



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - ESTRUCTURAS

## CRITERIOS Y CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO DE PLATAFORMAS MARINAS TIPO JACKET, PARA TIRANTES DE AGUAS SOMERAS

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A:

**ING. RUBISEL PÉREZ CASTRO**

TUTOR:

**M.I. CARLOS VILLASEÑOR MEJIA**

MÉXICO D.F., NOVIEMBRE DE 2015

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DRA. SONIA ELDA RUIZ GÓMEZ

Secretario: M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ

Vocal: M.I. CARLOS VILLASEÑOR MEJÍA

1er Suplente: DR. OSCAR ALBERTO LÓPEZ BÁTIZ

2do Suplente: DR. FRANCISCO LEONEL SILVA GONZÁLEZ

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, México, D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

M.I. CARLOS VILLASEÑOR MEJÍA

---

**FIRMA**

## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar a Mireya y Rubisel, mis padres, por todos los consejos, valores y principios inculcados, gracias a los cuales he logrado cumplir mis metas. Siempre demostrándome que todo logro se forja a base de méritos y mucho esfuerzo, teniendo como base el sentido del respeto y la responsabilidad.*

*A mis hermanos, Carolina, Rosa y Manuel por siempre demostrarme que por más difícil que parezca un problema, siempre se tendrá una solución, siempre y cuando se trabaje en equipo.*

*A mi abuelita que donde quiera que este me sigue enseñando con el legado que nos dejó, de quien aprendí que la vida hay que vivirla día a día, dando siempre todo lo que uno pueda dar sin esperar nada a cambio.*

*A mi novia, que con su paciencia me acompañó en esta etapa, sacrificando tiempo juntos, para que pudiera terminar exitosamente este posgrado.*

*A todos mis amigos y compañeros con los que viví esta maravillosa etapa de estudiar la maestría; jamás olvidare esas desveladas y presiones por exámenes y entregas de proyectos.*

*A todos y cada uno de mis profesores que han formado mi educación, ayudándome a tener una mayor preparación profesional.*

*A mi tutor y sinodales, los cuales con sus valiosos comentarios me ayudaron a obtener un trabajo exitoso.*

*La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos a la práctica.*  
**Aristóteles**

## CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	12
1.1 CONTEXTO GENERAL DEL TRABAJO .....	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2.1 PROBLEMÁTICA .....	16
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL .....	16
1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES .....	16
1.4 METAS.....	17
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	17
<b>2. GENERALIDADES DE LAS PLATAFORMAS MARINAS FIJAS Y SUS COMPONENTES</b> .....	18
2.1. HISTORIA DE LA EXPLOTACIÓN COSTA AFUERA EN MÉXICO .....	18
2.2. ESTRUCTURACIÓN DE UNA PLATAFORMA TIPO JACKET.....	19
2.3. TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS.....	20
2.4. COMPONENTES DE UNA PLATAFORMA MARINA TIPO JACKET .....	21
2.4.1. CIMENTACIÓN .....	21
2.4.2. SUBESTRUCTURA (JACKET) .....	22
2.4.3. ACCESORIOS .....	22
2.4.4. SUPERESTRUCTURA .....	23
2.5. NORMATIVIDAD VIGENTE, APLICABLE AL DISEÑO DE PLATAFORMAS MARINAS INSTALADAS EN EL GOLFO DE MÉXICO.....	24
<b>3. MODELADO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS TIPO JACKET</b> .....	26
3.1 BASES DE DISEÑO .....	26
3.2 SOFTWARE PARA EL MODELADO DE PLATAFORMAS MARINAS.....	27
3.2.1 OFFSHORE ANALYSIS AND DESIGN SOFTWARE (ANÁLISIS COSTA AFUERA Y SOFTWARE DE DISEÑO).....	27
3.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO .....	28
3.4 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO .....	29
3.5 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL (CASO EN ESTUDIO) .....	30
3.5.1 MATERIALES.....	30
3.6 DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA MODELADA (CASO EN ESTUDIO).....	30
3.6.1 GEOMETRÍA DE LAS SECCIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES .....	33
3.6.2 DESARROLLO DEL MODELO GEOMÉTRICO EN SACS .....	33
3.6.3 ESPESOR DEL CRECIMIENTO MARINO .....	36
3.6.4 FACTOR DE LONGITUD EFECTIVA .....	36
3.6.5 RESTRICCIONES EN LOS NODOS DE LA ESTRUCTURA PARA ANÁLISIS EN SITIO ..	38



3.7	DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS QUE ACTÚAN EN LA ESTRUCTURA EN CONDICIONES DE OPERACIÓN Y TORMENTA.....	39
3.7.1	CARGAS GRAVITACIONALES .....	40
3.7.2	CARGAS AMBIENTALES .....	48
3.7.3	CARGAS ACCIDENTALES.....	60
3.7.4	SISMO .....	60
3.8	PARÁMETROS GEOTECNICOS DE LA CIMENTACIÓN .....	61
3.9	FACTORES DE DISEÑO .....	61
3.10	COMBINACIONES DE CARGA .....	62
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA .....</b>	<b>63</b>
4.1	INFORMACIÓN GEOLOGICA DE LA SONDA DE CAMPECHE.....	64
4.2	PARÁMETROS DE DISEÑO.....	65
4.3	CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO .....	65
4.4	CRÍTERIOS DE ESTRUCTURACIÓN .....	66
4.5	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS .....	69
4.6	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA .....	75
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS POR EL MÉTODO ESTÁTICO, DE PLATAFORMAS TIPO JACKET EN LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y TORMENTA .....</b>	<b>77</b>
5.1	CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO .....	77
5.2	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON EL PROGRAMA SACS.....	79
5.3	PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS PARA DISEÑO BAJO CONDICIONES DE OPERACIÓN Y TORMENTA .....	80
5.3.1	PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS PARA DISEÑO BAJO CONDICIONES DE TORMENTA.....	80
5.3.2	PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS PARA DISEÑO BAJO CONDICIONES DE OPERACIÓN .....	82
5.4	COMBINACIONES DE CARGA .....	83
5.5	DATOS DE ENTRADA PARA EL ANÁLISIS EN EL PROGRAMA SACS .....	84
5.6	PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA CON EL PROGRAMA SACS .....	85
5.7	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO .....	86
<b>6.</b>	<b>REVISIÓN DE LA CAPACIDAD ÚLTIMA DE COLAPSO DE UNA PLATAFORMA TIPO JACKET .....</b>	<b>90</b>
6.1	FACTOR DE RESERVA DE RESISTENCIA (RSR) .....	90
6.2	ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER).....	91
6.3	PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER) CON AYUDA DE SACS.....	91
6.4	MODELO CONCEPTUAL DE LA PLATAFORMA A UTILIZAR EN EL ANÁLISIS PUSHOVER.....	93
6.5	RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL CON SACS .....	95
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS ESPECTRAL DE FATIGA .....</b>	<b>99</b>
7.1	MÉTODO DEL ANÁLISIS POR FATIGA.....	100
7.2	FACTOR DE SEGURIDAD.....	101

7.3	MODELO ESTRUCTURAL.....	101
7.4	CARGAS ACTUANTES EN EL ANÁLISIS POR FATIGA.....	101
7.5	PARÁMETROS UTILIZADOS.....	103
7.6	PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS ESPECTRAL POR FATIGA.....	103
7.7	CLASIFICACIÓN DE JUNTAS.....	104
7.8	FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS.....	105
7.9	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	106
7.10	CURVAS S-N.....	108
7.11	CRITERIOS Y CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO DEL ANÁLISIS ESPECTRAL POR FATIGA EN EL PROGRAMA SACS.....	108
7.12	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR FATIGA.....	114
<b>8.</b>	<b>REVISIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE UNA PLATAFORMA TIPO JACKET EN FUNCIÓN DE LOS DAÑOS OCASIONADOS POR FATIGA.....</b>	<b>115</b>
8.1	METODOLOGÍA.....	115
8.2	RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR FATIGA.....	116
8.3	FACTORES DE RESERVA DE RESISTENCIA (RSR).....	118
8.3.1	RSR's DE LA PLATAFORMA EN CONDICIONES DE DISEÑO.....	118
8.3.2	RSR's EN EL PUNTO CRÍTICO DE LA PLATAFORMA (RSR = 1).....	119
8.3.3	DEGRADACIÓN LINEAL DEL ACERO POR LOS DAÑOS OCASIONADOS POR EL EFECTO DE FATIGA.....	121
8.3.4	RSR's DE LA PLATAFORMA CON 10 AÑOS EN SERVICIO.....	122
8.3.5	RSR's DE LA PLATAFORMA CON 20 AÑOS EN SERVICIO.....	123
8.3.6	RSR's DE LA PLATAFORMA CON 30 AÑOS EN SERVICIO.....	124
8.4	REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS.....	124
8.5	COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	125
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>127</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>129</b>

## ABREVIACIONES

APC	Aprobado para construcción.
C.o.G.	Centro de Gravedad.
ft (')	Pies (unidad de longitud bajo el sistema inglés de unidades).
Fy	Esfuerzo de fluencia mínimo especificado del acero utilizado en kg/cm <sup>2</sup> o ksi.
G (g)	Aceleración de la gravedad.
GAP	Distancia o diferencia de longitud.
in (")	Pulgadas (unidad de longitud bajo el sistema inglés de unidades).
kips	Kilo-libras (unidad de fuerza bajo el sistema inglés de unidades). 1 kip = 1000 lbr = 454 kgf. aprox.
kg	Kilogramos (unidad de masa bajo el S.I. de unidades).
ksi	Kilo-libras sobre pulgada cuadrada (unidad de esfuerzo bajo el sistema inglés de unidades).
kg/cm <sup>2</sup>	Kilogramo sobre centímetro cuadrado (unidad de esfuerzo bajo el S.I. de unidades).
m/s	Metros por segundo (unidad de velocidad bajo el S.I. de unidades).
lb	Libras (unidad de masa bajo el sistema inglés de unidades).
m	Metros (unidad de longitud bajo el S.I. de unidades).
mm	Milímetros (unidad de longitud bajo el S.I. de unidades).
mph	Millas por hora (unidad de velocidad bajo el sistema inglés de unidades).
MBPD	Miles de Barriles por Día.
MMPCD	Millones de Pies Cúbicos Diarios.
NMM	Nivel Medio del Mar, elevación 0.000 m (0' – 0")
N.S.A.	Nivel Superior de Acero: Es la elevación donde empieza el patín superior que forma el sistema de piso.
PEP	PEMEX Exploración y Producción.
PTAR	Planta de Tratamiento de Agua Residual.
PT	Punto de Trabajo: Es la elevación de referencia de la estructura, donde se conecta la cimentación con la Superestructura; normalmente esta elevación se encuentra a 7.315 m (24' -0") con respecto al NMM.
R.I.	Relación de Interacción de Esfuerzos (esfuerzo actuante / esfuerzo permisible) de los elementos propuestos que conforman la estructura.
RSR	Reserve Strength Ratio (Factor de Reserva de Resistencia, por sus siglas en inglés).
s	Segundos (unidad de tiempo bajo el S.I. de unidades).
SCF	Factor de Concentración de Esfuerzos.
slug	"slug" (unidad de masa bajo el sistema inglés de unidades): $\left\{ 1 \text{ slug} = 1 \frac{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}{\text{ft}} \right\}$
UTM	Universal Transverse Mercator (coordenadas universales transversales de Mercator).
3D	Tercera dimensión.
Φ (D)	Diámetro (longitud de la sección transversal de un perfil circular).

## SIGLAS

API	American Petroleum Institute. (Instituto Americano del Petrleo).
ASTM	American Society For Testing and Materials. (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).
AWS	American Welding Society. (Sociedad Americana de Soldadura).
IMCA	Instituto Mexicano de la Construccin en Acero.
NRF	Normas de Referencia de PEMEX.
RP 2A-WSD	Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design. (Prcticas Recomendadas para la Planeacin, Diseo y Construccin de Plataformas Marinas Fijas – Diseo de Trabajo y Esfuerzos).
SACS	Structural Analysis Computer System. (Sistema de cmputo para anlisis estructural).

## TABLAS

Tabla 1.1 Reporte de Produccin PEMEX (2015).....	14
Tabla 2.1. Clasificacin de plataformas marinas tipo jacket. ....	20
Tabla 2.2. Comparativo de las cargas ms representantes en diferentes tipos de estructuras. ....	24
Tabla 3.1. Geometra de las secciones de los elementos estructurales de la cimentacin y subestructura. ....	33
Tabla 3.2. Espesor de crecimiento marino recomendado para diseo. ....	36
Tabla 3.3. Factores K recomendados por el American Petroleum Institute. ....	37
Tabla 3.4. Restricciones en las conexiones. ....	38
Tabla 3.5. Ejemplo de las restricciones en los nodos de los pilotes. ....	38
Tabla 3.6. Ejemplo de algunos equipos utilizados en el modelo del caso de estudio. ....	42
Tabla 3.7. Densidades de carga viva para el diseo estructural. ....	45
Tabla 3.8. Resumen de cargas utilizadas en el modelo del caso en estudio. ....	48
Tabla 3.9. Parmetros asociados a la altura de ola mxima de operacin en el Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche. ....	49
Tabla 3.10. Factores de bloqueo de corriente aproximados para el Golfo de Mxico para estructuras tipo Jacket, tomados de la seccin 2.3.1.b.-4 del API "Current Blockage Factor". ....	54
Tabla 3.11. Coeficientes de arrastre e inercia para fuerzas de oleaje y corriente en la subestructura, recomendados por el API. ....	55
Tabla 3.12. Coeficientes de arrastre e inercia mximos para fuerzas de oleaje y corriente sobre cubierta. ....	56
Tabla 3.13. Coeficientes de forma, recomendados por el API RP 2A-WSD.....	59
Tabla 3.14. Factores de contingencia para diseo de la carga, transporte e izaje.....	62
Tabla 4.1. Datos con los que se genera la Fig. 4.8.....	71
Tabla 4.2. Ejemplo de datos a utilizar en la modelacin para la interaccin suelo estructura.....	72
Tabla 4.3. Ejemplo de los resultados del anlisis de la interaccin suelo-estructura.....	76
Tabla 5.1. Valores del sitio en estudio, para la determinacin del periodo aparente de la ola.....	80
Tabla 5.2. Factor de bloqueo de corriente.....	81
Tabla 5.3. Parmetros del caso en estudio para condicin de tormenta, para una plataforma marina tipo octpodo, localizada en la Sonda de Campeche. ....	81
Tabla 5.4. Parmetros del caso en estudio para condicin de operacin de una plataforma marina tipo octpodo, localizada en la Sonda de Campeche. ....	82
Tabla 5.5. Factores de contingencia para diseo de la carga, transporte e izaje.....	83
Tabla 5.6. Ejemplo de las combinaciones de carga para la condicin de operacin. ....	83
Tabla 5.7. Ejemplo de las combinaciones de carga para la condicin de tormenta. ....	84
Tabla 5.8. Resultados del anlisis esttico, a nivel del lecho marino de las diferentes combinaciones de carga. ....	86

Tabla 6.1. Factores de Reserva de Resistencia mínimos de acuerdo a la NRF-003-PEMEX-2007 PEMEX. ....	90
Tabla 6.2. Ejemplo del cortante basal actuante a nivel del lecho marino, en cada una de las direcciones de incidencia, así como las cargas gravitacionales, estos obtenidos del análisis estático en SACS.....	96
Tabla 6.3. Ejemplo de los resultados del análisis Pushover para una plataforma tipo Jacket. ....	98
Tabla 7.1. Factores de seguridad para revisión por fatiga. ....	101
Tabla 7.2. Cargas aplicadas en el análisis por fatiga. ....	101
Tabla 7.3. y Tabla 7.4. Ejemplo de la distribución de frecuencias de la altura de ola significativa y dirección media del vector, respectivamente, para las áreas especificadas (Anexo C, NRF-003-PEMEX-2007).....	102
Tabla 7.5. Del caso en estudio, se muestra la información del �rea Abkatúm, Chuc “B”, Pool, Caan, considerando únicamente las 8 direcciones de incidencia: .....	111
Tabla 7.6. Ejemplo del caso en estudio de las probabilidades de incidencia de las alturas de oleaje que se presentan en la dirección a 0�, normalizadas para obtener una suma de frecuencias igual a la unidad. ....	112
Tabla 7.7. Extracto de los resultados del análisis por fatiga. ....	114
Tabla 8.1. Extracto de los resultados del análisis espectral por fatiga. ....	117
Tabla 8.2. Geometría de los elementos principales del Jacket de la plataforma, en condiciones de diseño (plataforma recién instalada). ....	119
Tabla 8.3. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket, con la geometría de diseño. ....	119
Tabla 8.4. Geometría de los elementos principales del Jacket de la plataforma, en la condición más crítica. ..	120
Tabla 8.5. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket, reduciendo al espesor crítico los elementos del Jacket. ....	120
Tabla 8.6. Geometría de los elementos principales del Jacket, después de degradarse el material durante 10 años por los efectos de fatiga.....	122
Tabla 8.7. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket con 10 años de vida considerando los efectos de fatiga.....	123
Tabla 8.8. Geometría de los elementos principales del Jacket, después de degradarse el material durante 20 años por los efectos de fatiga.....	123
Tabla 8.9. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket con 20 años de vida considerando los efectos de fatiga.....	123
Tabla 8.10. Geometría de los elementos principales del Jacket, después de degradarse el material durante 30 años por los efectos de fatiga.....	124
Tabla 8.11. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket con 30 años de vida considerando los efectos de fatiga.....	124

## FIGURAS

Fig. 1.1. Plataforma tipo Jackup “Vinegaroon” de Petrobras, 1971. ....	13
Fig. 1.2. Plataforma construida de madera, Texas, EUA, en 1938.....	13
Fig. 1.3. Partes de una plataforma marina fija tipo (Jacket).....	15
Fig. 1.4. Tipos de plataformas marinas; su uso depende del tirante de agua de donde se instalen. ....	15
Fig. 2.1. Complejo de plataformas (Producción, Enlace, Compresión y Habitacional).....	19
Fig. 2.2. Esquema de estructuración de una plataforma tipo Jacket. ....	20
Fig. 2.3. Hincado de pilotes. ....	21
Fig. 2.4. Configuración de pilotes. ....	21
Fig. 2.5. Traslado de Subestructura .....	22
Fig. 2.6. y Fig. 2.7. Construcción de la subestructura (Jacket) en patio de fabricación y modelado en SACS de subestructura. ....	22
Fig. 2.8. Defensas para piernas. ....	22
Fig. 2.9. Localización de oreja de arrastre. ....	23
Fig. 2.10. Ejemplos representativos de la superestructura .....	23
Fig. 3.1. Proceso de análisis y diseño de plataformas marinas empleado por el IMP.....	29
Fig. 3.2. Accesorios (atracadero) .....	32
Fig. 3.3. Superestructura .....	32

