



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE ESTRUCTURAS FLOTANTES DE PRODUCCIÓN
DE HIDROCARBUROS SUJETAS A FATIGA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A

JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ



DIRECTOR: ING. MARCOS TREJO HERNÁNDEZ
ASESOR: DR. EFRÉN AYALA URAGA

MÉXICO, D. F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Diseño de Estructuras Flotantes de Producción de Hidrocarburos sujetas a Fatiga.

Son tantas las personas a las cuales debo parte de este triunfo, de lograr mi culminación académica, la cual es el anhelo de todos los que así lo deseamos.

A MIS PADRES.

“José Luis Rodríguez y Esperanza Hernández”

A quienes agradezco de todo corazón por su amor, cariño y comprensión, y que sin ellos no hubiera sido posible realizar este trabajo. Les doy las gracias por todo el tiempo el cual se sacrificaron para que yo tuviera este logro, que también es de ustedes. Y por el apoyo que recibí en los momentos difíciles de mi carrera y que es a ustedes a quienes debo lo que ahora soy. A ustedes GRACIAS.

A MIS HERMANOS.

“Raymundo, Olivia, Rosalba y Alejandra”

Que sin su apoyo y su confianza incondicional hicieron más fácil realizar una de mis metas y se que con ellos contare para siempre.

A MIS SOBRINOS.

“Daniela, Enrique y Noemí”

A ellos por darme la fuerza suficiente para terminar esta meta tan importante.

A MI DIRECTOR Y ASESOR DE TESIS.

“Ing. Marcos Trejo Hernández y Dr. Efrén Ayala Uraga”

Que sin su ayuda y consejos no habría realizado este trabajo tan importante. No tengo palabras para agradecer todo el tiempo y paciencia que tuvieron para conmigo durante el desarrollo de mi tema. A ustedes mil gracias.

A MIS AMIGOS.

Adán, Edgar, Gabriel, Carlos, Beto, Daniel, Manuel, Vladimir, Noemí, Alejandro A., Ramón, Tania, Agustín, Juan, Santiago, Argelia, Castro, a mis cuñados Alejandro y Raúl que con su apoyo llegue a realizar este proyecto de vida. Gracias.

A DIOS.

POR HABERME DADO LA FUERZA PARA TERMINAR CON UNA ETAPA MÁS DE MI VIDA Y POR PERMITIR QUE TODA ESTA GENTE QUE PARTICIPO EN ESTE LOGRO ESTEN CONMIGO EN ESTE MOMENTO TAN IMPORTANTE.

DISEÑO DE ESTRUCTURAS FLOTANTES DE PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS SUJETAS A FATIGA

Objetivo	1
Resumen de capítulos	1
Introducción a estructuras flotantes para explotación de Hidrocarburos	2
Ia. Infraestructura para explotación de hidrocarburos	5
Ib. Tipos e Sistemas Flotantes de Producción	6
Capítulo 1 Definición de Cargas Ambientales y sus Efectos	16
1.1 Clasificación de cargas	16
1.2 Cargas por Oleaje, Viento y Corriente	19
1.3 Caracterización del Oleaje	24
1.4 Descripción de Condiciones Ambientales para Diseño	28
1.5 Comportamiento de Sistemas Flotantes ante Oleaje	33
1.6 Determinación de Fuerzas producidas por Oleaje	34
Capítulo 2 Determinación de Esfuerzos para Análisis de Fatiga	38
2.1 Descripción de Cargas por Fatiga	38
2.2 Definición Tipos y Rangos de Esfuerzos en Fatiga	41
2.3 Factores que Incrementan los Esfuerzos	46
2.4 Métodos de Análisis por Fatiga	54
2.5 Definición de Curvas S-N para Diseño	56
Capítulo 3 Diseño por Fatiga de Estructuras Soldadas	63
3.1 Conceptos de Diseño Estructural de Sistemas Flotantes	63
3.2 Descripción de Estados Límite de Diseño	63
3.3 Procedimiento de Diseño por Fatiga	67
Capítulo 4 Ejemplo de Aplicación de Detalle Estructural de un Sistema Flotante	92
4.1 Definición del Caso en Estudio	92
4.2 Geometría del Elemento longitudinal y Terminación del Atiezador (Bracket)	94
4.3 Factores K (Factor de Concentración de Esfuerzos)	95
4.4 Condiciones de Carga	97
4.5 Curva S-N y Protección contra Corrosión	98
4.6 Momentos Flexionantes Globales del Casco	99
4.7 Esfuerzos por Cargas Globales	101
4.8 Esfuerzos Combinados de Punto Critico	102
4.9 Distribución de esfuerzos de Largo Plazo	102
4.10 Cálculo del Daño por Fatiga	103
4.11 Cálculo de la Vida por Fatiga	105
Conclusiones	107
Referencias	109

Objetivo:

Mencionar, describir y determinar el análisis de un detalle estructural (bracket) de un Sistema Flotante de Producción, Almacenamiento y Descarga de Crudo, mejor conocido por sus siglas en inglés FPSO (Floating Production Storage and Offloading), mediante los tipos de carga y solicitaciones a las que el sistema estará sujeto, así como también determinar el periodo de vida útil del sistema.

Resumen de Capítulos:

Capítulo 1: Definición de cargas ambientales y sus efectos: En este capítulo se toman en cuenta todas las cargas que se involucran en el análisis y diseño de un FPSO, así como su clasificación en Cargas Permanentes, Variables y Accidentales. Abarcando las cargas por Oleaje, Viento y Corriente, denominadas Cargas Ambientales, son los datos que precisan el análisis y diseño tomando en cuenta las probabilidades de excedencia. Así como también se abordará el tema de las condiciones ambientales para diseño, tomando en cuenta el periodo y la altura de la ola, los estados de mar y los tipos de movimientos que se presentan en un FPSO cuando se encuentra en el agua.

Capítulo 2: Determinación de Esfuerzos para Análisis de Fatiga: el fenómeno de fatiga puede definirse como un proceso de acumulación de ciclos de daño en un material bajo la fluctuación de esfuerzos (tensiones y torsiones). Se explicarán las cargas por Fatiga en las estructuras flotantes, las cuales son: Cargas Proporcionales (cíclicas) y las no proporcionales (las referidas a un elemento adicional en la estructura). Veremos los tipos, definiciones y rangos de los esfuerzos de muesca, de punto crítico y esfuerzos normales. También hablaré de los factores que incrementan los esfuerzos, como las muescas, la geometría, la geometría de la soldadura, los esfuerzos nominales, los efectos de tamaño de espesor de placa. Mencionaremos los Métodos de Diseño por Fatiga, como el método del Esfuerzo Nominal, De Punto Crítico, De Tensión y Torsión de Muesca, De Tensión de Muesca Elástica-Lineal y Mecánica de Fractura. Veremos la definición de las Curvas S-N, con la sumatoria de Miner, los rangos equivalentes de esfuerzos y la clasificación de los datos para uniones soldadas.

Capítulo 3: Diseño por Fatiga de Estructuras Soldadas: Se mencionan los Estados Límite, que son importantes en el Análisis y Diseño de Estructuras Flotantes para la prevención de posibles fallas. Daré la definición de los Estados Límite de Diseño: Estado Límite de Servicio (ELS), Estado Límite Último (ELU), Estado Límite de Fatiga (ELF) y Estado Límite Accidental (ELA). Veremos el Procedimiento de Diseño por Fatiga, así como todas las constantes, cargas y momentos flexionantes que actúan sobre la estructura.

Capítulo 4: Ejemplo de Aplicación en un Detalle Estructural de un Sistema Flotante: En este capítulo desarrollare el análisis de un FPSO, dando el resultado del Periodo de vida útil de la estructura, tomando en cuenta todos los aspectos mencionados en los capítulos anteriores, considerando un detalle estructural (bracket) en la parte media de la embarcación.

INTRODUCCIÓN.

I. Industria Petrolera en el Mundo.

Para nadie es un secreto que gran parte del calentamiento global ha sido originado por las emisiones de gases, producto del consumo mundial de los hidrocarburos. Las sociedades del siglo XX a nivel mundial han experimentado importantes cambios a nivel técnico y tecnológico, transformando rápidamente las formas y usos de la energía, que han abastecido e impulsado los actuales sistemas productivos. Poco a poco los motores de combustión interna comenzaron a ocupar el espacio de los animales de carga en sus faenas y en los caminos, hasta que el consumo de hidrocarburos pasó a ser indispensable globalmente y su uso se extendió a lo largo de distintas geografías. En la actualidad, la problemática del mercado petrolero es un tema de gran atención debido al contexto global de la crisis de energéticos. A pesar de que el agotamiento de combustibles fósiles no parece tan inminente como la contaminación ambiental que ha provocado el aumento en su consumo, no debe perderse de vista que los costos en términos económicos y sociales también son inmediatos.

Una de las principales características del mercado petrolero mundial es que la oferta está concentrada regionalmente, mientras que la demanda es amplísima, a nivel mundial. Esta característica del mercado petrolero hace que la industria petrolera sea una actividad con cambios imprevisibles. No en vano se le llama oro negro, pues el petróleo se ha constituido a lo largo del siglo XX en la materia prima por excelencia del mundo contemporáneo. No existe un recurso natural equivalente que supla todos los usos que tiene. El consumo del petróleo, bajo la forma de los hidrocarburos, constituye el uso principal de este bien, que aporta la energía fundamental para el funcionamiento de las economías del mundo. La incertidumbre y el riesgo son pues, factores inevitables de la actividad petrolera. Por ello la industria petrolera moderna tiene que lidiar con la imprevisibilidad de una multitud de factores que la condicionan, por estar fundamentada en la administración del riesgo.

Industria Petrolera en México.

En los años cuarenta la industria petrolera inició el camino de su crecimiento al pasar de 51 millones de barriles producidos en 1940 a 86 millones en 1950 y la exportación en este último año sobrepasó los 12 millones de barriles. Este aumento productivo se debió a una labor intensa en la exploración, cuyo resultado más espectacular fue el descubrimiento -en 1952- de los primeros campos de la nueva Faja de Oro.

Se construyeron las refinerías de Poza Rica, de Salamanca, de Ciudad Madero, la nueva refinería de Minatitlán y se amplió la de Azcapotzalco. También, en 1951, empezó el funcionamiento de una planta petroquímica básica en Poza Rica, con lo cual se iniciaba la industria petroquímica en México. Entre 1964 y 1970, se impulsaron las actividades exploratorias y la perforación, descubriéndose el campo Reforma, en los límites de Chiapas y Tabasco, y el campo Arenque, en el Golfo de México y, en 1966, se creó el Instituto Mexicano del Petróleo.

Diseño de Estructuras Flotantes de Producción de Hidrocarburos sujetas a Fatiga.

En 1972, se detectó una nueva provincia productora de hidrocarburos en el Estado de Chiapas, mediante la perforación de los pozos Cactus I y Sitio Grande I, lo que constituyó el hallazgo de mayor importancia en esa época. La productividad de los pozos de la zona sureste conocida como el Mesozoico Chiapas-Tabasco hizo posible la reanudación de las exportaciones petroleras de México en 1974. Así, en 1976, las reservas de hidrocarburos ascendieron a siete mil millones de barriles, la producción a 469 millones de barriles anuales y las exportaciones de crudo a 34 millones y medio de barriles anuales.

En los 60's, se da un impulso importante a la refinación, al entrar en operación la refinerías de "Miguel Hidalgo", en Tula, Hgo.; "Ing. Héctor Lara Sosa", en Cadereyta, N.L., así como la "Ing. Antonio Dovalí Jaime", en Salina Cruz, Oax.

A partir de 1976, se impulsó una mayor actividad en todas las áreas de la industria, ante la estrategia política del Presidente José López Portillo de dar un gran salto en la producción petrolera y en las reservas de hidrocarburos, por lo que el petróleo se convirtió en la principal fuente de divisas del país, ya que llegó a representar el 75 por ciento de sus exportaciones. El aumento productivo de esta época estuvo ligado al descubrimiento de los campos de la Sonda de Campeche, considerada hasta la fecha como la provincia petrolera más importante del país y una de las más grandes del mundo.

En la década de los ochenta, la estrategia de la industria petrolera nacional fue la de consolidar la planta productiva mediante el crecimiento, particularmente en el área industrial, con la ampliación de la capacidad productiva en refinación y petroquímica. A partir de 1990, se inició un programa de inversiones financiado por el Eximbank y el Overseas Economic Cooperation Fund de Japón denominado "Paquete Ecológico", que comprendió la construcción de un total de 28 plantas de proceso en el sistema nacional de refinación, el cual fue terminado en 1997 y cuyos objetivos fueron mejorar la calidad de la gasolinas, reducir el contenido de azufre en el diesel y convertir combustóleo en combustibles automotrices, así como elevar las características de los residuales, a fin de cumplir con las normas ambientales adoptadas por el Gobierno de México.

En julio de 1992, el Congreso de la Unión aprobó la Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios, iniciativa que envió el Ejecutivo Federal, mediante la cual se emprendió una reestructuración administrativa y organizativa bajo el concepto de líneas integradas de negocios que incorpora criterios de productividad, responsabilidad, autonomía de gestión, definiendo bajo un mando único actividades operativas y de apoyo. Por tanto, PEMEX descentralizó y desconcentró funciones y recursos para cumplir todas las actividades implícitas de la industria petrolera y sus áreas estratégicas.

Esta ley establece la creación de los siguientes organismos descentralizados subsidiarios de carácter técnico, industrial y comercial, cada uno de ellos con personalidad jurídica y patrimonios propios: PEMEX Exploración y Producción, PEMEX Refinación, PEMEX Gas y Petroquímica Básica y PEMEX Petroquímica, bajo la conducción central del Corporativo PEMEX.

A partir de esta reestructuración administrativa de PEMEX, se llevó a cabo una transformación profunda de la empresa para maximizar el valor económico de las operaciones y para planear y ejecutar proyectos de inversión con mayor solidez y rentabilidad. De esta manera, en los años 1995 y 1996 se fortalecieron los programas operativos de PEMEX para mantener la producción de hidrocarburos y aumentar la elaboración y distribución de productos petrolíferos de mayor calidad, principalmente gasolinas PEMEX Magna y PEMEX Premium, así como PEMEX Diesel a nivel nacional.

El año de 1997 marcó el inicio de una nueva fase de expansión de la industria petrolera mexicana, mediante la ejecución de importantes mega proyectos de gran envergadura para incrementar los volúmenes de producción de crudo y gas, y mejorar la calidad de los combustibles.

Por su importancia estratégica y económica, se iniciaron el "Proyecto Cantarell" para renovar, modernizar y ampliar la infraestructura de este complejo, con el fin de mantener la presión en este yacimiento, ubicado en la Sonda de Campeche, a través de la inyección de nitrógeno; el "Proyecto Cadereyta" orientado a la modernización y reconfiguración de la refinería "Ing. Héctor Lara Sosa", en el Estado de Nuevo León para construir 10 nuevas plantas de proceso y ampliar otras 10 existentes; y el "Proyecto Cuenca de Burgos" para aprovechar el enorme potencial gasífero de la región norte de Tamaulipas y obtener una producción adicional de gas natural de 450 mil a mil 500 millones de pies cúbicos por día en el año 2000.

Durante el año 2000, se establecieron las bases para el diseño del Plan Estratégico 2001-2010, en el cual se proponen las estrategias operativas para maximizar el valor económico de las actividades operativas de PEMEX, la modernización de su administración para generar ahorros, así como los cambios necesarios en la relación con el Gobierno Federal, tales como un nuevo tratamiento fiscal, una nueva regulación basada en el desempeño y un control administrativo moderno de acuerdo a resultados.

A partir del mes de diciembre de 2000, se inició una nueva era en la industria petrolera mexicana con la implantación de estrategias orientadas a buscar un crecimiento dinámico de Petróleos Mexicanos, mediante la ejecución de importantes proyectos dirigidos a la producción de crudo ligero, a la aceleración de la reconfiguración de las refinerías, al mejoramiento de la calidad de los productos, a la optimización de la exploración para gas no asociado y a la integración de alianzas con la iniciativa privada para revitalizar y fomentar a la industria petroquímica.

Para cumplir estas metas, se lleva a cabo una reestructuración del Corporativo, con el propósito de mantener el liderazgo en la operación integral de la empresa, dar seguimiento a la nueva planeación e identificar los cambios encaminados a alcanzar mayores rendimientos y una mejor operación de las instalaciones con costos y calidad de nivel mundial.

Introducción a estructuras flotantes para explotación de hidrocarburos.

En 1949, la Industria Petrolera a nivel mundial explotaba yacimientos localizados en aguas de hasta 5m de profundidad, ya que para los inicios de los años 60's la demanda de los energéticos obligo a la Industria Petrolera a buscar en zonas más profundas, tales como el Mar del Norte, el Golfo de México y algunas costas de Brasil.

Con estas perspectivas se cree que para el año 2004, los nuevos campos de explotación se encontrarán a niveles de tirantes mayores a los 2500m.

Las perspectivas de producción en México son las siguientes:

- Región Costa Afuera Norte.- con profundidades de 200 a 3600m en la zona exclusiva de Estados Unidos de Norteamérica y México, llamada “Hoyos de Dona”, contemplando recursos potenciales de 35, 000 MMBOE.
- Región Marina Suroeste.- Existen varios proyectos en este lugar, los cuales son: Campeche Poniente, con tirantes de 2 a 500m. Golfo de México “B”, que cuenta con una extensión de 220, 500km² y 20 prospectos de exploración en tirantes de 560 a 1400m. El Litoral de Tabasco, con una extensión de 8, 000km² y es un activo de producción de crudo ligero. Proyecto Coatzacoalcos con una extensión de 13, 000km², la mayor parte de los prospectos de explotación se encuentran en aguas someras.

Ia. Infraestructura para explotación de hidrocarburos.

Los sistemas para explotación de hidrocarburos son muy importantes para cuando los tirantes se encuentran por arriba de los 100m, que se cataloga como aguas profundas, con lo que para realizar dicha explotación existen varios sistemas de plataformas que a continuación se mencionan:

1. Plataforma de Piernas Tensionadas (TLP) (de 457m a 2134m, 1500pies a 7000pies)
2. SeaStar (Mini TLP)(183m a 1067m, 600pies a 3500pies)
3. Plataforma Spar (610m a 3048m, 2000pipes a 10,000pies)
4. Plataforma Semi-sumergible (457m a 1829m, 1500pies a 6000pies)
5. Barco de Producción, Almacenamiento y Descarga. (FPSO)

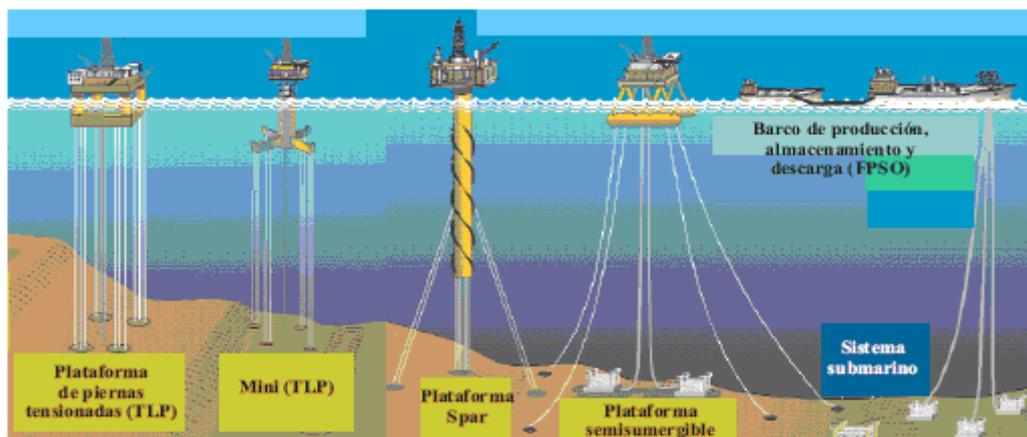


Figura 1. Tipos de Estructuras Flotantes. Ref. [2]

Ib. Tipos de sistemas flotantes de producción.

Plataformas de Piernas Tensionadas (TLP):

Estructura flotante mantenida en el lugar por tendones tensionados verticales conectados al piso por plantillas aseguradas con pilotes. Consiste en aparejos flotantes atados al fondo del mar en una manera que elimina el movimiento más vertical de la estructura. TLP "convencional" es un diseño de 4 columnas que mira similar a un semi-sumergible. Los mástiles han sido diseñados en tres configuraciones: el casco "convencional" cilíndrico de una sola pieza, " el mástil de entramado " donde el midsection es compuesto de elementos de entramado que conectan el casco superior boyante con el tanque inferior suave que contiene el lastre permanente, " y el mástil de célula " que es construido de múltiples cilindros verticales.



Figura 2. Plataforma tipo TLP en operación. Ref. [2]

SeaStar (MINI TLP):

Es una TLP pequeña, se utiliza para la producción de reservas pequeñas en aguas profundas. Puede utilizarse como satélite o como una plataforma de producción temprana. SeaStar es TLP mini que combina la simplicidad de un mástil y los rasgos de respuesta favorables de un TLP. Los resultados de una investigación detallada numérica del comportamiento dinámico de SeaStar son expuestos con especial atención al anclaje por medio de soga de la plataforma. El estudio numérico ha sido realizado usando un código ordenador de elemento finito desarrollado para el análisis no lineal dinámico de plataformas dóciles, en el dominio de tiempo que usa Morison la carga de la ola tipo.



Figura 3. Plataforma Tipo Seastar, Instalación y operación. Ref. [2]

Plataforma SPAR:

Cilindro vertical de gran diámetro que soporta una cubierta; se sujeta usando un sistema de catenarias tensas, de 6 a 20 líneas ancladas al fondo marino. La plataforma SPAR, es modelada como un cuerpo rígido con seis grados-de-libertad, conectada al fondo marino por la catenaria múltiple-componente de líneas que amarran, que son atadas a la plataforma. La matriz de rigidez dependiente de respuesta consiste en dos partes (a) la hidrostática proporciona la fuerza de restaurar en el tirón, el rollo y el diapasón, (b) las líneas que amarran y proporcionan la fuerza. Un modelo de ola unidireccional regularmente es usado para calcular las cinemáticas de la ola de incidencia por la teoría ondulatoria de Airy y la fuerza por la ecuación de Morison. El análisis de respuesta es realizado en el dominio de tiempo para solucionar el comportamiento dinámico de la plataforma amarrada como un sistema integrado.



Figura 4. Plataforma SPAR, instalación y operación. Ref. [2]

Plataforma Semi-sumergible:

Casco sumergible comúnmente equipado con sistemas de perforación y producción. Esta plataforma es anclada en el lugar con cables, cadenas o sogas de poliéster, también puede tener sistemas de propelas en múltiples direcciones para mantener la estructura en posición de producción. Tienen una plataforma o el área de cubierta puede ser de configuración cuadrada, rectangular o triangular. Esta plataforma es soportada por columnas grandes conectadas debajo del agua al casco de desplazamiento o esta montada sobre grandes marcos verticales. El propósito básico de este diseño es reducir la fuerza de la ola ubicando los miembros de flotabilidad de mayor importancia en el exterior o debajo de la acción de la ola. La estabilidad suficiente es proporcionada por las columnas. Su desplazamiento de operación se extiende de 15000 a 30000 toneladas métricas. La proporción entre el mínimo y máximo desplazamiento es de $\frac{1}{2}$ a $\frac{2}{3}$.



Figura 5. Operación Plataforma Na Kika. Ref. [18]

Barco de Producción, Almacenamiento y Descarga:

Buque tanque acondicionado para desarrollar actividades de producción, almacenamiento y trasiego de hidrocarburos, sistemas de amarres diversos. Es ideal para regiones sin infraestructura (oleoductos). Presenta grandes superficies para alojamiento de equipo y capacidad para soportar peso. La conversión del buque tanque para su uso como FPSO no consume mucho tiempo. El costo de conversión es poco sensible con el aumento del tirante de agua. Es fácilmente removido y reutilizado en otros campos. Son particularmente usados para el transporte de artículos y pasajeros. Sin embargo ellos también son usados para (temporal) operaciones relativamente de corta duración, por ejemplo, en la industria costa fuera. En tales circunstancias el beneficio de su movilidad puede ser utilizado completamente.



Figura 6. FPSO TerraNova y FPSO Rosa de Mar. Refs. [19] y [20]

Un sistema flotante de producción (FPS) consiste de un buque flotante el cuál recibe petróleo y gas de los pozos submarinos a través de las líneas de flujo conocidas como risers. La nave es una embarcación propuesta para desarrollar cualquier trabajo de producción, semi-sumergible o una conversión en cisterna. La presente evaluación es limitada a sistemas basados en cisternas, usualmente conocidos como Unidades Flotantes de Producción, Almacenamiento y Descarga (FPSO).

El concepto FPSO ha sido desarrollado por tres décadas (incluyendo FSU). Inicialmente los FPSs fueron introducidos por su producción anticipada (por lo tanto, mejora el flujo de fondos del proyecto) al desarrollo del campo menor. Fueron relacionados con el desarrollo de tecnología submarina, hoy, su potencial desarrollo para aguas profundas es de interés. Hasta ahora hay alrededor de 70 FPSOs trabajando alrededor de todo el mundo o bajo construcción.

Entre las razones de porque es mejor el FPSO comparado con otros conceptos, son:

- CAPEX inferior, requiere menor inversión de capital final, costo menor que otros conceptos, especialmente en el lejano Oriente.

- Programa corto: transformación de la embarcación para los líneas de amarra de la torrecilla de soporte y el sistema de producción a bordo habría requerido típicamente de 12 -14 meses, 6 a 12 meses se reduce el programa típico cuando se usa un FPSO.
- Pronta producción/flujo de efectivo: La pronta producción es conseguida. La producción de petróleo comienza a llenar inmediatamente después la instalación del FPSO y HUC (conectar y puesta en servicio) los cuales perfeccionan el valor presente de los proyectos.
- Unidades de auto-contención adaptable para ubicación remota con infraestructura existente: no requiere de otros buques para transporte e instalación en el sitio.
- Costo total de instalación (TIC): Menor sensibilidad al incremento de profundidad, comparado con otras opciones de competencia.
- Fácil de retirar: Dónde el buque FPSO provisto con sistema de auto-propulsión puede navegar fuera por si mismo.
- Re-uso. El FPSO puede ser re-usado más fácilmente que otros conceptos de plataforma, y son ideales para campos de desarrollo pequeños con vidas de producción cortas.

Sin embargo, los buques de este tipo son totalmente sensibles al clima y las condiciones del mar. En áreas con un ambiente lluvioso el buque necesita ser prácticamente dirigido sobre las olas, viento y corriente para limitar la demanda sobre el sistema de posicionamiento, el movimiento ascendente y descendente (y cabeceo) de los buques en tales áreas hace necesario usar risers flexibles durante la producción.

Las decisiones de configuración son llevadas principalmente por la necesidad de encontrar los requisitos de seguridad y funcionalidad óptimos.

Muchos campos, especialmente donde el FPS es empleado para pruebas de producción o producción anticipada son ubicados lejos de los sistemas de gasoductos existentes.

El buque debe tener una cubierta para soporte de equipo y capacidad de carga. La cubierta soporta, por ejemplo, 3m de claro de cubierta principal de todos los equipos de procesos, torre de señal luminosa, grúas y el auge de descarga de petróleo, equipo de conteo y también, posiblemente, el modulo de generación de energía. La masa de estos equipos dependerá de la producción del campo, pero es probable estar en el rango de 5,000 a 12,000 toneladas por campo con una producción entre 10,000 a 100,000 barriles /día.

A continuación se presentan una serie de componentes estructurales de las plataformas antes mencionadas.

Para plataformas flotantes:

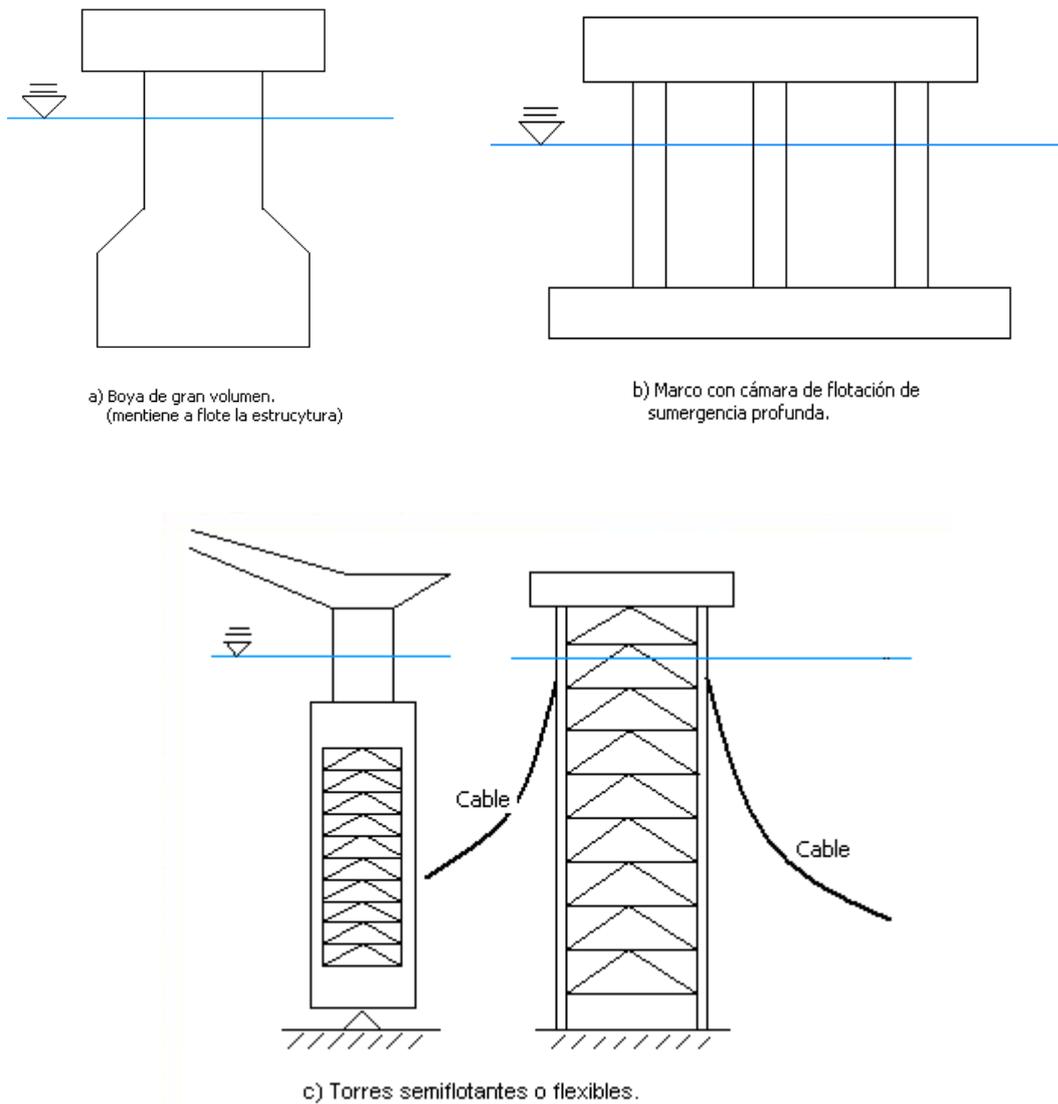


Figura 7. Sistemas de soportes flotantes y semiflotantes. Ref. [4]

Estos tres tipos de estructuras son los más usados para los siguientes tipos de plataformas:

- Semisumergible
- Spar
- Mini Spar
- TLP (Piernas tensionadas)
- Mini TLP

En las cuales se efectúa como conjunto, una serie de cargas que a continuación serán representadas:

Estas cargas o esfuerzos son de tipo torsionante, de compresión y flexión.

