambientales y las fuerzas de oleaje de primer orden.





Las condiciones ambientales para el análisis de fatiga están compuestas de una serie de 45 estados de mar de corto plazo (3 horas de duración) que representaron los eventos con mayor probabilidad de ocurrencia. Estos estados de mar fueron obtenidos de la función de densidad de probabilidades conjunta de alturas de ola significativa y periodos del oleaje, y sus velocidades de viento y corriente superficial asociados, para un sitio en la Sonda de Campeche. Fue utilizado el modelo de Weibull tres parámetros para ajustar la función de densidad de probabilidades conjunta de alturas de ola y periodos.

La metodología fue ejemplificada paso a paso para la junta superior del tendón más crítico de la TLP y considerando el estado de mar que produjo el daño de mayor magnitud. La identificación de las magnitudes de esfuerzo y el conteo de sus ciclos se realizó mediante el Método Rainflow. El daño parcial del tendón se determinó con ayuda de las curvas S-N del API RP*2^a-LRFD (API, 1993) y la regla de Miner, resultando para el tendón más crítico un daño acumulado anual de $.6897 \times 10^{-3}$. Con estos resultados se obtuvo una vida útil del tendón y por lo tanto del sistema de anclaje de la la plataforma de 115 años.

De acuerdo con el API RP-2T, la vida a la fatiga mínima requerida es de tres veces la vida de diseño de la plataforma (20 años), de lo cual resultó que el factor de seguridad que tienen los tendones de la TLP es de $5.75 > 3$, por lo cual el diseño por fatiga del tendón es aceptable.



Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

Para las plataformas del tipo TLP, el llevar a cabo un análisis de fatiga de elementos estructurales sometidos a ciclos de carga de forma prolongada tiene una gran importancia dado que este tipo de análisis nos obliga a realizar una revisión minuciosa en las secciones más críticas de los elementos estructurales (tendones) en función del tiempo de aplicación de la carga y de la intensidad de los esfuerzos que se presentan.

Debido a que los tendones son elementos estructurales con altas probabilidades de falla por fatiga, es en éstos en los que se ha enfocado este trabajo ya que de presentarse la falla de uno de ellos el colapso de la plataforma sería inminente.

La metodología seguida para llevar a cabo la evaluación del daño por fatiga de los tendones es aplicable para TLP's en cualquier tirante de agua y para cualquier tipo de representación estadística de condiciones ambientales.





Recomendaciones

Las recomendaciones para trabajos futuros serían las siguientes:

- ✦ Debido a que en México las reservas de hidrocarburos en aguas someras (con tirantes no mayores a los 100m) están en decadencia, en un futuro será necesario explotar yacimientos localizados en aguas más profundas, donde los sistemas flotantes serían la opción más factible para el desarrollo de los campos, por lo que es necesario que se amplíen más los estudios de este tipo de sistemas para su aplicación en México.
- ✦ En el presente trabajo solo fueron consideradas las fuerzas de oleaje de primer orden, por lo que para realizar un análisis más preciso sería necesario considerar las fuerzas de oleaje de segundo orden (*springing*). Asimismo, es recomendable efectuar la medición de las condiciones meteorológicas y oceanográficas prevalecientes en los mares nacionales, ya que hasta ahora existen datos solo provenientes de modelos numéricos, que han sido calibrados con pocos datos de la región.
- ✦ En trabajos futuros se debe dar continuidad a este tema, y extender su aplicación a otras conexiones de la TLP como entre columnas y pontones del casco de flotación, conexiones tendón-casco de flotación, a otros elementos como los risers, y a otras plataformas flotantes como las semisumergibles, los FPSO y las Spar.



“BIBLIOGRAFÍA”

API, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1993, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Load and Resistance Factor Design, API RP 2A – LRFD, 1st Edition, USA.

API, AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1997, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Tension Leg Platforms, API RP 2T, 2nd Edition, USA.

BARRANCO CICILIA F., 2005, Formato Genérico de Crítica Literaria y Estado del Arte de la Tecnología en PEMEX y el Resto del Mundo a Asimilarse del Consorcio DEEPSTAR.

BARRANCO CICILIA F., 2004, Reliability Based Design Criterium for a TLP Tendon Sistem, ScD Thesis COPPE-UFRJ, Brazil (en portugués).

ING. VÍCTOR M. VALDÉS, 2005, Curso de Ingeniería Civil Costa Afuera, Apuntes de Clase Tomo I y Tomo II.

N. A. SIDDIQUI, SUHAIL AHMAD, 2001, Fatigue and Reliability of TLP Tethers Under Random Loading.

PAULO MAURICIO VIDEIRO, 1998, Reliability Based Design of Marine Structures, Doktor Ingenior Thesis, Trondheim-Norway.

OFFSHORE STANDARD DVN-OS-C105, 2001, Structural Design of TLP's (LRFD Method).

OFFSHORE STANDARD DVN-OS-C101, 2004, Design of Offshore Steel Structures General (LRFD Method).





OFFSHORE MAGAZINE, 2005, Deepwater Solutions & Records for Concept Selection Poster, USA.

www.pemex.com

www.oceanografia.cicese.mx/golfodemexico

www.solociencia.com

www.modec.com