Fig. 3.4. Subestructura .....	32
Fig. 3.5. Diagonales de la subestructura en X .....	35
Fig. 3.6. Valores teóricos y recomendados por el AISC, de acuerdo al tipo de conexión del elemento. ....	37
Fig. 3.7. Ejemplo de las restricciones en los nodos de la subestructura y cimentación. ....	38
Fig. 3.8. Cargas que actúan en una plataforma tipo Jacket.....	39
Fig. 3.9. Ejemplo de cubierta en donde se asignó carga muerta; debido a la tolerancia fuera del plano que se indicó, los contraventeos horizontales no fueron cargados. ....	41
Fig. 3.10. Ejemplo de plano de localización general de equipos. ....	43
Fig. 3.11. Ejemplo de la aplicación de cargas por equipos montados sobre patines. ....	44
Fig. 3.12. Ejemplo de barras de ánodos de sacrificio en el Jacket de una plataforma.....	46
Fig. 3.13. Cargas ambientales actuantes en una plataforma.....	49
Fig. 3.14. Alturas de ola máxima y significativa por operación en el Litoral Tabasco y Sonda de Campeche. ....	49
Fig. 3.15. Altura de la ola máxima de diseño por tormenta.....	50
Fig. 3.16. Velocidad máxima del viento a 10 m SNM, promedio de 1 hora, Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche. ....	50
Fig. 3.17. Mareas de Tormenta en el Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche.....	51
Fig. 3.18. Velocidades de corriente marina en Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche. ....	51
Fig. 3.19. Efecto Doppler debido a las corrientes permanentes. ....	52
Fig. 3.20. Regiones de aplicación de las teorías de oleaje, Stream Functions, Stokes 5 y Linear/Airy. ....	53
Fig. 3.21. Grafica ilustrativa de la variación de Cd.....	56
Fig. 3.22. Vista en elevación de la cubierta de la plataforma (Fuente: NRF-003-PEMEX-2007). ....	57
Fig. 3.23. Definición del área total de la cubierta, (Fuente: NRF-003-PEMEX-2007).....	57
Fig. 3.24. Ejemplo de la variación de la velocidad del viento con la altura, en el sitio de la plataforma del caso en estudio (Sonda de Campeche).....	58
Fig. 3.25. Tipo de solicitaciones en la plataforma tipo Jacket. ....	61
Fig. 3.26. Direcciones de la aplicación de las cargas ambientales (corriente, oleaje y viento). ....	62
Fig. 4.1. Configuración del barco y equipo geofísico .....	64
Fig. 4.2. División convencional de la Sonda de Campeche. (PEMEX). ....	64
Fig. 4.3. y Fig. 4.4. Fabricación e hincado de pilotes. ....	66
Fig. 4.5. Esquema de un planteamiento de capacidad de carga axial para el diseño de pilotes. ....	67
Fig. 4.6. Diagrama de flujo para llevar a cabo un análisis no lineal de la interacción suelo-estructura.....	69
Fig. 4.7. Curva de capacidad de carga axial última, para un pilote de 54" de diámetro. Del lado derecho se muestra la estratigrafía del suelo marino. ....	70
Fig. 4.8. Curva de transferencia típica de carga axial-desplazamientos (t-z), (Fig. 6.7.2-1 del API-RP-2A-WSD). ....	71
Fig. 4.9. Ejemplo de curvas esfuerzo- deformación por carga axial en un pilote de 54" de diámetro. ....	71
Fig. 4.10. Ejemplo de curvas esfuerzo- deformación por carga lateral en un pilote de 54" de diámetro.....	72
Fig. 4.11. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (psiinp). ....	74
Fig. 4.12 y Fig. 4.13 Gráficas obtenidas del análisis estructural, con las cuales podemos verificar que los datos que se ingresaron al modelo estructural son correctos.....	75
Fig. 4.14. Ejemplo de la distribución de pilotes, en una plataforma tipo octápodo. ....	76
Fig. 5.1. Diagrama de cargas que inciden en una plataforma in situ. ....	78
Fig. 5.2. Diagrama de flujo del análisis estructural por el método estático, de una plataforma marina tipo Jacket, con ayuda del programa SACS. ....	79
Fig. 5.3. Ejemplo de los archivos generados para un análisis estático.....	85
Fig. 5.4 y Fig. 5.5 Ejemplo de la fuerza resultante del cortante en las direcciones (X, Y) para cada combinación de carga, en las etapas de operación y tormenta. ....	86
Fig. 5.6 y Fig. 5.7 Ejemplo de la resultante de los desplazamientos que se presentan en las direcciones (X,Y) del nodo 2241, el cual se encuentra en la elevación +47.240 m, para cada una de las combinaciones de carga. ....	87
Fig. 5.8. Ejemplo de la relación de interacción de esfuerzos en una subestructura. ....	88
Fig. 5.9 a – d. Resultados de los desplazamientos y la R.I. de esfuerzos en el Jacket, considerando y sin considerar los pilotes de cimentación.....	89
Fig. 6.1. Curva Fuerza-Desplazamiento lateral, (de capacidad o pushover). ....	91

Fig. 6.2. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (clpinp). .....	92
Fig. 6.3. Modelo conceptual de una plataforma tipo Jacket. ....	93
Fig. 6.4. Incidencia de cargas ambientales. ....	94
Fig. 6.5 a –h. Distribución de cargas laterales en la estructura para condiciones de tormenta.....	95
Fig. 6.6. Curvas resultantes del análisis estático no lineal (cortante basal resistente vs desplazamiento en la cubierta), para cada una de las 8 incidencias sobre la plataforma. ....	96
Fig. 6.7 a – h. Modos de falla de la plataforma para diferentes incidencias de cargas ambientales.....	97
Fig. 7.1 y Fig. 7.2 Inspección submarina del Jacket. ....	99
Fig. 7.3 y Fig. 7.4 Grietas en las conexiones de los elementos tubulares del Jacket, originadas por el oleaje. ....	100
Fig. 7.5. Configuraciones típicas de juntas tubulares.....	104
Fig. 7.6. Localización de puntos para el cálculo de los SCF.....	105
Fig. 7.7. Esquema del origen del Factor de Concentración de Esfuerzos. ....	106
Fig. 7.8. Variación de esfuerzos en un punto crítico de la plataforma. ....	106
Fig. 7.9. Ejemplo de función de transferencia (Dirección a 0°, cortante basal) .....	107
Fig. 7.10. Curva S-N empleada en el análisis de fatiga, (API RP 2A-WSD).....	108
Fig. 7.11. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (seainp). ....	109
Fig. 7.12. Extracto de algunos resultados hidráulicos, obtenidos de la modelación en SACS. ....	110
Fig. 7. 13. Ejemplo de los resultados del análisis de la interacción suelo-estructura. ....	111
Fig. 7.14. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (ftginp). ....	113
Fig. 7.15. Localización de las conexiones del caso en estudio, con el menor periodo de vida. ....	114
Fig. 8.1. Ejemplo de la localización de las conexiones más críticas en el Jacket.....	118
Fig. 8.2 a – h. Modo de falla de la plataforma para diferentes incidencias de cargas ambientales. ....	121
Fig. 8.3. Variación del espesor de las piernas del Jacket en función del periodo de vida y el daño por fatiga. .	122
Fig. 8.4. Variación del espesor de las piernas del Jacket a través del tiempo, debido a las grietas ocasionadas por la fatiga. ....	124
Fig. 8.5. Ejemplo de la capacidad estructural de la plataforma tipo Jacket a través del tiempo, considerando el daño ocasionado por fatiga, incidencia a 90°.....	125



# Capítulo 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El petróleo es el recurso natural más importante en nuestro país, porque satisface la demanda de energéticos y de petroquímicos básicos y contribuye al desarrollo industrial de nuestro país, es uno de los recursos no renovables más valiosos que proporciona la tierra y debe explotarse de manera cuidadosa utilizando métodos que garanticen por completo su aprovechamiento.

De acuerdo con sus raíces etimológicas, la palabra petróleo significa aceite de piedra; se deriva de los vocablos latinos: petra-piedra y oleum-aceite.

La primera estructura costa afuera para perforación de petróleo fue construida en 1887 fuera de la costa suroeste de California, cerca de Santa Bárbara, era una estructura de madera tipo muelle con una torre de perforación para pozos verticales en el lecho marino, otras plataformas más elaboradas soportadas por pilares de madera fueron construidas para perforación, incluyendo instalaciones semi-profundas en Caddo Lake, Lousiana en 1911. El principal problema de este tipo de estructuras fue el material con que se fabricaron, debido al efecto que tenían los organismos marinos sobre la madera (humedad, salinidad, etc.), por esta razón el concreto reforzado reemplazó a la madera como material de fabricación para este tipo de estructuras a finales de la década de los 1940's.

La compañía Signal Oil and Gas fue la que abrió camino en el desarrollo de las plataformas marinas en las costas de California. El primer intento de perforar en las aguas del Golfo de México fue en 1933, en las costas de Louisiana. A principios de 1938, aproximadamente a 1.6 km costa afuera de la playa de Texas, una plataforma de madera de 50 x 90 ft. (15.24 x 27.43 m) fue construida en el agua a una profundidad de 15 ft. (4.6 m) esta plataforma se muestra en la Fig. 1.2.

En 1965, la empresa brasileña Petrobras tuvo éxito en la exploración en busca de reservas de petróleo dentro de las costas de Bahía, sin embargo la producción era sólo de un tercio de lo que el país necesitaba, por lo que se decidió iniciar exploraciones en cuencas costa afuera. En 1967 se contó con la información suficiente y el primer pozo costa afuera fue perforado al año siguiente en la cuenca de Espirito Santo, para esto se creó la plataforma auto elevable "Vinegaroon", a una profundidad de 50 metros. Una perforación a esa profundidad fue considerada arriesgada en aquel entonces, la explotación del campo inició en 1971.





**Fig. 1.1. Plataforma tipo Jackup "Vinegaroon" de Petrobras, 1971.**



**Fig. 1.2. Plataforma construida de madera, Texas, EUA, en 1938.**

Las plataformas marinas de acero para la explotación de hidrocarburos se han venido utilizando desde 1946, la primera fue instalada en las costas de Louisiana y posteriormente se instalaron en las costas de California y en el Golfo Pérsico. A la fecha la estructura de acero tipo Jacket es la más ampliamente utilizada para la explotación de hidrocarburos en ambiente marino existiendo en Estados Unidos de América (EUA) alrededor de 4,000 plataformas de este tipo, actualmente en México, se cuenta con 271 plataformas marinas, instaladas principalmente en las costas de Campeche y un mínimo de éstas en las costas de Tampico y Veracruz.

Los criterios de diseño para plataformas han cambiado significativamente en los últimos 45 años, las primeras plataformas fueron diseñadas para soportar oleajes con períodos de retorno de 25 años, sin embargo desde 1969 la mayoría de las plataformas han sido diseñadas para oleajes con períodos de retorno de 100 años. El American Petroleum Institute (API) introdujo por primera vez en 1969, prácticas recomendadas para plataformas marinas a través de su código API-RP-2A, con el fin de establecer un criterio consistente para el diseño, fabricación e instalación de plataformas marinas. El API ha revisado periódicamente las recomendaciones contándose en la actualidad con la edición 21.

La industria petrolera en México para el desarrollo de sus instalaciones costa afuera se ha apoyado entre otras, principalmente en esta normatividad, primordialmente por la similitud de las condiciones ambientales que existen en todo el golfo de México, región en la cual se localizan la mayor parte de las instalaciones costa afuera de los E.U.A. y México.

En México, la explotación de yacimientos de hidrocarburos costa afuera inicio en 1958, en aguas del Golfo de México, con la instalación de plataformas fijas frente a la barra de Santa Ana, en el estado de Tabasco. Durante 1975 se inició la perforación del pozo exploratorio Chac-1, 80 Km al norte de la Isla del Carmen, Campeche, terminándose al año siguiente. Al resultar productivo este pozo, se creó la expectativa de lo que posteriormente se confirmó: la existencia de varios campos marinos productores de aceite y gas en la Sonda de Campeche.

Para 1977 se descubrieron 2 campos más, con la perforación de los pozos Akal-1 y Bakab-1, el siguiente año se descubrió el cuarto campo productor: Nohoch, que junto con Chac y Akal integran lo que se ha denominado el complejo Cantarell. La perforación exploratoria se llevó a cabo desde plataformas móviles del tipo autoelevable (Jack-up) y equipo flotante instalado sobre barcos de gran capacidad.

En México más del 80% del petróleo se obtiene a través de las técnicas de perforación marítimas. El departamento de PEMEX Exploración y Producción (PEP), como su nombre lo indica, es el responsable de la exploración y explotación del petróleo y el gas natural del país. Tiene a su cargo el transporte, almacenamiento en terminales y comercialización de primera mano de dichos hidrocarburos.

PEMEX Exploración y Producción posee 359 campos petroleros, 5,783 pozos en exploración, 271 plataformas marinas y 34,074 km de oleoductos y gasoductos, distribuidos en cuatro regiones: Norte, Sur, Marina Noreste y

Marina Suroeste. A Marzo del año 2015, la Región Marina Noreste y la Región Marina Suroeste producen un conjunto de 2 millones 300 mil barriles diarios de petróleo crudo (2.30MMBPD) y 6 mil 669 millones de pies cúbicos diarios (6,669 MPCD) de gas natural, representando el 82% y el 37% de la producción nacional, respectivamente. Estos volúmenes de producción ubican a México como uno de los países petroleros más importantes a nivel mundial.

**Tabla 1.1 Reporte de Producción PEMEX (2015)**

I. Producción y Distribución de Crudo

Reporte del 1 al 8 de Marzo de 2015

<b>Producción de Crudo (miles de barriles diarios)</b>	<b>2,311</b>	<b>Zona</b>
<u>Proyecto</u>		
Ku-Maloob-Zaap	861	Marina
Cantarell	249	Marina
Crudo Ligero Marino	96	Marina
Antonio J. Bermúdez	69	Terrestre
Ixtal-Manik	60	Marina
Chuc	251	Marina
Delta del Grijalva	78	Terrestre
Aceite Terciario del Golfo	43	Terrestre
Otros proyectos	604	Marino y Terrestre

Las plataformas de explotación (en las que pueden llegar a vivir aproximadamente 200 personas) son estructuras metálicas sustentadas en pilotes profundamente incrustados en el lecho marino, de manera que son instalaciones fijas que suelen tener dos cubiertas, formando un sistema de piso donde se colocan equipos, módulos y tuberías. La parte sumergida (subestructura) es una estructura con forma de pirámide truncada y la superior (superestructura) es el de tipo industrial.

Las plataformas marinas son autosuficientes en alta medida; obtienen agua potable a través de plantas desaladoras de agua marina y las aguas negras son tratadas; tienen generadores termoeléctricos que funcionan con gas natural; los abastecimientos externos los lleva semanalmente el barco que transporta los alimentos perecederos.

En lo que corresponde a ingeniería civil, el diseño y construcción de estructuras sobre las cuales puedan realizarse los trabajos de explotación y producción, ha representado uno de los principales problemas a resolver, bajo la premisa de economía y seguridad, lo cual ha dado origen a una amplia gama de soluciones basadas fundamentalmente en el tirante de agua del sitio de interés. Algunos de los países que han desarrollado tecnologías para el diseño, fabricación e instalación de plataformas marinas son EUA, Noruega, Francia, Holanda e Inglaterra.

El análisis, diseño y construcción de plataformas costa afuera es una tarea muy demandante y especializada que tiene un ingeniero civil, ya que las condiciones y situaciones que actúan sobre estas estructuras, con respecto a una estructura que se construye en tierra, son diferentes.

Debido a que los tirantes de agua que se manejan en la Sonda de Campeche son someros (menores que 100 m (328 ft)) la solución ha sido colocar plataformas marinas fijas tipo Jacket.

A la fecha existen a nivel mundial alrededor de 2000 plataformas marinas que han consumido la totalidad de su vida útil de diseño, muchas de estas plataformas marinas existentes al someterse a una evaluación no cumplen con los códigos o reglamentos vigentes para el diseño, fabricación e instalación de este tipo de estructuras, lo cual obligo al Minerals Management Service (MMS) a promover el establecimiento de la normatividad requerida para la evaluación de plataformas existentes, habiéndose logrado ésta a través del API al publicar la sección 17 del API RP.

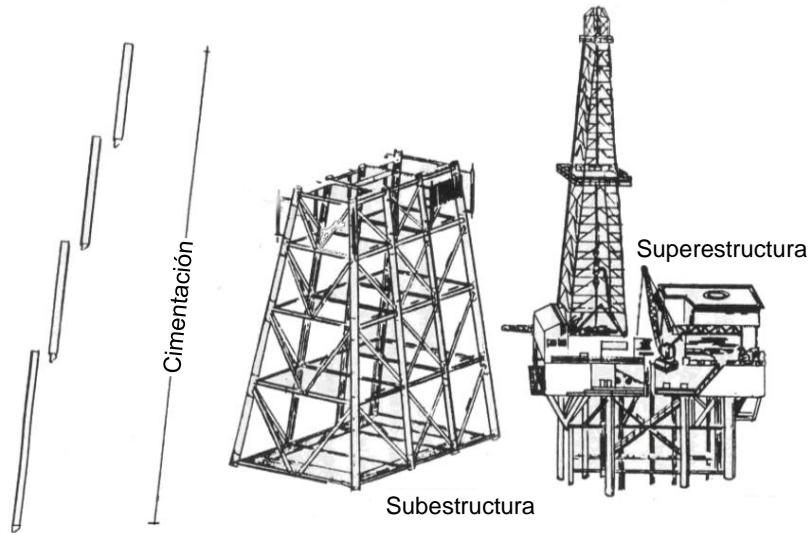


Fig. 1.3. Partes de una plataforma marina fija tipo (Jacket).