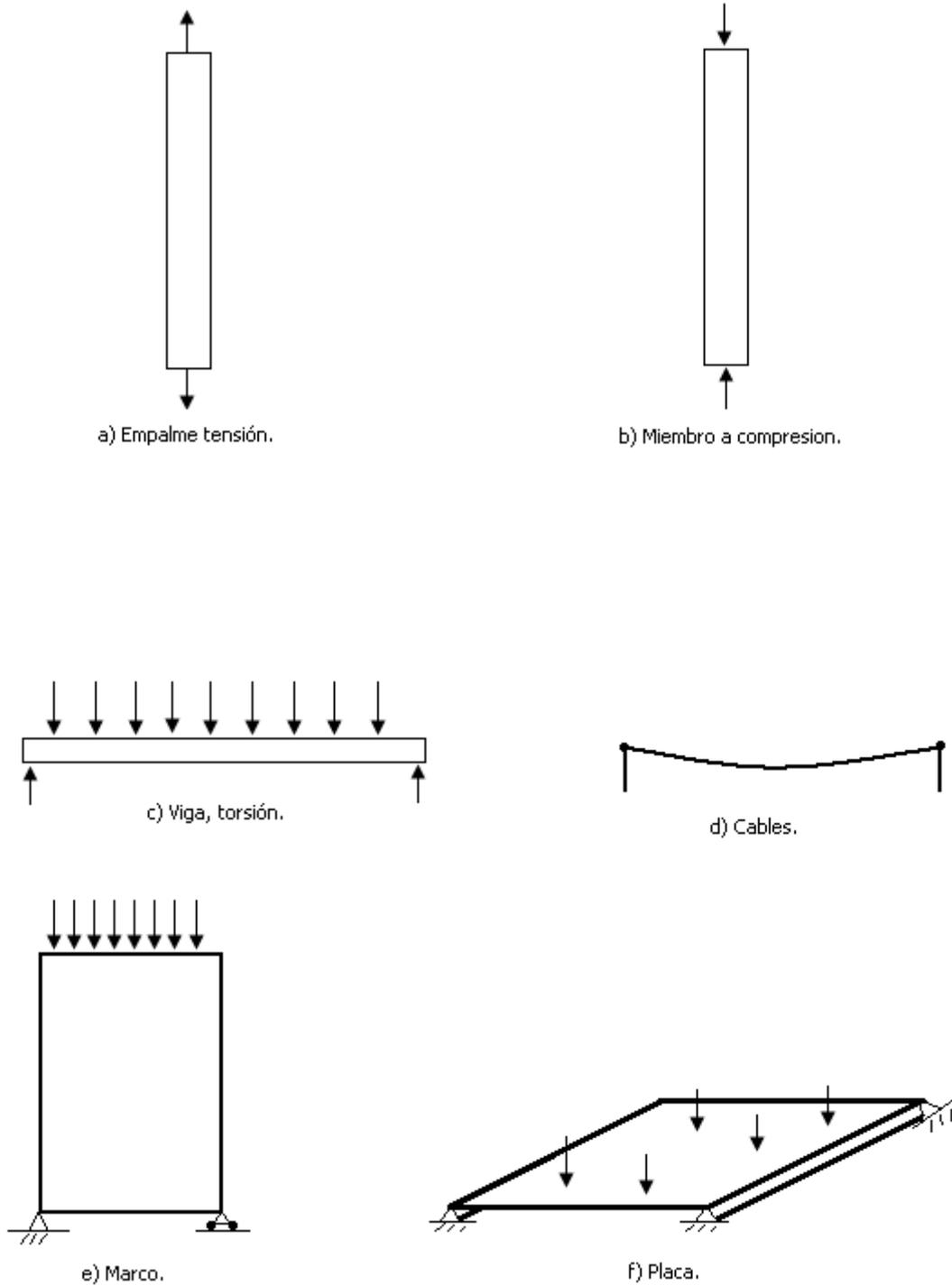
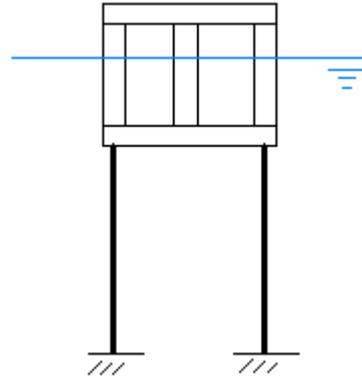
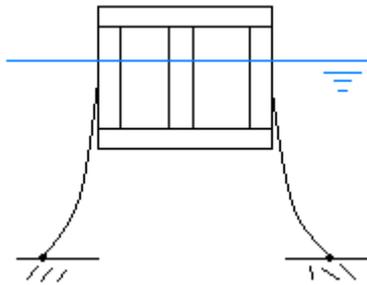


Figura 8. Esquemas de Esfuerzos y cargas sobre estructuras. Ref. [4]

Existen sistemas de posicionamiento, el cual ayuda a la plataforma a mantener el mismo punto, es decir, ayuda a no tener desplazamientos.

a) Sistema de amarré de catenarias.

b) Sistema de piernas tensionadas.



c) Sistema de empuje o posicionamiento dinámico.

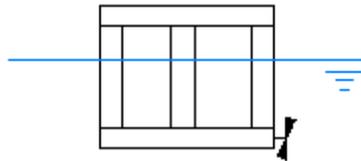


Figura 9. Esquema de sistemas de posicionamiento en estructuras flotantes. Ref. [4]

Todos y cada uno de estos elementos son diseñados, conforme a las características del lugar y las solicitaciones que tendrá la plataforma ya en el punto de instalación y operación. Tomando en cuenta los factores de seguridad que marca la norma, para evitar posibles accidentes, tanto materiales como pérdida de vidas humanas.

En general el tipo de estructura es escogido, o por lo menos se definen varias alternativas. La adaptación de los miembros es naturalmente regida por las magnitudes de las cargas, en cuyos tramos no son conocidas. Por lo tanto, la experiencia juega un papel importante en este paso y permite al diseñador evitar la necesidad de considerar demasiadas variaciones. Estas cargas son de varios tipos flotabilidad, cargas sobre la cubierta de la plataforma, cargas ambientales por oleajes, corrientes, viento, nieve, hielo, sismo y cargas accidentales hechas por el hombre como colisiones, explosiones y cargas por fuego. Las cargas pueden ser estáticas o dinámicas, temporales o permanentes, ocasionales o repetitivas. A estas cargas debe ser añadido el peso de la estructura, el cual es desconocido en esta etapa del diseño pero puede ser estimada con bastante exactitud. Dos aspectos son enfatizados en contacto con el análisis de los efectos de cargas; conociendo la diferencia entre el comportamiento estáticamente determinado e indeterminado, y estático y dinámico.

Para estructuras estáticamente determinadas, contenidas las cargas estáticas, las fuerzas y momentos en todos los miembros pueden ser simplemente ordenados usando las condiciones de equilibrio. Para estructuras estáticamente indeterminadas, es necesario hacer varias estimaciones del tamaño del miembro para determinar las tensiones en la estructura.

Cargas que varían en el tiempo, como las ráfagas de viento, las cargas por oleaje, impactos de explosiones y colisiones (cargas dinámicas) son difíciles de definir. El procedimiento convencional ha sido reemplazar las cargas no estáticas por cargas estáticas “equivalentes”. Las combinaciones de cargas que actúan simultáneamente son entonces definidas como “condiciones de carga” y son usados para el cálculo de tensión en los miembros. En muchos casos, la respuesta de las estructuras a cargas dinámicas debe investigarse en base al comportamiento dinámico de los materiales y propiedades estructurales. Relativamente pocas pautas respecto al análisis de carga-efecto pueden ser encontradas en los reglamentos. Esto es en parte difícil porque normalizaría la gran variedad de casos encontrados.

Cuando las propiedades de la sección son conocidas, es necesario verificar si o no, los supuestos pesos o la estructura corresponden a los pesos finales. Para estructuras teniendo espacios pequeños, el peso adecuado de la estructura es una pequeña porción de la carga total tal que, si el primer peso estimado es incorrecto, el cambio en la carga total es insignificante y es innecesario recalcular el rediseño. Sin embargo, para espacios grandes, el peso estructural es la mayor parte del total de la carga y errores pequeños en la estimación del peso puede tener una apreciable influencia sobre las cargas totales.

Para estructuras estáticamente indeterminadas, es necesario verificar si las rigideces relativas, de las secciones seleccionadas corresponden a los valores supuestos. Si las diferencias son pequeñas, no necesariamente se repite el análisis. Este es posible, cuando las diferencias son pequeñas, pero no insignificantes, para modificar el diseño sin repetir todos los cálculos. Después de la verificación de cargas, fuerzas internas y momentos, los miembros deben ser reverificados por tensiones, límites de deformaciones, y otros requerimientos de servicio, como los posibles efectos del arreglo de soporte, vibraciones, fatiga, efectos de las variaciones de temperatura, corrosión y la resistencia al fuego.

La construcción de estructuras de acero involucra a los propietarios, diseñadores, fabricantes y constructores (a menudo operadores marinos). Primero, los propietarios y diseñadores deben alcanzar un conocimiento concerniente al conjunto de requerimientos del proyecto. El contacto con los fabricantes es solamente necesario para asegurar la viabilidad de la fabricación y la instalación. En base a estos requerimientos, el diseñador prepara planos y especificaciones que describen en detalle el proyecto, entonces los fabricantes y los constructores construyen la estructura de estos planos y especificaciones. Las especificaciones juegan un papel importante en este proceso definiendo los estándares aceptables de calidad de los materiales, del obrero, y de la embarcación en fabricación y construcción.

Capítulo 1: Definición de cargas ambientales y sus efectos.

1.1 Clasificación de cargas.

Durante la vida útil, las estructuras marinas están sujetas a cargas o mejor dicho, a diversos tipos de cargas, para las cuales son diseñadas cumpliendo con los requisitos de seguridad con los que se rige el diseño de este tipo de estructuras. Este tipo de cargas considera una clasificación de la siguiente manera, en la cuales se mencionan diversos tipos, las cuales juegan un papel muy importante en el diseño de la estructura. A continuación se mencionan las cargas a considerar:

- *Cargas permanentes.*
- *Cargas variables.*
- *Cargas accidentales.*

1.1.1 Cargas permanentes.

Las cargas permanentes son cargas, que no deben variar en magnitud, posición o dirección durante el periodo de tiempo considerado. Por ejemplo:

- Peso de la estructura.
- Peso de equipo y lastre permanente, incluyendo amarras y risers.
- Presión hidrostática externa hasta el nivel medio del agua.
- Pre-tensado.
- Diferencia de presión hidrostática.

1.1.2 Cargas variables.

Las cargas variables se originan de operaciones normales de la estructura y variaciones en posición, magnitud y dirección durante el periodo considerado. Incluyendo:

- Personal.
- Helicópteros.
- Botes salvavidas.
- Grúas.
- Presiones en tanques.
- Almacenamiento de líquidos y artículos.
- Módulos y partes estructurales que pueden ser removidos.
- Impactos de embarcaciones, defensa y amarras.
- Peso de gas y líquido en plantas de proceso.
- Presión y temperatura.
- Lastre variable.
- Operaciones de instalación y perforación.

Junto con otras cargas que son consideradas como ambientales se encuentran las siguientes:

- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| I. Oleaje. | V. Temperatura del aire y del mar. |
| II. Viento. | VI. Hielo y nieve |
| III. Corrientes. | VII. Crecimiento marino. |
| IV. Oleadas y mareas de tormentas. | |

Otros fenómenos, tales como, tsunamis, composición anormal del aire y del agua, humedad del aire, salinidad del agua, flujo de hielo, icebergs, etc., pueden requerir consideraciones especiales.

1.1.3 Cargas accidentales.

Las cargas o acciones accidentales son causadas por operación anormal o por fallas técnicas. Incluye, por ejemplo, fuego y explosiones, fuego, explosiones, impactos de las embarcaciones y caída de objetos.

1.1.3a Fuego y explosiones.

Los principales eventos de explosiones y fuego, son asociados con fugas de hidrocarburo, válvulas, boquillas, etc.

Los siguientes tipos de fuego, deben entre otros ser considerados:

- Incendios sin apagar en el área de la cabeza del pozo.
- Fuego relacionado con fugas en los risers, colectores, equipos de procesos de carga o descarga, o tanques de almacenamiento: incluyendo bolas de fuego.
- Petróleo incendiado sobre el mar.
- Fuego en equipo o instalaciones eléctricas.
- Fuego sobre el helipuerto.
- Fuego en las habitaciones.
- Fuego sobre el pozo de cubierta o del mar.

Los siguientes tipos de explosiones son considerados:

- Explosiones por nubes de gas.
- Explosiones en espacios cerrados, incluyendo los espacios con maquinaria y otros cuartos con maquinaria, como tanques de almacenamiento de petróleo y gas.

1.1.3b Fuego.

La intensidad de acción del fuego se describe en términos del flujo térmico como una función del tiempo y el espacio, o simplemente, una curva estandarizada temperatura-tiempo para diferentes ubicaciones.

El flujo térmico del fuego se calcula en base al tipo de hidrocarburo, velocidad de liberación, combustión, tiempo y ubicación de ignición, ventilación y geometría estructural, usando formulas semi-empíricas, modelos analíticos, o numéricos del proceso de combustión.

Los modelos empíricos con exactitud razonable existen para pozos de fuego, nubes de fuego y muros de fuego.

Los efectos de cada tipo de fuego se determinan en base ha:

- Balance de calor (el flujo de calor incidente, radiante es balanceado por convección y conducción lejos de las superficie).
- Características de la estructura bajo calor.
- Propiedades térmicas y mecánicas a temperaturas elevadas.
- Propiedades de sistemas de protección de fuego activo y pasivo.

1.1.3c Explosiones.

Las explosiones pueden causar dos tipos de acciones, concretamente sobre-presión y arrastre.

La acción de sobre-presión debida a la expansión de productos combustibles se puede describir como la diferencia de presión en tiempo y espacio. Es importante asegurar que la velocidad de ascenso, la sobre-presión máxima y el área bajo la curva sean representadas adecuadamente.

La acción de arrastre es causada por el viento generado por la explosión, y es una función del cuadrado de la velocidad del gas, la densidad del gas, coeficiente de arrastre y el área expuesta del objeto. La acción de arrastre puede afectar tuberías, equipos y otros artículos.

1.1.3d Efectos combinados de fuego y explosiones.

Las cargas o acciones accidentales las cuales son combinaciones de eventos de fuego y explosiones se consideran con una probabilidad anual de 10^{-4} para el evento conjunto. El fuego y explosión que resultan del mismo tipo de combustible lanzado e ignición se deben suponer de acuerdo al mismo tiempo. El fuego y el análisis de expansión deben ser presentados tomando en cuenta los efectos de uno sobre el otro.

1.1.3e Caída de objetos.

En las acciones debidas a la caída de objetos deben incluirse los siguientes tipos de incidentes:

- Caída de equipo de levantamiento de carga.
- Caída del equipo de levantamiento.
- Balanceo involuntario de equipo.
- Pérdida de válvulas diseñadas para prevenir que se revienten las tuberías, o la pérdida de otro equipo de perforación.

La energía de impacto del equipo de levantamiento puede determinarse basándonos sobre la capacidad de levantamiento, la altura de levantamiento y la distribución del peso esperado en los objetos levantados.

La velocidad y trayectoria de la caída de los objetos en el agua, se determinan en base a la velocidad inercial, el ángulo de impacto sobre el agua, el efecto del impacto en el agua, velocidad de corriente posible y la resistencia hidrodinámica.

1.2 Cargas por Oleaje, Viento y Corriente.

Los parámetros que describen las condiciones ambientales se basan en observaciones de o en las inmediaciones de la ubicación relevante y sobre conocimientos generales de las condiciones ambientales en la zona. Los datos para la ocurrencia conjunta de las condiciones de oleaje, vientos y corrientes son registradas.

Según los reglamentos, las cargas ambientales están determinadas con la estipulación de probabilidades de excedencia. Los análisis estadísticos o datos simulados deben usar diferentes métodos estadísticos al evaluar la sensibilidad de los resultados. Los cálculos o distribuciones con respecto a los datos son probados por medio de métodos de análisis reconocidos.

El análisis de los datos se basa en el período de tiempo posible más largo para el área relevante. En el caso de series de tiempo cortos la incertidumbre estadística es tomada en cuenta para cuando se determinen los valores de diseño. La distribución más baja puede ser usada para extender la serie de tiempo medida o al interpolar al sitio donde los datos no han sido colectados. En este caso el modelo de distribución más bajo es calibrado contra los datos medidos, para asegurar que los resultados de baja distribución estadística cumplan con los datos medidos disponibles.

Las acciones son determinadas por análisis. Cuando las predicciones teóricas son sujetas a incertidumbres importantes, los cálculos teóricos deben ser sustentados por modelos de prueba u observaciones de estructuras existentes o por una prueba de tales combinaciones de observaciones y pruebas.

1.2.1 Cargas por Oleaje.

1.2.1a Modelos de ola.

Las olas pueden ser especificadas de acuerdo a la manera en que son consideradas en el diseño de los sistemas:

- Una descripción del periodo largo del estado de clima junto con una descripción del periodo corto de ola individual en cada uno de los estados del mar.

Las propiedades estadísticas del mar se suponen constantes dentro de un intervalo corto de tiempo y los parámetros H_s y T_z pueden ser usados para describir un estado de mar. La duración de un estado de mar se toma normalmente como de 3 horas.

Un periodo largo de observación del mar puede ser presentado por el registro de los parámetros H_s y T_z . Típicamente, la superficie del mar es observada por 20 minutos cada 3 horas, y H_s y T_z son estimados para cada periodo de observación. Esto puede hacerse del registro de las definiciones de H_s y T_z , las cuales son:

- Periodo de ola medio (T_z), es el valor medio definido por los periodos de ola.
- La altura significativa de ola (H_s), es el promedio más alto de las alturas de ola.

o por el cálculo del espectro de ola aplicando las ecuaciones de H_s y T_z :

$$H_s = 4\sqrt{m_0}$$

$$T_z \cong T_{02} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad 1.1 \text{ y } 1.2$$

La pareja de valores de H_s y T_z observados, puede ser dividida en clases y la probabilidad de cada pareja es escrita en una matriz, conocida como *diagrama de dispersión de ola*. También, la distribución acumulada del periodo largo de *la altura de ola significativa* puede encontrarse de las observaciones.

Esta distribución se describe normalmente con la distribución de Weibull:

$$P(H_s) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{H_s - H_0}{H_c - H_0} \right)^\gamma \right] \quad 1.3$$

- *Un diseño del periodo corto del estado del mar y una descripción de la ola individual en el estado de mar.*

El cálculo de los efectos de acción extremo puede basarse sobre periodos cortos de estados seleccionados. Esto es necesario para los sistemas significativamente influenciados por comportamientos no lineales. Para estas aplicaciones los efectos de acción son obtenidos del análisis dominio-tiempo y/o modelos de prueba.

El propósito general del concepto de tormenta de diseño es estimar las acciones y efectos de acción correspondientes a la probabilidad de excedencia anual prescrita, por ejemplo, 10^{-2} o 10^{-4} , sin hacer un análisis de respuesta de periodo largo completo. Una formulación adecuada del concepto de tormenta de diseño es usar combinaciones de alturas de ola significantes y espectros de periodo máximo ubicados a lo largo de una curva de nivel en el plano H_{m0} y T_p . Estas curvas de nivel se pueden establecer de diferentes maneras.

La manera más simple de establecer la curva de nivel de 10^{-2} es, primero establecer el valor de 10^{-2} de H_{m0} junto con la media condicional de T_p . La curva de nivel es entonces estimada del modelo conjunto de H_{m0} y T_p como la curva de densidad de probabilidad constante que pasa por la combinación del parámetro mencionado arriba.

- *Ola de diseño.*

Para la ola de diseño se especifica la altura de ola, H , el periodo de la ola, T y la dirección. Diferentes combinaciones de periodos de ola, alturas de ola y direcciones al mismo nivel de probabilidad (por ejemplo, 10^{-2} o 10^{-4}) pueden considerarse en orden para llegar a los valores más desfavorables para los efectos de diferentes acciones. De acuerdo con las parejas de (H, T) para cada dirección se puede obtener un largo periodo de curvas de nivel para (H, T) . Tales curvas de nivel pueden obtenerse usando información sobre el periodo corto de la función de densidad de probabilidad de (H, T) y el periodo largo de distribución de parámetros estado-mar (H_{m0}, T_p) .

Con efectos de acción, por ejemplo, la probabilidad de excedencia anual de 10^{-2} puede determinarse de manera simple, por el enfoque preliminar de la ola de diseño para el diseño de plataformas fijas. Para plataformas fijas las cuales responden a las acciones de olas con insignificantes efectos dinámicos, los efectos máximos de acción ocurren por las olas más altas. La relevante ola más alta H_{100} es entonces tomada para hacer la probabilidad de excedencia de 10^{-2} . H_{100} puede ser tomada como 1.9 veces la altura de ola significativa H_{m0} , correspondiente a una probabilidad de excedencia anual de 10^{-2} , como se obtuvieron las estadísticas de periodo largo, cuando la duración del estado de mar es de 3 horas.

El periodo T usado en conjunto con H_{100} deberá variar en el siguiente rango:

$$\sqrt{(6.5H_{100})} \leq T \leq \sqrt{(11H_{100})} \quad 1.4$$

En la ausencia de la documentación de detalle, la altura de ola H_{10000} con probabilidad de excedencia anual de 10^{-4} se puede tomar para ser 1.25 veces H_{100} , mientras que el periodo se incrementa el 5%.

Los máximos efectos de acción no siempre son causados por alturas de olas extremas, pero son bastante sensibles a olas de longitud definida y escarpado extremo. Ejemplos son los efectos de las acciones estructurales en instalaciones flotantes con columnas y pontones. Una simplificación, precautoria al aproximarse a la determinación de los efectos de acción con probabilidad de excedencia anual 10^{-2} en tal situación se puede basar sobre una ola con periodo crítico (largo) causado para instancias de fuerzas máximas de agrietamiento en el marco de trabajo de las plataformas flotantes.

Para olas de aguas profundas. H_d no necesita ser más grande de 1.9 veces la altura de la ola importante, que corresponde a una probabilidad de excedencia anual de 10^{-2} , o la altura de ola con una probabilidad de excedencia anual de 10^{-2} de acuerdo a la distribución del periodo largo.

Un tren de olas regulares se puede usar para establecer una relación entre esfuerzo (rango) y la altura de ola para el uso simplificado de los efectos de las acciones de periodo largo para el análisis por fatiga. Estas olas deben ser definidas seleccionando el periodo de ola (largo) correspondiente a la ola más escarpada igual a $1 / 20$ y debido a las consideraciones de los máximos de la función de transferencia para efectos de acciones importantes.

1.2.2 Cargas por corriente.

1.2.2a Velocidades de corriente.

La velocidad de corriente en la ubicación de la instalación debe establecerse en base a mediciones previas en la ubicación actual y adyacente, predicciones de distribución y corrientes de viento inducidas, como también modelos teóricos y otra información sobre mareas y corrientes costeras. Si la velocidad de corriente es significativamente importante para el diseño y los datos de corriente existentes son de incertidumbre y raros, las mediciones de la velocidad de corriente son llevadas a la ubicación en cuestión.

Los valores característicos de la velocidad de corriente se determinan de acuerdo con las inherentes incertidumbres. Si los suficientes datos conjuntos sobre corriente y condiciones de ola están disponibles, la distribución conjunta de los parámetros ambientales y las correspondientes curvas de nivel (o superficies) para un nivel de probabilidad de excedencia dado puede establecerse del mismo modo que para las condiciones de ola.

Además, los efectos de otras corrientes se consideran por separado en cada caso, incluyendo los efectos de:

- Corrientes de costa y oceánicas.
- Corrientes en remolino locales.
- Corrientes sobre cuevas empinadas.
- Corrientes causadas por oleadas de tormentas.
- Olas internas.

1.2.2b Efectos de ola y corriente.

Las corrientes se producen por la acción del viento, del oleaje, de la marea, y por la diferencia de densidades de masa de agua que se generan por la salinidad y temperatura del agua. La acción de las corrientes es importante en el diseño de las plataformas, pues contribuye en las fuerzas actuantes sobre las mismas y en la determinación de la localización de los atracaderos, defensas de pierna y defensas de ductos ascendentes.

Las categorías más comunes de corrientes son: corrientes asociadas con la marea astronómica, corrientes asociadas con el patrón de circulación de las aguas del océano y corrientes generadas por la acción de tormentas. La suma de estos tres tipos de corrientes conforma el perfil total de corriente.

La presencia de corriente en el agua produce tres efectos distintos.

- Primero, la velocidad de la corriente deberá adicionarse vectorialmente a la velocidad horizontal de la partícula de agua antes de calcular la fuerza de arrastre. Debido a que el arrastre depende del cuadrado de la velocidad horizontal de la partícula y porque la velocidad de la corriente disminuye suavemente con la profundidad, una corriente comparativamente pequeña puede incrementar el arrastre de manera importante.
- El segundo efecto es una modificación del perfil de la ola al cambiar la celeridad de la misma. Este efecto es muy pequeño y puede no tomarse en cuenta.
- El tercer efecto hace a la estructura por sí misma generar olas, las cuales a su vez producen fuerzas de difracción. Sin embargo, estas fuerzas no se toman en cuenta para valores prácticos de corriente actuando en miembros normales.

Las olas y corrientes son consideradas en los cálculos de acciones hidrodinámicas. En combinación con olas, la velocidad de corriente debe ser desplegada en la superficie local del agua. La acción hidrodinámica en miembros esbeltos, con una longitud de ola al diámetro del miembro mayor que 5, se determina por la ecuación de Morrison's usando una velocidad particular obtenida por la suma de un vector de ola y velocidades de corriente inducidas.

1.2.3 Cargas por viento.

1.2.3a Datos de viento.

La velocidad del viento en la ubicación de la instalación se establece en base a mediciones previas en la ubicación actual y adyacente, predicciones de distribución, como también modelos teóricos y otra información meteorológica. Si la velocidad del viento es de significativa importancia para el diseño y los datos existentes son raros y de incertidumbre, las mediciones de la velocidad de viento debe ser llevadas a la ubicación en cuestión.

1.2.3b Descripción de viento.

Los componentes estructurales cargados principalmente por viento deben diseñarse para condiciones extremas de velocidades de viento, proyectadas en direcciones y promedios de tiempo predeterminados como una función de su intervalo de recurrencia, obtenidos a partir de mediciones efectuadas en el sitio de interés, datos de recurrencia, magnitud y medidas de velocidades de ráfagas y viento sostenido, además de registros de la dirección de los vientos. La velocidad y dirección de viento varía con respecto al espacio y tiempo. Sobre una escala horizontal típica de cada estructura costa afuera, las propiedades estadísticas de viento (media y desviación estándar de velocidad) toman cada duración del orden de una hora no variable horizontalmente, pero cambia con la elevación (factor de perfil). Por lo tanto, un valor de velocidad de viento es sólo significativo si es calificado por la elevación y la duración.

Para una condición de periodo corto, el viento puede describirse por el promedio de la velocidad media del viento y una fluctuación de ráfagas de viento súper-impuesta con valor medio igual a cero (0), así como también una dirección media. A menos que se haga un cálculo más detallado de la velocidad media del viento a 10 metros sobre el nivel del mar, el valor característico con una probabilidad de excedencia anual de 10^{-2} puede escogerse como 41 m/s (10 min. promedio) o 38 m/s (1 hora promedio) para la plataforma continental.

Las estructuras o componentes estructurales que no son susceptibles a ráfagas de viento se calculan considerando como estática, la acción del viento. En el caso de estructuras o partes estructurales donde la dimensión máxima es menor que 50m aproximadamente, 3 segundos de ráfaga de viento pueden usarse para los cálculos de las acciones estáticas del viento. En el caso de estructuras o partes estructurales donde la máxima longitud es mayor que 50m, el periodo medio para viento se puede incrementar 15s.

Para estructuras o elementos estructurales que son expuestos a vientos simultáneos o acciones de olas, y donde la acción de la ola es la acción dominante, 1 min. de viento medio, puede ser usado en combinación con las acciones extremas de las olas.

1.3 Caracterización del oleaje.

El viento es responsable de la generación del oleaje que se desplaza sobre la superficie del agua y este juega un papel muy importante en el diseño de estructuras flotantes. Si observamos el mar durante una tormenta, su superficie parece estar en un estado de confusión y es difícil apreciar que entre el desorden es posible detectar los diferentes trenes de olas que allí se generan. Las olas son movimientos ondulatorios, oscilaciones periódicas de la superficie del mar, formadas por crestas y depresiones que se desplazan horizontalmente.

Para el estudio de las olas, éstas se dividen en: olas de agua profunda, que no están influenciadas por el fondo, se mueven independientemente de él y; las olas costeras en que por disminución de la profundidad del agua, su forma y movimiento están afectados por el fondo.

Las olas se caracterizan por su: longitud de onda, período, pendiente, altura, amplitud y velocidad de propagación, variables físicas y geométricas que se definen a continuación:

Longitud de onda (L): es la distancia horizontal entre dos crestas o dos depresiones sucesivas.

- Período (T): es el tiempo, contado en segundos, entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto.
- Altura (H): distancia entre la cresta de la ola y el nivel medio del mar.
- Pendiente: relación entre la altura y la longitud de onda (H/L).
- Amplitud (A): distancia entre la cresta y el valle de la ola.
- Velocidad de propagación: $V = \frac{\text{Longitud de onda}}{\text{Período}}$

Como las olas son muy variables para analizarlas y describirlas se usan métodos estadísticos. Así, para la altura, normalmente se refiere a la altura significativa, esto es el promedio de 1/3 de las olas más altas observadas en una serie, en un período de tiempo determinado.

1.3.1 Olas en agua profunda.

Producen un movimiento más o menos regular en la superficie del océano, denominado oleaje, en el cual la altura de la ola es relativamente débil en relación con el largo de la onda. El oleaje se propaga en el océano por lo general muy lejos del lugar donde se origina. Este oleaje es teórico y se explica por soluciones matemáticas.

1.3.2 Ola teórica.

Un hecho de observación común es que los objetos que flotan en la superficie del mar simplemente suben y bajan cuando la ola pasa por ellos. Esto ocurre porque las partículas de agua responden al paso de la onda y se mueven en órbitas circulares cuyo diámetro disminuye con la profundidad.

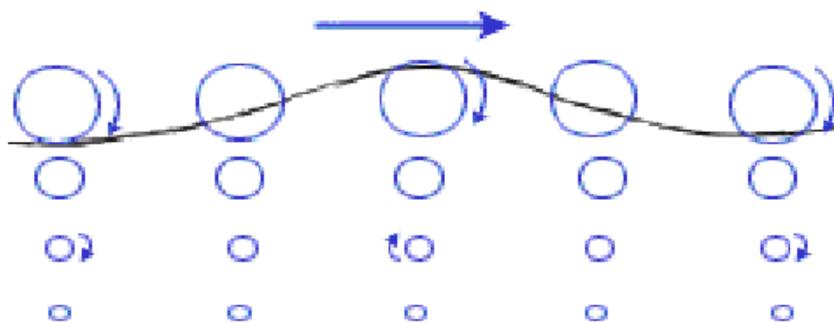


Figura 1.1 Ola teórica, Ref. [5]

- Las partículas de la superficie del mar describen círculos cuyo radio depende de la profundidad.
- El diámetro de las trayectorias disminuye con la profundidad y es prácticamente nulo en profundidad.

- El perfil del oleaje corresponde a un trocoide, que es la curva descrita por un punto de un disco que rueda sobre una recta.
- La ola en agua profunda corresponde a una onda de superficie. Al llegar a la costa se transforma en ola costera, ola de masa.

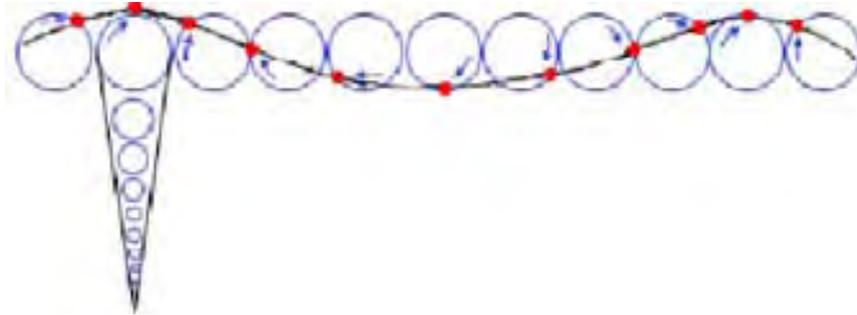


Figura 1.2 Descripción del movimiento de las partículas de agua de la Ola teórica. Ref [5]

A una profundidad igual a la mitad de la longitud de onda, el diámetro de las órbitas de las partículas de agua es $1/25$ veces del diámetro de la superficie y para propósitos prácticos, se considera este nivel como la máxima profundidad del movimiento del oleaje.

En aguas más profundas que la mitad de la longitud de onda, las partículas orbitantes no entran en contacto con el fondo oceánico, mientras que a profundidades menores que la mitad de la longitud de onda, las órbitas son achatadas por la resistencia debida a la fricción, pierden energía y se dice que la ola "siente el fondo". Se reconoce esta profundidad como el máximo nivel en que las olas pueden mover partículas y erodar los sedimentos finos del suelo oceánico, se le llama nivel del oleaje.

Cuando la profundidad es inferior a la mitad de la longitud de onda, la ola empieza a ser influenciada por el fondo que la hace sufrir deformaciones, que son independientes de la dirección de propagación y ocurre la rompiente. Otras deformaciones consisten en la modificación de la dirección de propagación, las cuales generan fenómenos de: refracción; reflexión; difracción.

1.3.3 Olas reales.

Las olas reales se alejan bastante de las olas teóricas, en las áreas donde sopla el viento que las genera. En las áreas de generación del oleaje hay una agitación aparentemente anárquica de la superficie. Con vientos sobre 9° Beaufort se observan montañas desordenadas de agua de alturas muy variables, sobre estas grandes olas se forman otras más pequeñas.

Así, la estructura superficial del océano es el resultado de la superposición de varios trenes de olas que se interfieren resultando depresiones y cumbres. La interferencia puede dar anulación o un reforzamiento.

Si la velocidad del viento es mayor a 5 m/seg , la altura de la ola crece más rápido que la longitud de onda, la pendiente aumenta y si sobrepasa el límite, las olas revientan independientemente de toda influencia del fondo generándose olas forzadas.

Las áreas de generación poseen espectros de olas muy variadas, de diferente longitud de onda. Como la velocidad aumenta con la longitud de onda, las olas que salen de esta zona de generación no progresan a la misma velocidad. A medida que el oleaje sale de esta área se va clasificando, simplificando, tomando el aspecto de ondulaciones paralelas y disminuyendo la pendiente.

El desarrollo de las olas se atribuye a tres factores principales:

1. La velocidad media del viento.
2. La duración del tiempo en que actúa.
3. La distancia sobre la que ha soplado (fetch).

Con relación al tipo de olas se distinguen los siguientes ambientes de oleaje:

1.3.4 Ambientes de ola de tormenta.

Estos ocurren en las altas latitudes donde soplan vientos fuertes y frecuentes, creando olas altas y de fuerte pendiente. La dirección dominante de los vientos en estos cinturones templados es Oeste. La costa oeste de Patagonia es probablemente la más atacada por las olas de tormenta durante todo el año y contrasta con la costa este donde el ataque es menor.

1.3.5 Ambiente de olas de costas oeste.

Olas largas y bajas que se han generado en los cinturones de tormenta y que posteriormente han disminuido su energía al alejarse de sus áreas de formación. Su nivel energía es mayor en las latitudes más altas y moderadas en los trópicos. Son costas relativamente homogéneas desde punto de vista del oleaje, exceptuando parte de las costas de México que pueden estar afectadas por ciclones tropicales; o las costas de la India en que el oleaje puede ser reforzado por olas generadas por el monzón estacional.

1.3.6 Ambiente de costas este.

Niveles de energía bajos a moderados, con la excepción de sectores de costas tropicales afectados por ciclones.

1.3.7 Ambientes protegidos.

Se trata de costas en las que el oleaje oceánico no penetra porque se encuentran protegidas por cubiertas de hielo o porque se encuentran localizadas fuera de los cinturones de tormenta. Generalmente son ambientes de olas de baja energía las costas polares y los mares cerrados donde hay poco fetch que restringe el desarrollo de la ola.

1.3.8 Principales áreas de generación del oleaje.

Son aquellas donde soplan los vientos del Oeste en las zonas templadas de los dos hemisferios. Las tormentas dan origen a olas del NW y SW, a partir de los 40° de latitud.

Fuera de estas regiones hay sólo un área importante en la generación de olas: el mar de Arabia, en los meses de junio, julio y agosto, durante el monzón de verano que es muy violento.

Los vientos alisios rara vez generan grandes olas. Los ciclones tropicales generan olas enormes pero en forma muy irregular. Así, la mayor parte de las olas observadas en las regiones intertropicales son originarias de las regiones de latitudes más elevadas y son propagadas libremente sobre miles de kilómetros.

Las regiones que tienen alta frecuencia de ocurrencia de vientos fuertes son en consecuencia, las regiones principales de generación de olas y corresponden a las zonas de actividad frontal en las más altas latitudes de ambos hemisferios. El cinturón de tormentas del sur es el área generadora de olas más clara y definida del mundo porque allí se registran gran cantidad de vientos fuertes (8-9° Beaufort), son relativamente persistentes en cuanto a ubicación y soplan.

1.4 Descripción de las condiciones ambientales para diseño.

1.4.1 Periodo de la ola.

El periodo de oleaje es el tiempo requerido para que dos crestas o valles sucesivos pasen por un mismo punto en particular.

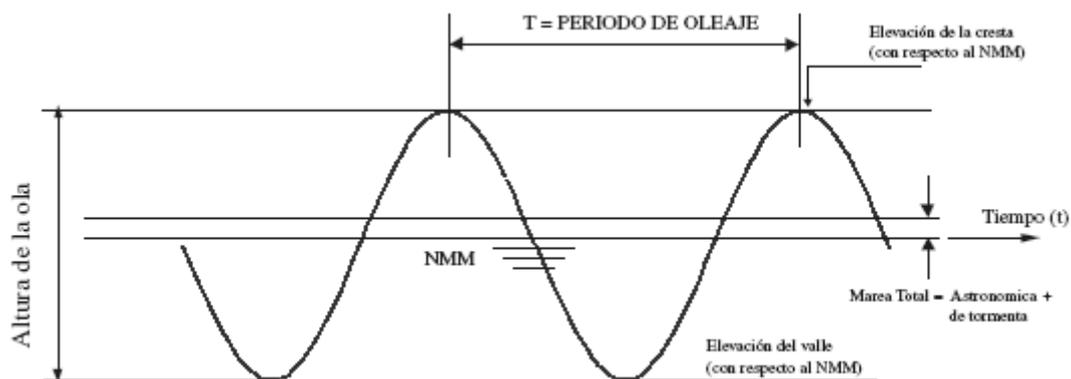


Figura 1.3 Características del oleaje. Ref. [1]

1.4.2 Altura de Ola.

La altura de ola es una propiedad que especifica el tamaño de oleaje y está definido por la diferencia entre el punto máximo de la cresta (punto superior del oleaje) y el valle del oleaje (punto inferior). La altura del oleaje depende principalmente de la acción del viento sobre la superficie del agua.

La altura de ola a considerar en el diseño debe ser desarrollada y presentada como una función de su promedio de recurrencia esperado. Otros datos que se toman en cuenta son:

- Rango probable y distribución de periodos de ola asociados con una altura de ola extrema.
- Distribución proyectada de otras alturas de ola.
- Elevaciones máximas de cresta y el espectro de energía de oleaje del estado de mar que genera una altura de ola extrema.
- Las corrientes que originen una altura de ola extrema.
- La naturaleza, datos y lugar de los eventos a considerar.

1.4.3 Estados de Mar.

Los estados de mar se refieren a la altura (H), el periodo de la ola (T) y las características de la ola, sobre la superficie de un gran cuerpo de agua. El gran número de variables involucradas en la creación del estado de mar, no puede ser fácil y rápidamente sumadas, así que escalas más simples son usadas para dar una descripción de las condiciones de agitación de corriente.

En aplicaciones de Ingeniería, los estados de mar son caracterizados a menudo por los siguientes parámetros:

- La altura de ola significativa H_{m0} o $H_{1/3}$ – un tercio de la altura media de la ola.
- El periodo medio de la ola, T_1 .
- Velocidad del viento.

1.4.3a Descripción:

Fuerza	Descripción	Descripción del Mar	Vel. Nudos	Pronostico	Rango	Estado de mar	Altura de Ola en [m]
0	Calma	El mar tiene la apariencia de un espejo.	0	calma	<1	calma	0
1	Viento ligero	Las olas se forman dando la apariencia de balanzas, sin formación de espuma en la cresta.	2	ligero	1 a 3	suave	0.1
2	Briza ligera	Se forman pequeñas olas, aún cortas pero profundas, las crestas tienen apariencia cristalina y no se rompen.	5	ligero	4 a 6	suave	0.2 a 0.3
3	Briza suave	Las olas son grandes, las crestas comienzan a romperse, aparición de espuma cristalina.	9	ligero	7 a 10	ligeramente moderado	0.6 a 1.0
4	Briza Moderada	Las pequeñas olas comienzan a crecer y a alargarse, son bastante frecuentes	13	moderado	11 a 16	moderado	1.0 a 1.5
5	Briza Fresca	El oleaje es moderado, toma una forma más alargada y pronunciada, existe cambio en la espuma.	19	fresco	17 a 21	agitado	2.0 a 2.5
6	Briza Fuerte	Formación de grandes olas, mientras que la espuma en la cresta comienza a extenderse.	24	fuerte	22 a 27	muy agitado	3.0 a 4.0
7	Semi-Vendaval	Montones de mar se levantan, mientras que la espuma de la ola golpea a lo largo en línea a la dirección del viento.	30	fuerte	28 a 33	alto	4.0 a 5.5
8	Vendaval	Olas altas de gran longitud, las crestas de las olas rompen y la espuma se ve como líneas blancas sobre el mar.	37	vendaval	34 a 40	muy alto	5.5 a 7.5
9	Vendaval fuerte	Olas muy altas, densas líneas de espuma en la dirección del viento, las crestas de las olas comienzan a caer y a dar vuelta, la espuma puede afectar la visibilidad.	44	vendaval grave	41 a 47	muy alto	7 a 10
10	Tormenta	Olas muy altas con cresta muy largas, la espuma da como resultado en grandes parches de color blanco sobre la superficie del mar, mientras que las olas golpean en la dirección del viento, la caída de las mismas se hace más pesada y es afectada la visibilidad.	52	Tormenta	48 a 55	Fenomenal	9.0 a 12.5
11	Tormenta violenta	Olas excepcionalmente altas (embarcaciones pequeñas y de tamaño medio podrían perderse por unos instantes detrás de las olas), el mar esta totalmente cubierto por parches blancos de espuma que se tienden a lo largo y en la dirección del viento, la visibilidad es afectada.	60	tormenta violenta	56 a 63	fenomenal	11.5 a 16
12	Huracan	El aire es cubierto con espuma, mar totalmente blanco, la visibilidad muy seriamente afectada.	> 64	huracan			> 16

Tabla 1.1 Descripción cualitativa de los estados de mar. Ref [7]



Fig. 1.4 Calma. Ref. [7]



Fig. 1.5 Viento Ligero. Ref. [7]



Fig. 1.6 Brisa Ligera. Ref. [7]



Fig. 1.7 Brisa Suave. Ref. [7]



Fig. 1.8 Brisa Moderada. Ref. [7]



Fig. 1.9 Brisa Fresca. Ref. [7]



Fig. 1.10 Brisa Fuerte. Ref. [7]



Fig. 1.11 Semi-Vendaval. Ref. [7]



Fig. 1.12 Vendaval. Ref. [7]

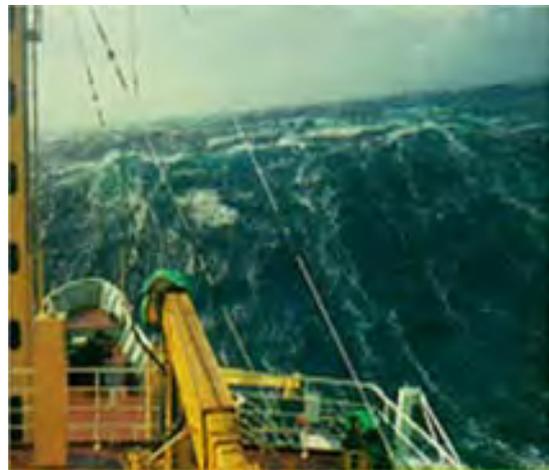


Fig. 1.13 Vendaval Fuerte. Ref. [7]



Fig. 1.14 Tormenta. Ref. [7]



Fig. 1.15 Tormenta Violenta. Ref

1.5 Comportamiento de Sistemas Flotantes ante Oleaje.

1.5.1 Tipos de movimientos.

El comportamiento de embarcaciones, con el movimiento de las olas ha sido estudiado durante el periodo de 1970 a 1985, dando como resultado avanzados modelos numéricos, capaces de calcular los movimientos, línea de amarra y fuerzas de defensa en tres dimensiones bajo varias combinaciones de altura de ola, periodo y dirección. Estos llamados seis grados de libertad, son herramientas complejas, requieren de una extensa y detallada contribución de datos sobre las características de la embarcación, configuración de amarras, exposición en puerto y condiciones de ola. En la etapa de planeación de un puerto o terminal estos datos a menudo no están disponibles, mientras son una necesidad más para estimaciones aproximadas de los movimientos.

Como se menciona anteriormente existen seis tipos de movimiento relacionados con las embarcaciones, estos movimientos son clasificados de la siguiente manera:

- **MOVIMIENTOS DE TRASLACIÓN.**- Dentro de los cuales se encuentran los movimientos: **1) longitudinal** (surge), respecto a la eje x, **2) transversal** (sway), respecto al eje y, y **3) vertical** (heave), respecto del z.
- **MOVIMIENTOS DE ROTACIÓN.**- Aquí se encuentran clasificados los siguientes: **4) cabeceo** (pitch), con respecto al eje y, **5) balanceo** (roll), respecto del eje x, y **6) giro** (yaw), respecto del eje z.

1.5.1a Breve descripción de los tipos de movimientos.

Longitudinal (surge).- Describe el deslizamiento del movimiento longitudinal de la embarcación.

Transversal (sway).- Describe el deslizamiento lateral, movimiento lado a lado de una embarcación.

Vertical (heave).- Describe el movimiento vertical, arriba y abajo de una embarcación.

Cabeceo (pitch).- Describe el movimiento sobre su eje transversal de una embarcación, causando que la proa y la popa del barco asciendan y desciendan repetidamente.

Balanceo (roll).- Describe el movimiento de la embarcación sobre su eje longitudinal, esto causa que la embarcación se meza de un lado a otro.

Giro (yaw).- Describe el movimiento de una embarcación sobre su eje vertical, esto causa que la proa y la popa se meneen de izquierda a derecha repetidamente.

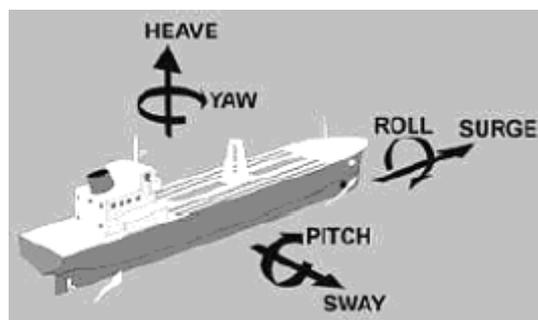


Figura 1.16 Movimientos de un FPSO. Ref [9]

1.6 Determinación de las Fuerzas Producidas por Oleaje.

Un tema de vital importancia en el diseño de estructuras costa fuera es la determinación de la acción de la ola la cual puede ser esperada donde la estructura será puesta. Hasta ahora, distintos programas fueron desarrollados para ayudar al diseñador en los cálculos de la acción de ola (movimiento) sobre cuerpos, los cuales son esbeltos o sobre las partes de la estructura que simplemente dan forma.

Aunque métodos de cálculo actuales han sido aplicados respecto de la acción de la ola sobre estructuras, movimientos de embarcaciones debidas a las olas, etc., han sido en principio establecidas matemáticamente por mucho tiempo, fue solamente hasta hace algunas décadas que ingenieros navales y civiles empezaron a aplicar las teorías existentes en técnicas de cálculo prácticamente aplicables.

La carga dinámica es la carga que varía apreciablemente con el tiempo, tal como la carga por oleaje. La respuesta de las estructuras a la carga dinámica es generalmente dependiente no solo de la magnitud de la carga, sino también sobre la historia de la carga.

Existen dos metodologías para el cálculo de las fuerzas por oleaje:

- Fuerzas en elementos esbeltos
- Fuerzas en cuerpos de gran dimensión (difracción).

1.6.1 Fuerzas de oleaje en elementos esbeltos.

Las fuerzas inducidas por oleaje pueden ser estimadas usando cualquier ecuación de Morrison, ya sea lineal o no lineal. La dificultad en el uso de la ecuación no lineal de Morrison surge de la relación no lineal entre la fuerza de la ola y la respuesta de la estructura en los términos de dominio-arrastre. La forma lineal de la ecuación de Morrison simplifica la estimación de las fuerzas por oleaje en estructuras costa afuera.

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho D |u| |u| + \frac{1}{4} C_m \rho \pi D^2 \frac{\partial u}{\partial t} \quad 1.5$$

La ecuación de Morrison solo es válida cuando el diámetro del miembro estructural es pequeño comparado con la longitud de ola. Se supone que la estructura no influye en el dibujo de la propagación de la ola. Cuando el miembro estructural es grande en diámetro comparado con la longitud de ola, la difracción de las olas tiene que ser tomada en cuenta. Normalmente la ecuación de Morrison es aplicable cuando la longitud de ola es más de cinco veces el diámetro o la dimensión proyectada del miembro estructural.

Nos enfocaremos en el fenómeno de la difracción que es fundamental en el diseño de buques. Ya que esta se emplea en el estudio de elementos estructurales con un diámetro mayor comparado con la longitud de la ola.

1.6.2 Difracción.

La difracción usualmente ocurre cuando las olas encuentran obstáculos penetrantes en la superficie, tales como rompe olas o una isla. Esto debe parecer que sobre el lado de sotavento de la isla, el agua debe estar en perfecta calma, sin embargo no lo es. Las olas al pasar el obstáculo, las olas giran detrás de la región del obstáculo, llevando energía.

Esta energía es transmitida lateralmente y hacia delante encima de la cresta. Cuando una parte del tren de olas es interrumpido por un obstáculo, el efecto de la difracción se manifiesta en la propagación de las olas dentro del área o región de la sombra geométrica del obstáculo.

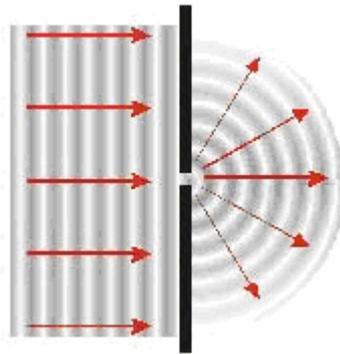


Figura 1.16 Efecto de difracción de ola. Ref [21]

1.6.3 Teoría de ola lineal (uniforme).

A continuación se dan las definiciones generales de los símbolos que se necesitan en la teoría de ola lineal:

x, y.- son coordenadas cartesianas con $y = 0$, aún al nivel fijo del agua (hacia arriba).

$\eta(x, t)$.- superficie libre del agua; $t =$ tiempo.

u, v.- componentes de velocidad en las direcciones de x, y, respectivamente.

$\phi(x, y, t)$.- la velocidad potencial en dos dimensiones.

ρ .- densidad del fluido.

a.- Amplitud de ola = $H/2$.

k.- número de ola = $2\pi/L$.

σ .- frecuencia de ola = $2\pi/T$.

d.- profundidad media del agua.

g.- aceleración de la gravedad.

H.- altura de ola.

L.- longitud de ola.

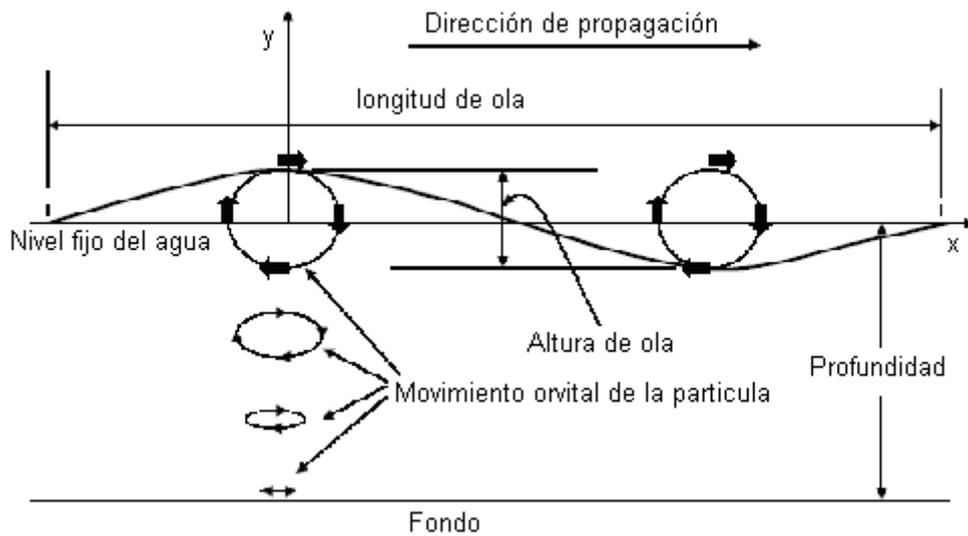
T.- periodo de la ola.

C.- celeridad de la ola = L/T .

La teoría de la ola lineal es una solución de la ecuación de Laplace:

$$\frac{\delta^2 \phi}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \phi}{\delta y^2} = 0 \tag{1.6}$$

El flujo particular en varias condiciones es determinado por las condiciones límite, en este caso las condiciones límite en la superficie del fluido y en el fondo.



La solución para satisfacer la potencial ecuación de Laplace, 1.6, sujeta a las condiciones límite es:

$$\phi = \left(\frac{ga}{\sigma} \right) \frac{\cosh k(y-d)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \tag{1.7}$$

$$\sigma = \left(\frac{gHT}{4\pi} \right) \frac{\cosh \left[\left(\frac{2\pi}{L} \right) (y+d) \right]}{\cosh \left(\frac{2\pi d}{L} \right)} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \tag{1.8}$$

$$\eta = a \cos(kx - \sigma t) = \frac{H}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \tag{1.9}$$

$$\sigma = (gk \tanh kd)^{\frac{1}{2}} \tag{1.10}$$

ó

$$L = \left(\frac{gT^2}{2\pi} \right) \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \tag{1.11}$$

ó

$$C = \left[\left(\frac{gL}{2\pi} \right) \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad 1.12$$

En agua profunda, $d/L > 5$, $\tanh(2\pi d/L) \approx 1.0$

$$\therefore L_o = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2 \quad 1.13$$

donde el subíndice “o” agua profunda.

En aguas “poco profundas” $d/L < 0.04$, $\tanh(2\pi d/L) \approx 2\pi d/L$

$$\therefore L = T(gd)^{\frac{1}{2}}; C = \sqrt{gd} \quad 1.14$$

Para todas las profundidades la longitud de ola L , puede ser encontrada por la iteración de:

$$\frac{d}{L_o} = \frac{d}{L} \tanh \left(\frac{2\pi d}{L} \right) \quad 1.15$$

1.6.4 Coeficiente de Cinemática.

Este factor se recomienda usarlo para tomar en cuenta las condiciones de irregularidad del oleaje. Se recomienda usar un factor de cinemática de la ola de 0.85 en la condición de Tormenta y para la condición de Operación el factor a usar será de 1.0.

1.6.5 Coeficiente de Arrastre y de Inercia.

En el ambiente de océano, las fuerzas que se predicen por la ecuación de Morison se pueden equiparar con las fuerzas de inercia y arrastre medidas razonablemente bien en cualquier tiempo particular del ciclo de oleaje con los coeficientes de arrastre y de inercia C_d y C_m . Los valores de C_d y C_m están en función de la rugosidad del elemento, el número de Reynolds, la relación corriente/velocidad de oleaje y de la orientación del elemento. Para fijar estos valores es muy difícil tomar en consideración todos los factores mencionados con anterioridad para cada condición predominante.

Los valores a usar para los coeficientes de arrastre e inercia ($C_d=1.05$ y $C_m=1.20$ para ambos casos de Tormenta y Operación).

Capítulo 2: Determinación de Esfuerzos para Análisis de Fatiga.

El fenómeno de fatiga puede definirse como un proceso de acumulación de ciclos de daño en un material bajo la fluctuación de esfuerzos (tensiones y torsiones). Dicho daño no es otra cosa que diminutos incrementos en el tamaño de una grieta, la cual se genera a partir de defectos microscópicos del material, como por ejemplo aquellos inducidos por la soldadura. Una característica importante del daño por fatiga en componentes estructurales, es que la falla ocurre después de un cierto número de fluctuaciones de carga que han sido aplicadas. Por lo general, la magnitud de dichas fluctuaciones de carga es por lo general muy reducida comparada con la capacidad estática del elemento estructural.

En fatiga, el parámetro más importante del efecto de carga es la magnitud de fluctuación de esfuerzos, comúnmente referida como rango de esfuerzos, definida como la diferencia entre un esfuerzo máximo (cresta) y el siguiente valle (valle). El nivel medio, es decir, alrededor de donde ocurre la fluctuación de esfuerzos o la magnitud del máximo esfuerzo son relativamente de menor importancia comparados con el rango de esfuerzos.

Es un hecho generalmente aceptado que el principal controlador del parámetro es el rango de esfuerzo. En estructuras reales, dicha fluctuación de esfuerzos puede implicar que se presenten esfuerzos de compresión, lo que teóricamente no produce daño por fatiga. Por tal razón resulta conservador asumir que el rango de esfuerzos que se presenta en la estructura induce tensión en todo momento.

El presente capítulo describe la manera en que se calcula el rango de esfuerzos en estructuras sujetas a cargas cíclicas, describiendo los diferentes procedimientos aplicados para lograr un adecuado diseño por fatiga.

2.1 Descripción de cargas por Fatiga.

Los varios tipos de cargas actuantes sobre las estructuras son llamadas acciones. El cálculo real de las cargas es experimentado por un componente o estructura en servicio, es una parte crucial en el proceso de diseño por fatiga. Las cargas son estimadas en base a las condiciones de operación planeada del componente o estructura, o pueden ser medidas sobre prototipos existentes de estructuras o componentes bajo condiciones reales de operación. Es importante identificar las más severas combinaciones de cargas, asegurar que los valores extremos del rango de esfuerzo no sean subestimados. Igualmente, debe ponerse especial atención a la ocurrencia de pequeñas cargas, ya que estas rigen la vida de fatiga.

Esto después es usado para calcular las componentes de esfuerzo causadas por varias cargas básicas, como casos separados de carga. Las cargas móviles tienen que estar ubicadas y orientadas en diferente orden de posición para encontrar los efectos máximos y mínimos en el punto bajo consideración. Las tablas o curvas son de gran ayuda en la definición de las ubicaciones críticas de las cargas.

Dependiendo de cuanto se mueven o fluctúan las cargas, las direcciones de los esfuerzos principales pueden ser constantes, o pueden variar entre diferentes eventos de carga. El primer caso anterior es llamado “carga proporcional” fig. 2.1 y el último es llamado “carga no proporcional” fig. 2.2:

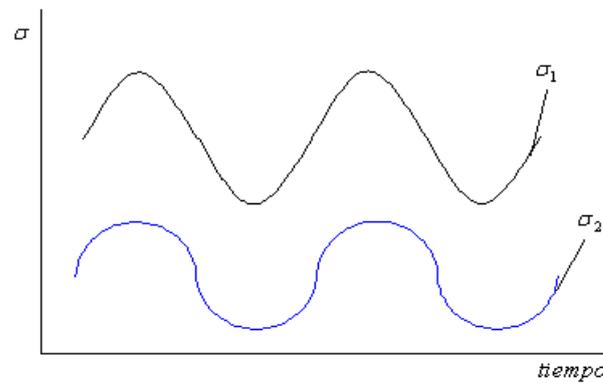


Fig. 2.1 Esfuerzos principales cíclicos debido a cargas proporcionales. Ref. [14]

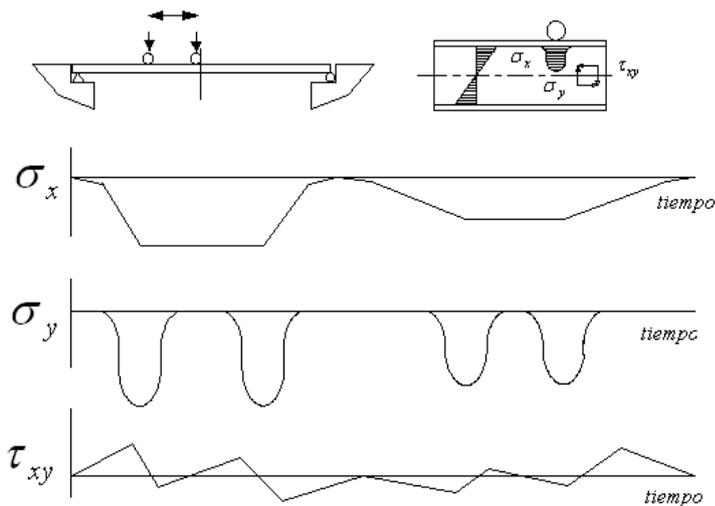


Fig. 2.2 Fluctuaciones de esfuerzo no-proporcionales. Ref. [14]

Como muestra la figura 2.2, muchas combinaciones de cargas a diferentes puntos y tiempo deben estudiarse, en el caso de cargas no proporcionales, se establece un orden de los valores en cada una de los componentes.

En los casos en los que los espectros de rango de esfuerzos son aplicados, solo dos casos de combinación de carga necesitan ser evaluados para cada componente de esfuerzos. El esfuerzo máximo se calcula como una combinación de los casos de carga básica, tomando en cuenta todas las cargas relevantes, las cuales deben incrementar el esfuerzo máximo. El esfuerzo mínimo es calculado por combinación de casos básicos, de tal manera que el esfuerzo bajo consideraciones logre su valor mínimo.

Las fluctuaciones de esfuerzos dinámicos causados por cargas de impacto y otras causas de excitación las cuales incrementan el esfuerzo máximo y disminuyen el esfuerzo mínimo, también deben ser tomadas en cuenta.

2.1.1 Cargas Proporcionales.

En varios resultados, la carga es proporcional y el grado es multi-axialmente bajo. En tales casos, las soluciones más simples para el esfuerzo equivalente se han ido aceptando para su uso. En varios reglamentos el rango del esfuerzo principal ha sido buscado. Sin embargo, los problemas surgen cuando las direcciones de los esfuerzos principales son inclinadas en relación con la dirección de la soldadura.

El rango de esfuerzo principal máximo en la superficie de una estructura controla la fatiga de las uniones soldadas, proporcionando los esfuerzos perpendiculares predominantes al pie de la soldadura (fig. 2.3). Por lo tanto, una grieta debe crecer al pie de la soldadura, paralela a la grieta. Sin embargo, si el esfuerzo principal actuante es esencialmente paralelo a la soldadura, el esfuerzo principal pequeño puede ser dominante debido al alto efecto de muesca en esta dirección. Sin duda, la fatiga causada por ambos esfuerzos principales debe ser analizada por separado. En muchas aplicaciones, tales como en las uniones entre estructuras de sección hueca, esto es suficiente para determinar solo la componente del esfuerzo a la soldadura.

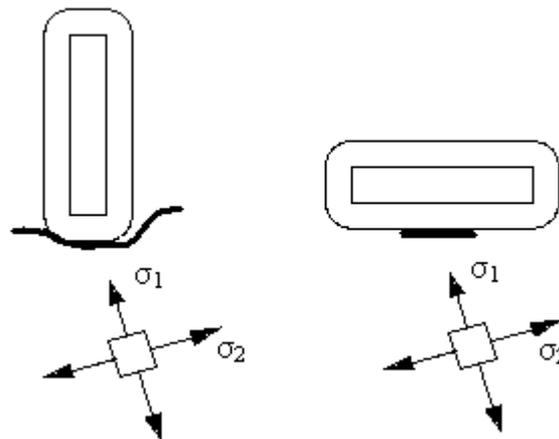


Fig. 2.3 Crecimiento de grietas a lo largo del pie de la soldadura debido al esfuerzo principal σ_1 , predominantemente perpendicular al pie de la soldadura. Ref [14]

2.1.2 Cargas No-proporcionales.

Para cargas no-proporcionales, usar el rango de esfuerzo principal máximo puede llevar a una predicción no conservadora de la vida. El esfuerzo equivalente dado por Mises y el criterio de fluencia dado por Tresca, no son usualmente apropiados, por que el efecto de muesca de la soldadura varía por las diferentes direcciones del esfuerzo. Además, la grieta debe iniciar en un cierto plano de experimentación máxima de daño. Con una dirección diferente del esfuerzo principal, el valor momentáneo del esfuerzo equivalente no necesariamente se correlaciona con el daño en ese plano crítico.

Estos esfuerzos equivalentes podrían ser más aplicables cuando los enfoques de esfuerzo de muesca local son usados en lugar del esfuerzo nominal o esfuerzos estructurales.

2.2 Definición, Tipos y Rango de Esfuerzos en Fatiga.

Los esfuerzos usados en el análisis de fatiga son aquellos que resultan de las cargas dinámicas producidas por el medio ambiente como cargas por viento, oleaje, corriente marina, fluctuaciones de temperatura, etc., o aquellas cargas dinámicas producidas por la operación de maquinaria o por el desempeño de otras estructuras, y todas aquellas sollicitaciones que produzcan fluctuaciones de carga a largo de la vida útil de las estructuras. Los esfuerzos secundarios tales como esfuerzos flexionantes en armaduras unidas rígidamente, o fluctuaciones de esfuerzos térmicos, también deben de ser incluidos.

La estructura del casco de los barcos está sujeta a las cargas dinámicas producidas por el oleaje y viento, aunque el primero de ellos es el que produce la mayor cantidad de grietas por fatiga que se presentan en los elementos estructurales.

Dependiendo del nivel de complejidad de una estructura y de las herramientas y procedimientos disponibles de análisis estructural, el cálculo de los esfuerzos dinámicos que actúan en la misma será de distinto nivel. Las estructuras de los barcos son complejas y generalmente requieren de modelos de elemento finito para la evaluación adecuada de los esfuerzos actuantes por efectos de cargas ambientales y cargas muertas. Algunos procedimientos simplificados permiten determinar esfuerzos nominales en los elementos estructurales, mientras que modelos detallados de elementos finitos proporciona niveles de concentración de esfuerzos definidos por la geometría de la propia estructura. En algunos casos particulares, se requerirá modelar incluso el perfil de la soldadura para determinar la magnificación de los esfuerzos debidos a la geometría de la soldadura.

2.2.1 Categorías de esfuerzos (tipos).

En los análisis por fatiga los siguientes esfuerzos son usados:

- Esfuerzo nominal.
- Esfuerzo estructural (punto crítico).
- Esfuerzo de muesca.

La elección de la categoría de esfuerzo depende del método usado para su cálculo y en consecuencia, la manera en que son empleados en el cálculo de daño por fatiga. A continuación se presenta una descripción de los tipos de esfuerzos citados arriba.

2.2.2 Definición de los Esfuerzos en Fatiga.

2.2.2a Esfuerzo nominal.

En general, los esfuerzos nominales son aquellos calculados usando formulas simples que se encuentran en los libros de texto elementales:

$$\sigma_{nom} = \frac{F}{A} + \frac{M}{I} y \tag{2.1}$$

donde: F-es la fuerza axial.

A-es el área de la sección transversal.

M-es el momento flexionante.

I-es el momento de inercia de la sección transversal.

y-es la distancia del centroide al punto considerado.

Un ejemplo de esfuerzo nominal en una misma viga, estableciendo de acuerdo a la ecuación de σ_{nom} se muestra en la fig. 2.4:

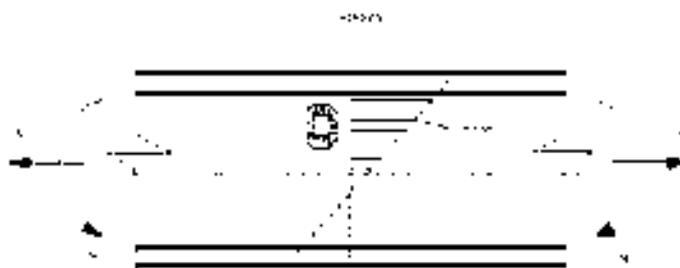


Fig. 2.4 Esfuerzo nominal en una misma viga. Ref. [14]

En el daño por fatiga de un apéndice conectado a una viga, el esfuerzo nominal es calculado en la región que contiene el detalle de soldadura, pero exceptuando cualquier influencia del apéndice en la distribución de esfuerzos.

Sin embargo, es necesario incluir en el esfuerzo nominal los efectos de ciertas características macro-geométricas, como también los campos de esfuerzo en la vecindad de las cargas concentradas a la reacción de las fuerzas.

2.2.2b Esfuerzo estructural.