Como se mencionó en los párrafos anteriores la importancia del buen diseño de las plataformas marinas es fundamental, tanto por el trabajo para el cual fueron diseñadas como por los graves problemas que se tendría en caso de que fallaran, debido a los problemas de poner en riesgo las vidas humanas que habitan y operan la estructura, los problemas ambientales y los problemas económicos, por lo cual surge la idea de realizar este trabajo, en donde se busca realizar un documento que involucre los detalles a tomar en cuenta para el análisis y modelado de este tipo de estructuras, así como mencionar los lineamientos a seguir para el análisis estructural de las mismas.

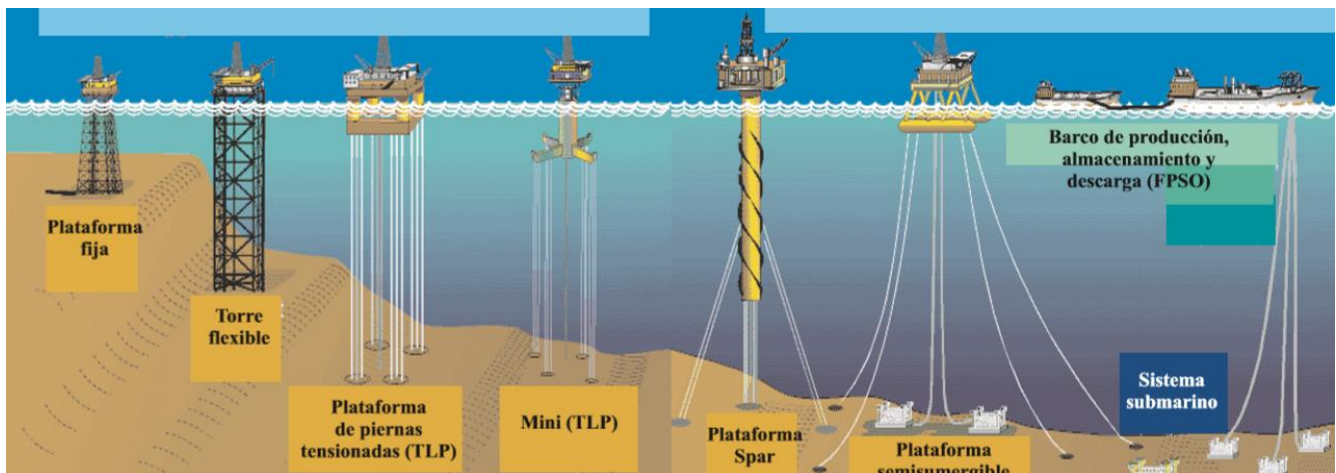


Fig. 1.4. Tipos de plataformas marinas; su uso depende del tirante de agua de donde se instalen.

## 1.1 CONTEXTO GENERAL DEL TRABAJO

Se realizó un documento en el cual se conglomeran los criterios, consideraciones y prácticas recomendadas para el análisis y modelado de plataformas marinas tipo Jacket. El documento se encuentra dentro del marco de la ingeniería básica de diseño, mencionando normas y criterios nacionales e internacionales. Tiene como fin brindar las bases al ingeniero estructuralista para realizar el modelado y análisis estructural de plataformas marinas tipo Jacket.

En el trabajo se redacta una breve historia sobre la ingeniería costa afuera, tanto nacional como internacional, para dar una idea de la evolución en los diseños estructurales.

Posteriormente se realiza la descripción de los requerimientos y estudios necesarios para el análisis de una plataforma tipo Jacket instalada en aguas someras y de los criterios nacionales e internacionales que se deben tomar en cuenta para en el análisis y modelado.

Se definen los parámetros necesarios, para analizar y diseñar una plataforma marina fija en el Golfo de México, como son los datos oceanográficos y meteorológicos, cargas gravitacionales y ambientales que actúan sobre la estructura, con los cuales se diseñarán las plataformas para las etapas de operación, tormenta y la revisión por los efectos de la fatiga.

Una vez definidos los parámetros necesarios se indican los criterios y consideraciones para la adecuada modelación de la estructura en el programa SACS Offshore Structure Enterprise, mostrando los diferentes tipos de modelaciones que se realizan para cada etapa (operación, tormenta o fatiga) en la que se encuentre la estructura, dicho programa hoy en día es uno de los más especializados para hacer estos tipos de análisis, con el cual podemos generar modelos de plataformas en 3D.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.2.1 PROBLEMÁTICA

Generar un documento en donde se propongan los criterios y consideraciones necesarios para el modelado y análisis de plataformas marinas tipo Jacket instaladas en aguas someras con ayuda del programa SACS, el cual este apegado a normas, reglamentos y recomendaciones establecidas por PEMEX y el API.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GENERAL

La presente tesis titulada "**CRÍTERIOS Y CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO DE PLATAFORMAS MARINAS TIPO JACKET, PARA TIRANTES DE AGUAS SOMERAS**" tiene como objetivo brindar las herramientas necesarias para realizar el análisis estructural de plataformas marinas tipo Jacket instaladas en aguas someras, definiéndole al ingeniero estructurista los parámetros y criterios que deberá considerar para el modelado de una plataforma marina. Se pretende que este tipo de herramientas involucre a más ingenieros en el área de estructuras costa afuera, para poder cubrir la demanda de ingenieros que tendrá el país debido a los cambios que se han tenido actualmente, referente al rubro de la explotación de hidrocarburos.

### 1.3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Investigar en normas, reglamentos, recomendaciones, prácticas adecuadas, etc. el procedimiento de análisis y modelación en el programa SACS de plataformas marinas fijas, que me permitan conocer cómo se encuentra hoy en día el análisis estructural de plataformas de aguas someras.
- Establecer los criterios y consideraciones para realizar las modelaciones por el método estático de plataformas marinas tipo Jacket instaladas en aguas someras, en las etapas de operación, tormenta y la revisión de los daños ocasionados por el efecto de la fatiga.
- Revisar la capacidad estructural última de colapso de plataformas fijas.
- Proponer un procedimiento de análisis, para conocer en diferentes instantes la capacidad estructural de la plataforma, considerando los daños ocasionados por la fatiga.
- Proponer un documento con la metodología para el modelado de plataformas, que brinde las bases para realizar el correcto análisis estructural de plataformas marinas tipo Jacket.

#### 1.4 METAS

- A partir de un marco teórico, normas y recomendaciones nacionales e internacionales definir aquellos puntos que son esenciales para realizar un correcto análisis, obteniendo así resultados óptimos.
- Modelar una plataforma marina tipo Jacket en el programa SACS, para conocer todos los puntos de detalle que son necesarios plantear en un adecuado análisis.
- Utilizar el programa SACS de forma satisfactoria para poder cumplir con los objetivos planteados.
- Integrar un documento que sirva de apoyo en la conceptualización y análisis de una plataforma marina tipo Jacket.

#### 1.5 JUSTIFICACIÓN

En México hoy en día, cerca del 88% de la energía primaria que se consume proviene del petróleo, es la principal fuente de insumos para generar energía eléctrica, permite la producción de combustibles para los sectores de transporte e industrial. Además, el petróleo es materia prima de una gran cantidad de productos como telas, medicinas o variados objetos de plástico, al ser un recurso no renovable se está en una constante búsqueda de yacimientos, que para este contexto se encuentran costa afuera; derivado que México está realizando un cambio radical para poder obtener mayor cantidad de petróleo será necesario construir más y mejores estructuras costa afuera.

A la fecha no se cuenta con ningún texto, referencia, curso, etc. del modelado y análisis de plataformas marinas con ayuda del programa SACS, el cual hoy en día es uno de los líderes en el diseño de este tipo de estructuras, así como de la interpretación de los resultados obtenidos, por lo cual surge esta investigación y preparación de este documento, ya que existe la necesidad de generar un texto que proporcione al ingeniero estructurista una guía práctica para realizar los análisis correspondientes según las normas y recomendaciones de plataformas marinas tipo Jacket, ya sea para el diseño o revisión de la misma.

## Capítulo 2

### **2. GENERALIDADES DE LAS PLATAFORMAS MARINAS FIJAS Y SUS COMPONENTES**

#### **2.1. HISTORIA DE LA EXPLOTACIÓN COSTA AFUERA EN MÉXICO**

En México, la explotación de yacimientos de hidrocarburos costa afuera se inició en 1958, en aguas del Golfo de México, con la instalación de plataformas fijas frente a la barra de Santa Ana, en el estado de Tabasco.

A finales de los sesenta se perforó desde una plataforma fija en la localización de Tiburón, al norte de la Barra de Tuxpan, Veracruz. También se instalaron siete plataformas frente a la Barra del Río Cazones para perforar los pozos Atún, Bagre, Morsa y Escualo. Frente a la desembocadura del Río Pánuco, en Tampico, desde cuatro plataformas se perforaron adicionalmente los pozos Arenque y Marsopa. En el diseño estructural de estas primeras plataformas se aplicaron métodos simplificados.

En todos los casos, las plataformas fueron diseñadas en el extranjero, construidas con materiales de importación e instaladas en tirantes de agua no mayores que 50 m. Éstas se utilizaron únicamente para la perforación y explotación de los pozos. La mezcla de aceite y gas era enviada a través de tuberías de conducción hasta las instalaciones construidas ex profeso en tierra firme, en donde se separaban en aceite, gas y agua.

Para el transporte de los hidrocarburos extraídos de estos primeros campos costa afuera, se tendieron 400 km de tuberías con diámetros de 20 a 30 cm y a una profundidad máxima de 60 m. Durante 1975 se inició la perforación del pozo exploratorio Chac-1, 80 km al norte de la Isla del Carmen, Campeche, terminándose al año siguiente. Al resultar productivo este pozo, se creó la expectativa de lo que posteriormente se confirmó: la existencia de varios campos marinos productores de aceite y gas en la Sonda de Campeche.

Para 1977 se descubrieron 2 campos más, con la perforación de los pozos Akal-1 u Bakab-1. El siguiente año se descubrió el cuarto campo productor: Nohoch, que junto con Chac y Akal integran lo que se ha denominado el complejo Cantarell. La perforación exploratoria se llevó a cabo desde plataformas móviles del tipo autoelevable (Jack-up) y equipo flotante instalado sobre barcos de gran capacidad.

Al resultar productivos los 2 primeros pozos exploratorios se iniciaron los estudios con simuladores matemáticos que permitan variar el espaciamiento entre pozos, utilizando para ello tecnología de punta disponible, e incorporando aspectos financieros. Como resultado, se obtuvo el número de pozos y plataformas para desarrollar un campo, la cantidad de pozos por plataforma, así como los programas de incorporación de reservas, de producción y de inversiones.

En forma paralela se desarrollaron en el país los primeros programas de cómputo para el análisis y diseño de plataformas marinas. Con estas consideraciones se estableció el plan regulador de la Sonda de Campeche bajo el esquema de explotación, con base en plataformas fijas y tuberías de conducción de hidrocarburos. Asimismo,



con este plan se definieron el número, función, orientación y capacidad de las plataformas PECH, las cuales están constituidas por: Producción, Enlace, Compresión y Habitacional.



**Fig. 2.1. Complejo de plataformas (Producción, Enlace, Compresión y Habitacional).**

Para complementar dichos complejos se instalan estructuras secundarias destinadas al soporte de quemadores, sistemas de telecomunicaciones y puentes; estos últimos necesarios para el paso peatonal y el apoyo de tuberías entre plataformas contiguas.

Al decidir la explotación intensiva de los campos Chac, Akal y Bakab, se estableció un programa de construcción de 10 plataformas fijas de perforación, instalándose la primera en noviembre de 1978 en el campo Akal-C, en un tirante de 44 m, marcando el inicio de la edificación de las plataformas instaladas en la Sonda de Campeche (Valdés, 2005, A).

## **2.2. ESTRUCTURACIÓN DE UNA PLATAFORMA TIPO JACKET**

Las plataformas tipo Jacket están estructuradas en tres partes que son: Cimentación, Subestructura y Superestructura.

La subestructura (Jacket) es la parte de la estructura que está directamente en contacto con el mar y recibe las fuerzas producidas por el oleaje. Está construida principalmente con elementos de sección tubular que forman marcos en la dirección longitudinal así como en la transversal. Sus principales elementos son las piernas por donde son introducidos los pilotes que van desde la superestructura hasta el suelo marino. Cuenta con diferentes plantas que proporcionan un arriostamiento lateral, las cuales se ubican dependiendo de las dimensiones de la estructura. Los contraventeos son comúnmente contruidos con secciones tubulares en forma de K y X. La función de la subestructura consiste en proporcionar arriostamientos laterales al pilote en la longitud que hay entre la superestructura y el suelo, lo cual reduce su longitud efectiva incrementando su capacidad de carga.

Existe un punto en donde la subestructura se une al pilote, es en este lugar donde la subestructura descarga su peso sobre los pilotes. En los niveles de arriostamiento inferiores la única restricción existente es la correspondiente a desplazamientos laterales, y verticalmente existe libertad entre los desplazamientos de la pierna y el pilote. Las fuerzas que el oleaje produce sobre la subestructura son transmitidas a los pilotes a través de desplazamientos laterales. La subestructura cuenta con accesorios como son los atracaderos, las defensas de las piernas, las protecciones de los ductos ascendentes y los ánodos de sacrificio (utilizados para proteger al acero de la subestructura contra los efectos de la corrosión), todos estos accesorios son considerados como elementos no estructurales durante los análisis, debido a que no influyen en la rigidez global de la estructura.

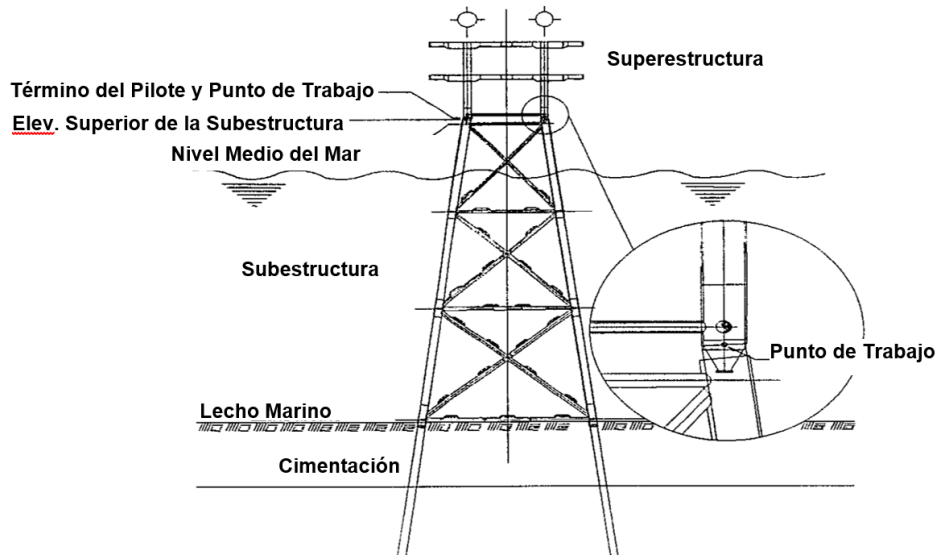


Fig. 2.2. Esquema de estructuración de una plataforma tipo Jacket.

### 2.3. TIPOS DE PLATAFORMAS MARINAS

Clasificación por su estructura; existen actualmente siete tipos básicos de sistemas estructurales:

- **Plataformas Fijas (utilizadas en México).**
- Plataformas flexibles.
- Plataformas semi-sumergibles.
- Buques tanque para producción, almacenamiento y descarga.
- Plataformas de piernas tensionadas.
- Sistemas submarinos de producción con enlace.
- Plataformas auto-elevables.

Clasificación por su servicio:

- Plataforma de Perforación.
- Plataforma de Producción (temporal y permanente).
- Plataforma de Enlace.
- Plataforma de Compresión.
- Plataforma Habitacional.
- Plataforma de Re-bombeo.
- Plataforma de Apoyo.
- Plataforma de Inyección.
- Plataforma de Almacenamiento de Diesel.
- Plataforma de Telecomunicaciones.
- Plataforma de Apoyo de Quemador.

Así mismo las Plataformas Marinas Fijas tipo Jacket se subdividen en los siguientes tipos:

Tabla 2.1. Clasificación de plataformas marinas tipo jacket.

		Clasificación	No. de Piernas
Plataforma Marina Fija de Acero Tipo Jacket	Estructuralmente	Trípodos Sea pony's	3
		Tetrápodos Seahorse	4
		Hexápodos	6
		Octápodos	8
		Dodecápodos	12



## 2.4. COMPONENTES DE UNA PLATAFORMA MARINA TIPO JACKET

Una plataforma marina se describe como una instalación industrial localizada costa afuera, cuya función original es la extracción de petróleo y gas natural de los yacimientos del lecho marino.

Las plataformas marinas fijas tipo Jacket se caracterizan por encontrarse desplantadas sobre el suelo marino extendiendo su estructura hasta por encima de la superficie del NMM.

Las plataformas fijas son estructuras comúnmente utilizadas en tirantes de hasta 200 m de profundidad, a fin de obtener diseños económicos y funcionales, mediante pilotes interiores, pilotes faldón o una combinación de ambos.

La plataforma tipo Jacket son estructuras metálicas en forma piramidal, se instalan en el fondo marino por medio de pilotes desplantados en estratos resistentes, el nombre de “Jacket” es de origen inglés y significa camisa. La plataforma funciona como un sistema integral suelo-estructura, formado por tres componentes principales: cimentación, subestructura y superestructura.

Cuando la plataforma se diseña con pilotes interiores, el trabajo de la subestructura es básicamente a cortante, por oleaje, viento y corriente; sin embargo, cuando el diseño considera pilotes faldón las fuerzas gravitacionales originadas por peso propio, carga muerta adicional, carga viva, tuberías, equipo, etc., se transmiten a través de la subestructura, por lo cual su trabajo principal es a flexo-compresión, a las plataformas que tienen este comportamiento se le denomina tipo “torre”. La utilización de pilotes faldón se recomienda para plataformas localizadas en tirantes de 100 a 200 m, sin embargo se han utilizado en tirantes mayores (Caballero, 2014).

### 2.4.1. CIMENTACIÓN

La cimentación se conforma por pilotes que están formados por elementos tubulares de sección circular, de punta abierta, y básicamente son la cimentación de la plataforma.