El esfuerzo estructural incluye ambos, los esfuerzos nominales y los efectos dados por una discontinuidad estructural o cambio brusco de rigidez. Esto no es generalmente factible usando métodos analíticos. Los esfuerzos en placas y estructuras armadas las cuales son establecidas por el Análisis de Elemento Finito basado en la teoría de los esfuerzos estructurales de armaduras, σ_s . El esfuerzo estructural es linealmente distribuido a través del espesor de la placa y consta de dos partes: membrana de esfuerzos y esfuerzo flexionante de la armadura, fig. 2.5:

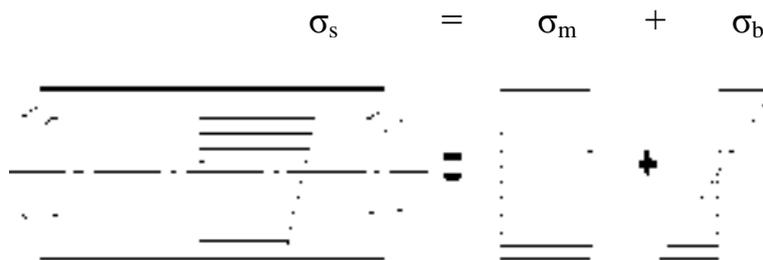


Fig. 2.5 Esfuerzo estructural en una placa. Ref. [14]

La membrana de esfuerzos, σ_m , es el esfuerzo medio a través del espesor de la placa, y el esfuerzo flexionante de la armadura, σ_b ; es la mitad de la diferencia entre los valores del esfuerzo estructural en las superficies máximas y mínimas.

El esfuerzo estructural es la suma de la membrana y el esfuerzo flexionante en muchas estructuras constituidas de elementos placa o semejantes. Este esfuerzo es usualmente más alto que el esfuerzo nominal, aunque lejos de las discontinuidades los esfuerzos estructurales y los esfuerzos nominales son equivalentes.

2.2.2b.1 Esfuerzo de punto crítico.

Un Hot Spot es el término usado para referir un punto crítico en una estructura, donde el agrietamiento por fatiga puede esperarse que ocurra debido a la discontinuidad y/o una muesca. En estructuras soldadas usualmente el punto crítico está ubicado al pie de la soldadura. El esfuerzo del punto crítico, σ_{hs} , es el valor del esfuerzo estructural en la zona del punto crítico. Aunque el punto crítico es ubicado en una muesca local, el esfuerzo del punto crítico no incluye el esfuerzo máximo no lineal causado por la amplificación provocada por la geometría de la soldadura, como se refleja en la comparación de las figuras 2.5 y 2.6.

2.2.2c Esfuerzo de muesca.

Los esfuerzos de muesca locales, σ_{ln} , son los esfuerzos totales ubicados al pie de la soldadura, como se ilustra en la fig. 2.6:

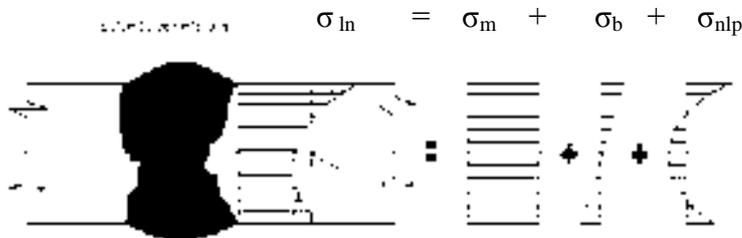


Fig. 2.6 Esfuerzo local amplificado por efecto geométrico al pie de la soldadura (esfuerzo total). Ref. [14]

El esfuerzo máximo no lineal, σ_{nlp} ; es el esfuerzo máximo en la parte no lineal de la distribución de esfuerzos, usualmente a través del espesor de la placa, causado por la muesca local, como se muestra en la figura 2.6.

Si se usa un refinado método de análisis de esfuerzos, el cual produce una distribución a través del espesor de la placa, el esfuerzo máximo no-lineal puede ser separado del esfuerzo estructural como muestra la fig. 2.6. Primero, el esfuerzo promedio, el cual es igual a la membrana de esfuerzo, σ_m , a través del espesor, es calculado. Entonces el esfuerzo flexionante se encuentra dibujado por una línea recta al punto 0 donde la membrana de esfuerzos interseca al plano medio de la placa. El gradiente del esfuerzo flexionante, σ_b , es buscado (o resuelto por cálculos) tal que la parte no-linealmente distribuida restante esté en equilibrio. Su valor en la superficie es el esfuerzo no-lineal máximo, σ_{nlp} .

2.2.2 Rangos de esfuerzos.

El rango de esfuerzos, $\Delta\sigma$, fig. 2.7, es el parámetro principal a ser determinado por el análisis de fatiga. En el caso de la carga de amplitud constante, el rango de esfuerzo es definido por:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad 2.2$$

La ecuación de 2.2, puede ser aplicada para varias de las tres categorías de esfuerzo definidas anteriormente. En muchos casos, el rango de esfuerzos no puede ser determinado directamente, pero σ_{\max} y σ_{\min} deben ser resueltas separadamente de los diferentes casos de carga.

En las estructuras soldadas, la carga de amplitud variable (fig. 2.8) es más común que la carga de amplitud constante. Esto es causado por la superposición de efectos de todas las acciones no- permanentes:

- Fluctuaciones en la magnitud de las cargas.
- Movimiento de las cargas a lo largo de la estructura.
- Cambios en las direcciones de las cargas.
- Vibraciones estructurales.
- Temperatura transitoria.

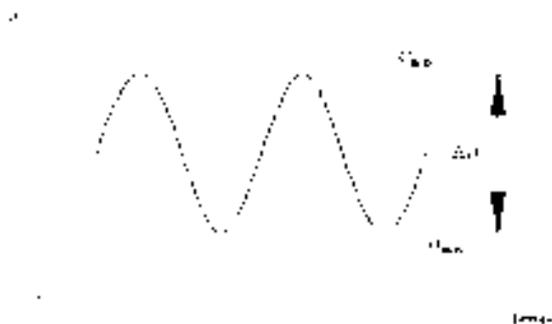


Fig. 2.7 Historia de esfuerzos de amplitud constante. Ref. [14]

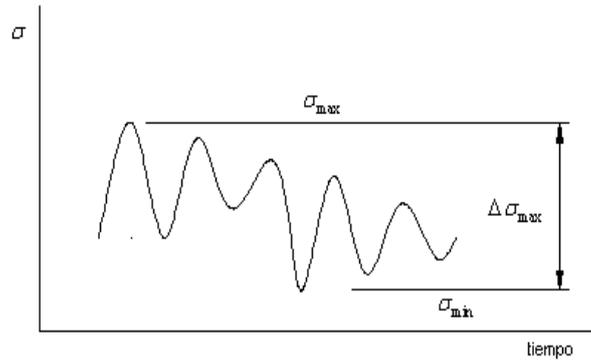


Fig. 2.8 Historia de esfuerzos de amplitud variable. Ref. [14]

El análisis por fatiga se basa en la acumulación de todos los rangos de esfuerzos ocurridos durante diseño de vida. Una tabla de ocurrencia de rango de esfuerzos es producida de la historia de esfuerzos por un método de conteo, preferiblemente usando el conteo de Rainflow o conteo de parejas de rangos.

2.2.2a Esfuerzo Medio.

Los esfuerzos residuales y los esfuerzos causados por las cargas permanentes, son esfuerzos estáticos. En estructuras que presentan un comportamiento no-lineal, no contribuyen al rango de esfuerzo, el cual es la diferencia entre los esfuerzos máximos y mínimos. Las cargas permanentes deben ser tomadas en cuenta en el cálculo del rango de esfuerzos, solo en aquellos casos en los cuales las deformaciones de la estructura son geoméricamente grandes para causar un comportamiento no-lineal.

Varios métodos de análisis de fatiga toman en cuenta el efecto del esfuerzo medio $\frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2}$, o la relación de esfuerzos, $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

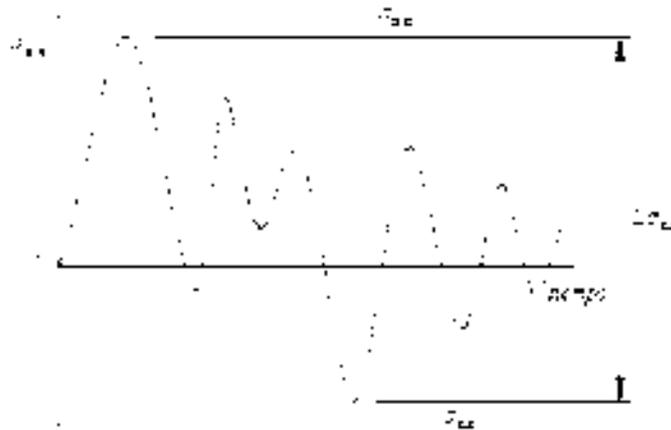


Fig. 2.9 Historia de esfuerzos. Ref. [14]

Si un método de análisis de fatiga es usado para resolver la relación de esfuerzos, el esfuerzo máximo, σ_{max} , debe determinarse tomando en cuenta también el esfuerzo estático y todos los esfuerzos secundarios, incluyendo el esfuerzo residual por soldadura. Por lo tanto el esfuerzo máximo se supone igual al esfuerzo de fluencia del material, R_e , como cuando se consideran las estructuras soldadas. Para la carga de amplitud variable, σ_{max} , se supone comúnmente igual al esfuerzo de fluencia por la gran ocurrencia de carga. Los otros esfuerzos máximos son bajos debido al efecto de “baja vibración”, fig.2.9. Algunos esfuerzos plásticos generalmente ocurren debido a los esfuerzos residuales durante los primeros ciclos de esfuerzo, pero el subsecuente comportamiento de esfuerzos de tensión-torsión se quedan predominantemente elásticos, tal que $(\Delta\sigma)_{m\acute{a}x} < 2R_e$.

2.3 Factores que Incrementan los Esfuerzos.

2.3.1 Geometría Estructural.

Considere un miembro esforzado como el de la fig. 2.10, con un esfuerzo axial uniforme o un esfuerzo nominal. Si se hace un orificio en el elemento (placa), la distribución de esfuerzos debe distorsionarse. La sección transversal del hoyo será reducida, resultando en un esfuerzo medio más grande, S_{net} = sección neta de esfuerzo. Además, el hoyo es un concentrador de esfuerzos, destacando una ampliación de la sección neta de esfuerzo por un factor K_t -el factor de concentración de esfuerzo (elástico).

En geometrías complicadas la sección neta de esfuerzo no puede ser fácilmente definida, y el factor de concentración de esfuerzos es calculado en base al esfuerzo nominal. Las concentraciones de esfuerzos no son solo causadas por la disminución de la sección transversal, sino por cualquier tipo de discontinuidad o cambio en la rigidez de un elemento estructural.

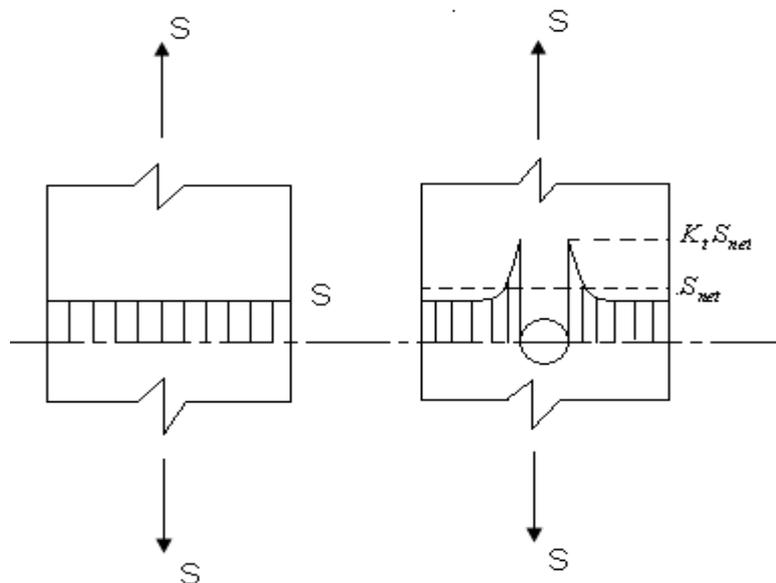


Fig. 2.10 Esfuerzos en una placa intacta (izquierda) y en una placa con un corte circular (derecha). Ref. [22].

También incrementando las secciones, el esfuerzo aumenta localmente como muestra la figura 2.11.

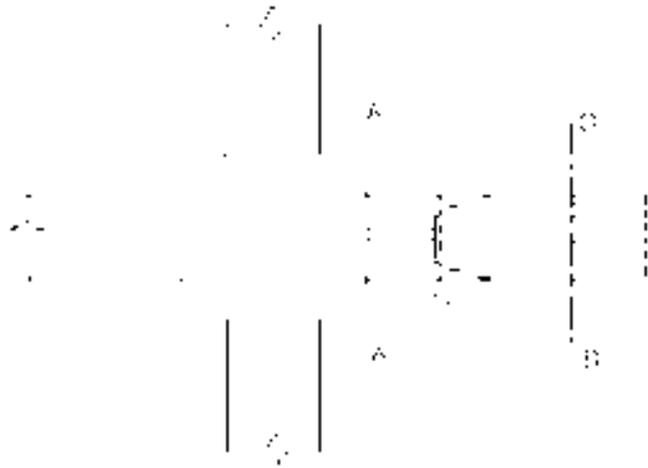


Fig. 2.11 Distribución de esfuerzos a través de la placa soldada mostrando el esfuerzo nominal (B – B) y la distribución de esfuerzos a través del pie de la soldadura (A – A). Ref. [22]

Los factores de concentración de esfuerzos pueden ser calculados con la Teoría de Elasticidad, por varios métodos. Los métodos analíticos tienden a ser matemáticamente complicados, y son aplicados solo a geometrías simples. Los métodos de elementos finitos son más versátiles, y pueden fácilmente hacer frente a problemas en dos dimensiones. Para casos de tres dimensiones, el método del elemento finito es aún práctico, pero es muy costoso en muchos casos.

Las uniones soldadas a menudo conducen cambios en la sección transversal. Casos típicos son los refuerzos de vigas, refuerzos y rigidez de placas, etc. Las concentraciones de esfuerzos causadas por las formas estructurales son a menudo llamadas concentraciones de esfuerzo estructural.

Para muchos detalles estructurales, el factor de concentración de esfuerzo puede ser difícil de calcular, no solo debido a una configuración complicada, sino también debido a un patrón de esfuerzo complicado.

2.3.2 Geometría de Soldadura.

Además de la concentración de esfuerzos estructurales, la soldadura de refuerzo es también, en muchos casos, un concentrador de esfuerzos. Incluso soldaduras longitudinales a la dirección de la carga las cuales actúan como concentradores de esfuerzo, debido a la superficie ondulada de la capa de la soldadura. Solo por cuidado del maquinado de la superficie de la soldadura, esta concentración local de esfuerzos puede ser eliminada.

Usando soldaduras transversales a la dirección de la carga, por ejemplo, la forma de la soldadura puede definirse por los siguientes parámetros, fig. 2.12.

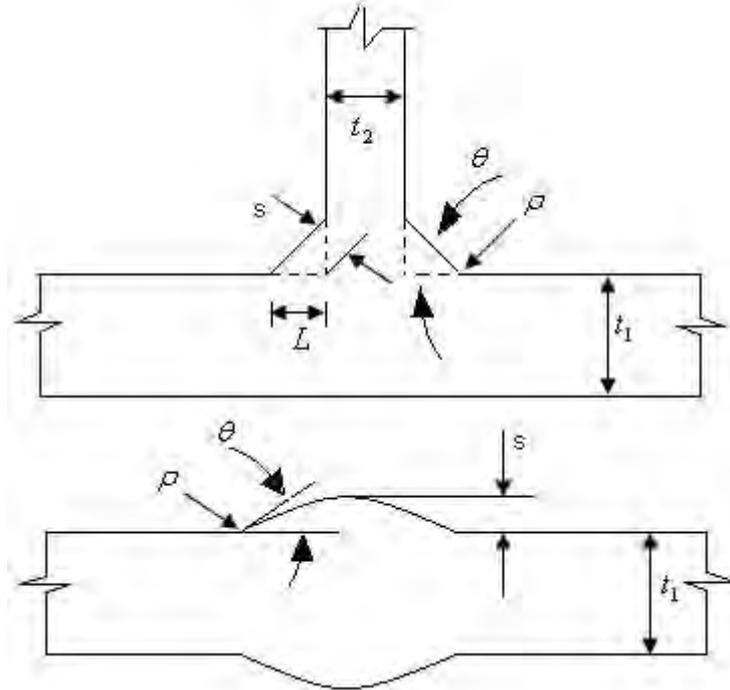


Fig. 2.12 Parámetros que definen la geometría nominal de la soldadura. Ref. [22]

Donde: θ = ángulo del pie de la soldadura.

ρ = Radio de la muesca, de la raíz, al pie de la soldadura.

s = espesor de garganta.

L = longitud de pierna, un parámetro alternativo para s .

t_1 = espesor de placa diseñada para soportar carga.

t_2 = espesor anexo.

Por el análisis del elemento finito, esto puede mostrar que los primeros parámetros en definir el factor de concentración de esfuerzo al pie de la soldadura son θ y ρ .

Los factores de concentración de esfuerzo de soldaduras pueden ser calculados por métodos de análisis de elementos finitos. Sin embargo estos factores de concentración de esfuerzo calculados por estos métodos refieren la idealización de las formas de las soldaduras. Las soldaduras reales exhiben una geometría irregular, y aún más importante, ahí siempre deben estar los defectos de los tipos de soldadura mostrados en la fig. 2.13.

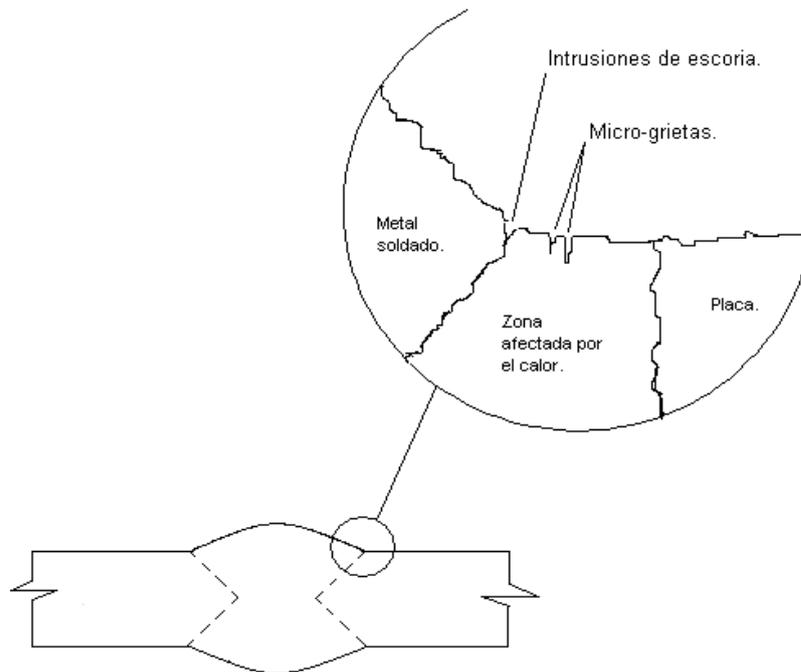


Fig. 2.13 Incluso en soldaduras de sonido, los defectos están presentes, actuando como el sito o núcleo de la grieta. El factor de mella en fatiga de una soldadura es por lo tanto mucho más grande de lo que puede ser pronosticado de la geometría externa. Ref. [22]

Por esta razón, el factor de muesca de la conexión, K_f , de una soldadura es significativamente más grande que el factor teórico de concentración de esfuerzo K_t el cual puede calcularse con la teoría de elasticidad. El papel de K_t es dar tendencias con respecto al esfuerzo de fatiga de varias geometrías soldadas. El esfuerzo real de fatiga solo puede ser encontrado por pruebas de fatiga.

2.3.3 Esfuerzo Nominal Local.

El diseño por fatiga se basa en la aproximación del esfuerzo nominal local. El término nominal quiere decir que la concentración de esfuerzos creados por la forma de la soldadura es ignorada. Por ejemplo, los esfuerzos en la sección A-A de la figura 2.11 se supone ser la misma como estaría en la falta de soldadura, y el pertinente esfuerzo para propuestas de diseño debería ser S . El efecto de la concentración de esfuerzo causado por la soldadura es incluido en las curvas S-N como un factor de muesca de fatiga implícito.

Los efectos de la concentración de esfuerzos debida a toda la geometría deben, sin embargo, tomarse en cuenta. Por lo tanto, en la fig. 2.10, los esfuerzos de diseño por fatiga deben ser los esfuerzos nominales aumentados por el factor de concentración de esfuerzos causado por el hoyo, por ello el término "local".

Es de notarse que la aproximación del esfuerzo nominal local ha sido adoptada también para el diseño por fatiga de uniones tubulares. Los efectos de la concentración de esfuerzos de todas las formas de unión es tomada en cuenta. Pero el efecto de muesca de la soldadura es ignorado por un proceso de extrapolación de los esfuerzos cerca de la soldadura.

La única excepción a la aproximación del esfuerzo nominal local es en casos cuando el diseño se basa en las cargas diseñadas para soporte del esfuerzo del filete de la soldadura en las uniones. Entonces el esfuerzo de diseño es el esfuerzo cortante en la soldadura mínima del área de la garganta, a menos que este requisito sea invalidado por el esfuerzo de diseño para la placa, fig. 2.14.

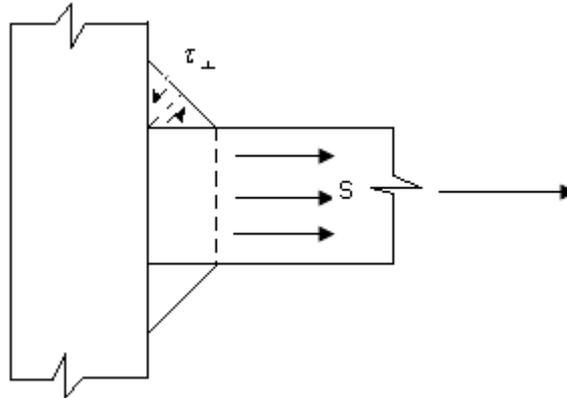
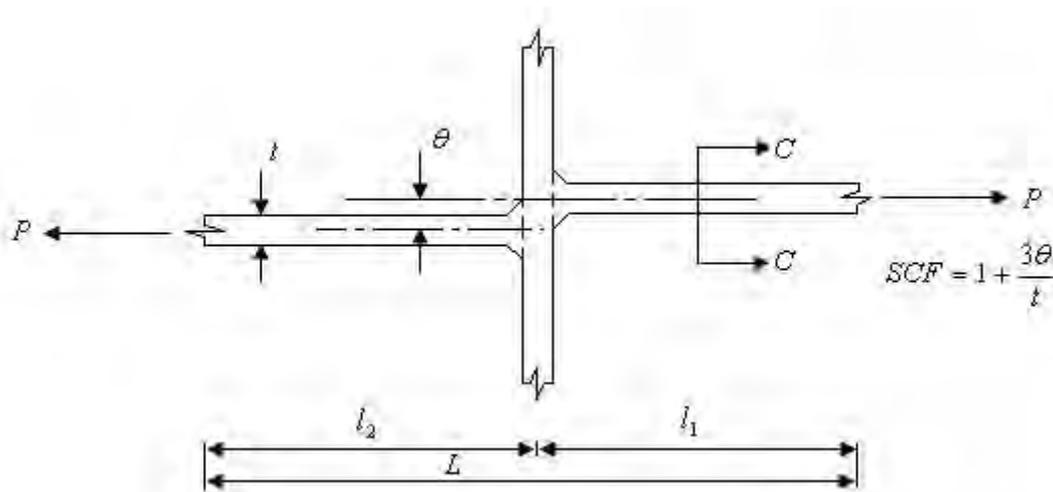


Fig. 2.14 En la carga-transporte transversal de las soldaduras de filete, las grietas de fatiga pueden desarrollarse del pie de la soldadura (esfuerzos de diseño S) o a través del filete (esfuerzos cortantes τ_{\perp}). Ref. [22]

2.3.4 Efectos secundarios de le geometría.

Hasta ahora, geometrías idealizadas o nominales han sido consideradas. En fabricación soldada, la producción de las tolerancias puede tener un efecto sobre los esfuerzos.

Para soldaduras transversales de carga, la mala alineación ha demostrado tener un efecto fuerte sobre los esfuerzos de fatiga. La mala alineación puede caracterizarse por mala alineación angular o paralela, como se muestra en la figura 2.15.



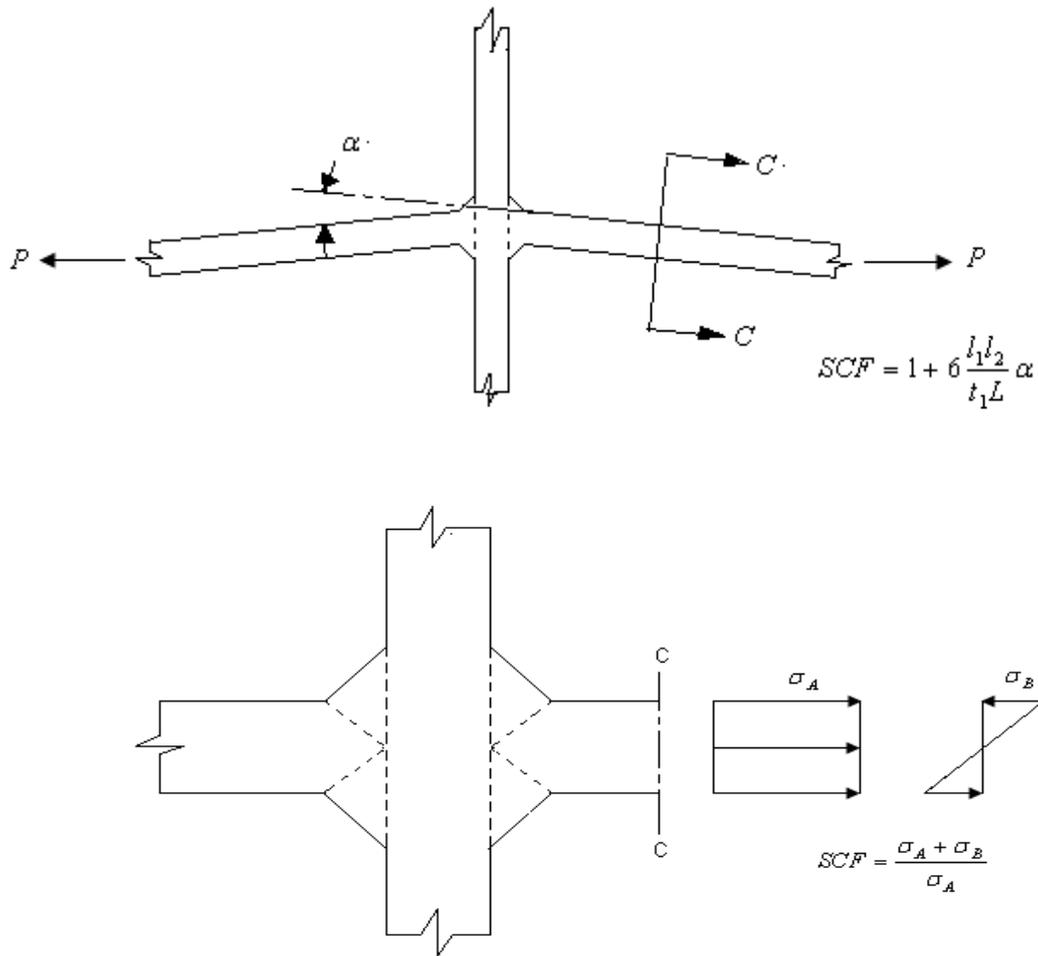


Fig. 2.15 Mala alineación de soldadura en carga-transporte, paralela (a) y mala alineación angular (b) con sus respectivas fórmulas para factores de concentración de esfuerzos. Ref. [22]

En uniones mal alineadas sujetas a un esfuerzo axial nominal, los esfuerzos secundarios de flexión pueden surgir. En general los esfuerzos secundarios deben ser proporcionales al esfuerzo nominal. Aplicando el concepto del esfuerzo nominal local, los esfuerzos secundarios deben tomarse en cuenta por un factor de concentración de esfuerzos (SCF). Las típicas fórmulas son dadas en las figuras. 2.15 y 2.16. Las fórmulas de la fig. 2.15 son validas para uniones sin arriostramiento, por ejemplo, soldadura de extremos, para uniones en forma de cruz, o soldaduras de extremos en placas rígidas.

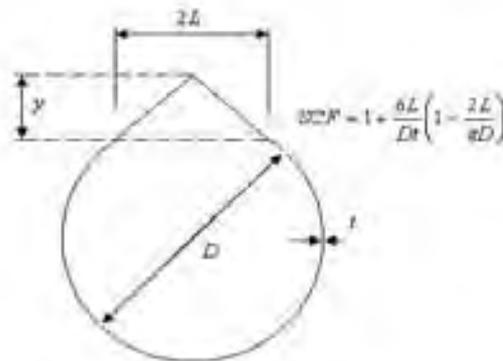


Fig. 2.16 Juntas tubulares soldadas con una fórmula para el factor de concentración de esfuerzos. Ref. [22]

Es de notarse que una mala alineación paralela de 20% del espesor de la placa reduce el esfuerzo por fatiga de una unión sin arriostamiento por aproximadamente 40%, el cual es superior al efecto del agua observado en uniones soldadas. En otras palabras, el efecto de mala alineación es significante.

2.3.5 Efecto de tamaño – Espesor de placa.

Incrementando el tamaño de un tipo de espécimen de fatiga mientras se mantienen todos los otros parámetros, debe causar una disminución en el esfuerzo de fatiga. Este efecto de tamaño en fatiga puede darnos varias interpretaciones. El tan llamado efecto proviene de, que la fatiga es un proceso de enlace débil, centrando la ubicación donde los esfuerzos, geometría, defectos y propiedades de los materiales se combinan para formar las condiciones óptimas para la iniciación y crecimiento de la grieta por fatiga. Incrementando el tamaño de un espécimen debería producir estadísticamente la ubicación de donde es más vulnerable a las fallas por fatiga. Para uniones soldadas, este efecto de tamaño debería ser esencialmente una función de la longitud de la soldadura. Muy poco, sin embargo, se conoce el efecto estadístico en fatiga de soldaduras. Como se indica en la fig. 2.17, el efecto debería tender a bajar el esfuerzo de fatiga de soldaduras de gran tamaño de valor medio más bajo, obligando encontrar la región en una prueba a pequeña escala.



Fig. 2.17 El efecto de incrementar la longitud de soldadura por espécimen. Ref. [22]

Independiente del efecto de tamaño estadístico, aquí también es un efecto el espesor de la placa en uniones soldadas. Esto ha sido notado experimentalmente como una disminución en el esfuerzo de fatiga por el incremento del espesor de la placa. Posibles razones para la influencia del espesor son la tecnología de soldadura y esfuerzos residuales, los cuales tienden a ser más adversos para grandes secciones soldadas. Sin embargo, esto ha ido mostrando que el espesor de la placa principalmente influye en el esfuerzo de fatiga de la soldadura a través de la geometría, la cual actúa independientemente de algunos otros efectos de placa.

Un modelo útil para la descripción del efecto de espesor es obtenido de las siguientes suposiciones:

- a) Las uniones soldadas del mismo tipo en varios espesores de placas simétricamente similares (típica soldadura de carga).
- b) Las condiciones iniciales del crecimiento de la grieta son independientes del espesor de la placa ($a_1 = \text{constante}$).

De estas suposiciones, el efecto del espesor de placa puede comprenderse de un simple modelo geométrico como se muestra en la figura 2.18

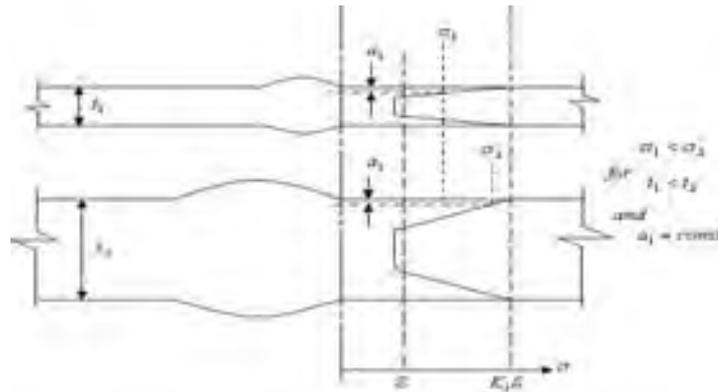


Fig. 2.18 Modelo geométrico para el efecto del espesor de placa en la fatiga de uniones soldadas. Ref. [22]

De la suposición a) la distribución de esfuerzos a través de la placa de carga en el plano del crecimiento de la grieta son similares, destacando un gradiente de esfuerzos en una pendiente más inclinada en la unión más delgada. Por lo tanto, de la suposición b) la grieta inicial en la placa delgada debe experimentar un pequeño esfuerzo que la grieta inicial de la misma longitud en la placa gruesa, causando un pequeño índice de crecimiento inicial de grieta en el caso anterior. La diferencia en el índice de crecimiento grieta inicial supera la diferencia en la longitud de la grieta a causa de la fractura, por lo tanto la unión más delgada debe tener una vida por fatiga mayor.

En términos de mecánica de fractura, el gradiente de esfuerzo a través del espesor de la placa entra en el cálculo del factor de intensidad de esfuerzo. Los efectos de espesor son causados por los siguientes parámetros:

- i. La magnitud de la concentración de esfuerzos al pie de la soldadura (principalmente determinada por la geometría de la soldadura local).
- ii. El gradiente del esfuerzo en el plano del crecimiento de la grieta (principalmente determinado por el espesor de la placa).
- iii. El número de ciclos en el crecimiento de la grieta a través de la región de la pendiente del gradiente de esfuerzo, relativa al número de ciclos de falla (principalmente determinada por el tamaño de la grieta inicial).

Usando este modelo, ha sido demostrado que el efecto del espesor puede calcularse por la corrección de las siguientes formulas:

$$N = N_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^3 \quad 2.3$$

$$S_N = S_{N,0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{4}} \quad 2.4$$

donde N_0 y $S_{N,0}$ se refieren a la vida por fatiga y el esfuerzo para un referente espesor de placa t_0 .

La referencia del espesor de placa t_0 , supone estar en un plano medio del espesor de la placa en las pruebas de las cuales el diseño de las curvas S-N se han ido derivando, son 22 mm para uniones de placas y 32 mm para uniones tubulares.

2.4 Métodos de Diseño por Fatiga.

2.4.1 Método del Esfuerzo Nominal.

El enfoque del esfuerzo nominal, es generalmente usado ya que varias reglas de diseño para estructuras de acero contienen un procedimiento para el análisis basado en este enfoque. El enfoque del esfuerzo nominal de fluencia produce resultados satisfactorios con mínimos cálculos de esfuerzo si se cumplen las siguientes condiciones:

- Existe un esfuerzo nominal bien definido, sin complicarse por efectos de macro-geometría.
- La discontinuidad estructural es comparada con uno de los detalles incluidos en las reglas de diseño.
- El detalle está libre de imperfecciones significantes.

El método del esfuerzo nominal se aplica básicamente en estructuras a base de armadura como los jackets de las estructuras marinas. Los factores de concentración de esfuerzos son generalmente determinados con ecuaciones paramétricas

2.4.2 Método del Esfuerzo del Punto Crítico.

El enfoque del esfuerzo del punto crítico es usado principalmente para uniones en la cual la orientación del pie de la soldadura es transversal a la componente de fluctuación del esfuerzo y se supone que la grieta crece del pie de la soldadura. El enfoque no es apropiado para uniones en las cuales los defectos de la grieta crecen incrustados o de la raíz del filete de la soldadura. Comparado con el enfoque del esfuerzo nominal, este enfoque es más apropiado para usarse en los siguientes casos:

- Donde no está claramente definido el esfuerzo nominal debido a efectos complicados de geometría.
- La discontinuidad estructural no es comparable con ningún detalle clasificado en las reglas de diseño (enfoque de esfuerzo nominal).
- Para las razones mencionadas arriba, el método del elemento finito es usado con el modelado de sólidos.
- Pruebas de estructuras prototipo se presentan usando las mediciones de los esfuerzos estándar.
- La compensación a las malas alineaciones angulares exceden las tolerancias especificadas como compatibles con las curvas S-N usadas en el método de esfuerzo nominal.

2.4.3 Método de Esfuerzos de Tensión/Torsión de muesca.

El método de esfuerzos de muesca predice la iniciación y la vida para una grieta a raíz de la muesca, en contraste con los métodos del esfuerzo nominal y el esfuerzo de punto crítico el cual predice la vida completa de falla en secciones transversales compactas, o la formación de una macro-grieta a través del espesor de la placa.

2.4.3a Método del Esfuerzo de Tensión de muesca Elástico-lineal.

Este método puede ser considerado como apropiado para buscar el régimen de vida larga (ciclo alto), en el cual la iniciación de la falla y cada fase de crecimiento son dominantes. En este enfoque el refuerzo geométrico de la soldadura se supone conocido. Estos contrastes con el esfuerzo nominal y el esfuerzo de punto crítico, en el cual la geometría local se supone es una variable aleatoria, afecta la resistencia por fatiga estadística de las uniones.

La versión del enfoque de esfuerzo de muesca elástico-lineal parece ser prometedor para casos en los cuales ocurren los estados de esfuerzo multi-axial no-proporcional. El uso del esfuerzo equivalente como el esfuerzo principal de fluencia no resulta conservador.

2.4.4 Método de Mecánica de Fractura.

El método de mecánica de fractura es un método avanzado, especialmente siempre que un diseño de daño tolerante sea requerido, o la capacidad para determinar una estructura que contenga defectos necesarios para ser valorado. El análisis de mecánica de fractura del crecimiento de una grieta, proporciona la siguiente información:

- La vida esperada de una unión soldada.
- La vida restante de una parte agrietada.
- El tamaño tolerable de la grieta (discontinuidad).
- La resistencia requerida del material.
- La frecuencia de las inspecciones en servicio.
- La exactitud requerida de las inspecciones en servicio.
- Los efectos de las mejoras propuestas en el diseño o fabricación.

En contraste con el método del esfuerzo de torsión local, la mecánica de fractura adopta una grieta inicial existente. Por lo tanto, predice la propagación de vida de la grieta de un tamaño inicial a un cierto tamaño final. Como en las estructuras de acero soldadas no son caracterizadas por una iniciación de vida significativa, este método predice la vida total si los datos recabados son correctos.

La mecánica de fractura puede tomar en cuenta también los efectos de la amplitud de carga variable de manera racional. Esta característica es importante en casos en los cuales las grandes porciones del rango de esfuerzos de fluctuación están por debajo de del límite de fatiga, determinado en la prueba de amplitud constante. Cabe mencionar, sin embargo, que este método no es práctico como el método de diseño de estructuras, por lo que su aplicación se limita a la evaluación avanzada del incremento de grietas existentes de dimensiones conocidas.

2.5 Definición de Curvas S-N para Diseño.

2.5.1 La sumatoria de Miner.

El diseño por fatiga de estructuras soldadas se basa en los datos S-N de amplitud constante. Una estructura marina, sin embargo, debe experimentar un historia de cargas de una naturaleza estocástica.

El desarrollo de daño por fatiga bajo cargas estocásticas o aleatorias es en general un daño acumulativo. Sin embargo, la sumatoria de Miner ha demostrado ser un método eficiente y mucho más simple. Por lo tanto, virtualmente todo el diseño por fatiga de estructuras de acero (estructuras costa afuera, puentes, grúas, etc.) se basan en este procedimiento.

La suposición básica del método de la sumatoria de Miner es que el “daño” sobre la estructura por ciclo de carga es constante a un rango de esfuerzo dado e igual a

$$D = \frac{1}{N} \quad 2.5$$

donde N es la amplitud constante de resistencia al rango de esfuerzos dado. En una prueba de amplitud constante, esta conduce al siguiente criterio de falla.

$$D \geq 1 \quad 2.6$$

En una historia de varios rangos de esfuerzos $S_{r, i}$, con cada número de ciclos n_i , la sumatoria del daño sigue de

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad 2.7$$

con el criterio de falla aún dado por la ecuación 2.6. El proceso se muestra en la figura 2.19:

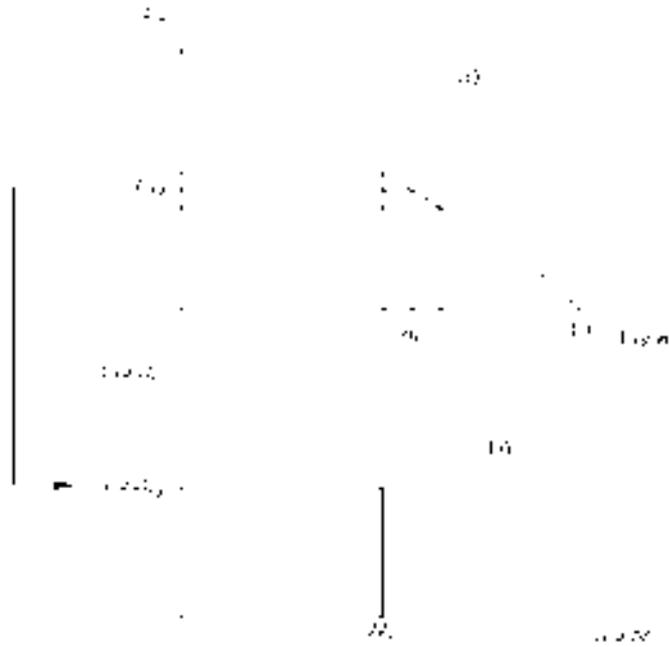


Fig. 2.19 a) Diagrama del Proceso de la sumatoria Miner para un bloque de esfuerzos particular excediendo el rango de esfuerzos, b) curva S-N. Ref. [22]

La relación entre la sumatoria de Miner y el enfoque de mecánica de fractura en el crecimiento de la grieta puede demostrarse suponiendo un bloque de historias de esfuerzo como muestra la figura 2.20.

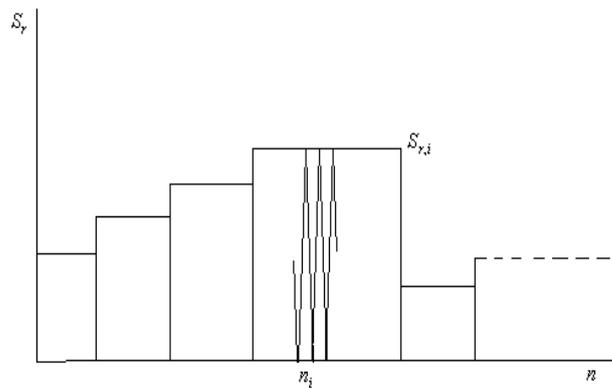


Fig. 2.20 Programa de bloque de cargas en una derivación de la suma de Miner. En la mecánica de fractura. Ref [22]

En un bloque de rango de esfuerzo $S_{r,i}$ donde n_i son los ciclos. La vida de fatiga en el rango de esfuerzo $S_{r,i}$ es N_i .

2.5.2 Rango de Esfuerzo Equivalente.

La suma de Miner puede expresarse en términos de un rango de esfuerzos equivalente $S_{r,eq}$. Insertando para la curva S-N

$$N(S_{r,i})^m = a = \text{constante} \tag{2.8}$$

la suma de Miner para fractura es

$$D_f = \sum_1 \frac{n_i}{N_i} = \sum_1 \frac{n_i (S_{r,i})^m}{a} = 1 \tag{2.9}$$

El número total de ciclos para fatiga es

$$N = \sum_i n_i \tag{2.10}$$

Construyendo de la ecuación anterior:

$$\sum_i n_i \frac{\sum_i n_i (S_{r,i})^m}{\sum_i n_i} = N \frac{\sum_i n_i (S_{r,i})^m}{N} = a \tag{2.11}$$

La ecuación de arriba ahora tiene la forma de $a = \text{const.}$ Para la curva S-N con un rango de esfuerzo equivalente dado por:

$$S_{r,i} = \left[\frac{\sum_i n_i (S_{r,i})^m}{N} \right]^{\frac{1}{m}} \tag{2.12}$$

Y la vida de fatiga dada por el número total de ciclos N . Por lo tanto, la suma de Miner., para fractura puede representarse por una curva S-N de esfuerzo equivalente, la cual para un detalle soldado con una curva S-N de amplitud constante dada, debe depender de la forma del espectro de carga.

2.5.3 Datos S-N para uniones soldadas.

2.5.3a Clasificación de los datos.

El núcleo de algunos reglamentos de diseño por fatiga de uniones soldadas es:

- Una asignación de los diferentes diseños de unión o clases de esfuerzos de acuerdo a aquellos esfuerzos comparativos de fatiga.
- Un conjunto de curvas S-N de diseño, definiendo la capacidad de fatiga para cada clase de unión.

Las uniones soldadas son clasificadas con respecto al esfuerzo de fatiga en base a tres características:

- La geometría del detalle de la soldadura.
- La dirección de la fluctuación del esfuerzo relativo al detalle.
- El método de la manufactura e inspección del detalle.

Geometría de soldadura.- La geometría de la soldadura puede describirse sobre un nivel nominal, un nivel local, un nivel microscópico. Considerando por ejemplo unir por el extremo dos placas, esta puede llevarse a cabo de varias maneras, fig. 2.21. Sobre un nivel nominal, todas aquellas uniones son uniones de extremo. En términos de esfuerzo de fatiga, los varios diseños de uniones pueden variar considerablemente, dependiendo de la geometría local. Sobre un nivel microscópico, la misma geometría local puede de nuevo darse de varias geometrías, destacando una considerable variación de los esfuerzos de fatiga.



Fig. 2.21 Formas de unión de extremos de placas diferentes maneras de esfuerzos. Ref. [22]

En fatiga la clasificación de las uniones soldadas, solo la geometría local de la soldadura es especificada. La geometría microscópica resulta del método de soldadura y no está definida explícitamente.

Dirección de cargas.- Las reglas de diseño se basan en datos de prueba obtenidos con especímenes esforzados axialmente con cualquier soldadura “longitudinal” o “transversal” a la dirección de la carga. Por ello los términos de soldadura “transversal” y “longitudinal”. La carga a considerar en el diseño por fatiga es la componente de fluctuación del esfuerzo. En estructuras de placa, los esfuerzos nominales son en general biaxiales.

En fatiga la grieta tiende a crecer en dirección normal al esfuerzo principal más grande. Por lo tanto, el esfuerzo principal puede tomarse como la “fuerza motriz” en fatiga. El rango del esfuerzo principal máximo no puede ser siempre normal o paralelo a la dirección de la soldadura, sino en algún otro ángulo. Con el tipo de clasificación común de las soldaduras, esto puede dificultar la decisión de cual clase es aplicable. Esto ha propuesto que si la dirección del esfuerzo principal máximo se desvía más de 25° de la dirección de la soldadura, la soldadura se clasifica como “transversal”.

Factores de fabricación.- El principal efecto de los métodos de fabricación, es debido a la geometría. Diferentes procesos de soldadura pueden llevar a diferentes “micro-geometrías” para soldaduras idénticas normalmente, y un efecto subsecuente sobre el esfuerzo de fatiga. Un efecto típico geométrico es la irregularidad en el perfil de la soldadura, causado por las interrupciones en un paso de la soldadura, a menudo llamada posición de inicio/alto. Las posiciones de inicio/alto tienden a bajar el esfuerzo de fatiga, particularmente en cargas longitudinales, y esto es reflejado en la clasificación de uniones soldadas.

A continuación se muestran unos ejemplos de curvas S-N y su respectivo detalle estructural:

Fig. 2.22 Detalle estructural soldado. Ref. [30]

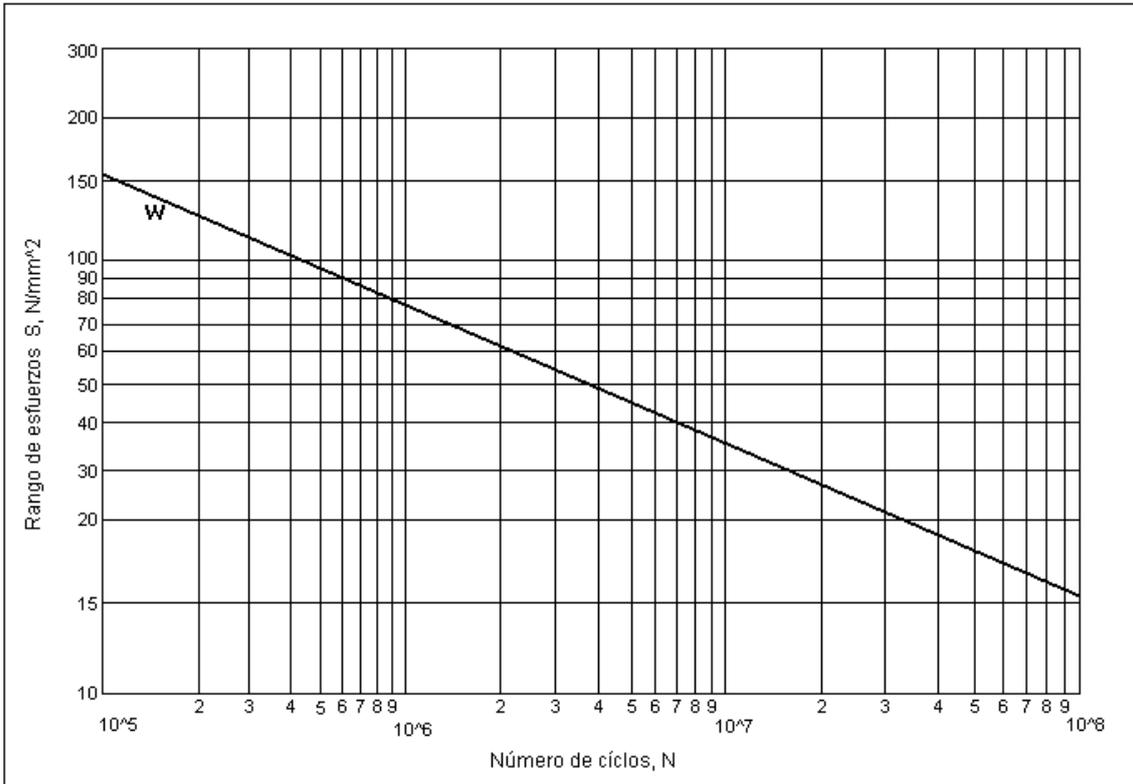


Fig. 2.23 Curva S-N (W) de la figura 2.22. Ref. [30]

Fig.2.24 Detalle estructural de doble placa soldada. Ref. [30]

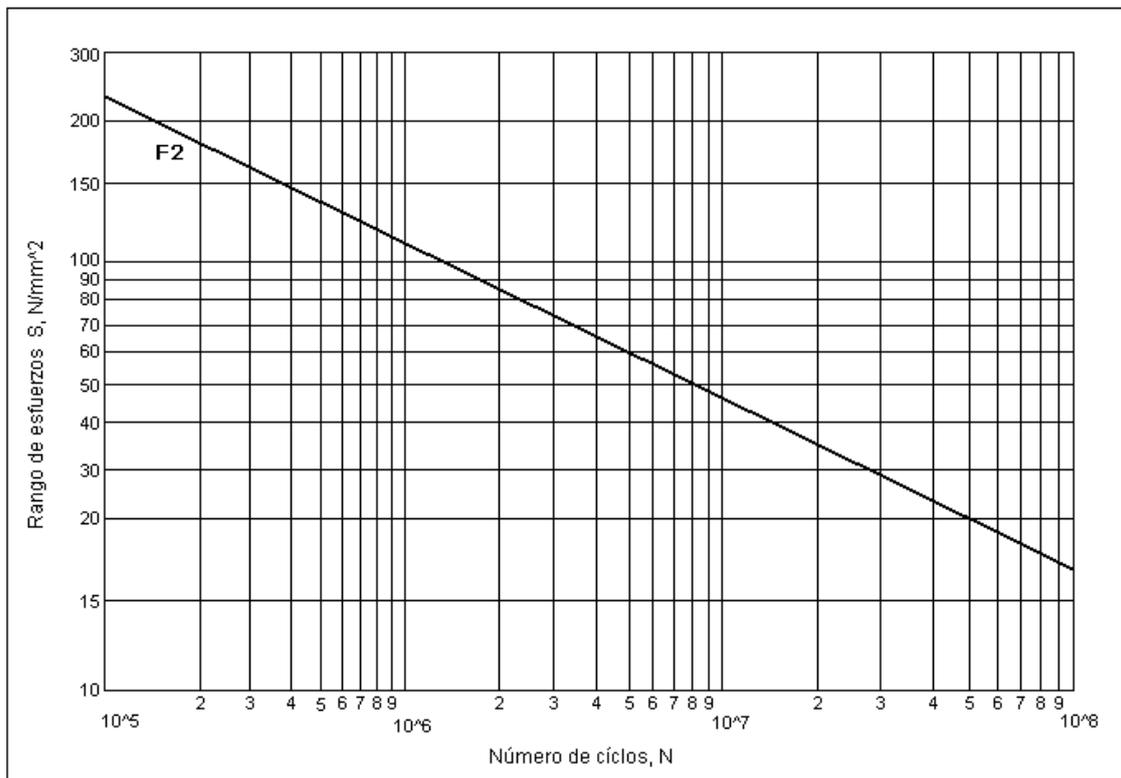


Fig. 2.25 Curva S-N de la figura 2.24. Ref. [30]

Capítulo 3: Diseño por Fatiga de Estructuras Soldadas.

3.1 Conceptos de Diseño Estructural de Sistemas Flotantes.

El principio básico del diseño es asegurar que la estructura o sus elementos no lleguen a un estado particular (modo de falla), llamado estado límite. Los estados límite que deben considerarse en el diseño de sistemas flotantes son:

- Criterio de servicio (ELS)
- Estados Límite Ultimo (ELU), que incluye:
- Estado Limite Accidental (ELA) y
- Estado Limite de Fatiga (ELF)

Para el dimensionamiento, por ejemplo, demostrando que los criterios de diseño son cumplidos por la selección de materiales, consiste en los siguientes pasos: (i) determinación de las cargas, (ii) determinación de los efectos de carga en los varios miembros y uniones de la estructura, (iii) determinación de la resistencia componente/unión, (iv) selección del material y conexiones de modo que la resistencia exceda los efectos de carga por un margen apropiado de seguridad.

3.2 Descripción de los Estados Límite de Diseño.

Las estructuras de acero son igualmente sujetas a varios tipos de deformaciones y cargas surgidas de los requisitos de servicio que pueden extenderse de la rutina al extremo accidental. La misión del estructurista, es diseñar una estructura que pueda soportar tales demandas de carga y deformación desde el principio hasta el fin de la vida útil de la estructura.

En el diseño, la estructura es exigida para tener un margen de seguridad contra tales demandas, el factor seguridad es necesario para explicar varias incertidumbres debidas a la variabilidad natural, procedimientos incorrectos usados en la evaluación o control de cargas o efectos de carga (por ejemplo esfuerzos y deformación), incertidumbres similares en la resistencia estructural (capacidad) y su deformación, y también variaciones en los procedimientos de construcción.

El Estado Límite de Diseño es diferente del tradicional diseño del esfuerzo permisible. En el diseño por esfuerzo permisible, el punto principal es cuidar los esfuerzos resultantes de las cargas de diseño bajo un cierto nivel de esfuerzo activo. En el contexto marino, cuerpos reguladores o sociedades de clasificación usualmente especifican el valor del esfuerzo permisible como una fracción de las propiedades mecánicas de los materiales (por ejemplo, el esfuerzo ultimo de tensión).

Durante las últimas dos décadas, el énfasis del diseño estructural ha sido movido del diseño por esfuerzo permisible al Estado Ultimo de Diseño, por lo tanto el ultimo enfoque hace posible una estructura rigurosamente diseñada, económica, considerando los varios modos de falla directa.

Un Estado Límite es formalmente definido por la descripción de una condición para la cual un detalle, miembro estructural o estructura entera dejan de efectuar la función esperada. Desde el punto de vista del estructurista, se consideran cuatro tipos de Estados Límite, concretamente para las estructuras de acero, los cuales son:

- Estado Límite de Servicio (ELS).
- Estado Límite Ultimo (ELU).
- Estado Límite de Fatiga (ELF).
- Estado Límite Accidental (ELA).

3.2.1 Estado Límite de Servicio.

El criterio de diseño usado por el ELS de elementos placa (acero) se basan normalmente en los límites de deflexión o vibración por uso normal. En realidad, la deformación excesiva de una estructura también puede ser un indicativo de excesiva vibración o ruido. Los límites aceptables dependen necesariamente del tipo, la misión y arreglo de la estructura.

El ELS representa convencionalmente estados de falla por operaciones normales debidas al deterioro de la funcionalidad estructural. Las consideraciones del diseño pueden abordar:

- a) Daño local, el cual reduce la durabilidad de la estructura o afecto las eficiencia de los elementos estructurales.
- b) Deformaciones inaceptables, las cuales afectan el uso eficiente de los elementos estructurales o el funcionamiento del equipo que depende de ellos.
- c) Vibración excesiva o ruido, el cual puede causar incomodidad al personal o afectar el propio funcionamiento del equipo.
- d) Deformaciones y deflexiones las cuales pueden estropear la apariencia estética de la estructura.

3.2.2 Estado Límite Ultimo (ELU).

El criterio de diseño ELU se basa en la falla plástica o en el esfuerzo ultimo. Este criterio simplifico el diseño de muchas estructuras incluyendo buques mercantes,

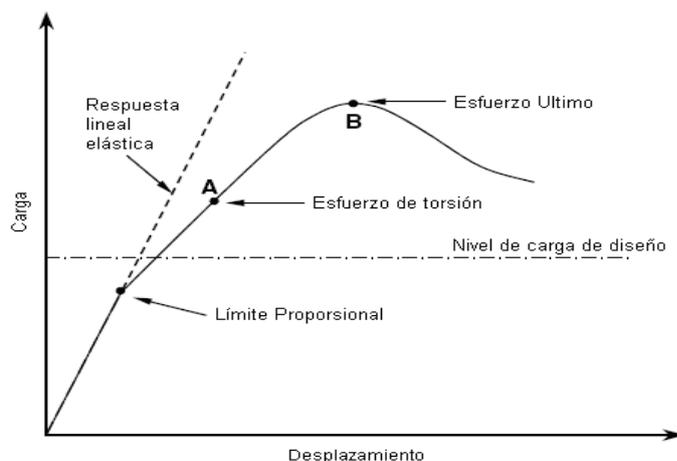


Fig. 3.1 Consideraciones de diseño estructural basado en el Estado Limite Ultimo. Ref [23]

El ELU (también llamado Esfuerzo Ultimo) representa típicamente la falla de la estructura debido a la pérdida de esfuerzo y rigidez estructural. Tal pérdida de capacidad puede relacionarse a:

- Pérdida de equilibrio en parte o en la estructura completa, a menudo consideradas como cuerpos rígidos (por ejemplo, volteo o zozobra de la estructura).
- El logro de la resistencia máxima de regiones estructurales o conexiones por fluencia pura, ruptura o fractura.
- Inestabilidad en parte o en la estructura completa resultado de la torsión y la falla plástica de placado, paneles rígidos y miembros de soporte.

3.2.3 Estado Límite de Fatiga (ELF).

El criterio de ELF se lleva para asegurar que la estructura tenga una adecuada vida por fatiga. También la predicción de la vida por fatiga puede ser una base para programas de inspección eficiente durante la operación de la estructura. El diseño de la vida por fatiga en componentes estructurales se basa normalmente en la vida de servicio de la estructura requerida por el operador u otro cuerpo responsable, tal como las sociedades de clasificación.

Para estructuras marinas, la vida por fatiga es a menudo tomada como 20 años o más. El criterio de diseño y el análisis deberían en un principio estar enfocados a varios orígenes de agrietamiento por fatiga, las cuales incluyen uniones soldadas y áreas locales de concentración de esfuerzos.

Los criterios de diseño para el ELF, usualmente se basan en el daño acumulado por fatiga de una estructura bajo fluctuaciones repetidas de carga. El daño por fatiga en un sitio de iniciación de grieta es afectado por varios factores tales como los rangos de esfuerzo experimentados por los ciclos de carga, características locales de la concentración de esfuerzos y el número de ciclos del rango de esfuerzo.

Dos tipos de métodos de diseño de ELF son considerados para las estructuras de acero, los cuales son:

- El método de las curvas S-N (S = fluctuación de esfuerzos, N = el número de ciclo asociado).
- Método de Mecánica de Fractura.

En el método de las curvas S-N, la regla del daño acumulativo de Miner es aplicada junto con la curva S-N relevante. Esta aplicación normalmente sigue tres pasos: (1) definir el histograma del rango de esfuerzo cíclico, (2) seleccionar la curva S-N relevante, y (3) calcular el daño acumulado por fatiga. Uno de los factores más importantes en el diseño por fatiga es el esfuerzo característico empleado en ambos, definiendo la curva S-N (la capacidad) y también en el análisis de esfuerzos (la fluctuación de esfuerzos de fatiga local sobre la estructura).

Por lo tanto, el ELF representa la ocurrencia de grietas por fatiga de detalles estructurales debido a la concentración de esfuerzos y acumulación de daño (crecimiento de la grieta) bajo la acción de cargas repetidas.

3.2.4 Estado Límite Accidental (ELA).

El principal objetivo del diseño ELA para estructuras de acero puede caracterizarse por los siguientes tres sub-objetivos:

- Evitar la pérdida de vida de la estructura o el área circundante.
- Evitar la contaminación ambiental.
- Minimizar la pérdida de propiedad o exposición financiera.

En el diseño por ELA, es necesario conseguir un diseño tal que las principales funciones de seguridad de la estructura no deban reducirse durante ningún evento accidental o dentro de un cierto periodo de tiempo después del accidente. Los criterios de diseño para ELA son basados en limitantes de consecuencia accidental o contaminación ambiental. En el caso de embarcaciones mercantes o buques de guerra, posibles eventos accidentales que pueden estar considerados por ELA, incluyendo colisiones, carga excesiva por errores humanos, explosiones internas de gas en tanques de crudo o espacios de maquinaria, y explosiones submarinas o en la atmósfera. Las funciones principales de seguridad de la estructura que no debería comprometerse durante ningún evento de accidente o dentro de cierto periodo de tiempo después del accidente incluye:

- Utilización de las vías de evacuación.
- Integridad de las áreas de resguardo, y control de los espacios.
- Capacidad de orientación de la carga global.
- Integridad del ambiente.

Por lo tanto:

	Características principales
Estado Límite de Servicio	<ul style="list-style-type: none"> • Especificaciones como la estimación de servicio o durabilidad • Deformaciones excesivas (vibraciones) sin pérdida de equilibrio • Daño causado por corrosión • Aspectos de durabilidad en el juicio general incluyendo mantenimiento y reparación imprevista.
Estado Límite Ultimo	<ul style="list-style-type: none"> • Pérdida de equilibrio • Capacidad de carga ultima • Colapso o inestabilidad de un miembro individual o una estructura • Transformación en mecanismos (deformaciones excesivas)
Estado Límite de Fatiga	<ul style="list-style-type: none"> • Efectos acumulados causados por esfuerzos cíclicos o repetidos durante la vida de servicio • Desintegración causada por el daño de fatiga
Estado Límite Accidental	<ul style="list-style-type: none"> • Disipación de la energía relacionada con la capacidad de absorción de energía de la estructura. • Capacidad de resistencia de miembros locales o estructuras. • Capacidad de la estructura global. • Variedad de esfuerzos permisibles para evitar la ruptura. • Resistencia de la protección contra el fuego.

Tabla 3.1 Características de los Estados Límite de Diseño. Ref. [4]

3.3 Procedimiento de Diseño por Fatiga.

Las grietas y daños por fatiga han sido conocidas por los diseñadores de barcos durante varias décadas. Inicialmente la solución obvia fue mejorar el diseño de detalle, con la introducción de aceros de alta resistencia en la estructura de los cascos, el esfuerzo en los elementos estructurales del casco aumenta y, el problema de fatiga se incrementa notoriamente, por lo que:

El objetivo del control de fatiga es, asegurar que todas las partes de la estructura del casco sujetas a cargas dinámicas tienen una adecuada vida de fatiga. El cálculo de la vida de fatiga, calibrada con los datos relevantes de daño por fatiga, puede dar la base para el diseño estructural (selección del acero, planos y detalles locales). Además, se puede formar la base de programas de inspección eficientes durante la fabricación y durante la vida de la estructura.

El siguiente cuadro sinóptico nos muestra las diferentes etapas del Análisis de Fatiga:

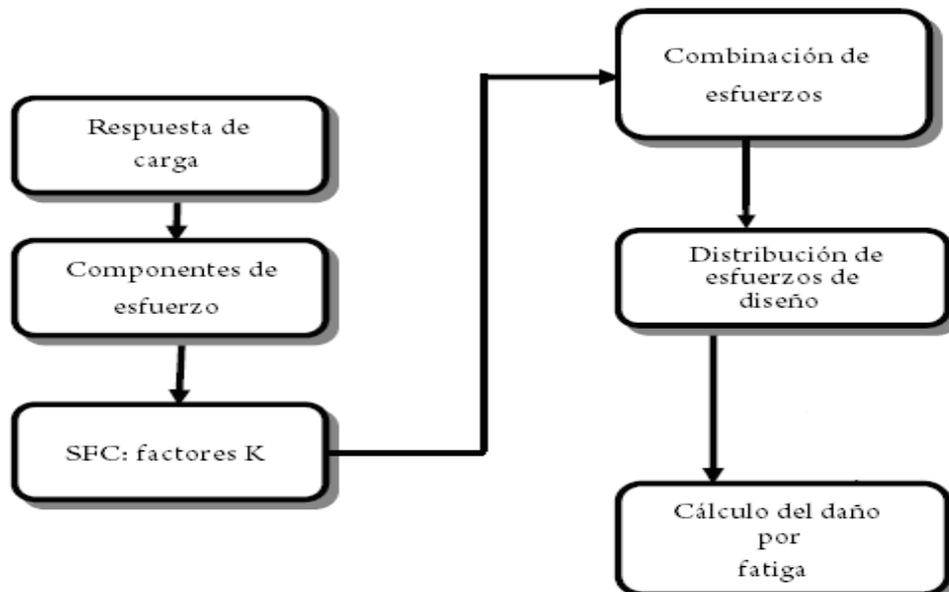


Fig. 3.2 Procedimiento para el Análisis por Fatiga. Ref. [24]

3.3.1 Factores de Diseño por Fatiga (FDF)

Los factores de diseño por fatiga (FDF) estarán en función de la criticidad con respecto a la seguridad y consecuencias económicas. Los factores de diseño por fatiga son dados en el DNV-OS-C101. Estos factores deben ser aplicados a menos que estén determinados en las especificaciones o requerimientos de proyecto. Los factores de seguridad aplicados a cada detalle de conexión son escogidos en base a la accesibilidad de la conexión para inspección y reparación, y las consecuencias de daño en la conexión.

De esta manera:

- Los Factores de Diseño por Fatiga (FDF) deberán aplicarse para reducir la probabilidad de falla por fatiga.
- Los FDF están en función de la trascendencia de los componentes estructurales con respecto a la integridad estructural y disponibilidad para la inspección y reparación.
- Los FDF's deberán aplicarse al diseño de la vida por fatiga. El cálculo de la vida por fatiga deberá ser mayor que los tiempos de los FDF del diseño de vida por fatiga.
- Los requerimientos de diseño pueden ser expresados alternativamente como lo proporción de daño acumulado por el número de ciclos de carga del diseño de vida por fatiga que multiplicada por el FDF deberá ser menor o igual a 1.0.

FDF	
2	Estructuras internas, accesibles y no soldadas directamente a la partes sumergidas.
2	Estructuras externas, accesibles para inspección y reparación regular en condiciones mejado y seco.
3	Estructuras internas, accesibles y soldadas directamente a partes sumergidas.
3	Estructuras externas no accesibles para inspección y reparación en condiciones mojado seco.
10	Áreas no accesibles, áreas no planeadas para ser accesibles para inspección y reparación durante la operación.

Tabla 3.2 Factores de Diseño por Fatiga (FDF). Ref [28] y Ref. [29]

3.3.2 Respuesta de carga.

3.3.2a Momentos flexionantes inducidos por oleaje en las vigas del casco.