Cada pilote consta de dos partes, una de ellas se aloja concéntricamente en cada una de las piernas o columnas de la Subestructura y la otra parte se halla contenida en el lecho marino. La longitud de penetración a partir del lecho marino está en función de la capacidad del suelo y de la descarga de la superestructura y equipos.

El pilote se hinca en el suelo marino por percusión, excepto el primer tramo que se introduce en el suelo por caída libre, requiriendo en la punta un bisel que favorezca el corte del terreno.

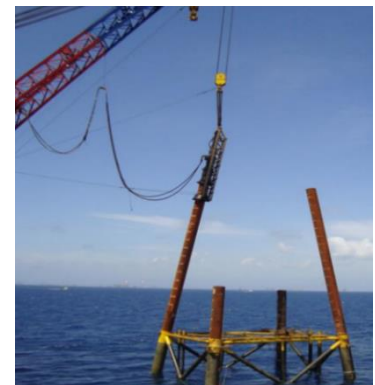


Fig. 2.3. Hincado de pilotes.

El pilote se integra por varios segmentos con diferentes espesores y longitudes, de acuerdo a la magnitud de los elementos mecánicos que actúan sobre él.

En la Sonda de Campeche, la cimentación de las plataformas marinas está formada por pilotes con longitudes de penetración que varía entre 70 m y 130 m, medidos a partir de la línea de lodos.

Por lo general los estudios geotécnicos proporcionan datos de características físicas, mecánicas y de capacidad de los diferentes estratos, con los cuales se determina la profundidad de la cimentación.

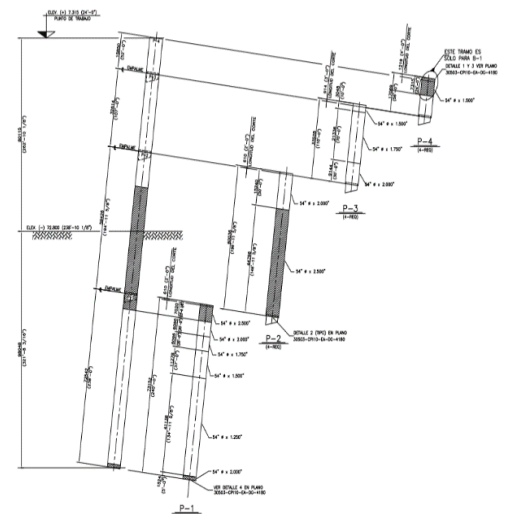


Fig. 2.4. Configuración de pilotes.

### 2.4.2. SUBESTRUCTURA (JACKET)

La subestructura se integra totalmente por perfiles tubulares de sección circular. Su estructuración se basa en el empleo de elementos principales que constituyen sus piernas que son interconectadas y arriostradas por elementos de menor sección, adoptando en conjunto una forma trapezoidal que se desplanta a nivel del lecho marino y con una altura que la hace sobresalir del mar.

La inclinación de las piernas está dada por la relación 1:8 (horizontal: vertical), mejorando las características de rigidez del conjunto y carga axial en los apoyos, en comparación con una estructura de piernas verticales.

El trabajo de la subestructura se realiza en conjunto con los pilotes, que se hallan en forma concéntrica dentro de sus piernas. La subestructura contiene en el interior de sus piernas, placas espaciadoras, que limitan la holgura existente entre el diámetro interior de estas y el diámetro exterior de los pilotes.

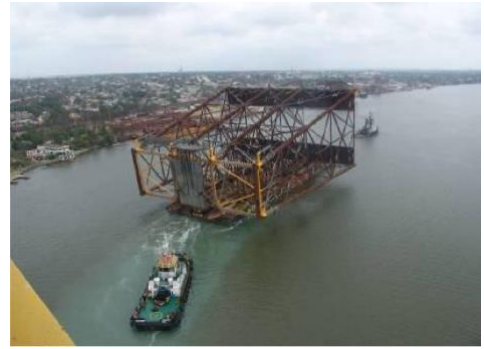


Fig. 2.5. Traslado de Subestructura

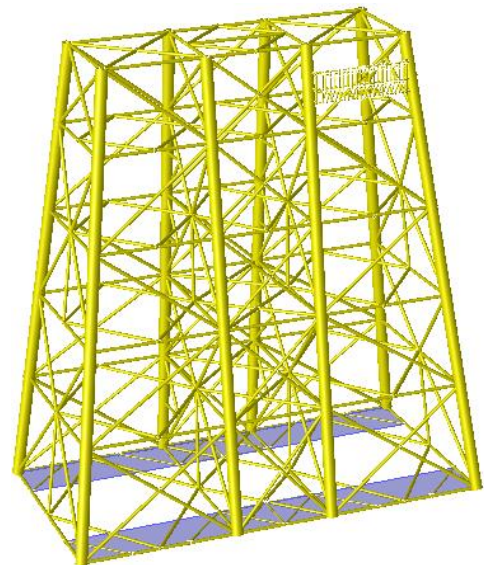


Fig. 2.6. y Fig. 2.7. Construcción de la subestructura (Jacket) en patio de fabricación y modelado en SACS de subestructura.

### 2.4.3. ACCESORIOS

Las condiciones por la que transita la estructura desde su fabricación hasta la instalación, establecen la necesidad de que cuente con accesorios que permitan y favorezcan su fabricación y manejo, así como su instalación y operación. Los accesorios son todos los elementos que no forman parte de las estructuras principales de soporte (pilotes, subestructura y superestructura). Cada uno de los accesorios cumple una función específica y cada uno de ellos se sujeta a un análisis y diseño estructural. Los accesorios que se usan en este tipo de plataformas son:

Superestructura:

- Oreas de izaje / arrastre.
- Camisas para bombas de succión.
- Sumideros.
- Marcos de arrastre.
- Elementos temporales de izaje.

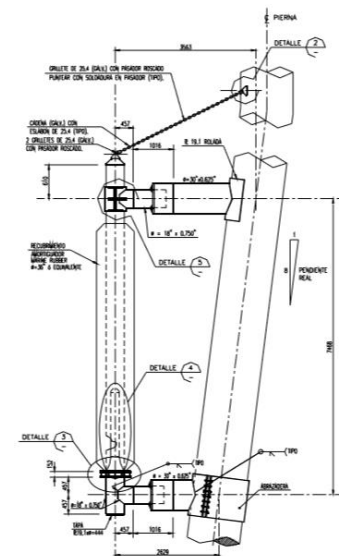
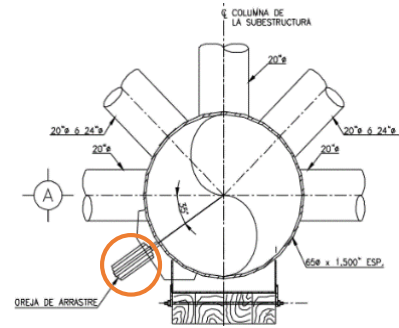


Fig. 2.8. Defensas para piernas.

Subestructura:

- Atracaderos / Embarcaderos.
- Correderas de lanzamiento.
- Defensas de piernas y de ductos ascendentes.
- Pasillos de acceso.
- Ánodos de sacrificio.
- Orejas de arrastre.
- Orejas de posicionamiento vertical.
- Tapas de sello.
- Sistema de inundación.
- Tanques de flotación.
- Placas base.
- Conductores.
- Ductos ascendentes.



**Fig. 2.9. Localización de oreja de arrastre.**

#### 2.4.4. SUPERESTRUCTURA

La superestructura es la parte de la plataforma destinada a dar alojamiento y soporte al equipo de operación de la plataforma. Está formada por marcos rígidos, con columnas tubulares de sección circular, apoyadas sobre los extremos superiores de los pilotes, e interconectadas mediante traveses de sección I fabricadas de tres placas. Las traveses dan soporte a sistemas de piso donde se apoya el equipo.


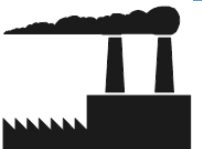

Con relación a las columnas, su diámetro se establece en función del diámetro de los pilotes, con el que deben ser compatibles; y a su vez el pilote debe ser compatible con el espesor de la columna. Los efectos locales por concentraciones de esfuerzos originados a partir de la incidencia de miembros sobre las columnas, son resistidos con la utilización de anillos soldados por el interior de estas, o con solapas exteriores de placa rolada. El material de las columnas en su interconexión con las traveses principales es de acero especial (como por ejemplo el API-2H-Gr. 50, entre otros).



**Fig. 2.10. Ejemplos representativos de la superestructura**

Las plataformas marinas son diseñadas para las condiciones de carga ante las cuales se verán sometidas, las cuales difieren en gran medida a las consideradas en una estructura urbana. A continuación se muestra un comparativo de las cargas que influyen en diferentes tipos de estructuras:

**Tabla 2.2. Comparativo de las cargas más representantes en diferentes tipos de estructuras.**

			
<b>Gravitacionales</b>			
Muerta	✓	✓	✓
Viva	✓	✓	✓
<b>Ambientales</b>			
Sismo	✓	✓	✓
Viento	✓	✓	✓
Oleaje			✓
Corriente			✓
Marea			✓

## 2.5. NORMATIVIDAD VIGENTE, APLICABLE AL DISEÑO DE PLATAFORMAS MARINAS INSTALADAS EN EL GOLFO DE MÉXICO

En el diseño de plataformas marinas se tiene especial atención en la seguridad; las consecuencias por el colapso de una estructura de este tipo en términos generales esta en función de las pérdidas humanas, del impacto ambiental y del impacto económico. Este tipo de estructuras está sometida a cargas que no siempre serán de la forma a como fue diseñada, ya que las cargas de diseño son calculadas en base a la estadística y probabilidad de ocurrencia del oleaje principalmente; esta parte del problema resultaría bastante subjetiva y produciría diseños extremadamente dispares, si no fuese por los códigos de construcción que se han desarrollado (y que en una forma u otra se usan casi universalmente).

Los códigos establecen límites mínimos requeridos o sugeridos en aquellos casos en que la seguridad constituye un factor importante, por ello, a lo largo de este documento se hace hincapié en seguir las normas de referencia, códigos y manuales sobre el diseño, cálculo, operación y construcción de este tipo de estructuras. La filosofía de operación de PEMEX Exploración y Producción establece el cierre temporal de la producción y la evacuación del personal de las plataformas cuando se prevé la presencia de un evento ambiental extremo. Por lo tanto, el efecto predominante en la estimación de la consecuencia de falla es el impacto económico correspondiente al cese de la producción manejada durante el período de rehabilitación, incluyendo los costos de reparación, retiro y reemplazo de la estructura.

Las instalaciones marinas están sujetas a efectos ambientales extremos y a prácticas de operación propias, por lo que deben ser diseñadas o evaluadas de acuerdo con normas y estándares que reflejen estas características locales, así como las condiciones económicas propias del país lo permitan. Como resultado de extensivos estudios sobre el peligro ambiental, el riesgo y la confiabilidad estructural de plataformas que se han diseñado o construido en el Golfo de México, se establecen normas, códigos y recomendaciones para el diseño, construcción, instalación, inspección, mantenimiento y evaluación de plataformas marinas fijas.

Se enuncian las normas y recomendaciones más relevantes para el diseño y construcción de plataformas marinas en México, los cuales constituyen en conjunto, la base y marco de referencia requeridos para el desarrollo de la ingeniería estructural especializada en este tema. Cabe mencionar que dichas normas y recomendaciones son reconocidas internacionalmente.



- **NORMAS DE REFERENCIA DE PEMEX**
  - "Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México" (NRF-003-PEMEX-2007)
  - "Carga, Amarre, Transporte e Instalación de Plataformas Costa Afuera" (NRF-041-PEMEX-2007)
  - "Diseño de Accesorios Estructurales para Plataformas Marinas" (NRF-173-PEMEX-2009)
  - "Helipuertos de Acero en Plataformas Marinas Fijas" (NRF-174-PEMEX-2007)
  - "Acero Estructural para Plataformas Marinas" (NRF-175-PEMEX-2007)
  
- **PRÁCTICAS RECOMENDADAS PARA LA PLANEACIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PLATAFORMAS MARINAS FIJAS**
  - Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. (API RP 2A-WSD)
  
- **AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS)**
  
- **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM)**
  
- **IMCA - INSTITUTO MEXICANO DE LA CONSTRUCCIÓN EN ACERO**

Todas las plataformas marinas y líneas submarinas que existen en la Sonda de Campeche para la explotación de yacimientos petroleros, cuyo objetivo es la obtención de aceite crudo y gas fueron diseñadas con la normatividad que marca el protocolo del American Petroleum Institute (API), que es la práctica recomendada para la planeación, diseño, fabricación, transporte, instalación, mantenimiento y revisión de esas estructuras marinas, apegándose a los parámetros y consideraciones que establece PEMEX en sus normas.

# Capítulo 3

## 3. MODELADO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS TIPO JACKET

Para el modelado y análisis estructural de plataformas marinas tipo Jacket en aguas someras, se requiere considerar diversos puntos que influyen en una estructura de este tipo, partiendo desde la conceptualización geométrica de la estructura de acuerdo a las necesidades de la infraestructura que albergará, la función que tendrá, así como el sitio en donde se instalará, posteriormente se considerarán los efectos de las cargas gravitacionales y ambientales a la que estará sujeta la estructura a fin de obtener un diseño optimo, buscando obtener con los menores recursos económicos, estructuras seguras y eficientes.

En este capítulo se abordarán los puntos fundamentales a tomar en cuenta para el modelado y análisis de este tipo de estructuras, en una primera etapa se indicará el procedimiento de análisis de forma general y posteriormente se describirá de manera particular el caso en estudio, del cual se desglosaran los puntos específicos que son necesarios de analizar y las consideraciones para ser modelados en el programa SACS.

### 3.1 BASES DE DISEÑO

El principio de todo diseño estructural son las bases de diseño, documento en el que se definen las características principales de la estructura y los criterios de diseño. Los criterios de diseño por lo general están muy relacionados con los códigos, reglamentos y prácticas que se han desarrollado y se obtienen en la práctica.

Petróleos Mexicanos proporciona a las firmas de ingeniería bases de usuario para la elaboración de un proyecto de una plataforma, así los especialistas de cada disciplina, apoyados en estándares de ingeniería, elaboran anteproyectos de los diferentes sistemas para que posteriormente y en forma coordinada se integren entre sí por áreas, por niveles o módulos debidamente dimensionados.

A grandes rasgos, las bases de usuario se dividen en dos secciones, la información general de la obra y la información técnica de la obra requerida por PEMEX o el contratista, a continuación se enlista parte de la información que contienen las bases de usuario expedidas por PEP.

Información General de la Obra:

- Nombre de la obra.
- Justificación de la obra.
- Lista de requerimientos.
- Descripción general de la obra.
- Localización de las instalaciones.
- Observaciones (alcances de la obra, fechas de requerimiento, responsables del proyecto, etc.).

- Cuadro de firmas de Autorización.
- Control de cambios de la Obra.

Para realizar el análisis estructural de una plataforma marina es necesario contar con la siguiente información técnica de la obra:

- Equipos y sistemas requeridos (equipos dinámicos, de proceso, de medición, sistemas de automatización, de seguridad y control, auxiliares y de telecomunicaciones).
- Configuración estructural de la obra (No. de cubiertas, de piernas, accesorios, etc.).
- Esquemas, croquis y mapas.
- Características de alimentaciones y productos (composición, flujo, calidad, etc.).
- Condiciones ambientales.
- Estudios geofísicos y geotécnicos (estudios de mecánica de suelo y topográficos).
- Requerimientos de certificación.
- Normas y códigos.
- Anexos
- Datos adicionales (relacionados con otras obras, gestión de calidad, datos de operación, etc.).

También deben incluir los servicios requeridos para el proceso y operación de la misma y la flexibilidad en cuanto a sus funciones.

### **3.2 SOFTWARE PARA EL MODELADO DE PLATAFORMAS MARINAS**

Los criterios y consideraciones para el modelado de plataformas marinas tipo Jacket instaladas en aguas someras, serán referidos al programa Structural Analysis Computer System (SACS).

#### **3.2.1 OFFSHORE ANALYSIS AND DESIGN SOFTWARE (ANÁLISIS COSTA AFUERA Y SOFTWARE DE DISEÑO)**

SACS es un conjunto integrado de programas de análisis estructural de elementos finitos, que ofrece de manera integral: diseño, fabricación, instalación, manejo de operaciones y mantenimiento de estructuras costa afuera, principalmente plataformas petroleras.

El programa SACS proporciona a los ingenieros especialistas en estructuras costa afuera capacidades de diseño que mejoran la seguridad y el funcionamiento de la estructura a utilizar, así como minimizar los riesgos y los costos de una amplia gama de estructuras. SACS es un programa especializado para el análisis de cualquier proyecto costa afuera, por ejemplo: análisis estructural no-lineal, análisis de respuesta dinámica debido al viento, corriente marina, oleaje y a las cargas sísmicas, además cuenta con análisis de alta gama, especial para cargas accidentales graves como la explosión dinámica, impacto por buque y el colapso estructural.

Este programa puede modelar estructuras con todos los perfiles integrados en su biblioteca o cuenta con la posibilidad de crear perfiles armados de acuerdo a las necesidades del diseñador; los perfiles más comunes utilizados en SACS son perfiles tubulares concéntricos, vigas "IR", mástiles, largueros "CE" y ángulos "LE", conos, acartelamientos, etc., en resumen, maneja la mayoría de los perfiles de acero con los que diseñan los Pilotes, Superestructura y Subestructura tipo Jacket que conforman una plataforma petrolera en el Golfo de México.

La capacidad de apegarse a los códigos específicos de diseño de la ingeniería costa afuera internacionales y a las normas reconocidas mundialmente (API RP 2A-WSD), hace del software SACS una de las herramientas más utilizadas en este ámbito, además su capacidad es reforzada por funcionar en un sistema operativo de 64 bits, con velocidad del procesador Multi-core y la capacidad de reutilizar datos con otras aplicaciones como AutoCad o Staad Pro.

El programa tiene la capacidad de realizar diversos análisis de acuerdo con la respuesta estructural requerida, considerando así los efectos estáticos, dinámicos y no-lineales necesarios para modelar de forma aproximada el comportamiento real de la plataforma.