En la siguiente figura se muestra una ola transversal igual a la propia longitud del buque:

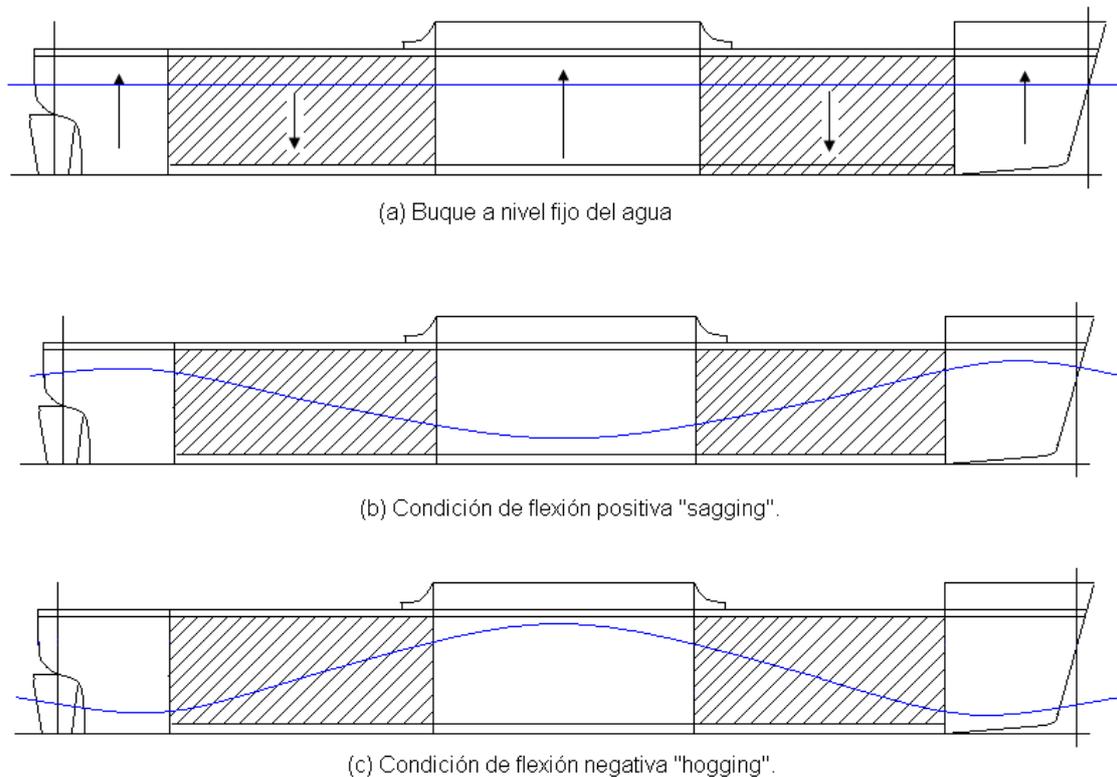


Fig. 3.3 Diagramas de momento positivo (sagging) y momento negativo (hogging). Ref [25]

Para un FPSO, (a) condición de nivel fijo del agua, (b) la condición extrema de flexión positiva “sagging”, el casco será considerando el lleno total de los tanques de crudo combinado con una ola de aproximadamente la longitud del barco, con el valle de la ola en el centro del barco y (c) la flexión negativa “hogging” será con los tanques del barco vacíos combinado con una ola de la longitud del barco con la cresta en el centro.

Los esfuerzos longitudinales en condiciones de carga homogénea son afectados principalmente por la longitud del espacio del tanque, coeficiente de bloque, tipo y cantidad de cortante, proporción de la longitud de la viga, ubicación y extensión de los cuartos de bombas y bunkers, ubicación y extensión de los tanques de lastre, y todos aquellos factores tomados en consideración por las sociedades de clasificación cuando determinan las vigas del casco para tales buques.

Una de las suposiciones básicas en el cálculo del momento flexionante en un buque sobre una ola trocoidal es que, la presión y la flotación, son directamente proporcionales a la profundidad debajo de la superficie de la ola. Se ha demostrado que en una ola la presión no se ajusta a las leyes de la hidrostática debido a la posición de las fuerzas centrífugas por el movimiento orbital de las partículas en la ola. Por lo tanto, la presión dentro de una ola no es proporcional a la profundidad debajo de la superficie de la ola.

Los momentos flexionantes globales inducidos por el oleaje vertical pueden ser calculados usando las amplitudes de los momentos, cabe recordar que dependiendo de la longitud de la ola y la posición de la cresta a lo largo del barco, el casco podrá experimentar flexión positiva (los extremos más arriba del centro) o flexión negativa, ver figura 3.4. Los momentos globales máximos, pueden tomarse como:

$$M_{wo,s} = -0.11 f_r k_{wm} C_w L^2 B (C_B + 0.7) [kNm] \quad 3.1$$

$$M_{wo,h} = 0.19 f_r k_{wm} C_w L^2 B C_B [kNm] \quad 3.2$$

Donde:

- $M_{wo,s}$ = Amplitud de ola de momento positivo
- $M_{wo,h}$ = Amplitud de ola de momento negativo
- C_w = Coeficiente de ola.

$= 0.0792L$	$L < 100m$
$= 10.75 - [(300 - L) / 100]^{3/2}$	$100m < L < 300m$
$= 10.75$	$300m < L < 350m$
$= 10.75 - [(L - 350) / 150]^{3/2}$	$350m < L$
- k_{wm} = Factor de distribución de momento
 - = 1.0 entre 0.40L y 0.65L delante de popa, para embarcaciones con velocidad baja/moderada
 - = 0.0 en popa y proa (interpolación lineal entre estos valores)
- f_r = Factor de transformación de carga del nivel de probabilidad de 10^{-4} a 10^{-8} .
 - $= 0.5^{1/h_o}$
- h_o = Parámetro de forma de Weibull de periodo largo.
 - $= 2.21 - 0.54 \log(L)$
- L = Regla de longitud (eslora) de la embarcación (m).
- B = Ancho o Manga de la embarcación medida en metros desde la marca del nivel del agua en verano.
- C_B = Coeficiente de bloque.

Para el propósito de cálculo del momento flexionante vertical de la viga del casco por análisis directo de elemento finito global, las cargas simplificadas pueden obtenerse de la siguiente manera:

Para determinar el cálculo de elemento finito global, el rango del momento flexionante vertical de la viga del casco puede expresarse contrarrestando las fuerzas verticales, como muestra la siguiente figura 3.4:

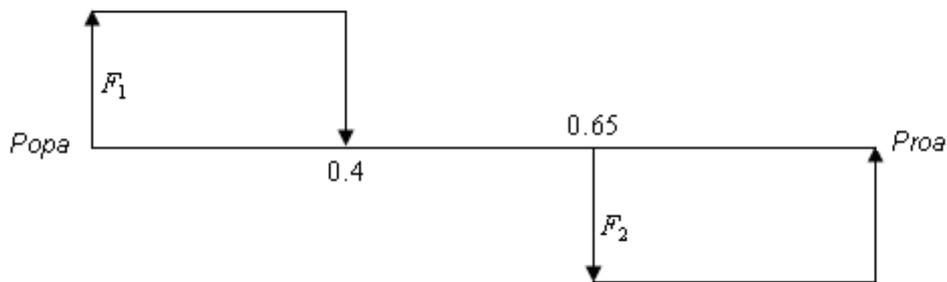


Fig. 3.4 Distribución de las secciones de fuerzas para el cálculo del rango de esfuerzos vertical.
Ref. [24], Apéndice C

- En popa y 0.4L delante de popa:

$$F_1 = + / - \frac{[M_{wo,h} - M_{wo,s}]}{(0.4L)} \quad 3.3$$

- En 0.65L delante de popa y en proa:

$$F_2 = - / + \frac{[M_{wo,h} - M_{wo,s}]}{(0.35L)} \quad 3.4$$

$$q_h = -0.88 f_r \sqrt{1 - \frac{C_B^2 L^2 B C_{SWP}}{18000 T_{act}^2}} L^{\frac{3}{4}} (T_{act} + 0.3B) C_B \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \dots [kN/m] \quad 3.5$$

$$m_t = 1.63 f_r \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{3C_B L}\right) L^{\frac{1}{3}} B^2 \frac{C_{SWP}}{C_B} \quad 3.6$$

$$-0.27 f_r \sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{3C_B L}\right) L^{\frac{1}{3}} B^2 \frac{C_{SWP}}{C_B^2} \dots [kNm/m] \quad 3.7$$

Donde:

- $C_{SWP} = A_{WP} / (LB)$
- $A_{WP} = \text{Área del plano del agua en m}^2 \text{ del calado de la nave} = T.$
- $T_{act} = \text{Calado de la nave en metros en condiciones consideradas. (Note que un calado igual al calado de diseño puede en general ser supuesto como representativo para una condición de análisis por fatiga relacionado con las condiciones de carga de las embarcaciones).}$
- $x = \text{Distancia en metros de popa a la posición considerada sobre la viga del casco.}$

- f_r = Factor de transformación de carga del nivel de probabilidad de 10^{-4} a 10^{-8} .
 $= 0.5^{1/h_0}$, insertando $h = 0.95$
- $M_{wo, s}$ = Amplitud de ola de momento positivo
- $M_{wo, h}$ = Amplitud de ola de momento negativo

El momento flexionante de amplitud horizontal de la ola en un nivel de probabilidad de 10^{-4} puede tomarse de la siguiente manera:

$$M_H = 0.22 f_r L^{\frac{9}{4}} (T_{act} + 0.30B) C_B \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right) \dots [kNm] \quad 3.8$$

Donde:

- x = es la distancia en m de popa a la sección considerada.

3.3.2b Cargas de presión externas.

Debido a la intermitente superficie mojado-seca, el rango de la presión es reducido sobre $T_{act} - z_{wl}$, como muestra la figura 3.5:

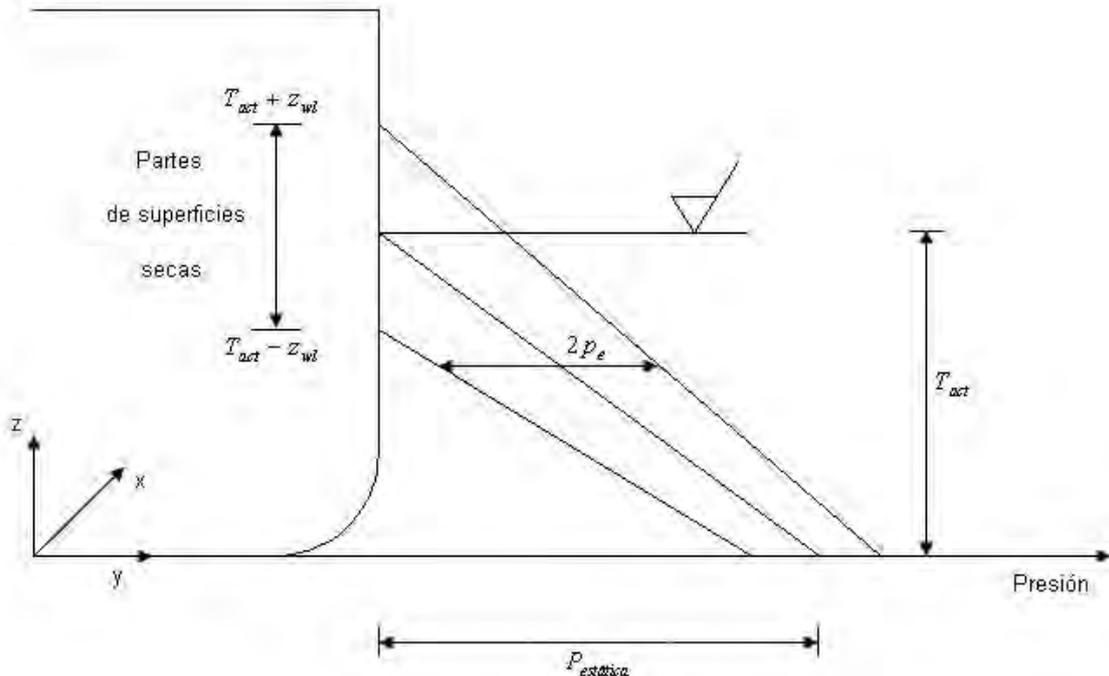


Fig. 3.5 Rango de presiones reducida en la superficie. Ref. [24]

La amplitud de presión dinámica externa (rango de presión media), p_e , relacionado al calado de la condición de carga considerada, puede tomarse como:

$$p_e = r_p p_d \dots [kN / m^2] \tag{3.9}$$

Donde:

- p_d = amplitud de presión dinámica bajo la línea de nivel del agua.

La amplitud de presión dinámica puede tomarse como la mayor de las combinaciones denominadas por el movimiento de cabeceo “oleaje que incide sobre la proa en la dirección longitudinal (head)/y la dirección a 45 grados (quartering seas)”, p_{dp} , o “la presión combinada por el balanceo que es el oleaje que incide en la dirección transversal (beam)/ y los 45 grados (quartering seas)”, p_{dr} , como:

$$p_d = \text{máx} \begin{cases} p_{dp} = p_l + 135 \frac{|\bar{y}|}{B + 75} - 1.2(T_{act} - z_w) \dots [kN / m^2] \\ p_{dr} = 10 \left[|y| \frac{\phi}{2} + C_b \frac{|y| + k_f}{16} \left(0.7 + 2 \frac{z_w}{T_{act}} \right) \right] \end{cases} \tag{3.10}$$

Donde:

$$p_l = k_s C_w + k_f \tag{3.11}$$

$$= (k_s C_w + k_f) \left(0.8 + 0.15 \frac{V}{\sqrt{L}} \right) \text{ si } \frac{V}{\sqrt{L}} > 1.5 \tag{3.12}$$

$$k_s = 3C_B + \frac{2.5}{\sqrt{C_B}} \quad \text{en A. P. y popa.} \tag{3.13}$$

$$= 3C_B \quad \text{entre 0.2L y 0.7L de A. P.} \tag{3.14}$$

$$= 3C_B + \frac{4.0}{C_B} \quad \text{en F. P. y mayores.} \tag{3.15}$$

Entre áreas especificadas k_s es variado linealmente.

- z_w = distancia vertical de la línea de base al punto de carga.
= máximo T_{act} (m).
- y = distancia horizontal de la línea del centro al punto de carga.
- $\bar{y} = y$, pero mínima $B/4$ (m).
- C_w = Coeficiente de ola.
- k_f = el más bajo de T_{act} y f .

- f = distancia vertical del nivel del agua a la parte más alta del borde de la embarcación en la sección transversal considerada.
= máximo $0.8C_w$ (m).
- ϕ = ángulo de balanceo, solo amplitud (rad)
= $50 c / (B + 75)$
- $c = (1.25 - 0.025T_R) * k$
- $k = 1.2$ para embarcaciones sin quilla lateral de balance.
= 1.0 para embarcaciones con quilla lateral de balance.
= 0.8 para embarcaciones provistas de sistemas reductores activos del movimiento de Balanceo.
- T_R = periodo de cabeceo.
= $\frac{2k_r}{\sqrt{GM}}$, máximo 30 (s). 3.16
- $k_r = 0.39B$ para embarcaciones con distribución uniforme de masa y doble casco en los tanques de lastre.
= $0.35B$ solo para tanques de lastre.
= $0.25B$ para embarcaciones cargadas con minerales entre mamparas longitudinales.
- GM = altura metacéntrica (m).
= $0.07B$ en general.
= $0.12B$ solo para tanques, graneleros y cisternas con doble casco totalmente cargados.
= $0.17B$ para transporte de mineral y granel in la condición de carga de mineral.
= $0.33B$ para tanques de doble casco en la condición de carga de lastre.
= $0.25B$ para transportes a granel en la condición de lastre.
= $0.04B$ para transportes cisterna.
- V = Velocidad de diseño del buque en nudos.
- r_p = reducción de la amplitud de presión en la zona de superficie.
= 1.0 para $z < T_{act} - z_{wl}$ 3.17
= $\frac{T_{act} + z_{wl} + z}{2z_{wl}}$ para $T_{act} - z_{wl} < z < T_{act} + z_{wl}$ 3.18
= 0.0 para $T_{act} + z_{wl} < z$ 3.19
- z_{wl} = distancia en metros medida de la línea actual del agua. En el área de lado la placa $z = T_{act} + z_{wl}$ se supone que la presión externa de mar no debe contribuir al daño por fatiga.
= $\frac{3 p_{dT}}{4 \rho g}$ 3.20
- $p_{dT} = p_d$ en $z = T_{act}$
- T_{act} = el calado de la condición de carga considerada.

➤ $\rho =$ densidad del agua de mar = 1.025 (t / m³)

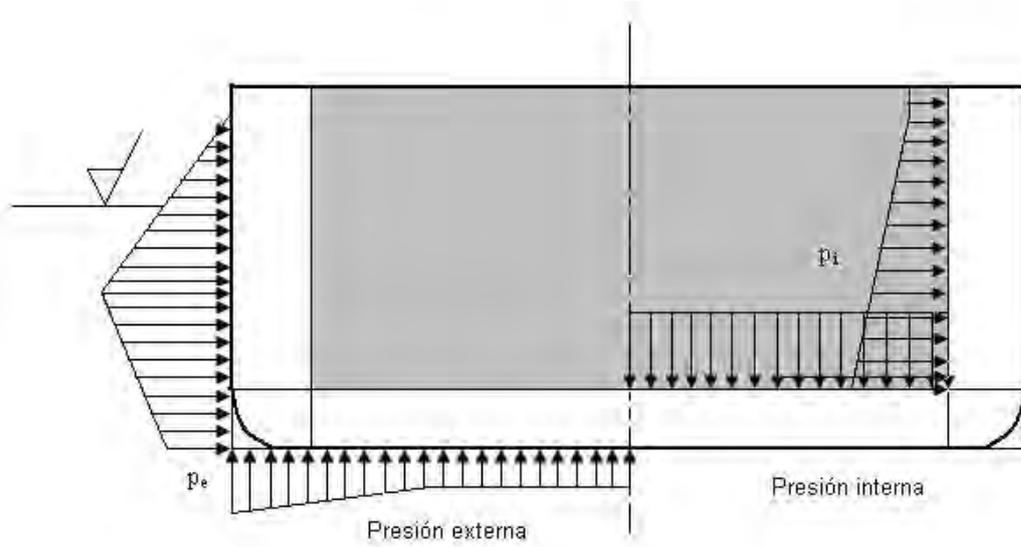


Fig. 3.6 Distribución de las amplitudes de presión para tanques en la condición totalmente cargado. Ref. [24]

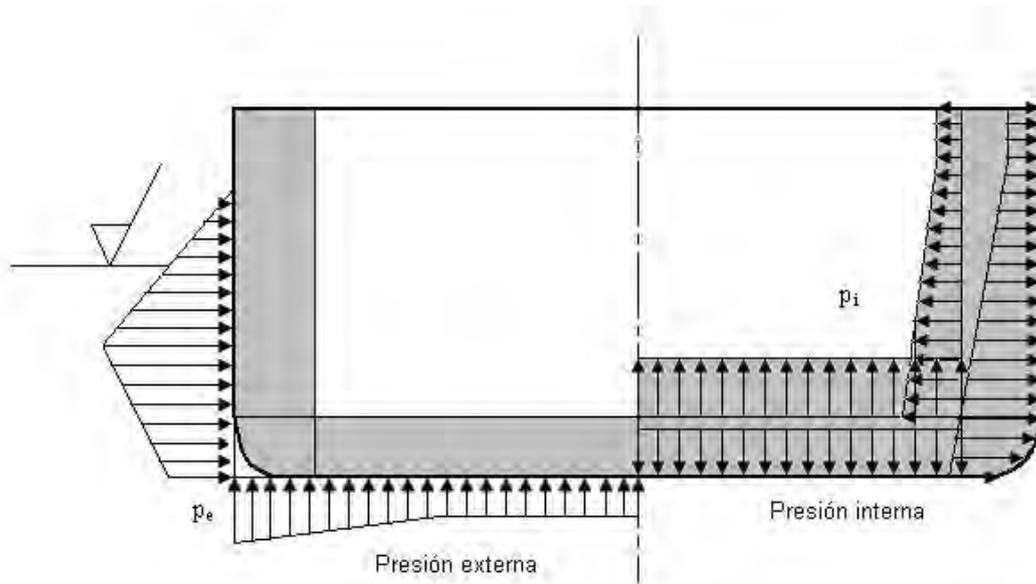


Fig. 3.7 Distribución de las amplitudes de presión para tanques en condiciones de lastre. Ref [24]

3.3.2c Cargas de presión interna debido a los movimientos de la embarcación.

La presión dinámica de líquidos de carga o agua de lastre debe calcularse en base de las aceleraciones combinadas relacionadas con el sistema de coordenadas fijo. La amplitud de presión dinámica interna, p_i , en kN / m^2 , puede tomarse como la presión máxima debida a la aceleración de la masa interna:

$$p_i = f_a máx \begin{cases} p_1 = \rho a_v h_s \\ p_2 = \rho a_t |y_s| \dots [kN / m^2] \\ p_3 = \rho a_l |x_s| \end{cases} \quad 3.21$$

Donde:

- p_1 = presión debida a la aceleración vertical (mayor presión en la región baja del tanque).
- p_2 = presión debida a la aceleración transversal.
- p_3 = presión debida a la aceleración longitudinal.
- ρ = densidad del agua de mar = $1.025 (t / m^3)$.
- x_s = distancia longitudinal del centro de la superficie libre del líquido en el tanque al punto de presión considerado.
- y_s = distancia transversal del centro de la superficie libre del líquido en el tanque al punto de presión considerado. Figura 3.8.
- h_s = distancia vertical del punto considerado a la superficie dentro del tanque (m) figura 3.8.
- a_v, a_t y a_l = aceleraciones en dirección vertical, transversal o longitudinal (m / s^2)
- f_a = factor de transformación del efecto de carga a un nivel de probabilidad de 10^{-4} , cuando las aceleraciones son especificadas en el nivel de probabilidad de 10^{-8} .
 $= 0.5^{1/h}$
- $h = h_0 + 0.05$
 $= 2.26 - 0.54 \log_{10} (L)$

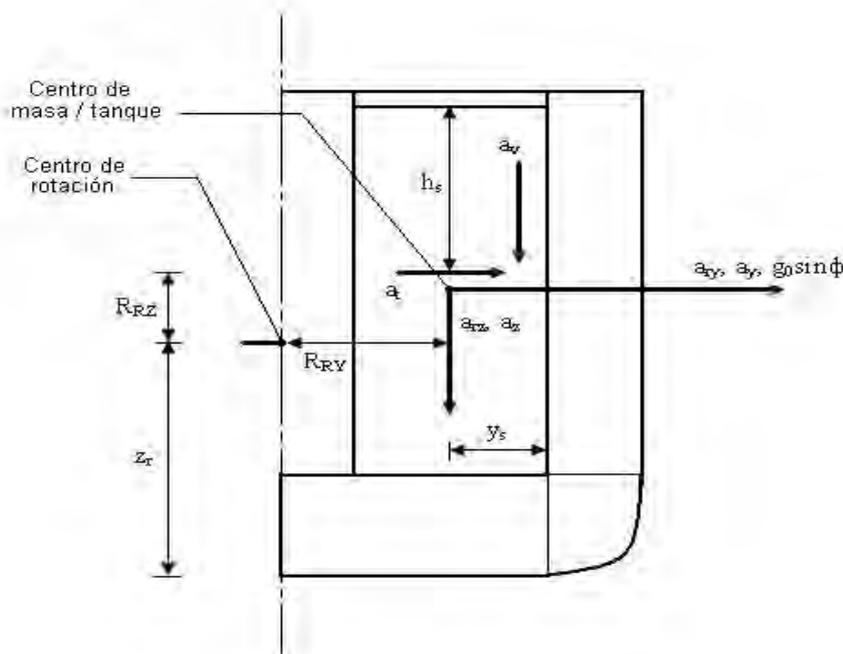


Fig. 3.8 Ilustración de las componentes de la aceleración. Ref. [24]

• **Aceleraciones combinadas.**

➤ $a_t = \sqrt{a_y^2 + (g_0 \sin \phi + a_{ry})^2}$ 3.22

➤ a_t = aceleración transversal combinada en (m / s²).

➤ $a_l = \sqrt{a_x^2 + (g_0 \sin \theta + a_{px})^2}$ 3.23

➤ a_l = aceleración longitudinal combinada en (m / s²).

➤ $a_v = \text{máx} \begin{cases} \sqrt{a_{rz}^2 + a_z^2} \\ \sqrt{a_{pz}^2 + a_z^2} \end{cases}$ 3.24

➤ a_v = aceleración vertical combinada en (m / s²).

Donde:

➤ $a_x = \text{aceleración longitudinal (m / s}^2\text{)}$
 $= 0.2 g a_0 \sqrt{C_B}$ 3.25

➤ $a_y = \text{aceleración debida a transversal y giro (m / s}^2\text{)}$
 $= 0.3 g a_0$ 3.26

➤ $a_z = \text{aceleración vertical (m / s}^2\text{)}$
 $= \frac{0.7 g a_0}{\sqrt{C_B}}$ 3.27

➤ $a_0 = \text{aceleración constante.}$
 $= \frac{3C_W}{L} + \frac{C_V V}{\sqrt{L}}$ 3.28

➤ $C_V = \frac{\sqrt{L}}{50}$, máx. 0.2 3.29

➤ V = velocidad de diseño de la embarcación (nudos).

• **Movimientos de balanceo.**

➤ a_{ry} = componente horizontal de la aceleración del cabeceo (m / s^2).

$$= \phi \left(\frac{2\pi}{T_R} \right)^2 R_{RZ} \quad 3.30$$

➤ a_{rz} = componente vertical de la aceleración del balanceo (m / s^2).

$$= \phi \left(\frac{2\pi}{T_R} \right)^2 R_{RY} \quad 3.31$$

➤ R_R = distancia del eje de rotación al centro de masa.

La distancia es relacionada al balanceo del eje de rotación que puede tomarse en z_r (m) sobre la línea base, donde z_r es el menor de $[D / 4 + T / 2]$ y $[D / 2]$.

Para tanques de lastre de doble casco el R_R puede ser aproximado por la distancia horizontal de la línea de centro al centro de la superficie del tanque.

➤ R_{RZ} = distancia vertical del eje de rotación al centro de masa/tanque (m).

➤ R_{RY} = distancia transversal del eje de rotación al centro de masa/tanque (m).

• **Movimientos de cabeceo.**

➤ a_p = aceleración tangencial del cabeceo (m / s^2).

$$= \theta \left(\frac{2\pi}{T_p} \right)^2 R_p \quad 3.32$$

➤ a_{px} = componente longitudinal de la aceleración del cabeceo (m / s^2).

$$= \theta \left(\frac{2\pi}{T_p} \right)^2 R_{pZ} \quad 3.33$$

➤ a_{pz} = componente vertical de la aceleración del cabeceo (m / s^2).

$$= \theta \left(\frac{2\pi}{T_p} \right)^2 R_{pX} \quad 3.34$$

➤ R_p = distancia del eje de rotación al centro del tanque (m).

➤ R_{pZ} = distancia vertical del eje de rotación al centro de masa/tanque (m).

➤ R_{pX} = distancia longitudinal del eje de rotación al centro de masa/tanque (m).

➤ T_p = periodo del cabeceo (s).

$$= 1.80 \sqrt{\frac{L}{g}} \quad 3.35$$

➤ θ = ángulo máximo de cabeceo (rad).

$$= 0.25 \frac{a_0}{C_B} \quad 3.36$$

3.3.3 Componentes de esfuerzos.

3.3.3a Esfuerzos considerados.

El proceso para el análisis de fatiga se basa en la suposición de que solo es necesario considerar los rangos de esfuerzos principales cíclicos en la determinación de la resistencia a la fatiga. Sin embargo, alguna reducción en la acumulación del daño por fatiga puede crearse, cuando partes del rango de esfuerzos cíclicos son en compresión.

Debería notarse que en uniones soldadas, pueden ubicarse varias grietas por fatiga las cuales se pueden desarrollar, por ejemplo, el pie de la soldadura, en la raíz de la soldadura y en el chaflán de la unión. Es recomendado verificar, las potenciales ubicaciones de los puntos críticos para las grietas por fatiga, comparando el nivel de esfuerzos principal con el rango de esfuerzo máximo de muesca permisible,

Cuando la potencial grieta de fatiga es ubicada en el material original al pie de la soldadura, el esfuerzo local de muesca relevante es el rango de esfuerzos principales adyacentes a la potencial ubicación de la grieta con concentraciones de esfuerzos existentes tomados en cuenta.

Esta concentración de esfuerzos es debido a la forma del material y la geometría de la soldadura, Como ejemplo, para la soldadura mostrada en la figura a), el relevante esfuerzo local de muesca para diseño por fatiga debería ser el esfuerzo de tensión, σ , multiplicado por el factor de concentración de esfuerzo debido a la soldadura K_w . Para la soldadura mostrada en la figura b) el factor de concentración de esfuerzo para la geometría local debe además ser tomado en cuenta para, el esfuerzo de muesca local dando igual a $K_g K_w \sigma$, donde K_g es el factor de concentración de esfuerzo debido al hoyo. Para soldaduras de barril con la superficie de la soldadura al ras y un pequeño esfuerzo de flexión local a través del espesor de la placa, K_w de 1.0 es usado. De otra manera K_w de 1.5 es usado.

El rango de esfuerzo principal máximo dentro de 45° de la normal al pie de la soldadura debería usarse para el análisis.

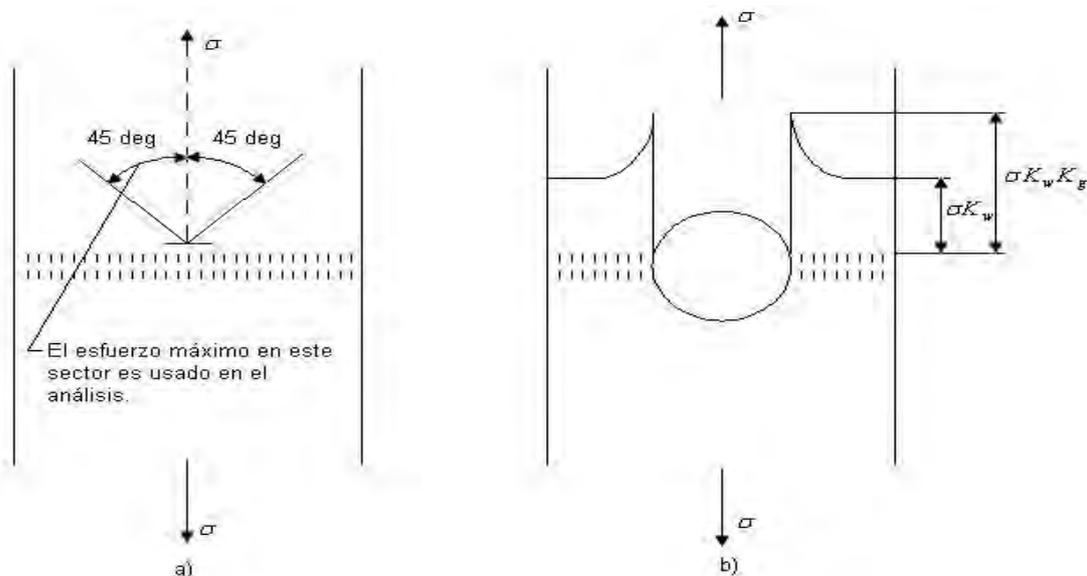


Fig. 3.9 Explicación de los esfuerzos de muesca locales. Ref. [24]

Para el análisis de fatiga de regiones en el material base no afectado significativamente por los esfuerzos residuales debidos a la soldadura, el rango de esfuerzo puede reducirse dependiendo de si los esfuerzos cíclicos promedio están en tensión o compresión. El rango de esfuerzo obtenido puede multiplicarse por el factor de reducción f_m como se obtuvo en la figura 3.10 antes de entrar a la curva S-N. Para esfuerzos de amplitud variable, $\Delta\sigma$ puede tomarse como el rango de esfuerzos en el nivel de probabilidad de excedencia de 10^{-4} .

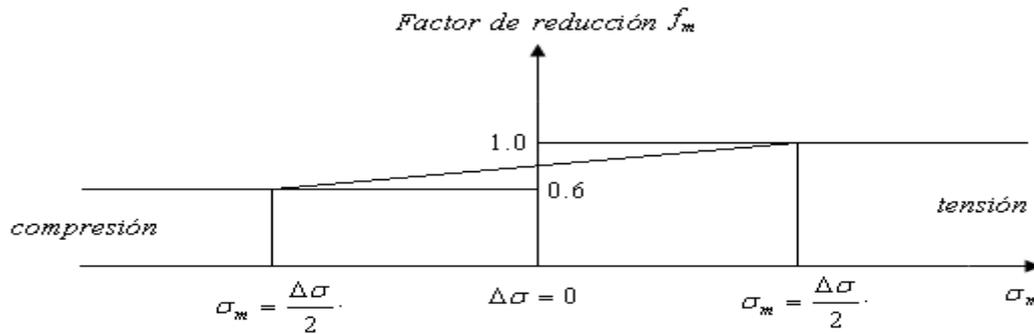


Fig. 3.10 Factor de reducción del rango de esfuerzos usado con la curva S-N para material base. Ref. [24]

Los esfuerzos residuales debidos a la construcción y soldadura son reducidos cuando la embarcación es sujeta a carga. Si una región de punto crítico es sujeta a una fuerza de tensión implicando la fluencia local en la región considerada, el rango de esfuerzos efectivo para el análisis de fatiga puede reducirse debido a los efectos de los esfuerzos promedio también para regiones afectadas por esfuerzos residuales de soldadura. Los siguientes factores de reducción derivados del rango de esfuerzo pueden aplicarse, figura 3.11:

- f_m = Factor de reducción debido a los efectos de los esfuerzos promedio.
 - = 1.0 para tensiones sobre el conjunto de ciclos de esfuerzo.
 - = 0.85 para esfuerzo promedio igual a cero (0).
 - = 0.7 para compresiones sobre el conjunto de ciclos de esfuerzo.

Para las partes de la estructura expuesta a ambos esfuerzos promedio tensión y compresión, dependiendo de la situación de carga, el factor de reducción $f_m = 0.85$ puede aplicarse en el rango de distribución de esfuerzos de periodo largo. Para esfuerzos de amplitud variable, $\Delta\sigma$ puede tomarse como el rango de esfuerzo en el nivel de probabilidad de excedencia de 10^{-4} .

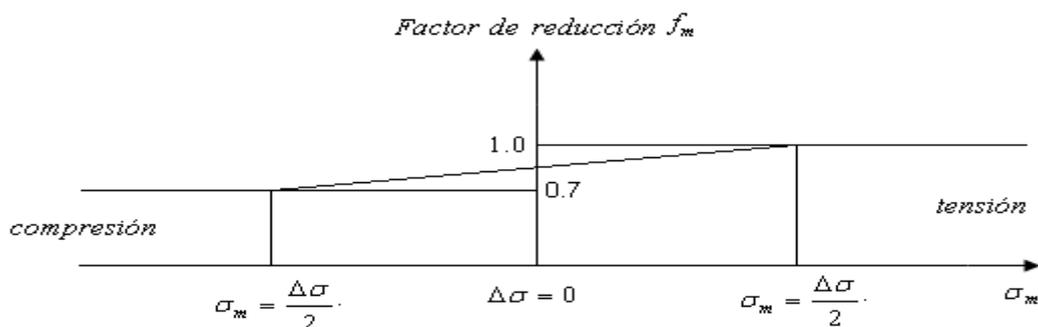


Fig. 3.11 Factor de reducción del rango de esfuerzos que podría usarse con la curva S-N para estructuras soldadas. Ref. [24]

3.3.4 Factores de Concentración de Esfuerzo (K).

Los factores de concentración de esfuerzo o factores-K pueden determinarse basándose en la malla fina del análisis de elemento finito. Alternativamente los factores-K pueden obtenerse de la siguiente selección de factores para detalles típicos en embarcaciones.

La vida de fatiga de un detalle es regida por el rango de esfuerzo de muesca. Para componentes aparte de especímenes lisos el esfuerzo de muesca se obtiene por la multiplicación del esfuerzo nominal con los factores-K. Los factores-K de esta manera son definidos como:

$$K = \frac{\sigma_{muesca}}{\sigma_{no\ min\ al}} \quad 3.37$$

La relación entre el rango de esfuerzo de muesca es usado con la curva S-N el rango de esfuerzo nominal es:

$$\Delta\sigma = K \cdot \Delta\sigma_{no\ min\ al} \quad 3.38$$

Todas las líneas de esfuerzo están consideradas cuando se evalúan los esfuerzos de muesca. Esto puede hacerse por la multiplicación de los factores-K aparecidos de las diferentes causas. El factor-K resultante es usado para el cálculo de los efectos de muesca derivados como:

$$K = K_g \cdot K_w \cdot K_{te} \cdot K_{ta} \cdot K_n \quad 3.39$$

Donde:

- K_g = factor de concentración de esfuerzo debido a la geometría del detalle considerado.
- K_w = factor de concentración de esfuerzo debido a la geometría de la soldadura.
- $K_w = 1.5$ si no se indica otra cosa.
- K_{te} = factor de concentración de esfuerzo adicional debido a la tolerancia de la excentricidad (normalmente usado solo para conexiones de placas).
- K_{ta} = factor de concentración de esfuerzo adicional debido a la mala alineación angular (normalmente usado solo para conexiones de placas).
- K_n = factor de concentración de esfuerzo adicional para refuerzos asimétricos o panales cargados lateralmente, aplicado cuando el esfuerzo nominal es derivado del análisis de una viga simple.

A continuación se muestran dos ejemplos de placas, en las cuales se puede observar el caso de los esfuerzos de muesca locales.

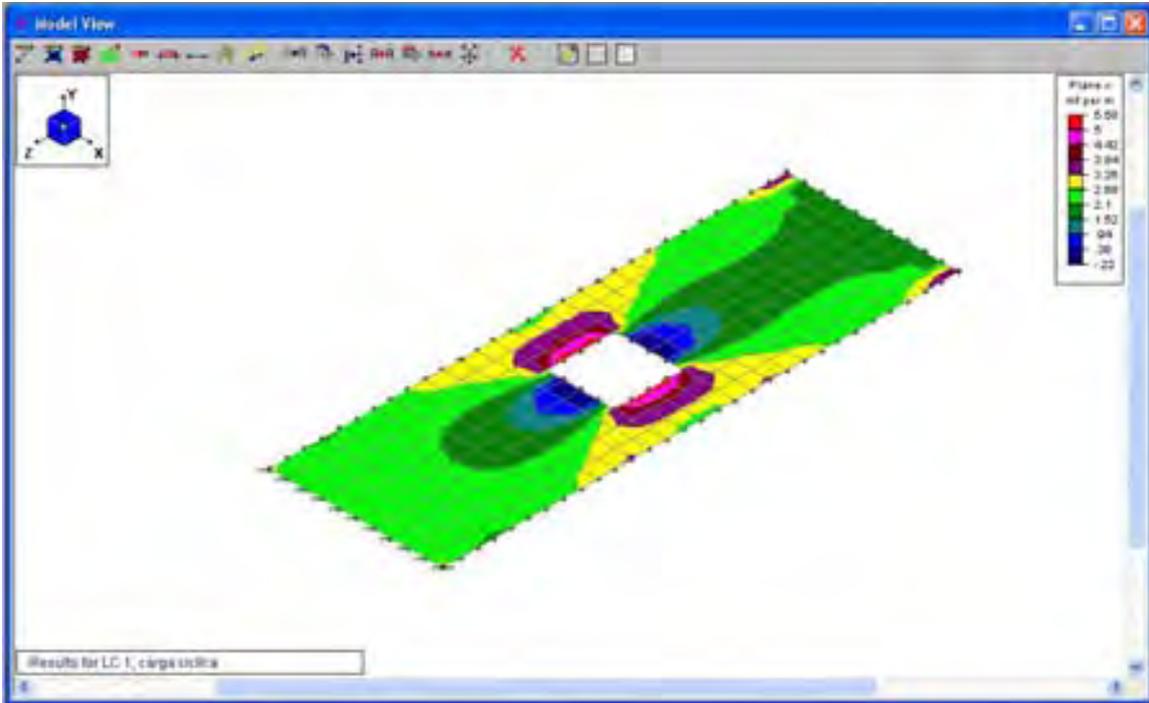


Fig. 3.12 Ejemplo de esfuerzos locales en una placa, con el programa análisis y diseño estructural RISA 3D

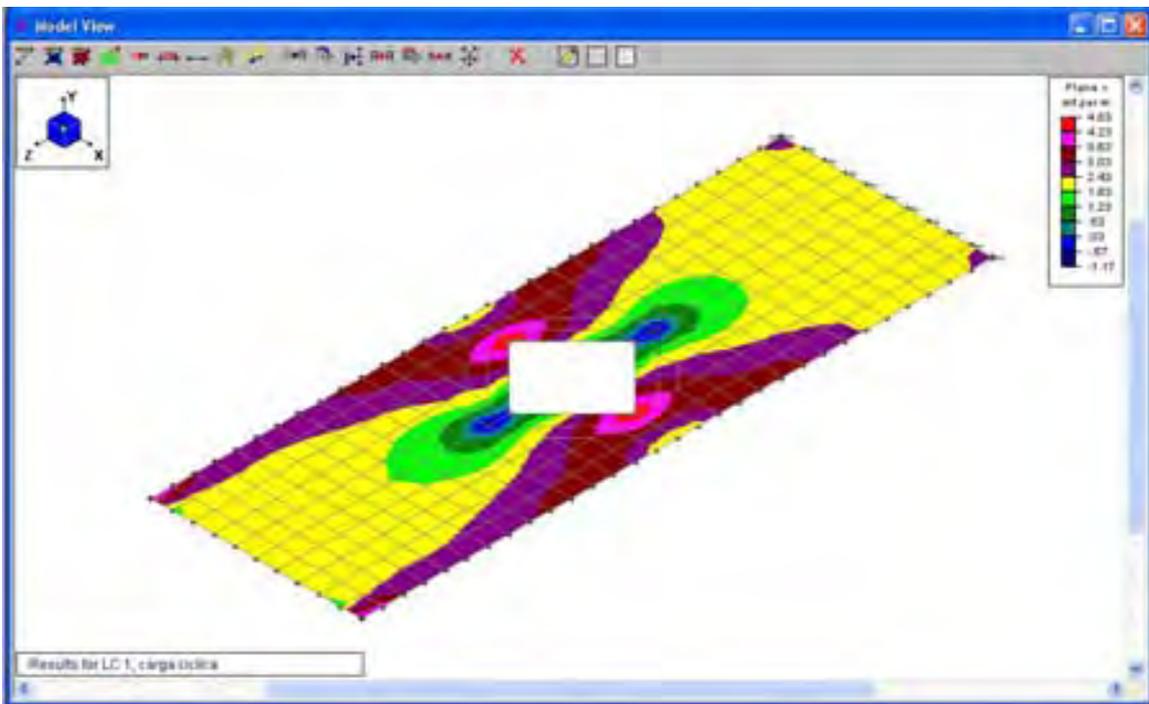


Fig. 3.13 Ejemplo de esfuerzos locales en una placa, con el programa análisis y diseño estructural RISA 3D

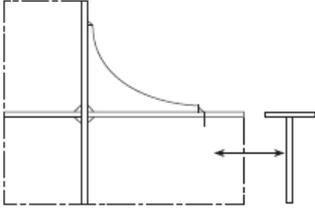
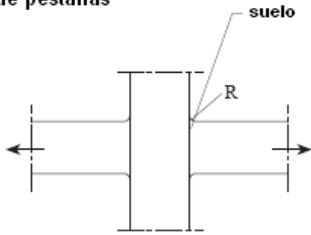
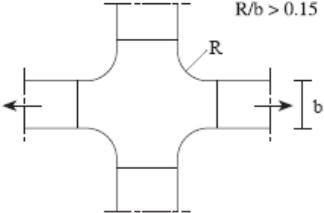
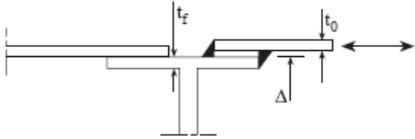
Geometría	Factor-K
<p>Conexión de pestaña con pie ligero.</p> 	$K_g \cdot K_w = 2.2$
<p>Cruce de pestañas</p> 	$K_g \cdot K_w = 2.2$ <p>$R \geq 1.25t$ (tierra) Soldado de ambos lados $t =$ espesor de la pestaña</p>
 <p>$R/b > 0.15$</p>	$K_g = 1.9$ <p>Usado junto con la curva S-Para material base.</p>
<p>Conexión coincidente.</p> 	$K_g = \left(4 \frac{t_0}{t_f} + 3 \left(\frac{t_0}{t_f} \right)^2 + 6 \frac{\Delta t_0}{t_f^2} \right)$ <p>$\Delta = \text{gap} = \text{tolerancia}$ Default: $\Delta = 1.0 \text{ mm}$</p> $K_w = 1.5$

Tabla 3.3 Factores K para conexiones soldadas. Ref. [24]

3.3.5 Combinación de esfuerzos.

3.3.5a Definición de componentes de esfuerzo.

Las variaciones de esfuerzos dinámicos son referidos como *rango de esfuerzo* ($\Delta\sigma$) o *amplitud de esfuerzo* (σ). Para respuestas lineales, se aplica la siguiente relación:

$$\Delta\sigma = 2\sigma \quad 3.40$$

Los componentes de esfuerzo global (esfuerzos primarios) los cuales deben considerarse en el análisis de fatiga son:

- σ_v = esfuerzo flexionante vertical sobre la viga del casco inducido por oleaje.
- σ_{hg} = esfuerzo flexionante horizontal sobre la viga del casco inducido por oleaje.

Las amplitudes de esfuerzos dinámicos locales también deben considerarse y se definen como:

- σ_e = amplitud de esfuerzo local total debido a cargas de presión dinámica externa.
- σ_i = amplitud de esfuerzo local total debido a fuerzas o cargas de presión dinámica interna.

Los componentes de esfuerzo local son definidos como:

- σ_2 = amplitud de esfuerzo resultante del sistema de vigas flexionadas.
- σ_{2A} = amplitud de esfuerzo producida por la flexión de la rigidez entre las vigas de soporte.
- σ_3 = amplitud de esfuerzo terciario producido por flexión de los elementos placa sin rigidez entre marcos transversales y longitudinales.

3.3.5b Combinación de esfuerzos.

Para cada condición de carga, los componentes combinados de esfuerzo local debido a cargas de presión externa e interna son combinados con componentes de esfuerzo global inducidos por la flexión del casco como viga con el oleaje.

Los componentes de esfuerzos combinados son los esfuerzos de muesca, por ejemplo, esfuerzos incluyendo los factores de concentración de esfuerzo, K. El factor de concentración de esfuerzo resultante de un detalle estructural depende de la geometría de la soldadura, geometría estructural y tipo de carga.

El rango de esfuerzos local y global combinado puede tomarse como:

$$\Delta\sigma_0 = f_m \Delta\sigma \quad 3.41$$

$$\Delta\sigma = f_e \text{máx} \begin{cases} \Delta\sigma_g + b \cdot \Delta\sigma_l \\ a \cdot \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_l \end{cases} \quad 3.42$$

Donde:

- f_m = factor de reducción derivado del rango de esfuerzos combinado para las rutas de navegación de grandes periodos de las embarcaciones considerando el clima de la ola media a las que el buque estará expuesto durante su vida útil.
- f_e = factor de reducción derivado del rango de esfuerzos explicado para el efecto de esfuerzos medios.
- a, b = factores de combinación de carga, explicados para la correlación entre el oleaje inducido local y el rango de esfuerzos global.

$$a = 0.6$$

$$b = 0.6$$

- $\Delta\sigma_l$ = rango de esfuerzo local combinado debido a cargas de presión lateral.
- $\Delta\sigma_g$ = rango de esfuerzos global combinado.

El rango de esfuerzos global combinado puede tomarse en general como:

$$\Delta\sigma_g = \sqrt{\Delta\sigma_v^2 + \Delta\sigma_{hg}^2 + 2\rho_{vh} \Delta\sigma_v \Delta\sigma_{hg}} \quad 3.43$$

Donde:

- $\Delta\sigma_v$ = rango de esfuerzos debido a la flexión del casco como viga inducida por el oleaje vertical.
- $\Delta\sigma_{hg}$ = rango de esfuerzos debido a la flexión del casco como viga inducida por el oleaje horizontal.

$$= 2\sigma_h \text{ en general (para buques y tanques sin grandes escotillas abiertas).}$$

- $\rho_{vh} = 0.10$ correlación promedio entre el esfuerzo flexionante vertical y horizontal inducido por oleaje.

El rango de esfuerzos local combinado, $\Delta\sigma_l$, debido a las cargas de presión interna y externa puede tomarse como:

$$\Delta\sigma_l = 2 \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_i^2 + 2\rho_p \sigma_e \sigma_i} \quad 3.44$$

Donde:

- σ_e = amplitud de esfuerzo local total debido a las cargas de presión de mar (tensión = positivo).
- σ_i = amplitud de esfuerzo local total debido a las cargas de presión internas (tensión = positivo).
- ρ_p = correlación promedio entre las cargas de presión de mar y las cargas de presión interna.

$$= \frac{1}{2} - \frac{z}{10 \cdot T_{act}} + \frac{|x|}{4 \cdot L} + \frac{|y|}{4 \cdot B} - \frac{|x| \cdot z}{5 \cdot L \cdot T_{act}} \quad 3.45$$

Donde $z \leq T_{act}$ para $z > T_{act}$, z puede tomarse igual a T_{act} .

El origen del sistema coordenado tiene coordenadas (a la mitad del barco, en la línea de centro, línea base) x , y y z , las cuales son distancias longitudinal (x), transversal (y) y vertical (z) el origen del sistema al punto de carga del miembro estructural considerado, figura 3.14.

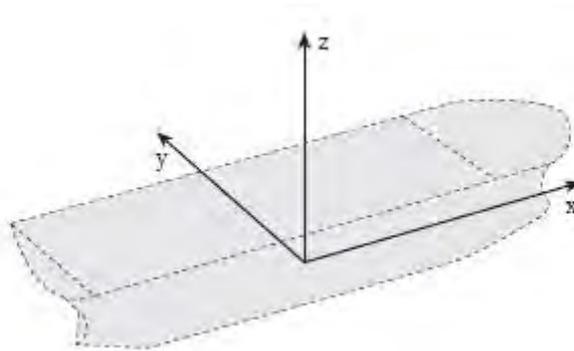


Fig. 3.14 Sistema Coordenado. Ref. [24]

La amplitud de esfuerzo local total debido a cargas de presión internas y externas es la suma de los componentes de esfuerzo individuales, como sigue:

$$\sigma_{e,i} = \sigma_2 + \sigma_{2A} + \sigma_3 \quad 3.46$$

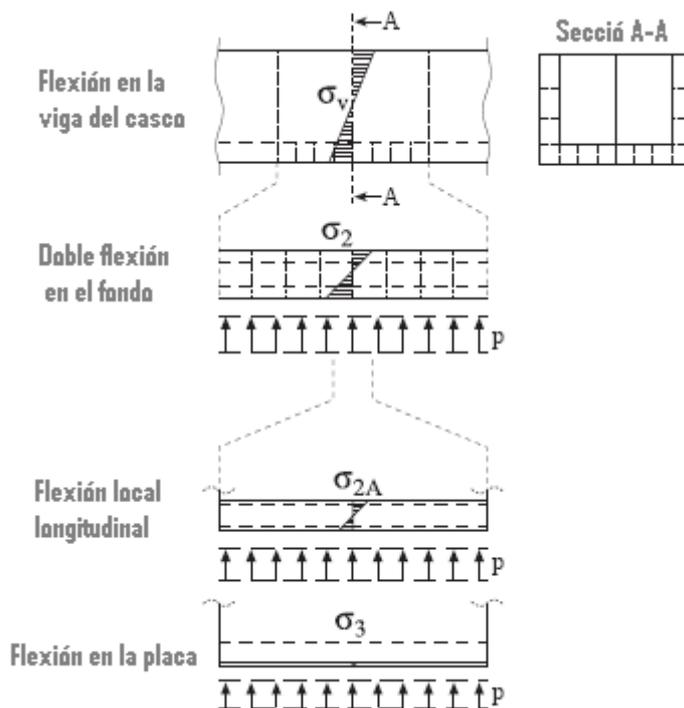


Fig. 3.15 Definición de los componentes de esfuerzo. Ref . [24]

3.3.6 Distribución de esfuerzo de diseño.

La distribución del rango de esfuerzo de diseño en detalles locales puede describirse por la distribución de Weibull, como:

$$Q(\Delta\sigma) = \exp\left[-\left(\frac{\Delta\sigma}{q}\right)^h\right] \quad 3.47$$

Donde:

- Q = probabilidad de excedencia del rango de esfuerzo $\Delta\sigma$.
- h = parámetro de forma de Weibull.
- q = parámetro de escala de Weibull, definido como

$$q = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{\frac{1}{h}}} \quad 3.48$$

La distribución del rango de esfuerzo puede expresarse también como:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_0 \left[\frac{\ln n}{\ln n_0} \right]^{\frac{1}{h}} \quad 3.49$$

Donde:

- $\Delta\sigma_0$ = el valor de referencia del rango de esfuerzo en el detalle local excedido una vez fuera de n_0 ciclos.
- n_0 = número total de ciclos asociados con el nivel del rango de esfuerzos $\Delta\sigma_0$.

Cuando el rango de esfuerzo de periodo largo sigue una distribución de Weibull con parámetros de forma en el rango 0.8 – 1.0, la contribución principal al daño acumulado por fatiga viene del oleaje pequeño (pequeñas olas), figura 3.15.

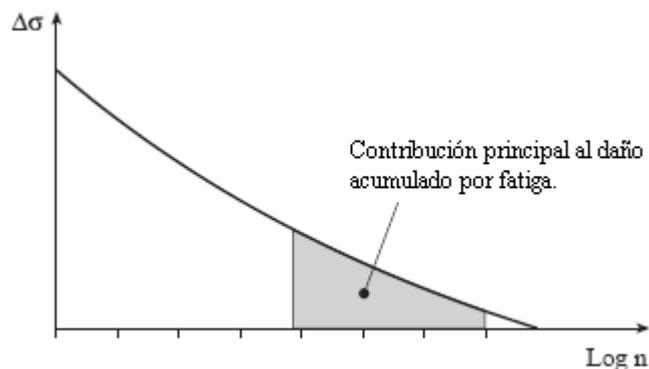


Fig. 3.16 Contribución al daño por fatiga de diferentes bloques de esfuerzo. Ref. [24]

Si los rangos de esfuerzos altos fuera de ciclos de esfuerzo de 10^8 son usados al describir la distribución de esfuerzos de periodo largo, el cálculo del daño por fatiga es muy sensible al estimado del parámetro de forma de Weibull h .

El parámetro de forma de Weibull puede establecerse del análisis de las cargas de oleaje de periodo largo. En lugar de más cálculos exactos, el parámetro de forma puede tomarse como:

- $h = h_0$ para cubiertas longitudinales.
- $h = h_0 + h_a \frac{(D - z)}{(D - T_{act})}$ para embarcaciones con lados encima de la línea del agua
 $T_{act} < z < D$
- $h = h_0 + h_a$ para embarcaciones con lados en la línea del agua $z = T_{act}$.
- $h = h_0 + \frac{h_a z}{T_{act}} - 0.005(T_{act} - z)$ para embarcaciones con lados entre la línea del agua $z < T_{act}$
- $h = h_0 - 0.005T_{act}$ para fondos longitudinales.
- $h = h_0 + h_a$ para mamparas longitudinales y transversales.

Donde:

- h_0 = parámetro de forma básico.

$$= 2.21 - 0.54 \log_{10}(L)$$

(En lugar de más cálculos exactos h_0 puede, para buques de tipo abierto, tomarse como 1.05 en conexión con la valoración de fatiga de estructuras en cubierta sujetas a esfuerzos de torsión y dinámicos).

- h_a = factor adicional dependiente de periodo del movimiento de respuesta.

= 0.05 en general.

= 0.00 para placas sujetas a fuerzas relacionadas con el movimiento de balanceo para buques con un periodo de balanceo $T_R > 14$ seg.

- z = distancia vertical de la línea de base longitud considerada (m).

3.3.7 Calculo del daño por fatiga.

La vida por fatiga puede calcularse en base al enfoque de fatiga S-N bajo la suposición de daño acumulativo lineal (regla de Miner.).

Cuando el rango de distribución de esfuerzos de periodo largo es expresado por un histograma de esfuerzos, consistente de un número conveniente de bloques $\Delta\sigma_i$ de rangos de esfuerzos de amplitud constante cada uno con un número de repeticiones de esfuerzo n_i , el criterio de fatiga se lee como sigue:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^k n_i (\Delta\sigma_i)^m \leq \eta \tag{3.50}$$

Donde:

- D = daño aculado por fatiga.
- \bar{a} , m = parámetros de fatiga S-N.
- k = número de esfuerzos de bloque.
- n_i = número de ciclos de esfuerzo en esfuerzos de bloque i .
- N_i = número de ciclos para falla en el rango de esfuerzos constante $\Delta\sigma_i$.
- η = factor de uso. El factor de uso es aceptado y definido como $\eta = 1.0$.

Cuando la distribución de esfuerzo de periodo largo es definida aplicando la distribución de Weibull para las diferentes condiciones de cargas, y una curva S-N de pendiente 1 es usada, el daño por fatiga es dado por:

$$D = \frac{v_0 T_d}{\bar{a}} \sum_{n=1}^{N_{carga}} p_n q_n^m \Gamma \left(1 + \frac{m}{h_n} \right) \leq \eta \tag{3.51}$$

Donde:

- N_{carga} = número total de condiciones de carga considerado.
- p_n = fracción de diseño de vida en condición de carga n , $\sum p_n \leq 1$, pero normalmente es menor que 0.85
- T_d = diseño de vida de embarcaciones en segundos (20 años = 6.3×10^8 seg)
- h_n = parámetro de distribución de forma de Weibull del rango de esfuerzo para la condición de carga n .
- q_n = parámetro de distribución de escala de rango de esfuerzos de Weibull para la condición de carga n .
- v_0 = promedio del periodo largo de la respuesta cruzando la frecuencia cero.
- $\Gamma \left(1 + \frac{m}{h_n} \right)$ = función gamma. Valores de la función gamma se listan en la siguiente tabla:

h	$m = 3.0$	h	$m = 3.0$
0.60	120.000	0.86	11.446
0.61	104.403	0.87	10.829
0.62	91.350	0.88	10.263
0.63	80.358	0.89	9.741
0.64	71.048	0.90	9.261
0.65	63.119	0.91	8.816
0.66	56.331	0.92	8.405
0.67	50.491	0.93	8.024
0.68	45.442	0.94	7.671
0.69	41.058	0.95	7.342
0.70	37.234	0.96	7.035
0.71	33.886	0.97	6.750
0.72	30.942	0.98	6.483
0.73	28.344	0.99	6.234
0.74	26.044	1.00	6.000
0.75	24.000	1.01	5.781
0.76	22.178	1.02	5.575
0.77	20.548	1.03	5.382
0.78	19.087	1.04	5.200
0.79	17.772	1.05	5.029
0.80	16.586	1.06	4.868
0.81	15.514	1.07	4.715
0.82	14.542	1.08	4.571
0.83	13.658	1.09	4.435
0.84	12.853	1.10	4.306
0.85	12.118		

Tabla 3.4 Valores numéricos para Γ . Ref [24]

El parámetro de escala de Weibull es definido del nivel del rango de esfuerzo, $\Delta\sigma_0$, como:

$$q_n = \frac{\Delta\sigma_0}{(\ln n_0)^{\frac{1}{n_n}}} \quad 3.52$$

Donde n_0 es el número de ciclos sobre el periodo de tiempo para el cual el nivel del rango de esfuerzo $\Delta\sigma_0$, es definido ($\Delta\sigma_0$ incluye los efectos de los esfuerzos medios).

Capítulo 4: Ejemplo de Aplicación de Detalle Estructural de un sistema Flotante.

En este capítulo se presenta el análisis y diseño por fatiga de un detalle estructural del casco de un FPSO (Sistema Flotante de Producción y Almacenamiento), en el cual se emplea el método de Análisis del Elemento Finito, de acuerdo a lo mencionado en el capítulo anterior en el inciso 3.3) Procedimiento de Diseño por Fatiga, en el cual se menciona la metodología a seguir para el desarrollo de este ejemplo, así como la descripción de los factores a intervenir para el análisis.

4.1 Definición del caso en estudio.

En este ejemplo de aplicación se hará la valoración de fatiga de una conexión soldada entre un elemento longitudinal del casco y un atiesador (bracket) en la parte lateral del barco. A fin de comenzar el cálculo de los esfuerzos se deben definir las condiciones de carga a considerar y, considerar el nivel del detalle para el cálculo de los esfuerzos. Las siguientes observaciones se deben de tomar en cuenta para los cálculos.

- a) El análisis está basado en el método simplificado mencionado en el capítulo anterior. Las cargas globales y locales están basadas en las dimensiones principales dadas en la tabla 4.1.
- b) El detalle considerado es la terminación de un atiesador (bracket) y su conexión soldada con un elemento longitudinal. El proceso simplificado de cálculo de los esfuerzos es realizado tomando en cuenta los efectos corrosivos que reducen el espesor de las placas con el paso del tiempo, hasta la conclusión de la vida de diseño de la estructura.

Longitud del barco	$L = 221$	m
Ancho del barco	$B = 42$	m
Coficiente de Bloque	$C_B = 0.83$	
Profundidad del barco	$D = 20.3$	m
Modulo de Sección Vertical a la línea de cubierta	$Z_v = 23.1$	m ³
Eje Neutro sobre la Quilla	$n_0 = 8.2$	m
Modulo de Sección Horizontal en el costado del barco	$Z_h = 40.1$	m ³

Tabla 4.1 Características de la embarcación (caso en estudio). Ref. [24]



Fig. 4.1 Fatiga on FPSOs, Crack Control of FPSO Hull Structure, Microsoft PowerPoint.

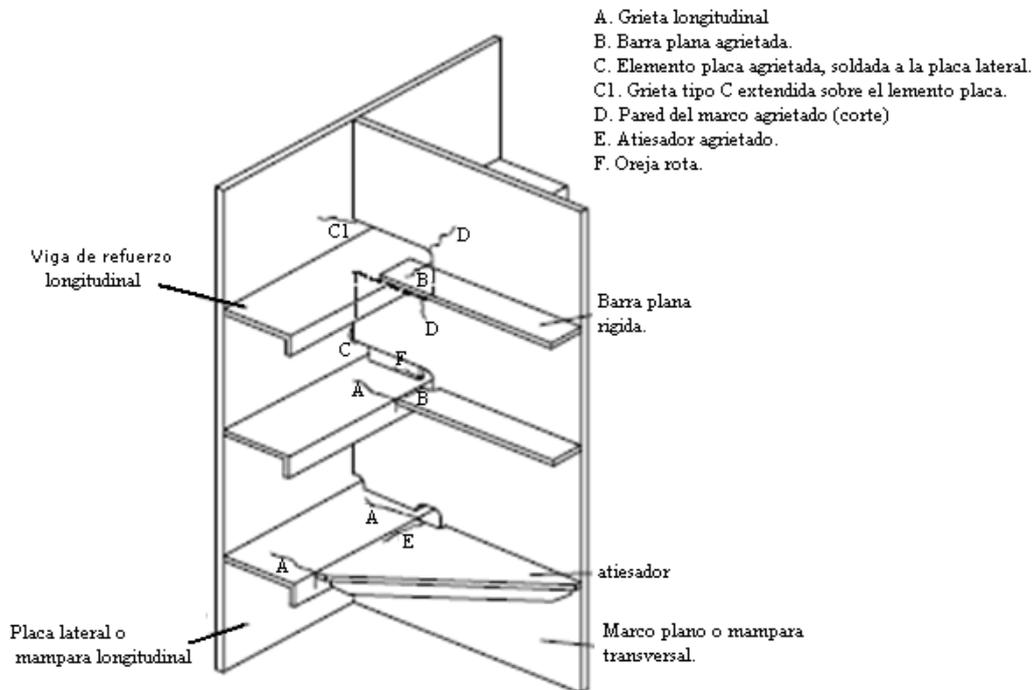


Fig. 4.2 Tipos de grietas en elementos soldados. Ref. [26]

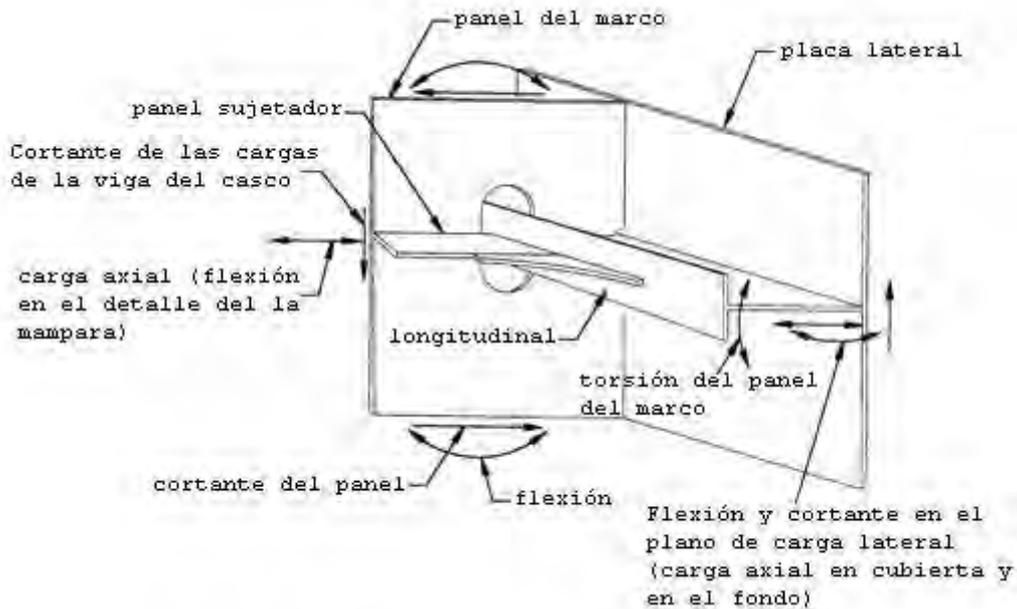


Fig. 4.3 Cargas y elementos mecánicos en un detalle estructural. Ref. [26]

4.2 Geometría del elemento longitudinal y terminación del atiesador (bracket).

Para diferentes condiciones de carga estos cambian normalmente para cada condición de carga. Por lo tanto, esto puede ser práctico al calcular los esfuerzos por unidad de momento flexionante, por unidad de presión lateral y aquella escala con valores importantes para cada condición de carga. Este es principalmente el cálculo de los esfuerzos debidos a la presión lateral que debe simplificarse por tal enfoque. Para la terminación de un atiesador sobre el punto más alto de un refuerzo, los esfuerzos están considerados relacionados con la presión lateral y son debidos a:

- Flexión del refuerzo.
- Deflexión relativa entre el primer marco y la mampara.
- Flexión del doble casco.

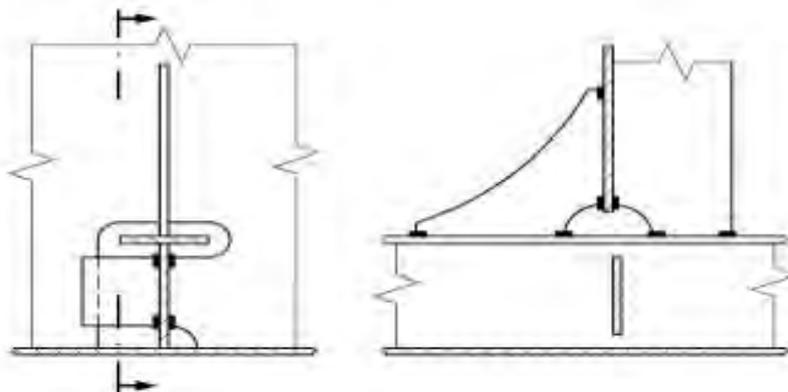


Fig. 4.4 Detalle estructural (elemento longitudinal y atiesador). Ref. [26]

4.3 Factores K (Factor de Concentración de Esfuerzo).

Un parámetro importante en el análisis de Fatiga es el Factor de Concentración de Esfuerzo. Este factor describe el incremento en el esfuerzo de muesca debido a la geometría local y calidad de la soldadura. El valor del factor K se decide por el detalle considerado antes de calcularse los esfuerzos de muesca.