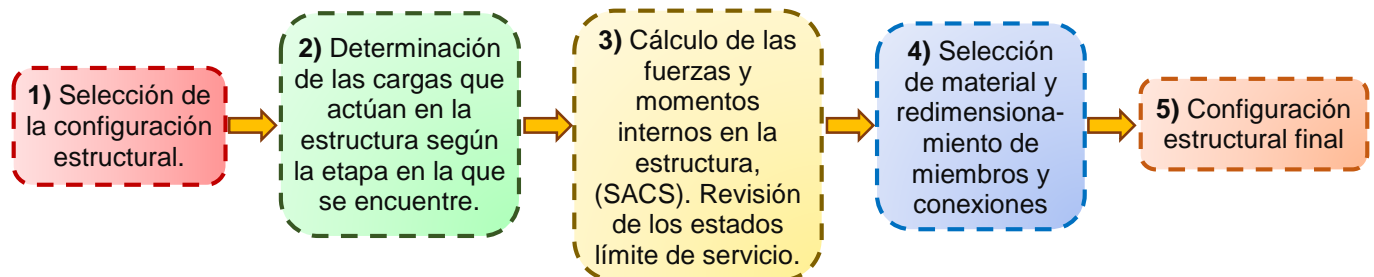
Además cuenta con la capacidad de revisar la resistencia de los elementos por diversas especificaciones de diseño estructural ante los esfuerzos inducidos por las diferentes consideraciones de carga, por lo que cada uno de ellos deberá ser congruente con las condiciones de carga y frontera correspondiente a cada una de las etapas que se represente.

El programa de cómputo, modela todos los elementos estructurales principales como son las columnas, pilotes, elementos de arriostramiento horizontal y vertical (puntales), así como el sistema de piso conformado con vigas de secciones universales o armadas. Dichos componentes se pueden visualizar dentro de un espacio tridimensional (3D).

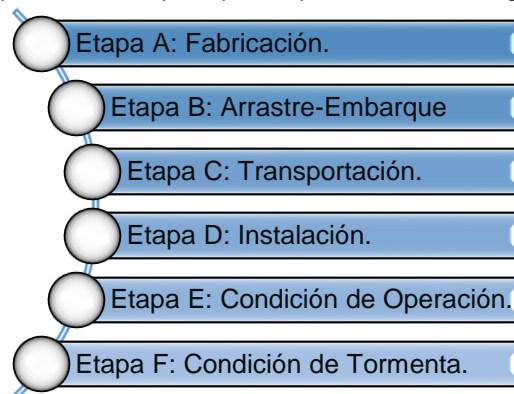
### 3.3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Para el diseño estructural de plataformas tipo Jacket, se ha determinado seguir un procedimiento, el cual ha surgido de la experiencia, estos pasos a seguir son iniciados con una solicitud del activo o estancia encargada de explotar el campo petrolero.

El procedimiento que rige el diseño de una estructura para las profundidades existentes en la Sonda de Campeche (aguas someras), consiste básicamente en 5 pasos principales:



Los pasos del 2 al 4 se ejecutan para las 6 etapas que se presentan a lo largo de la vida útil.



Se recomienda que los elementos estructurales tubulares de la plataforma se diseñen de acuerdo con el Reglamento Norteamericano API RP 2A-WSD (21ª Edición); y los demás elementos estructurales como perfiles "IR" y vigas armadas, con el reglamento IMCA o AISC.

En ingeniería civil, el ámbito del análisis y diseño estructural abarca diversas actividades convirtiéndose en un proceso en donde una de las finalidades principales es la de crear una estructura capaz y funcional de acuerdo a las necesidades por la que es realizada, el proceso estructural es un conjunto de elementos que se combinan en forma ordenada para cumplir con determinada función, a continuación se presenta el proceso de análisis y diseño para plataformas empleado por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP).



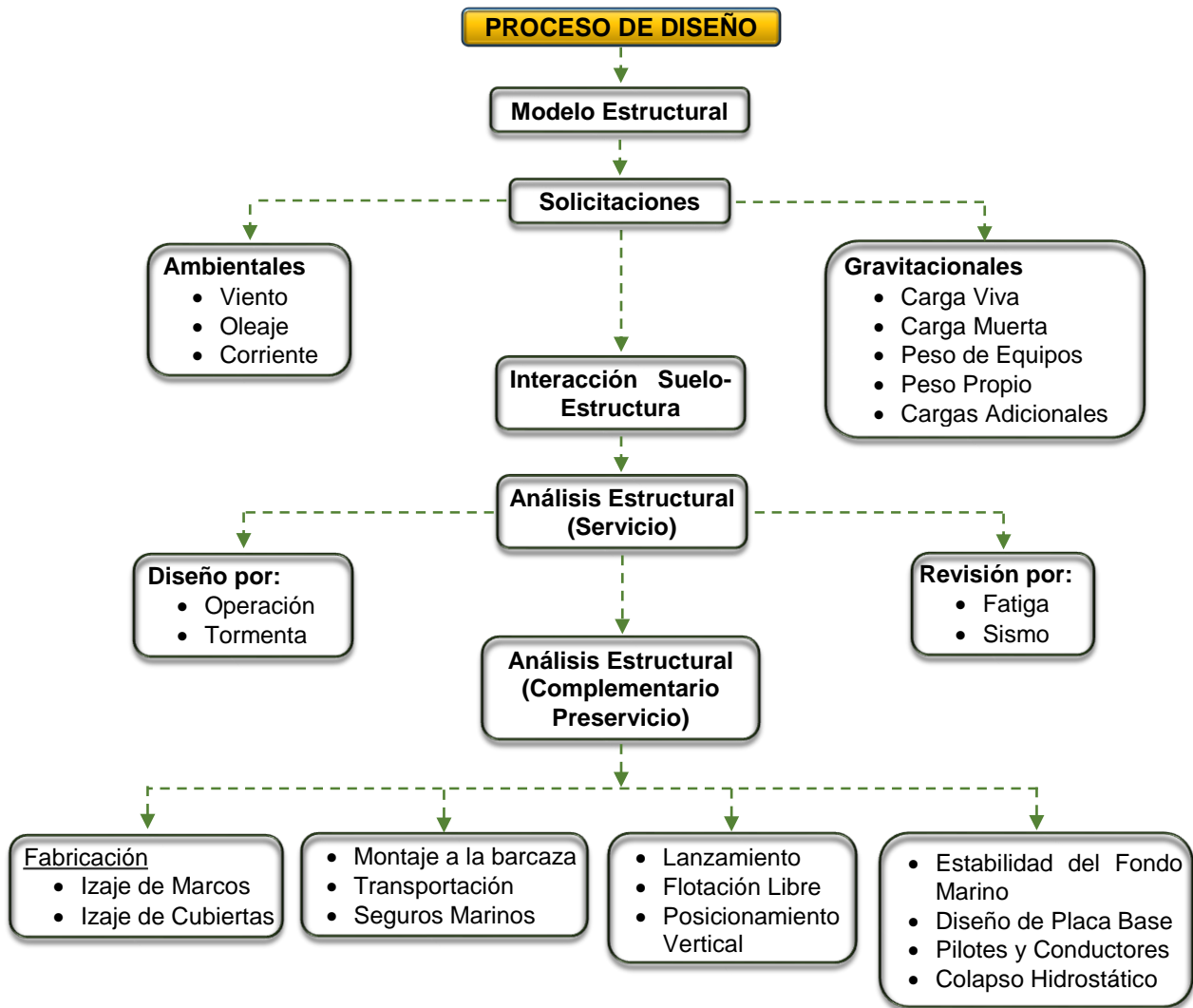


Fig. 3.1. Proceso de análisis y diseño de plataformas marinas empleado por el IMP.

### 3.4 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

Durante el diseño de una estructura de esta naturaleza deben considerarse todos los tipos de carga probable, así como sus combinaciones más desfavorables. Podría pensarse que las cargas que se presentan en la condición de oleaje de tormenta rigen por sí solas el diseño global de la estructura, o aquellas presentes en la condición de transportación, sin embargo no es así, puesto que el diseño global de la estructura es regido por las cargas que se habrán de presentar en todas y cada una de las condiciones por las que pasará la estructura a lo largo de su vida (Caballero, 2014).

- **Condición Servicio:** Es aquella que se define cuando la plataforma queda fija en el sitio de instalación, se encuentra habitada y brindando el servicio para la cual fue diseñada. Sus condiciones principales son: operación, tormenta, sismo y fatiga.
- **Condición Temporal:** Son aquellas situaciones que se presentan de manera temporal en la plataforma: fabricación, arrastre-embarque, transportación de la Sub y Superestructura, lanzamiento al mar de la Subestructura, izaje de la Superestructura e hincado de pilotes.

Las estructuras deben analizarse y diseñarse para todas las condiciones de carga que se presentan durante toda su vida, estos análisis son:

- ✓ Análisis y diseño por operación y tormenta.
- ✓ Análisis sísmico a nivel de resistencia.
- ✓ Análisis espectral de fatiga.
- ✓ Análisis de embarque.
- ✓ Análisis de arrastre de la superestructura.
- ✓ Análisis de izaje.
- ✓ Análisis de flotación.
- ✓ Análisis de estabilidad durante instalación.
- ✓ Análisis de abandono seguro de la subestructura.

### 3.5 SELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL (CASO EN ESTUDIO)

Se comienza realizando una configuración estructural de la plataforma, lo que viene siendo una propuesta del tamaño de los elementos y la posición de los mismos; los elementos propuestos en un inicio por mencionar algunos son: pilotes, piernas, arriostramientos horizontales de la subestructura, columnas de la superestructura, traveses, arriostramientos de la superestructura, elementos del atracadero y protecciones de las piernas.

En el punto 3.6 se presenta un extracto de las bases de diseño del caso en estudio, a partir de las cuales se propondrá la geometría de la estructura.

#### 3.5.1 MATERIALES

Los materiales a utilizar, específicamente el acero deberá cumplir con la norma del American Society For Testing and Materials (ASTM) (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales), donde se establecerá la resistencia del acero a utilizar. En la práctica se utilizan los siguientes tipos de acero.



**Acero A36** ( $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$ )

•  $F_y = 2,530 \text{ kg/cm}^2$

•  $F_u = 4,080 \text{ kg/cm}^2$

• Acero utilizado prácticamente en todos los elementos de la estructura a excepción de las conexiones.



**Acero A572** ( $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$ )

•  $F_y = 3,515 \text{ kg/cm}^2$

•  $F_u = 4,570 \text{ kg/cm}^2$

• Acero utilizado para las conexiones.

Para el análisis de este trabajo se modelará y diseñará una plataforma tipo octápodo, con 3 cubiertas, ubicada en la Sonda de Campeche, con un tirante de 78.638 m. A continuación se muestra la configuración inicial propuesta para la plataforma tipo Jacket (cimentación, subestructura, superestructura y accesorios).

### 3.6 DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA MODELADA (CASO EN ESTUDIO)

Plataforma de Perforación Tipo Octápodo.

La **superestructura** contará con tres cubiertas, localizadas en los niveles +19.10 m, +32.16 m y +39.83 m, estructuradas con traveses principales transversal y longitudinal, traveses intermedias transversales, traveses perimetrales y largueros que forman el sistema de piso. Las tres cubiertas de la superestructura estarán soportadas por 8 columnas.

La **subestructura** contara con ocho columnas (piernas) de acero estructural dispuestas en cuatro marcos transversales y dos longitudinales, las columnas de las esquinas contarán con una doble pendiente 1:8 y las columnas intermedias solo tendrán pendiente simple de 1:8.

La **cimentación** contará con ocho pilotes, los cuales serán de sección tubular de punta abierta. Adicionalmente a la longitud de diseño se considerarán 6.96 m (20'), en cada pilote, por sub hincado o sobre hincado.

El **punto de trabajo** se ubicara en la elevación +7.620 m, en este punto se realiza la conexión de los pilotes con las columnas de la superestructura, se utilizarán conos de transición para llevar a cabo la conexión entre ambos componentes estructurales.

La subestructura contara con 6 **plantas de arriostamiento horizontal**, localizadas en las elevaciones -78.638 m, -58.528 m, -41.528 m, -25.018 m, -8.498 m y +6.098 m.

**Espacio anular pierna-pilote y placas centradoras.** Los pilotes se diseñaran de tal forma que se mantenga un espacio anular mínimo, entre la pierna y el pilote mantener 25.4 mm (1") de holgura, a fin de alojar placas centradoras de 12.7 mm (1/2") de espesor con una holgura de 12.7 mm (1/2").

**Conexión subestructura-pilote.** Se utilizaran placas de relleno para conectar cada pilote a la subestructura, la conexión subestructura-pilote se realizará en la elevación +7.320 m.

**Tolerancia por corrosión.** Para tomar en cuenta la posible pérdida de material en los elementos estructurales por efecto de la corrosión, se recomienda de acuerdo a la National Association of Corrosion Engineers (NACE Standard RP-01-76 "Control of Corrosion on Steel, Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production") que en el diseño estructural para el control de la corrosión en la zona de salpicadura (esta es la zona de una plataforma que debido a la influencia de las mareas, vientos y oleaje, esta alternativamente dentro y fuera del agua, se excluyen de esta zona las superficies que son mojadas sólo durante las grandes tormentas, en el Golfo de México la zona de salpicadura normalmente cubre un intervalo de aproximadamente 2 m), sea añadido un espesor suficiente, el cual será material perdido debido a la corrosión durante la vida útil de la plataforma; en el Golfo de México típicamente se recomienda añadir 0.50 a 0.75 in (13 a 19 mm), esto se proporcionará dando mayor espesor a los elementos tubulares.

No obstante que el espesor real no participa en lo referente a esfuerzos, el peso real de los elementos si será considerado como carga.

**Protección catódica.** La zona sumergida de la subestructura se protegerá de la corrosión con ánodos de sacrificio, de aluminio galvalum iii tipo H725 (peso neto 725 lbs de aluminio).

**Accesorios estructurales.** Se considera el peso de toda la estructura miscelánea como: pasillos, escaleras, barandales, rejilla, soportería, etc.

**Atracadero.** Se considerara un atracadero con 19.37 m de longitud, estará conectado a las piernas. Se diseñara a base de elementos tubulares protegido con tiras de hule amortiguador comercial y de elementos frontales rellenos de concreto  $f'c = 100 \text{ kg/cm}^2$ .

**Defensas de piernas.** Se instalarán defensas de piernas de esquina, se localizarán a 45 grados con respecto a cualquiera de los ejes de la plataforma.

**Placa base:** Se instalaran dos placas base, localizadas en la última planta de arriostamiento (elev. -78.638 m).

**Helipuerto.** Se considera colocar un helipuerto integrado a nivel de cubierta (elevación 39.830 m).

A continuaci3n se muestran los cortes transversal y longitudinal de la estructura a modelar (caso en estudio).

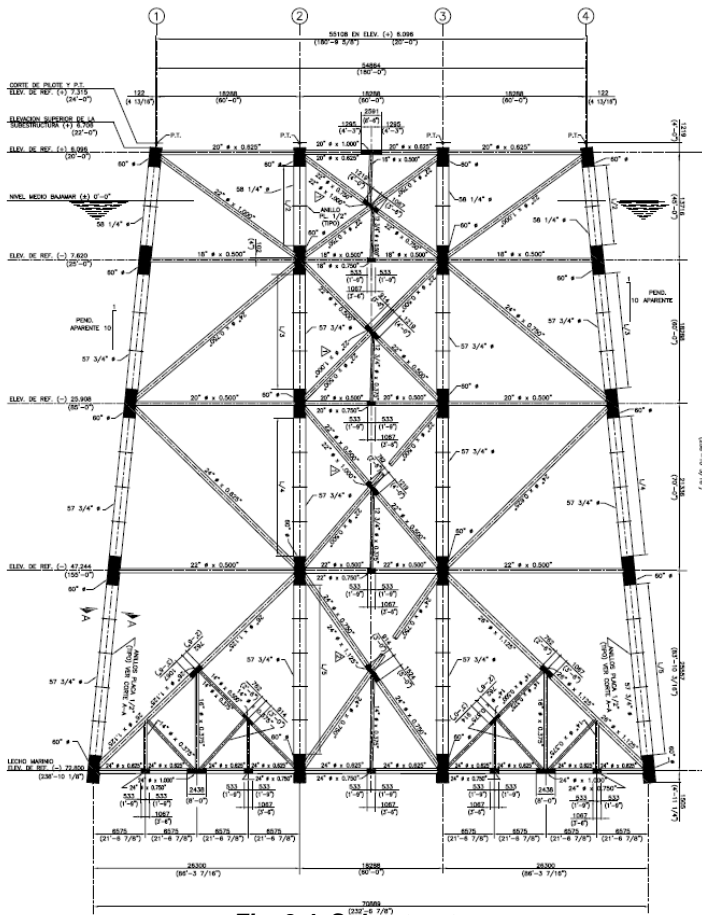


Fig. 3.4. Subestructura

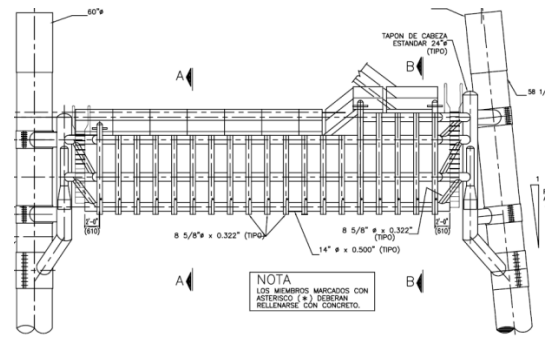


Fig. 3.2. Accesorios (atracadero)

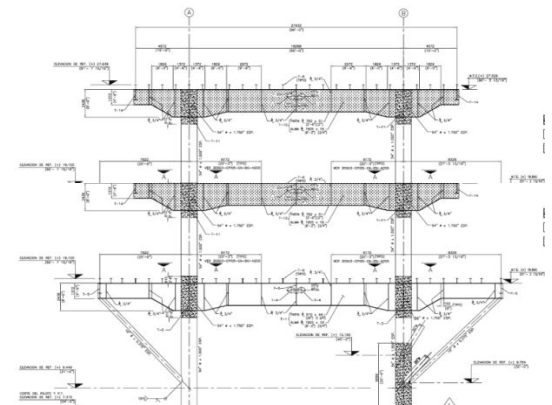


Fig. 3.3. Superestructura

Algunas consideraciones a tomar en cuenta cuando se realiza el predimensionamiento de los elementos y elevaciones de las cubiertas, son las que se especifican en la norma NRF-003-PEMEX-2007, en la cual se establece que la elevaci3n m3nima de la cubierta inferior especificada en la tabla 8.3.1 de esa norma sustituye a la recomendaci3n del API-RP-2A (WSD), 21<sup>a</sup> edici3n, y corresponde a la elevaci3n del pa1o superior de las vigas del sistema de piso de la cubierta inferior de la plataforma. La elevaci3n m3nima de la cubierta inferior ser3 de 19.10 m para tirantes de aguas mayores que 25 m, y que 15.85 m para tirantes menores.