La geometría considerada en este caso es un perfil T expuesto a cargas laterales en combinación con momentos flexionantes globales. Para la soldadura al final del bracket triangular soldado en la parte más alta de la pestaña del atiesador, el factor K para carga axial se toma como sigue:

$$K_{axial} = K_g \cdot K_w = 2.2$$

En donde K_g = Factor de concentración de esfuerzos geométrico y K_w = factor de concentración de esfuerzos de la geometría de la soldadura.

Y el factor K para los esfuerzos de flexión locales (inducidos por la presión lateral), se define como:

$$K_{lateral} = K_g \cdot K_w \cdot K_{n2} = 2.2 \cdot K_{n2}$$

el factor K_{n2} se define de la siguiente manera:

$$K_{n2} = \frac{(1 + \gamma\beta^2)}{(1 + \gamma\beta^2\psi)}$$

Donde:

$$\beta = 1 - \frac{t_w}{b_f}$$

$$\psi = \frac{(h - t_f)^2 t_w}{(4Z_s)}$$

$$\gamma = \frac{3 \left(1 - \left(\frac{\mu}{280} \right) \right)}{\left(1 + \left(\frac{\mu}{40} \right) \right)}$$

$$\mu = \frac{l_s^4}{\left(b_f^3 t_f h^2 \left(\frac{4h}{t_w^3} + \frac{s}{t^3} \right) \right)}$$

Entonces de la tabla:

Modulo de sección del atiesador en lo alto del patín	$Z_s = 0.461 \times 10^{-3}$	m^3
Distancia sobre la quilla	$z = 13.06$	m
Longitud de espacio efectivo	$l = 2753$	mm
Longitud de la cara del atiesador	$b = 350$	mm
Distancia del final del atiesador al punto crítico	$x = b/3 = 116.7$	mm
Espaciamiento de la hoja del marco	$l_s = 3420$	mm
Espaciamiento del atiesador	$s = 790$	mm
Espesor de placa	$t_p = 16.5$	mm
Altura del atiesador	$h = 250$	mm
Espesor de la placa	$t_w = 9$	mm
Ancho de patín	$b_f = 90$	mm
Espesor de la patín	$t_f = 14$	mm
Espesor del atiesador	$t_b = 10$	mm
Espesor del chapado del marco transversal	$t_{fr} = 14$	mm
Distancia del eje neutro al punto mas alto del patín	$z_{01} = 222.6$	mm

Tabla 4.2 Propiedades geométricas del caso en estudio. Ref. [24]

$$\mu = \frac{(3420)^4}{\left(90^3 \cdot 14 \cdot 250^2 \left(\frac{4(250)}{9^3} + \frac{790}{16.5^3}\right)\right)} = 138.583$$

$$\gamma = \frac{3 \left(1 - \left(\frac{138.583}{280}\right)\right)}{\left(1 + \left(\frac{138.583}{40}\right)\right)} = 1.0045$$

$$\psi \left(\frac{(0.25 - 0.014)^2 (0.009)}{4(0.461 \times 10^{-3})} \right) = 0.272$$

$$\beta = 1 - \frac{9}{90} = 0.9$$

Por lo tanto K_{n2} es:

$$K_{n2} = \frac{1 + (1.0045 \cdot 0.9^2)}{1 + (1.0045 \cdot 0.9^2 \cdot 0.272)} = 1.485$$

Entonces $K_{lateral}$ queda:

$$K_{lateral} = K_g \cdot K_w \cdot K_{n2} = 2.2 \cdot K_{n2}$$

$$K_{lateral} = 2.2 \cdot 1.485$$

$$K_{lateral} = 3.27$$

4.4 Condiciones de carga.

Las condiciones de carga se consideran normalmente para tipos de embarcaciones específicas, como el buque de producción y almacenamiento que es el caso, son dos las condiciones de carga a considerar:

1. Totalmente cargado, con una fracción de tiempo $p_n = 0.45$ y
2. Lastre con una fracción de tiempo $p_n = 0.40$

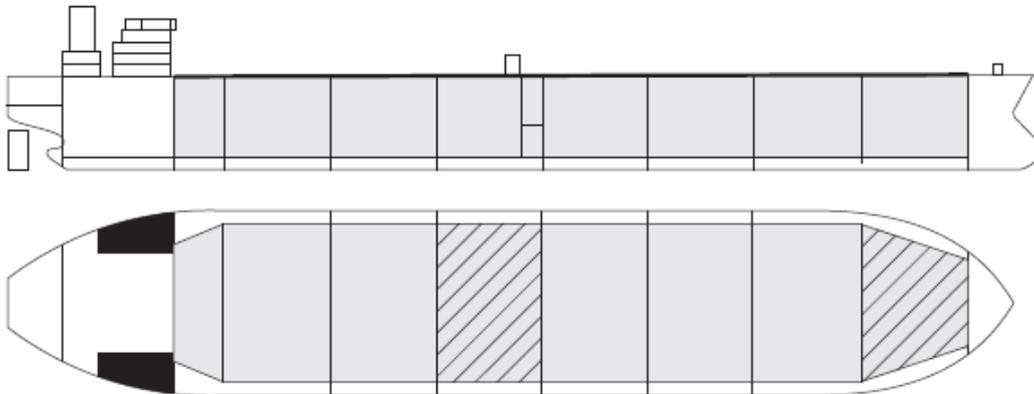


Fig. 4.5 Primera condición de carga. Ref. [24]

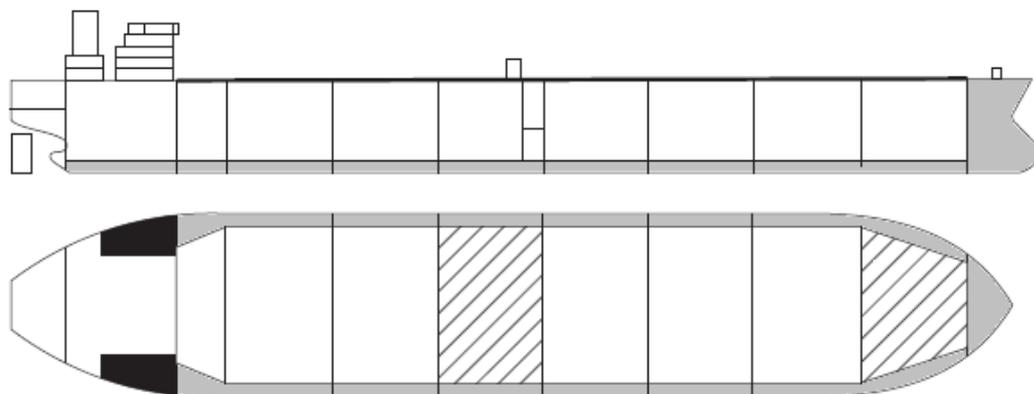


Fig. 4.6 Segunda condición de carga. Ref. [24]

Con los datos de calado, altura metacéntrica, radio de giro, fracción del tiempo para cada condición de carga y densidad (carga de crudo y agua).

	Totalmente cargado	Lastre
Calado	$T_f = 14.20 \text{ m}$	$T_b = 7.20 \text{ m}$
Altura metacéntrica	$GM = 5.04 \text{ m}$	$GM = 13.86 \text{ m}$
Radio de giro	$K_R = 16.38 \text{ m}$	$K_R = 16.38 \text{ m}$
Parte de tiempo en condiciones de carga	$p_n = 0.45$	$p_n = 0.40$
Densidad	$\rho_{\text{carga}} = 1000 \text{ kg/m}^3$	$\rho_{\text{agua}} = 1025 \text{ kg/m}^3$

Tabla 4.3 Datos sobre la embarcación y densidades crudo y agua. Ref. [24]

4.5 Curva S-N y Protección contra Corrosión.

El detalle en cuestión se encuentra en un costado del tanque de lastre con protección catódica, que de acuerdo al reglamento **CN-30.7.-Fatigue Assessment of Ships Structures**, el buque con un mínimo de 20 años de tiempo de vida, implica que la curva S-N de tipo I (en aire) debe aplicarse para los primeros 15 años de tiempo de vida y la curva S-N de tipo II (corrosión) para el resto del tiempo.

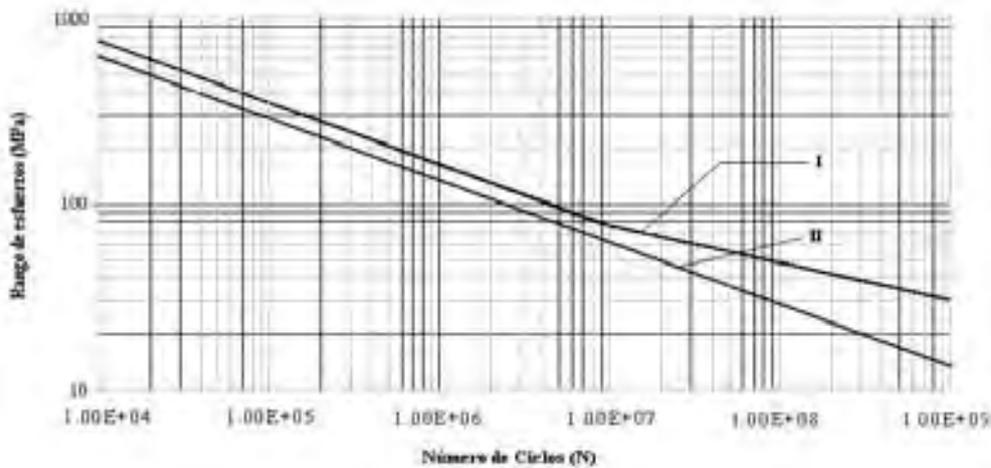


Fig. 4.7 Curvas I y II. En aire o protección catódica y ambiente corrosivo. Ref. [24]

Con un factor de corrección ambiental $f_e = 0.8$. Se considera este factor ya que las condiciones o clima donde funcionara el buque no son tan agresivos como las condiciones que se presentan en el Atlántico Norte, puesto que para esas condiciones se toma un $f_e = 1.0$

4.6 Momentos Flexionantes Globales del casco.

Los momentos flexionantes verticales inducidos por oleaje se calculan de la siguiente forma para la condición de carga 1 “totalmente lleno”:

$$M_{wo,s} = -0.11 \cdot f_r \cdot k_{wm} \cdot C_w \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0.7) \text{ Momento negativo.}$$

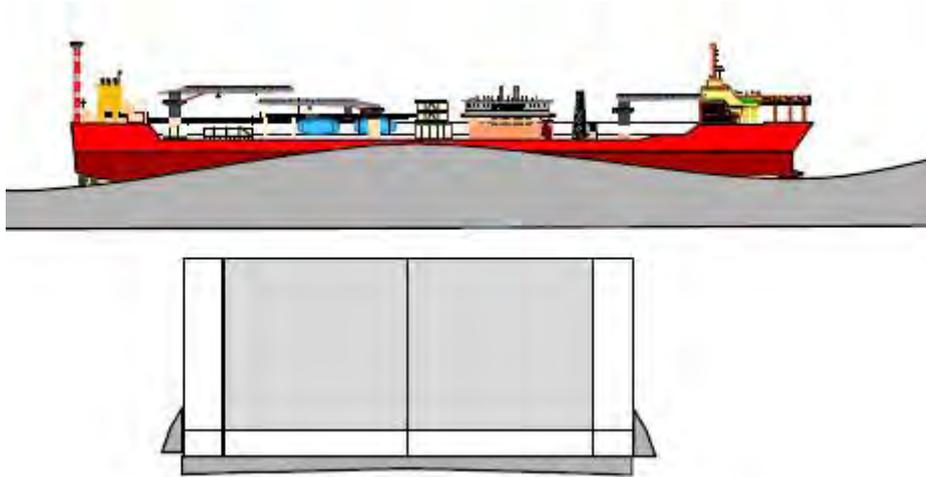


Fig. 4.8 Esquema de momento negativo (sagging) de un FPSO. Ref. [27]

$$M_{wo,h} = 0.19 \cdot f_r \cdot k_{wm} \cdot C_w \cdot L^2 \cdot B \cdot C_B \text{ Momento positivo.}$$

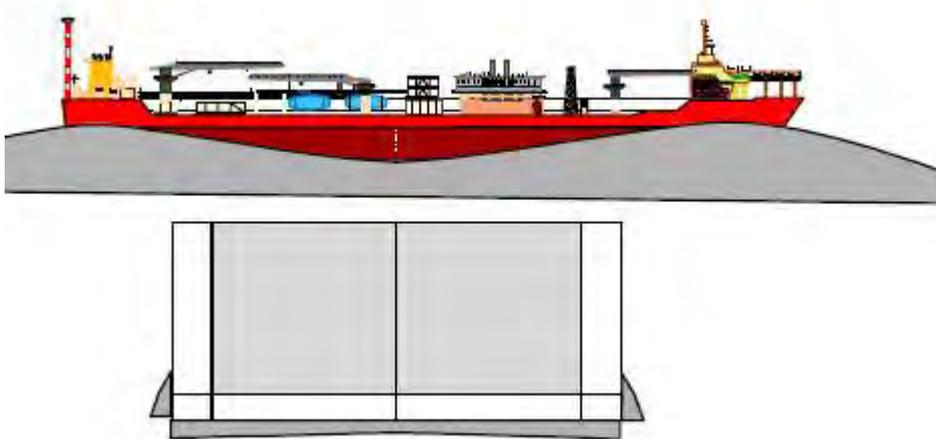


Fig. 4.9 Esquema de momento positivo (hogging) de un FPSO. Ref. [27]

Los momentos flexionantes horizontales inducidos por oleaje se calcularán como sigue:

$$M_H = 0.22 \cdot f_r \cdot L^{\frac{9}{4}} (T_{act} + 0.30B) \cdot C_B \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right)$$

Donde:

Coefficiente de oleaje es:

$$C_w = 10.75 - \left[\frac{(300 - L)}{100} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$C_w = 10.75 - \left[\frac{(300 - 221)}{100} \right]^{\frac{3}{2}} = 10.05$$

Parámetro de forma de Weibull a largo plazo es:

$$h_0 = 2.21 - 0.54 \cdot \log(L)$$

$$h_0 = 2.21 - 0.54 \cdot \log(221) = 0.944$$

El factor de transformación de carga del nivel de probabilidad de excedencia de 10^{-8} a 10^{-4} es:

$$f_r = 0.5^{\frac{1}{h_0}}$$

$$f_r = 0.5^{\frac{1}{0.944}} = 0.48$$

El factor de distribución de momento es $k_{wm} = 1.0$.

Entonces:

Para el nivel de probabilidad 10^{-8} , $f_r = 1.0$:

$$M_{w0,s} = -0.11 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 10.05 \cdot 221^2 \cdot 42(0.83 + 0.7)$$

$$M_{w0,s} = -3469.6 \times 10^3 \text{ kNm}$$

$$M_{w0,h} = 0.19 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 10.05 \cdot 221^2 \cdot 42 \cdot 0.83$$

$$M_{w0,h} = 3251.1 \times 10^3 \text{ kNm}$$

$$M_H = 0.22 \cdot 1.0 \cdot (221)^{\frac{9}{4}} (14.20 + 0.30(42)) 0.83 (1 - \cos(\pi))$$

$$M_H = 1843.1 \times 10^3 \text{ kNm}$$

Para el nivel de probabilidad 10^{-4} , $f_r = 0.944$

$$M_{w0,s} = -0.11 \cdot 0.48 \cdot 1.0 \cdot 10.05 \cdot 221^2 \cdot 42(0.83 + 0.7)$$

$$M_{w0,s} = -1665.4 \times 10^3 \text{ kNm}$$

$$M_{w0,h} = 0.19 \cdot 10.48 \cdot 1.0 \cdot 10.05 \cdot 221^2 \cdot 42 \cdot 0.83$$

$$M_{w0,h} = 1560.5 \times 10^3 \text{ kNm}$$

$$M_H = 0.22 \cdot 0.48 \cdot 1.0 \cdot (221)^{\frac{9}{4}} (14.20 + 0.30(42)) 0.83(1 - \cos(\pi))$$

$$M_H = 884.7 \times 10^3 \text{ kNm}$$

4.7 Esfuerzos por cargas globales.

Rango de esfuerzo global vertical para un nivel e probabilidad de 10^{-4} :

$$\Delta\sigma_v = K_{axial} (M_{w0,h} - M_{w0,s}) 10^{-3} \frac{(z - n_0)}{Z_v (D - n_0)}$$

$$\Delta\sigma_v = 2.2 (1560.5 \times 10^3 - (-1665.4 \times 10^3)) \frac{(13.06 - 8.2)}{23.1(20.3 - 8.2)} = 123.4 \text{ N/mm}^2$$

Rango de esfuerzo global horizontal para el nivel de probabilidad de 10^{-4} :

$$\Delta\sigma_{hg} = 2 \cdot K_{axial} \cdot M_H 10^{-3} \cdot \frac{|y|}{Z_h \cdot \frac{B}{2}}, \text{ donde } y = \frac{B}{2} - (h + t_p)$$

Entonces:

$$y = \frac{42}{2} - (0.25 + 0.0165) = 20.73 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$\Delta\sigma_{hg} = 2 \cdot 2.2 \cdot 884.7 \times 10^3 \cdot \frac{20.73}{40.1 \cdot 21} = 95.82 \text{ N/mm}^2$$

Y para el rango de esfuerzo global combinado se tiene:

$$\Delta\sigma_g = \sqrt{\Delta\sigma_v^2 + \Delta\sigma_{hg}^2 + 2\rho_{vh} \Delta\sigma_v \Delta\sigma_{hg}}$$

Donde $\rho = 0.1$, que es la correlación promedio entre el esfuerzo de flexión inducido por el oleaje vertical y horizontal.

Por lo tanto:

$$\Delta\sigma_g = \sqrt{123.4^2 + 95.82^2 + 2 \cdot 0.1 \cdot 123.4 \cdot 95.82} = 163.63 N / mm^2$$

4.8 Esfuerzos combinados de punto crítico.

Para el rango de esfuerzo local y global se tiene:

$$\Delta\sigma = f_e \max \begin{cases} \Delta\sigma_g + b \cdot \Delta\sigma_l \\ a \cdot \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_l \end{cases}$$

Donde a, b son factores de combinación de carga igual a 0.6, $\Delta\sigma_l = 279.38 \text{ kN/m}^2$ y $\Delta\sigma_g = 163.8 \text{ N/m}^2$, por lo tanto:

$$\Delta\sigma = 0.8 \begin{cases} 163.63 + (0.6 \cdot 279.4) = 0.8 \cdot 331.27 = 265.01 N / mm^2 \\ (163.63 \cdot 0.6) + 279.4 = 0.8 \cdot 377.6 = 302.06 N / mm^2 \end{cases}$$

$$\Delta\sigma = 302.06 N / mm^2$$

Con una corrección por esfuerzo medio, suponiendo que el esfuerzo medio es igual cero, se tiene:

$$\Delta\sigma_0 = f_m \cdot \Delta\sigma$$

$$\Delta\sigma_0 = 0.85 \cdot 302.06 = 256.75 N / mm^2$$

4.9 Distribución de esfuerzo de largo plazo.

Calculando el periodo del balanceo como:

$$T_R = \frac{2k_R}{\sqrt{GM}} = \frac{2 \cdot 16.38}{\sqrt{5.04}} = 14.59s$$

Entonces:

$$h = h_0 + \frac{h_a z}{T_{act}} - 0.005(T_{act} - z)$$

Donde $h_a = 0.0$ ya que es un factor adicional del periodo de respuesta del movimiento.

$$h = 0.944 - 0.005(14.20 - 13.06) = 0.938m$$

4.10 Cálculo de daño por Fatiga.

La parte de daño por fatiga para la condición totalmente lleno y con un periodo de vida de 20 años, se calculará de la siguiente forma:

$$D = \frac{v_0 T_d}{\bar{a}} \cdot p_{full} \cdot q_{full}^m \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right)$$

Donde:

El número de ciclos en 20 años es:

$$v_0 T_d = \frac{\text{años} \cdot \text{días} \cdot \text{horas} \cdot \text{segundos}}{4 \log_{10}(L)} = \frac{20 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}{4 \log_{10}(221)} = 6.72 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

Para la obtención del valor gamma, se usara el valor de $h = 0.938$ m y la tabla 3.4, se tiene:

$$\Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right) = 8.024 \cdot \frac{8(8.024 - 7.671)}{10} = 7.742$$

El para metro de escala de Weibull es:

$$q_{full} = \frac{\Delta \sigma_0}{(\ln n_0)^{\frac{1}{h}}}$$

Donde, el número de ciclos total asociado con el nivel de probabilidad 10^{-4} y a el rango de esfuerzos $\Delta \sigma_0$, será igual a $n_0 = 10^4$. La parte de tiempo totalmente lleno es igual a $p_{full} = p_n = 0.45$, por condición de carga, el rango de esfuerzo considerado es $\Delta \sigma_0 = 256.81 \text{ N/mm}^2$, el parámetro de forma de Weibull es igual a $h = 0.938$, por lo tanto, tenemos:

$$q_{full} = \frac{\Delta \sigma_0}{(\ln n_0)^{\frac{1}{h}}} = \frac{256.75}{(\ln 10^4)^{\frac{1}{0.938}}} = 24.07 \text{ N/mm}^2$$

Por lo tanto:

$$D = \frac{v_0 T_d}{\bar{a}} \cdot P_{full} \cdot q_{full}^m \cdot \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right)$$

$$D = \frac{6.72 \times 10^7}{5.75 \times 10^{12}} \cdot 0.45 \cdot 24.07^3 \cdot 7.742 = 0.566$$

Para la condición 2, de lastre, se tiene:

Momentos flexionantes del casco:

Para el nivel de probabilidad de 10^{-4} :

$$M_{wo,h} = -1665.1 \times 10^3 \text{ kNm}$$

$$M_{wo,s} = 1560.2 \times 10^3 \text{ kNm}$$

$$M_H = 653.5 \times 10^3 \text{ kNm}$$

Esfuerzos por cargas globales.

$$\Delta\sigma_v = 2.2(1560.2 - (-1665.1)) \times 10^3 \left(\frac{13.06 - 8.2}{23.1(20.3 - 8.2)} \right) = 123.37 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_{hg} = 2(2.2)(653.5) \times 10^3 \left(\frac{20.73}{40.1(21)} \right) = 70.78 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_g = \sqrt{123.37^2 + 70.78^2 + 2(0.1)(123.37)(70.78)} = 148.24 \text{ N/mm}^2$$

Esfuerzos combinados de punto crítico.

$$\Delta\sigma = 0.8 \begin{cases} 148.24 + (0.6 \cdot 87.09) = 0.8 \cdot 200.5 = 160.4 \text{ N/mm}^2 \\ (148.24 \cdot 0.6) + 87.09 = 0.8 \cdot 176.03 = 140.8 \text{ N/mm}^2 \end{cases}$$

$$\Delta\sigma = 160.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_0 = 0.85 \cdot 160.4$$

$$\Delta\sigma_0 = 136.34 \text{ N/mm}^2$$

Distribución de esfuerzo de largo plazo.

$$h = h_0 + h_a \left(\frac{D - z}{D - T_{act}} \right)$$

$$h_0 = 2.21 - 0.54(\log(221)) = 0.944$$

$$h_a = 0.05$$

$$h = 0.944 + 0.05 \left(\frac{20.3 - 13.06}{20.3 - 7.2} \right) = 0.972$$

Cálculo de daño por fatiga.

$$v_0 T_d = \frac{\text{años} \cdot \text{días} \cdot \text{horas} \cdot \text{segundos}}{4 \log_{10}(L)} = \frac{20 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600}{4 \log_{10}(221)} = 6.72 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

$$\Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right) = 6.750 \cdot \frac{2(6.750 - 6.483)}{10} = 6.697$$

$$q_{last} = \frac{\Delta \sigma_0}{(\ln n_0)^{\frac{1}{h}}} = \frac{136.34}{(\ln 10^4)^{\frac{1}{0.938}}} = 11.04 N / mm^2$$

$$D = \frac{v_0 T_d}{\bar{a}} \cdot p_{last} \cdot q_{last}^m \cdot \Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right)$$

$$D = \frac{6.72 \times 10^7}{5.75 \times 10^{12}} \cdot 0.4 \cdot 11.04^3 \cdot 6.697 = 0.042$$

4.11 Calculo de la vida por fatiga.

Por lo tanto el daño total por fatiga, es la suma de la CÁLCULO DE DAÑO POR FATIGA de cada condición de carga, entonces:

$$D = \frac{v_0 T_d}{\bar{a}} \cdot p_{last} \cdot q_{last}^m \cdot \Gamma \left(1 + \frac{m}{h} \right) = \sum_{n=1}^{Nload} D_n \leq \eta$$

Entonces

$$D = 0.566 + 0.042 = 0.608$$

Y multiplicando por el factor de ambiente corrosivo $\chi = 1.3$, se tiene:

$$D = 0.608 \cdot \chi = 0.608 \cdot 1.3 = 0.790$$

Por lo tanto el periodo de vida es de:

$$T_{life} = \frac{20}{0.790} = 25.3 \text{ , } \mathbf{25.3 \text{ años.}}$$

En estructuras Costa Fuera se requiere de un periodo de vida mayor, que por lo general se toma un FDF = 1. Este FDF puede variar conforme al tipo de importancia de la estructura y su accesibilidad para inspección y reparación, como se menciona en el inciso 3.3.1.

CONCLUSIONES:

Es necesario tener en mente todos los aspectos que intervienen para el análisis y diseño de una estructura flotante, como es el caso de un barco de Producción, Almacenamiento y Trasiego, conocido como FPSO, ya que su adecuada consideración es de suma importancia para el buen funcionamiento de todo el sistema. Uno de los criterios de diseño que gobiernan el dimensionamiento de las estructuras flotantes es el diseño por fatiga. Debido a la naturaleza Dinámica de las fuerzas inducidas por el oleaje (cargas cíclicas) a las que están sometidas los sistemas flotantes, p. ej. FPSO's, durante su vida útil, el fenómeno de fatiga toma gran importancia.

Los esfuerzos producidos por oleaje actúan todo el tiempo en las estructuras flotantes y son los causantes de la disminución de la vida útil de las estructuras, ya que en los elementos o conexiones soldadas es donde se encuentran los mayores daños por fatiga debido a las altas concentraciones de esfuerzo situados en esos puntos. El procedimiento de análisis y de diseño típicamente utilizado en estructuras costafuera es presentado en este trabajo, haciendo énfasis en los aspectos más relevantes del proceso. El daño por fatiga en las estructuras del casco de un FPSO es inducida por los efectos de las cargas de oleaje, tanto en forma global como local, y dependen de la respuesta de la embarcación. Entre los efectos debidos a cargas globales del FPSO se tienen los momentos actuantes sobre la estructura cuyo comportamiento se asemeja a una gran viga. Estos efectos globales toman en cuenta las condiciones de carga para el sistema flotante, en las cuales intervienen los niveles de llenado de los tanques de carga de la embarcación, es decir, la flexión del casco por las cargas verticales sin oleaje. Este efecto se combina con los efectos inducidos por el oleaje, en el cual se provoca el momento positivo (cuando el casco es considerado lleno y se tiene una ola de la longitud del barco con el valle de la ola en el centro del mismo y las crestas en los extremos), y el momento negativo (cuando se considera a los tanques vacíos y en combinación con una ola, la cual tiene la cresta en el centro del sistema flotante y la ola de la misma longitud del barco). Dentro del mismo análisis el rango de esfuerzo actúa para el análisis el cual se determina de los esfuerzos principales cíclicos actuantes en la resistencia por fatiga. También como se menciona durante el desarrollo de la tesis se definieron los factores de concentración de esfuerzo "K", como un cociente entre los esfuerzos de muesca de la estructura y los esfuerzos nominales, los cuales se puede obtener con una malla fina del análisis de elemento finito en el detalle estructural de interés. Los componentes de esfuerzo combinado, en este caso son los esfuerzos de muesca, que definen los factores K que dependen de la geometría de la soldadura, la geometría estructural y el tipo de carga. Siguiendo también con la distribución de esfuerzos de diseño, se aplica la distribución de Weibull, que es una expresión probabilística que describe el rango de esfuerzos de largo plazo, el cual es un rango equivalente que es empleado para el cálculo de daño por fatiga de manera simplificada. El rango de distribución de periodo largo es expresado por un histograma de esfuerzos, consiste de un número conveniente de bloques $\Delta\sigma_i$ de rangos de esfuerzos de amplitud constante cada uno con un número de repeticiones de esfuerzo n_i . La vida por fatiga para diseño se calcula mediante las curvas de diseño de fatiga S-N bajo la suposición de daño acumulativo lineal (regla de Miner). Las curvas S-N son determinadas mediante pruebas de laboratorio en especímenes típicos sometidos a cargas cíclicas con rango de esfuerzo constante. Los especímenes probados son semejantes a los que se encuentran en las estructuras reales.

La gran dificultad del análisis de fatiga se debe a que las cargas cíclicas producidas por el oleaje son aleatorias y es muy difícil asociar una expresión matemática que la describa fielmente. En la práctica es común calcular el daño por fatiga para cada uno de los estados de mar (normalmente de 3 horas de duración) y se hace la sumatoria de las contribuciones de cada estado de mar. También existen metodologías estadísticas para describir distribuciones de esfuerzo de largo plazo, como lo es la distribución de Weibull.

Para poder tener un comportamiento aproximado al real, mediante el método de elemento finito se hace el análisis para obtener los esfuerzos y factores de concentración de esfuerzo en cada punto de la estructura. El diseño se realiza utilizando las curvas de diseño S-N, que corresponde a los tipos de detalles estructurales (uniones soldadas), así como también los espesores de placa adecuados para los requerimientos del FPSO, en base a los códigos y reglamentos de diseño para estructuras flotantes.

Referencias:

- [1] Valdéz, Victor M. 2004, Curso de Ingeniería Civil Costa Afuera, Tomo I, Primera Edición, UNAM, México D. F.
- [2] Valdéz, Victor M. 2004, Curso de Ingeniería Civil Costa Afuera, Tomo II, Primera Edición, UNAM, México D. F.
- [3] T. Moan, 1996. Design of Offshore Structures. Tomo II Floating Production, Storage and Offloading units. Dept. of Marine Technology, NTNU, Norway
- [4] T. Moan, 1994, Design of Marine Structures, Tomo I, Univ. of California, Berkeley.
- [5] Norsok, N-003, Actions and Action Effects, 1999, Oslo, Norway.
- [6] Curso Geografía del Mar. Dinámica de los Océanos. http://www.uc.cl/sw_educ/geo_mar
- [7] Sea State Photographs for Determining Wind Speed. The Beaufort Wind Force Scale (from NOAA). <http://www.geology.wmich.edu/Kominz/windwater.html>
- [8] Tipos de movimientos. <http://www.m-i-link.com/dictionary>
- [9] Sin-Der Lee and Ching-Yaw Tzeng. 1997 A Study on Model Ship Track-Keeping Autopilot Design and Experiment.
- [10] Patrick Holmes, 2001, Professional Development Programme: Coastal Infrastructure Design, Construction and Maintenance. Chapter 5.
- [11] Ståle Fines, 1985. Loads on Ocean Structures, A. S. Veritec, Oslo, Chapter 2.
- [12] Knut Engesvik, 1985 Fracture Mechanics as a Tool in Fatigue Analysis, SINTEF, Trondheim, Chapter 3. In: Almar-Naess, Tapir Publishers. Fatigue Handbook, Tapir, Trondheim
- [13] Stig Berge, 1985 Basic Fatigue Properties of Welded Joints, Norges tekniske høyskole, Trondheim, Chapter 4. In: Almar-Naess, Tapir Publishers. Fatigue Handbook, Tapir, Trondheim
- [14] Erkki Niemi, Abington Publishing, 1995, Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components, First edition.
- [15] UKOOA, Oil and Gas for Britain, 2002, FPSO Design Guidance Notes for UKCS Service.
- [16] British Standard, 1993, Fatigue Design and Assessment of Steel Structures. BS-7608
- [17] Offshore Technology.com
http://www.offshore-technology.com/projects/na_kika/images/8-offshore-platform.jpg
- [18] Ship-technology.com
<http://www.ship-technology.com/projects/searose/>
- [19] Newfoundland and Labrador Refining Corporation
<http://www.nlrefining.com/i/fps0.jpg>
- [20] The Open the Door Web Site <http://www.saburchill.com/physics/chapters2/0008.html>
- [21] A. Almar Naess, Tapir Publishers, 1985, Fatigue Handbook, Tapir, Trondheim, Norway

Diseño de Estructuras Flotantes de Producción de Hidrocarburos sujetas a Fatiga.

[22] Paik, J. K. and Yhayamballi, A. K. 2003, Ultimate Limit State Design of Steel-plated Structures, John Wiley and Sons.

[23] DNV 30.7, 2001, Fatigue Assessment of Ships Structures, Det Norske Veritas, Oslo

[24] Principles of Naval Architecture, 1983. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, sexta ed. Agosto.

[25] Moan T., 2006, Fatigue on FPSOs, Crack Control of FPSO Hull Structure, Microsoft Powerpoint presentación.

[26] Norsok Standard N-004 Design of Steel Structures Rev. 2, October 2004.

[27] DNV-RP-C206, 2006. Fatigue Methodology of Offshore Ships, Det Norske Veritas, Oslo.

[28] DNV-OS-C101, 2008. Design of Offshore Steel Structures, Det Norske Veritas, Oslo.