### 3.6.1 GEOMETRÍA DE LAS SECCIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Al realizar la modelación en el programa SACS, se requiere hacer el trazo de los elementos y definir todas las secciones que utilizarán los elementos de la cimentación, subestructura, superestructura y accesorios, así mismo en este proceso se definen las características de los materiales de cada sección.


Se recomienda realizar un listado en un archivo externo al modelo de todas las secciones a utilizar, colocándoles un ID para identificarlas en el programa SACS, con un máximo de 4 caracteres.

A continuación se presentan algunas características de las secciones utilizadas en el modelo de este trabajo.


**Tabla 3.1. Geometría de las secciones de los elementos estructurales de la cimentación y subestructura.**

No.	ID en SACS	Elemento	Geometría	Diámetro		Espesor		Acero	
				(in)	(cm)	(in)	(cm)	Grado	(kg/cm <sup>2</sup> )
1	O-1	Pilotes	Circular	60.00	152.40	2.00	5.08	A-36	2,530
2	O-2	Piernas	Circular	63.00	160.02	1.50	3.81	A-36	2,530
3	O-3	Contraventeo de Ejes A y B, tramos (1-2 y 2-3)	Circular	25.00	63.50	1.00	2.54	A-36	2,530
4	O-4	Contraventeo de Ejes A y B, tramo (2-3)	Circular	20.00	50.80	0.50	1.27	A-36	2,530
5	O-5	Contraventeo de Ejes 1 y 4, tramos (A-B)	Circular	22.00	55.88	0.80	2.03	A-36	2,530
6	O-6	Contraventeo de Ejes 2 y 3, tramos (A-B)	Circular	26.00	66.04	0.88	2.22	A-36	2,530
7	O-7	Elementos Adiciolanesde los Contraventeos de los Ejes 2 y 3, tramos (A-B). Y ejes A y B	Circular	24.00	60.96	0.50	1.27	A-36	2,530
8	O-8	Elementos Horizontales de los Ejes A, B, 1, 2, 3 y 4 (Todos los Pisos).	Circular	24.00	60.96	0.50	1.27	A-36	2,530
9	O-09	Arrostramientos Horizontales en Elev. -78.638	Circular	24.00	60.96	0.50	1.27	A-36	2,530
10	O-10	Contraventeos Horizontales (Todos los Pisos)	Circular	24.00	60.96	0.50	1.27	A-36	2,530

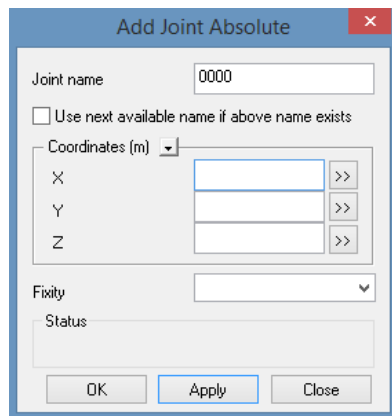
### 3.6.2 DESARROLLO DEL MODELO GEOMÉTRICO EN SACS

A continuación se describirá el procedimiento para generar el modelo geométrico en el programa SACS de una plataforma marina tipo Jacket, con ayuda del módulo Modeler  del programa SACS. El cual consiste en hacer el trazo de los nodos y elementos barra, definiendo las propiedades de las secciones, para lo cual se realizan los siguientes pasos:

Se recomienda comenzar trazando los nodos y barras de la subestructura y cimentación, después la superestructura y por último los accesorios de la plataforma.

Para definir los **nodos** abrimos el desplegado del Menú Joint, en donde seleccionaremos la opción Add. 


Al abrir la opción Add, se despliega la siguiente ventana, con el cual se generan los nodos necesarios para modelar la estructura.



Nombre del Nodo

Coordenadas donde se localiza el nodo.

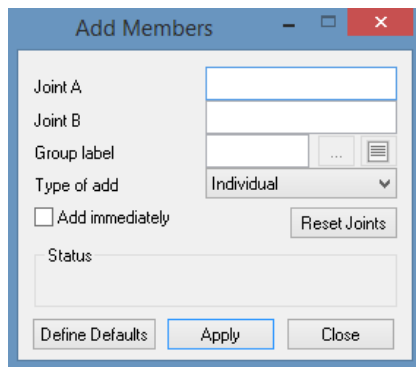
Tipo de nodo; empotrado, libre, articulado, etc.

Se recomienda colocar inicialmente un nodo en el origen con coordenadas (0, 0, 0) y posteriormente a partir de este colocar los demás referenciados al del origen (con el comando Relative del Menu Joint).  Relative

Una vez que tenemos los nodos en donde conectaran las barras hacemos el trazado de las mismas, para lo cual en el Menu Member, ingresamos a la opción Add.



Una vez que abrimos la opción Add, nos despliega la siguiente ventana:



- >▶ Nodo inicial de la barra.
- >▶ Nodo final de la barra.
- >▶ En esta opción se define el grupo al cual pertenece el elemento; al modelar es necesario definir grupos de los elementos a partir de los cuales se asigna la geometría y material.
- >▶ Al desplegar esta opción obtenemos:
  - Individual: Para generar barra por barra.
  - String: Sirve para generar varias barras consecutivamente.

Un grupo de elementos posee la característica de que las secciones cuentan con la misma geometría y material.

En la modelación es recomendable al momento de generar los elementos barra, se hagan en una sola dirección, es decir, las barras horizontales se realicen de izquierda a derecha y para los elementos verticales de abajo hacia arriba, esto es para que las cargas actuantes en dichos elementos tengan la misma dirección.

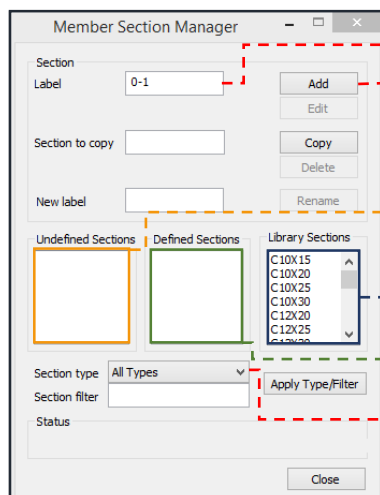
Los pilotes modelados tienen una holgura entre el diámetro interior de la pierna y el diámetro exterior del pilote, en la construcción esta holgura se elimina colocando placas que dan arriostramiento de la pierna hacia el pilote, con lo cual se logra que el pilote trabaje a carga axial, en el modelo esto se representa con el comando Wish bone, el cual tiene la función de transmitir la carga axial entre elementos.

A partir de que generamos el trazo de los elementos de la plataforma en el modelo y asignamos a cada elemento el grupo al cual pertenece, se procede a asignar el tipo de geometría y material a cada grupo.

En primera instancia se declaran las **secciones** que se utilizaran en la modelación, esto se realiza a partir del Menu Property en donde ingresamos a la opción Member Section:



Al abrir el comando Member Section, nos despliega la siguiente ventana, en la cual nos permite el programa agregar las secciones a utilizar de la siguiente manera:



- >▶ 1) Se coloca el nombre de la sección (máximo 4 caracteres)
- >▶ 2) Opción para agregar la sección: despliega la ventana que se muestra en la siguiente imagen, en donde se asignan las propiedades de la sección.
- >▶ Cuadro en donde se presentan las secciones que han sido declaradas y no se han asignado a ningún grupo de elementos.
- >▶ Librería de secciones que tiene precargadas el programa SACS.
- >▶ Cuadro en donde se presentan las secciones que han sido declaradas y asignadas a algún grupo de elementos.
- >▶ En Section type, se despliegan todos los tipos de secciones que se pueden ingresar (tubo, perfil I, perfil C, etc.).

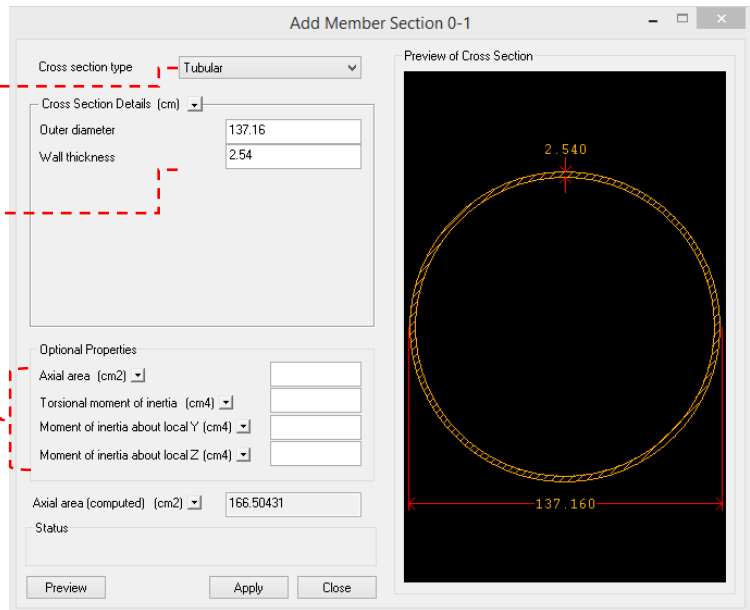



# Crterios y Consideraciones para el Modelado de Plataformas Marinas Tipo Jacket, para Tirantes de Aguas Someras

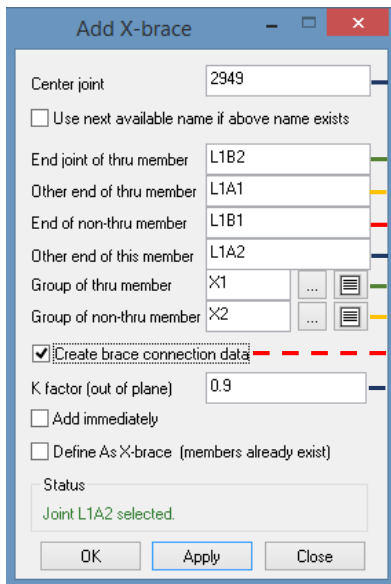
Cross section type, es un desplegado en donde nos muestra todas las geometrías de secciones que podemos utilizar.

Apartado en el cual damos las dimensiones de la sección, estos varían para cada geometría de sección, según se elija.

Apartado para datos opcionales que se deseen agregar, en algunos casos se incorporan secciones las cuales deseamos que tengan menor área o momento de inercia según sea el caso.



Para aquellos elementos de la subestructura o superestructura en donde se requiera colocar elementos en "X", se deberán ingresar con el comando "X-Brace"  X Brace, el cual lo encontramos en el Menu Member, y se aplica de la siguiente manera:



- ➡ Asignar nombre del nodo donde cruzaran los elementos.
- ➡ Nodo 1 del extremo de la barra que atraviesa la conexión.
- ➡ Nodo 2 del extremo de la barra que atraviesa la conexión.
- ➡ Nodo 1 del extremo de la barra que no atraviesa la conexión.
- ➡ Nodo 2 del extremo de la barra que no atraviesa la conexión.
- ➡ Grupo al que pertenece la barra que atraviesa la conexión.
- ➡ Grupo al que pertenece la barra que no atraviesa la conexión.
- ➡ Crear datos de los elementos que se conectan.
- ➡ Para los elementos X el API recomienda usar un factor de longitud efectiva igual a 0.90

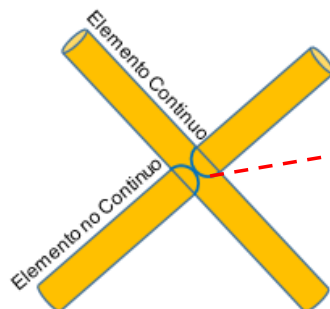



Fig. 3.5. Diagonales de la subestructura en X

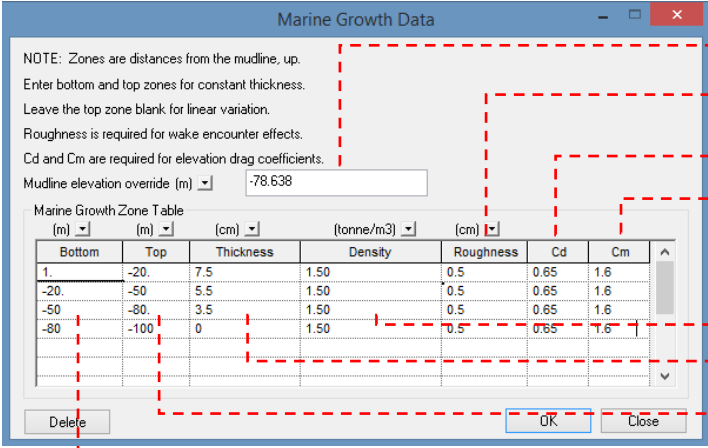
### 3.6.3 ESPESOR DEL CRECIMIENTO MARINO

El espesor del crecimiento marino se modela de acuerdo con lo especificado en la Tabla 8.3.1.5 "Crecimiento Marino Recomendado para Diseo", de la norma de referencia NRF-003- PEMEX-2007, y debe aplicarse en todos los elementos estructurales, conductores, ductos ascendentes y accesorios que se ubiquen total o parcialmente entre las elevaciones referidas.

Para ingresar el crecimiento marino en el programa SACS se realizan los siguientes pasos:

Ingresamos el Menu Environment, en donde abrimos la opcin Marine Growth.  Marine Growth

Al abrir la opcin Marine Growth se despliega la siguiente ventana:



NOTE: Zones are distances from the mudline, up.  
Enter bottom and top zones for constant thickness.  
Leave the top zone blank for linear variation.  
Roughness is required for wake encounter effects.  
Cd and Cm are required for elevation drag coefficients.

Mudline elevation override (m)

Bottom (m)	Top (m)	Thickness (cm)	Density (tonne/m3)	Roughness (cm)	Cd	Cm
1.	-20.	7.5	1.50	0.5	0.65	1.6
-20.	-50.	5.5	1.50	0.5	0.65	1.6
-50.	-80.	3.5	1.50	0.5	0.65	1.6
-80.	-100.	0	1.50	0.5	0.65	1.6

Buttons: Delete, OK, Close

- Elevación del lecho marino.
- Rugosidad del crecimiento marino, este valor se refiere a la profundidad de los surcos que tiene el mismo
- Coeficiente de arrastre.
- Coeficiente de inercia.
- Densidad del crecimiento marino.
- Espesor del crecimiento marino.
- Elevación inferior del intervalo del crecimiento marino, respecto al N.M.M.
- Elevación superior del intervalo del crecimiento marino, respecto al N.M.M.

El crecimiento marino es particular de cada sitio y debe modelarse considerando el promedio de las mediciones registradas en los últimos 5 reportes de inspección anual para diferentes rangos de elevación. Para los casos en los que no se cuenta con esta información, deben tomarse los valores mostrados en la tabla 8.3.1.5 de la NRF-003-PEMEX-2007.

**Tabla 3.2. Espesor de crecimiento marino recomendado para diseo.**

Intervalo de Elevación Respetto al NMM (m)	Espesor de Crecimiento Marino Duro (cm)
+ 1.0 a -20.0	7.50
- 20.0 a -50.0	5.50
- 50.0 a -80.0	3.50
- 80.0 a -100.0	0.00

### 3.6.4 FACTOR DE LONGITUD EFECTIVA

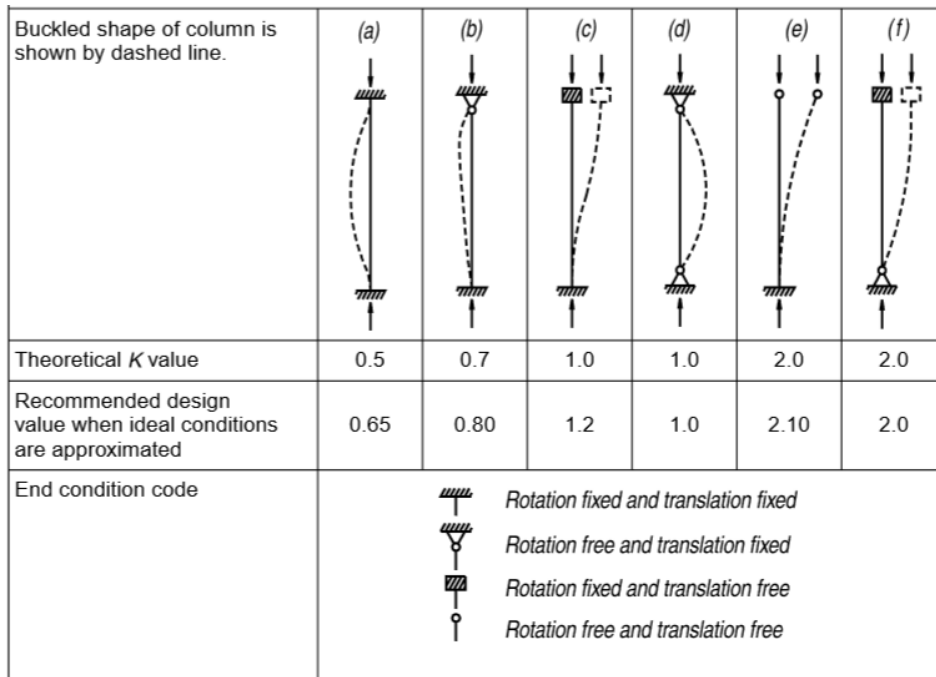
Las longitudes efectivas se refieren a las longitudes sin arriostramientos del elemento y se denomina KL, para la plataforma así como para otro tipo de estructuras se asigna el factor de longitud efectiva "K" a los elementos tubulares que trabajan a compresión de la subestructura y de la superestructura de acuerdo con lo indicado en el AISC en México se puede usar el manual del IMCA, donde la tabla C-C2.1 del AISC (Fig. 3.6.) indica los valores de K dependiendo del tipo de apoyo en los extremos; este manual presenta los factores de longitud efectiva recomendados cuando se tienen condiciones ideales aproximadas, proporcionando dos grupos de valores de K, uno de ellos es el valor teórico y el otro el valor recomendado para diseo, basado en el hecho de que no son posibles las condiciones de articulación y empotramiento perfecto. A su vez estos manuales dan como otra herramienta para la obtención del factor K los nomogramas, uno de ellos se desarrolló para columnas sin desplazamientos laterales y el otro para columnas con desplazamientos laterales.



Por otra parte en las recomendaciones prácticas API-RP 2A-WSD, 21ª edición se menciona que para las plataformas marinas se pueden usar los valores mostrados en la Tabla 3.3:

**Tabla 3.3. Factores K recomendados por el American Petroleum Institute.**

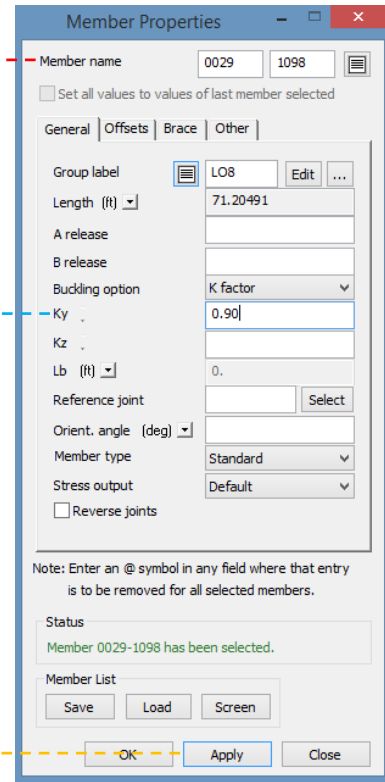
ELEMENTO TUBULAR	FACTORES $K_Y$ y $K_Z$
Columnas de la Subestructura	1.00
Diagonales Principales en "X"	0.90
Elementos Tubulares Horizontales	0.80
Diagonales Secundarias	0.70



**Fig. 3.6. Valores teóricos y recomendados por el AISC, de acuerdo al tipo de conexión del elemento.**

El factor de longitud efectiva se puede ingresar al modelo desde la opción Properties Members que se ubica en el Menú Member, de la siguiente manera:

- 1) Se selecciona el comando Member Properties, el cual despliega la ventana que se muestra del lado derecho.
- 2) Se seleccionan los elementos barra a los cuales se les aplicara el factor K.
- 3) Se aplica el factor ya sea en dirección Y o Z.
- 4) Apply, para aceptar los cambios.



### 3.6.5 RESTRICCIONES EN LOS NODOS DE LA ESTRUCTURA PARA ANÁLISIS EN SITIO

Las restricciones nodales de la plataforma para los análisis en sitio (operación y tormenta), se considerarán de la siguiente manera:

La Tabla 3.4 nos muestra algunos tipos de conexiones que podemos tener:

Para un análisis estático los nodos de la subestructura y superestructura serán libre de restricciones.

En el caso de la cimentación se les colocará a los pilotes la condición PILEHD.

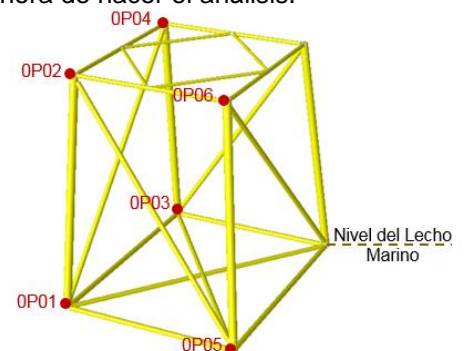
**Tabla 3.4. Restricciones en las conexiones.**

		RESTRICCIONES NODALES					
		TRASLACIÓN			ROTACIÓN		
		F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>
OPERACIÓN Y TORMENTA	1	0	0	0	0	0	0
	2	1	1	1	1	1	1
	3	2	2	2	2	2	2
	4	PILEHD					
	5	FIXED					
Tipo de Análisis: Estático		1 = Restringido			0 = Liberado		
Tipo de Análisis: Dinámico		2 = Restringido			0 = Liberado		

A continuación se presenta un ejemplo de las restricciones nodales de los pilotes que se alojan concéntricamente en el Jacket; no tendrán restricción de traslación ni en rotación, ya que el trabajo del Jacket es darle estas restricciones a los pilotes, sin embargo los nodos que se encuentran al nivel del lecho marino se les asignará la opción PILEHD, con esto serán reconocidos como pilotes a la hora de hacer el análisis.

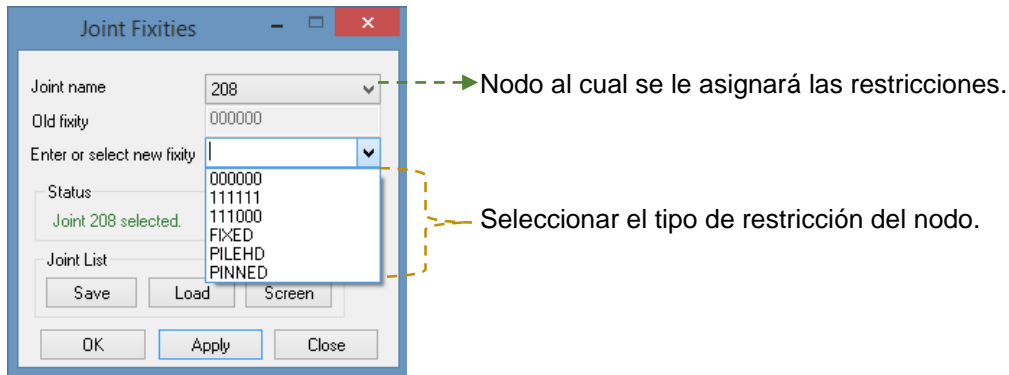
**Tabla 3.5. Ejemplo de las restricciones en los nodos de los pilotes.**

CONDICIÓN	NODO	CIMENTACIÓN					
		RESTRICCIONES NODALES					
		TRASLACIÓN			ROTACIÓN		
		F <sub>x</sub>	F <sub>y</sub>	F <sub>z</sub>	M <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>
OPERACIÓN Y TORMENTA	0P01	PILEHD					
	0P02	0	0	0	0	0	0
	0P03	PILEHD					
	0P04	0	0	0	0	0	0
	0P05	PILEHD					
	0P06	0	0	0	0	0	0
		1 = Restringido			0 = Liberado		



**Fig. 3.7. Ejemplo de las restricciones en los nodos de la subestructura y cimentación.**

Para modelar estas restricciones a cada uno de los nodos de la plataforma en el programa SACS, se utilizará el comando **Fixities**, que se encuentra en el **Menu Joint**.



### 3.7 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS QUE ACTÚAN EN LA ESTRUCTURA EN CONDICIONES DE OPERACIÓN Y TORMENTA

Se pueden clasificar en dos tipos de cargas las que afectan directamente a las plataformas, cargas gravitacionales y cargas ambientales, regularmente éstas cargas se emplean en el análisis para dos condiciones de carga: **operación y tormenta**.

Se dice condición de operación cuando la plataforma se encuentra habitada y dando el servicio por la cual fue diseñada y condiciones climatológicas normales; condición de tormenta es cuando las condiciones climatológicas son de mal tiempo (tormenta/huracán) por lo tanto sus equipos dejan de funcionar y por reglamentación debe desalojarse.

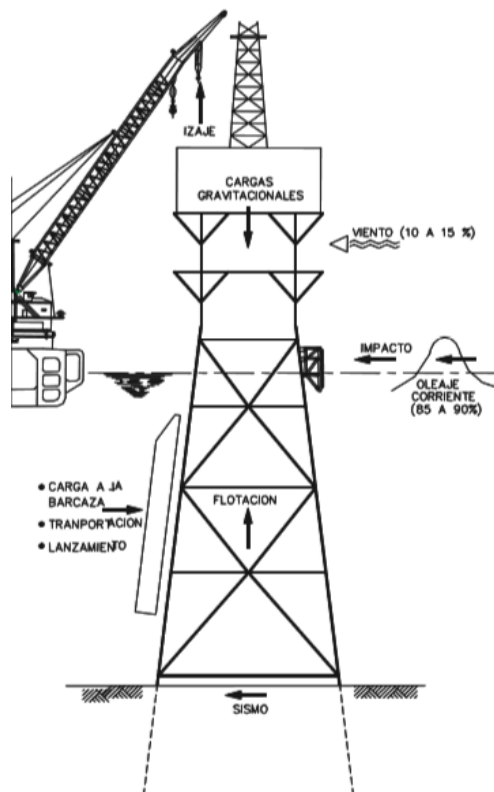


Fig. 3.8. Cargas que actúan en una plataforma tipo Jacket.


### 3.7.1 CARGAS GRAVITACIONALES

Las cargas gravitacionales que se consideran actuando en una plataforma marina, están integradas dependiendo su permanencia en: peso propio, carga muerta, carga de equipos, carga viva y tuberías.

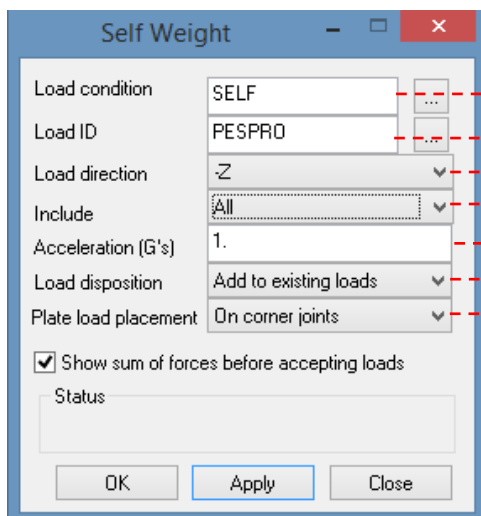
#### PESO PROPIO DE LA ESTRUCTURA (PP)

El peso propio se integra por el peso de los elementos principales y secundarios que conforman la estructura (subestructura, superestructura, pilotes y accesorios), los cuales contribuyen en la rigidez y resistencia del sistema estructural. El peso es determinado por medio de un programa de computo (SACS), con base en las propiedades geométricas de los elementos que integran la estructura, normalmente se considera una densidad del acero de 7,850 (kg/m<sup>3</sup>).

Los pasos a seguir para definir la condición de carga del peso propio en el programa SACS son los siguientes:

En el desplegado del Menú Load, elegimos la opción Self Weight  Self Weight

Una vez que elegimos la opción Self Weight, nos será desplegada la siguiente ventana:



Colocar ID de la Condición de Carga, la cual puede ser conformada por varias cargas.

Colocar ID de la carga que conforma a la Condición de Carga.

Dirección de la carga, -Z (dirección de la gravedad).

Colocar la opción "All", para que esta condición de carga se aplique a todos los elementos de la cimentación, subestructura, superestructura.

Número de veces que se aplicará la aceleración de la gravedad, asignar la unidad "1".

En el caso de tener varias cargas en la Condición de Carga, esta opción nos permite agregar a las existentes o suplirlas, para este caso se utiliza "Add to existing loads".

Esta opción nos permite indicar dónde queremos que se concentre el peso de las placas, ya sea en las esquinas de las uniones o en el centroide, se recomienda utilizar en las esquinas para que haya una distribución de carga.

#### CARGA MUERTA (CM)

En la idealización de una plataforma resulta casi imposible modelar todos los elementos de los cuales estará conformada. Todos aquellos elementos que no se contemplan dentro de la condición de peso propio de la estructura (modelado en el programa) y que son de carácter permanente, son tomados en cuenta como cargas muertas. Dentro de estas cargas se encuentran, sistemas de piso, placas base, barandales, escaleras, etc. Su peso es calculado haciendo una bajada de cargas gravitacionales y se ingresa al programa como carga uniformemente distribuida.

Realizando el análisis de bajadas de cargas correspondiente se obtiene el peso de la carga muerta, para este caso se obtuvo lo siguiente:

Rejilla, placa base, barandales, escaleras y accesorios de la plataforma no modelados; CM = 100 kg/m<sup>2</sup>.

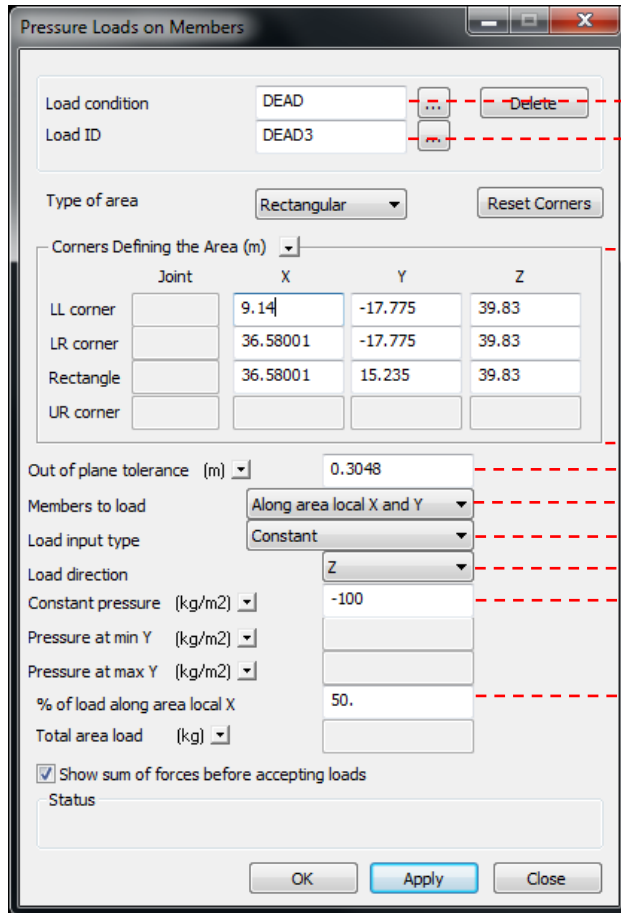
Para modelar la carga muerta en el programa SACS, se ingresará como carga uniformemente distribuida, por unidad de área; el programa a través de áreas tributarias repartirá a las vigas la carga que le corresponda.

Los pasos a seguir para definir la Carga Muerta en el programa SACS son los siguientes:

En el desplegado del Menú Load, elegimos la opción Member Area



Una vez que elegimos la opción Member Area, nos despliega la siguiente ventana:



Colocar ID de la Condición de Carga, la cual puede ser conformada por varias cargas.

Colocar ID de la carga que conforma a la Condición de Carga

Coordenadas del área en donde se aplicará la carga distribuida.

Tolerancia fuera del plano horizontal; los elementos que se encuentren en este rango se les aplicará la carga distribuida.

Dirección de los elementos que serán cargados, "X", "Y" o "XY".

Opción que nos permite elegir entre carga uniformemente repartida o una carga total que será distribuida.

Dirección en la que actúa la carga.

En esta opción asignamos el valor de la carga uniformemente distribuida, con su respectivo signo que indica la dirección.

Porcentaje de la carga que queremos se aplique en el eje X o el eje Y, dependiendo de dónde se ubiquen los ejes principales.

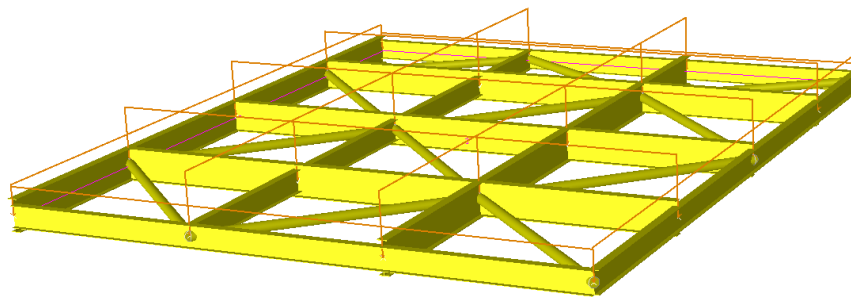


Fig. 3.9. Ejemplo de cubierta en donde se asignó carga muerta; debido a la tolerancia fuera del plano que se indicó, los contraventeos horizontales no fueron cargados.

## PESO DE LOS EQUIPOS (EQUI)

Dependiendo de la disponibilidad y requerimientos, se define el equipo que se empleará debido al servicio que prestará la plataforma.

Para el presente trabajo se tomaron los pesos de una plataforma cuya función es de perforación, a continuación se muestra un extracto del listado de algunos equipos que se ubican en la primer cubierta, la cual se encuentra en la elevación de 19.10 m S.N.M.

**Tabla 3.6. Ejemplo de algunos equipos utilizados en el modelo del caso de estudio.**

EQUIPO	MODULO	DIMENSIÓN			PESO ESTIMADO	
		UNIDADES METRICAS			Seco	Operación
		H	B	L		
		(milímetros)			(toneladas)	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Bomba de Diesel Sucio	Cubierta 1		792	792	0.50	0.60
Bomba de Diesel Sucio	Cubierta 1		792	792	0.50	0.60
Bomba de Diesel Limpio	Cubierta 1		457	457	0.30	0.30
Bomba de Diesel Limpio	Cubierta 1		457	457	0.30	0.30
Bomba de Empaquetado de Diesel	Cubierta 1		1585	1585	2.20	2.50
Bombas de Empaquetado de Diesel	Cubierta 1		1585	1585	2.20	2.40
Bombas de Agua de Drenaje Abierto	Cubierta 1	357	381	890	0.10	0.10
Bombas de Agua de Drenaje Abierto	Cubierta 1	357	381	890	0.10	0.10
Bombas de Drenaje Cerrado	Cubierta 1	433	457	1271	0.30	0.30
Bombas de Drenaje Cerrado	Cubierta 1	433	457	1271	0.30	0.30
Bombas de Aceite de Drenaje Abierto	Cubierta 1	357	381	890	0.10	0.10
Bombas de Aceite de Drenaje Abierto	Cubierta 1	357	381	890	0.10	0.10
Capsula de Salvamento	Cubierta 1				10.00	14.00
Filtros de Aceite Crudo	Cubierta 1	1828	762		1.80	2.90
Filtros de Aceite Crudo	Cubierta 1	1828	762		1.80	2.90
Filtro de Diesel Sucio "A"	Cubierta 1		549	1920	0.40	0.60
Filtro de Diesel Sucio "R"	Cubierta 1		549	1920	0.40	0.60
Generador de Emergencia	Cubierta 1		1676	5517	6.40	6.40

En la práctica para asignar estas cargas al modelo se recomienda lo siguiente:

- Equipos con peso menor que 2 toneladas: Sumar todos los equipos y distribuirlos entre el área de la cubierta para ingresarlos como carga uniformemente distribuida.
- Equipos con peso mayor que 2 toneladas: Ingresar estos equipos como cargas puntuales sobre la cubierta según la localización de los mismos.

Para el presente trabajo se obtuvieron los siguientes valores de cargas distribuidas, y los equipos que se encuentren fuera del rango de las 2 toneladas se modelaran como cargas puntuales:

- Área de Cubierta 1 = 2,411.08 m<sup>2</sup>
- Área de Cubierta 2 = 2,109.63 m<sup>2</sup>
- Área de Cubierta 3 = 905.79 m<sup>2</sup>

Por lo que se utilizaron las siguientes cargas:

Equipos Operando

- Carga Uniformemente Distribuida de Equipos en Cubierta 1 = 450.00 (kg/m<sup>2</sup>)
- Carga Uniformemente Distribuida de Equipos en Cubierta 2 = 250.00 (kg/m<sup>2</sup>)

Equipos en estado Seco

- Carga Uniformemente Distribuida de Equipos en Cubierta 1 = 420.00 (kg/m<sup>2</sup>)
- Carga Uniformemente Distribuida de Equipos en Cubierta 2 = 230.00 (kg/m<sup>2</sup>)

El peso de los equipos se modela considerando su distribuci3n, indicada en los Planos de Localizaci3n General de equipos de la plataforma (PLG's).

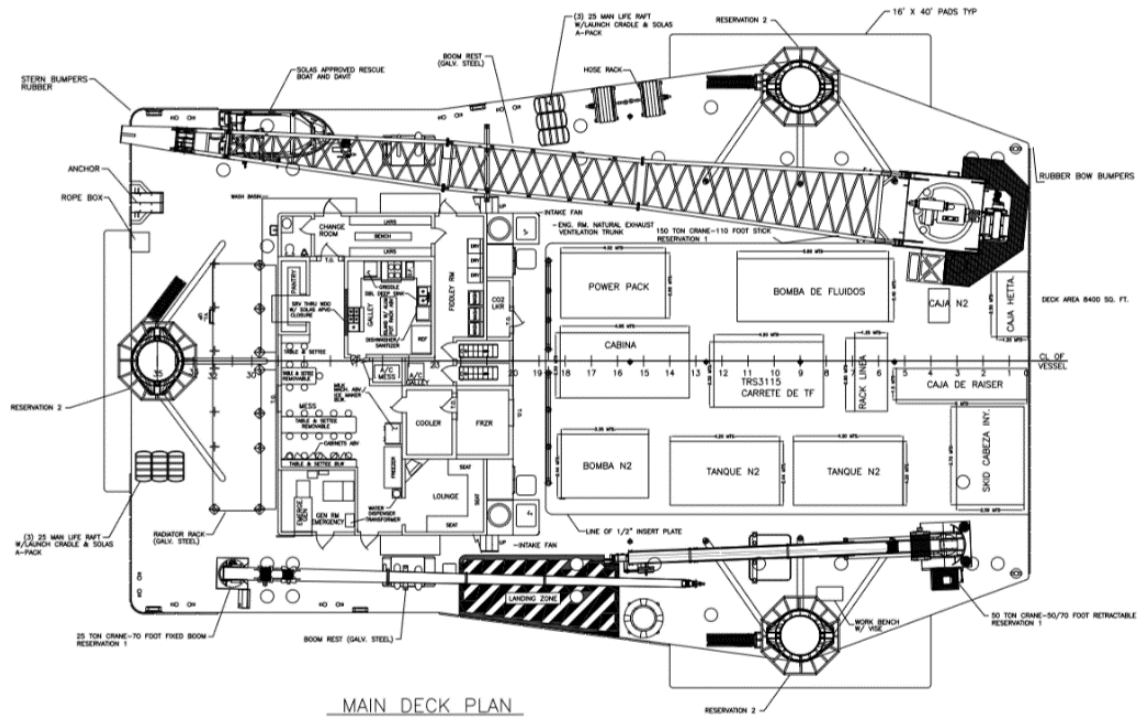



Fig. 3.10. Ejemplo de plano de localizaci3n general de equipos.

Para modelar la carga de los equipos cuyo peso es menor que 2 toneladas se ingresaran como carga distribuida, de la misma forma como se explic3 el ingreso de carga muerta.

Para aquellos equipos cuyo peso es mayor que 2 toneladas y cuya carga ser3 soportada por patines espec3ficos, se realizar3 con el comando **Skid Loads**  **Skid Loads** , como se muestra en la siguiente figura.



**Skid Loads**

Load condition: EQUI (Display) ... (Delete)

Load ID: CUB1 (Display) ... (Delete)

Add  Edit

Skid beam direction: X (Increment (m) dropdown)

Out of plane tolerance (m): 0.3048 (X, Y, Z dropdowns)

Skid beam length (m): 8

Total skid width (m): 5

Number of skid beams: 4 (Move Skid button)

Center of Skid (m): X: -34.09876, Y: 1.52417, Z: 18.64

Forces (kg): Fx, Fy, Fz: -15000

Moments (kg-cm): Mx, My, Mz

Center of force is at geometric center of the skid

Center of Force (m): X: -34.09876, Y: 1.52417, Z: 18.64

Show sum of forces before accepting loads

Status: Center of skid has been selected.

Buttons: Reset, OK, Apply, Close

Annotations:

- Colocar ID de la Condición de Carga, la cual puede ser conformada por varias cargas.
- Colocar ID de la carga que conforma a la Condición de Carga.
- Dirección de los patines sobre los cuales descansará el equipo.
- Tolerancia fuera del plano horizontal; los elementos que se encuentren en este rango se les aplicara la carga correspondiente.
- Longitud de los patines; debe ser mayor que o igual a la distancia entre vigas sobre las cuales se apoyaran los patines.
- Distancia entre los patines de los extremos.
- Número de patines que se usara para soportar el equipo.
- Coordenadas del centroide de los patines.
- Fuerza que se genera por el peso del equipo y dirección de la misma.
- Coordenadas del punto central donde se aplica la carga.
- Al aceptar esta opción nos mostrara las cargas aplicadas, como se muestra en la Fig. 3.10.

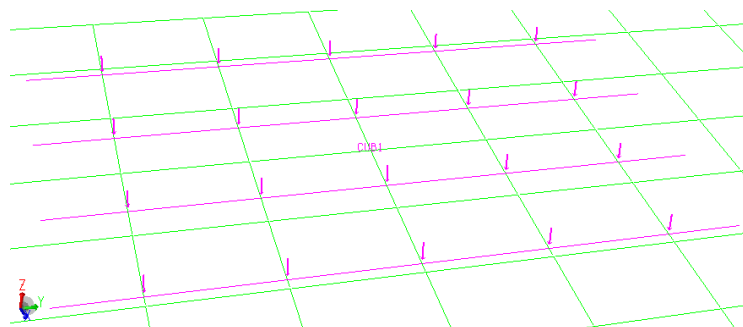


Fig. 3.11. Ejemplo de la aplicación de cargas por equipos montados sobre patines.

### CARGA VIVA (CV)

Se consideran como cargas vivas aquellas que no son de carácter permanente, producidas tanto por la tripulación de la plataforma como por material, herramientas, pequeños equipos temporales, los líquidos contenidos en tuberías y recipientes, así como por el peso de grúas y helicópteros; en condición de tormenta, este tipo de carga reduce su magnitud considerablemente ya que la plataforma no labora en estas condiciones (esta reducción se debe contemplar para el análisis de tormenta).



Para efecto del análisis de la superestructura se considera una densidad de carga viva de acuerdo a la distribución de áreas, como son áreas de carga y descarga, y áreas destinadas para tránsito de personal.

La Tabla 3.7, obtenida de la Norma de Referencia NRF-173-PEMEX-2009, cita las densidades de carga viva para su aplicación en el diseño estructural, dependiendo su localización.

**Tabla 3.7. Densidades de carga viva para el diseño estructural.**

Áreas	Densidad de Carga Viva
Escaleras	250 (kg/m <sup>2</sup> )
Plataformas de Descanso	250 (kg/m <sup>2</sup> )
Plataformas de Servicio	500 (kg/m <sup>2</sup> )

Para ingresar esta condición de carga en el programa SACS, se realizan los mismos pasos que se realizaron para aplicar la carga muerta.

### CARGAS ACTUANDO SOBRE ELEMENTOS BARRA Y CONEXIONES ESPECÍFICAS

Para los casos en que es necesario asignar una carga a uno o varios elementos barra, en el programa SACS se



hará uso del comando Members **Members** que se encuentra en el Menú Loads, de la siguiente manera:

The screenshot shows the 'Load Members' dialog box with the following fields and annotations:

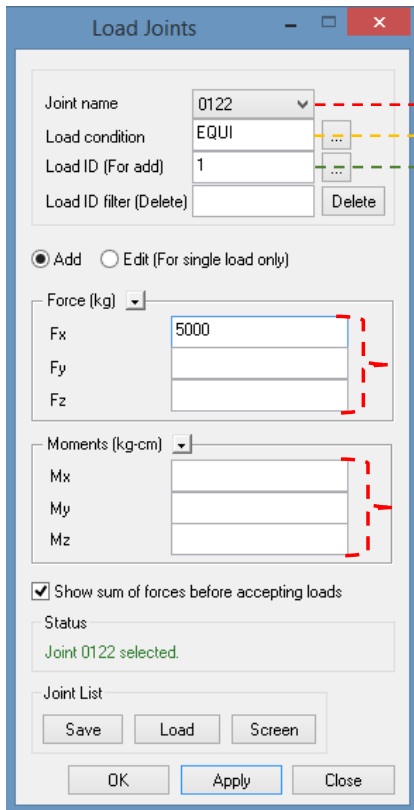
- Member:** 2683-2684 (Annotation: Elementos barra a los que se les asignará la carga.)
- Load condition:** EQUI (Annotation: Colocar ID de la Condición de Carga.)
- Load ID (For add):** E-1 (Annotation: Colocar ID de la carga que conforma a la Condición de Carga.)
- Load ID filter (Delete):** (Annotation: Esta opción es en caso de querer eliminar alguna carga.)
- Load category:** Distributed (Add) (Annotation: Seleccionar la categoría de carga que se asignará o eliminará: distribuida, concentrada o por temperatura.)
- Load type:** Force (Annotation: Seleccionar si es fuerza o momento.)
- Coordinate system:** Global (Annotation: Sistema de coordenadas a utilizar: global o local del elemento.)
- Direction:** Z (Annotation: Dirección de la carga, X, Y o Z.)
- Initial load value (kg/m):** -500 (Annotation: Indicar la carga inicial en el elemento.)
- Distance to beginning of load (m):** (Annotation: Si todo el elemento va a ser cargado, este valor se deja nulo.)
- Final load value (kg/m):** -500 (Annotation: Indicar la carga al final del elemento, en el caso de que todo el elemento este sujeto a una misma carga distribuida, la carga inicial y la final serán iguales.)
- Load length if not to member end (m):** 5.00 (Annotation: Longitud del elemento que abarca la carga.)
- Note:** Negative distances are measured from Joint B end of member.
- Buttons:** Save, Load, Screen, OK, Apply, Close.

Un ejemplo de la aplicación de este comando, es el ingresar la carga que genera el Muro Contra Incendio, el cual no es modelado en el programa, sin embargo la carga actuante se ingresa como una carga distribuida.

Las cargas concentradas que actúan sobre algunos nodos en particular, como podría ser el caso de la carga de



un equipo, se ingresará con el comando Joints **Joints**, el cual se encuentra en el Menú Load, de la siguiente manera:



- Nodo al que se le asignará la carga.
  - Condición de Carga.
  - Colocar ID de la carga que conforma a la Condición de Carga.
- Fuerzas que serán aplicadas al nodo.
- Momentos que serán aplicadas al nodo.

### CARGAS DEBIDAS A EQUIPOS PARA PROTECCIÓN CATÓDICA.

Se cuenta con métodos para prevenir y controlar la corrosión, como las barreras físicas, inhibidores de corrosión y los sistemas de protección catódica, éste último consiste en lograr que la estructura funcione como cátodo en una celda de corrosión, mediante la modificación de factores electroquímicos.

En las estructuras o tuberías de acero enterradas o sumergidas, existen varias formas de corrosión, producidas por diferentes causas que inciden en el deterioro del metal. Diversos factores afectan sustancialmente el tipo y velocidad de corrosión en una estructura en contacto con el suelo o con los diferentes ambientes que la rodean.


Se debe seleccionar el sistema de protección catódica para cada caso particular, de tal manera que: se proporcione una corriente eléctrica que satisfaga la demanda, se distribuya uniformemente la misma en la estructura por proteger, se eviten interferencias y daños en el recubrimiento anticorrosivo.

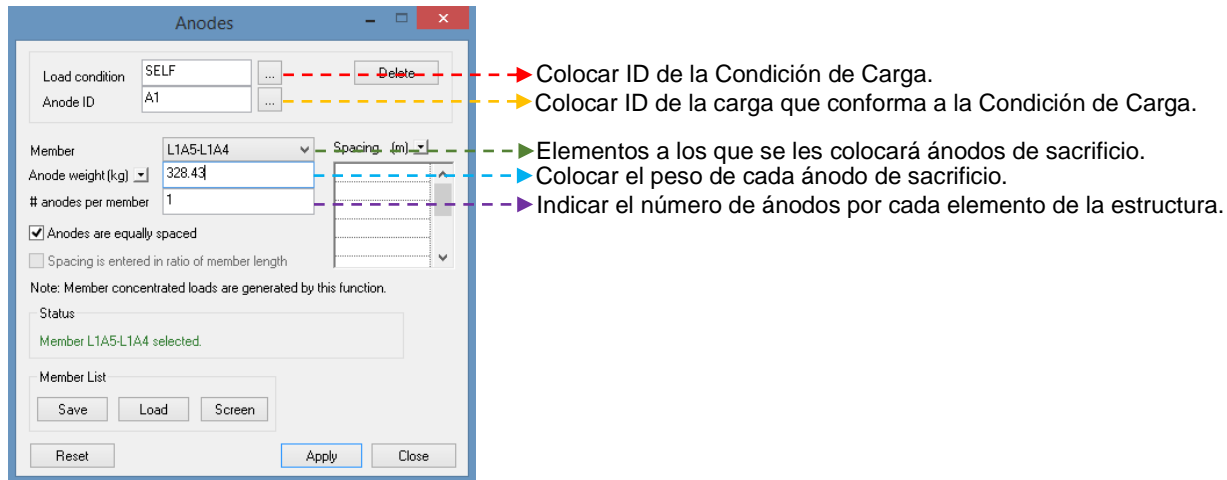
El diseño del sistema de protección, debe estar en función de la vida útil de la estructura e incluir todos los accesorios metálicos y líneas que vayan a ser conectados eléctricamente al ducto, tales como curvas de expansión, interconexiones, acometidas, entre otras.

La norma que rige la protección catódica en México es: NRF-047-PEMEX-2002, "Diseño, Instalación y Mantenimiento de los Sistemas de Protección Catódica".



Fig. 3.12. Ejemplo de barras de ánodos de sacrificio en el Jacket de una plataforma.

Para modelar las cargas debido a los ánodos de sacrificio, se hará uso del comando **Anodos**  **Anode**, que se localiza en el Menú **Load**, de la siguiente manera:



## CARGAS DEBIDAS AL CRECIMIENTO MARINO.

El crecimiento marino sobre los miembros de una estructura (en el caso de plataformas tipo Jacket, sobre las piernas y diagonales que están propensas a que allá crecimiento marino) produce un incremento en masa. Adicionalmente, el incremento en la dimensión de la geometría, debido a que este crecimiento produce un correspondiente aumento en la masa adherida de agua y, por lo tanto, también se debe considerar este efecto, ya que la fuerza vertical y lateral sobre la estructura aumenta.

Las cargas por crecimiento marino se ingresan al programa SACS, únicamente definiendo los rangos de elevación y espesor del crecimiento marino, tal como se indicó en el apartado 3.5.4 “Espesor de Crecimiento Marino”.

## CARGAS DE FLOTACIÓN

La flotación de miembros, producto del volumen de agua desplazada, es parte de las cargas verticales actuantes sobre la estructura. Debido a que la mayor parte de los elementos que conforman la subestructura se encuentran sellados, es decir, llenos de aire, estos efectos resultan considerables. Las fuerzas de flotación resultan del orden del 40% del peso total de la estructura (considerando superestructura, subestructura, accesorios y crecimiento marino).

## RESUMEN DE LAS CARGAS UTILIZADAS EN EL MODELO DE LA PRESENTE TESIS

- **Peso Propio de la Estructura (PP):** Es determinado con el programa (SACS),  $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$  (490 lb/ft<sup>3</sup>).
- **Carga Muerta (CM) (rejilla, placa base, barandales, escaleras, accesorios de la plataforma):** para el análisis de la plataforma que se está realizando se considerará  $\text{CM} = 100 \text{ kg/m}^2$ .
- **Peso de los Equipos (EQUI):** Para esta condición de carga se coloca el peso de los equipos según el servicio que preste la plataforma, en el análisis del presente trabajo se realizará con el equipo de una plataforma de Perforación.
- **Carga Viva (CV):** La plataforma analizada corresponde a una plataforma de servicio, por lo que la carga viva a utilizar es  $500 \text{ kg/m}^2$ .

Una vez que se tiene el modelo de la plataforma con las cargas asignadas, se procede a hacer un análisis estático el cual se explica en el capítulo V “Análisis por el Método Estático, de una Plataforma Tipo Jacket en las

Etapas de Operación y Tormenta”, para poder revisar que sea correcta la bajada de cargas, las cuales quedan de la siguiente manera:

**Tabla 3.8. Resumen de cargas utilizadas en el modelo del caso en estudio.**

**Cargas Gravitacionales Consideradas**

Descripción	Carga (Ton)	Factor de Contingencia	Carga Total (Ton)
Peso Propio - Flotación + Crecimiento Marino.	3,981	10%	-4,379
Subcubierta Elev. 13.72 m, carga muerta.	91	10%	-100
Subcubierta Elev. 13.72 m, carga viva.	251		-251
Cubierta Elev. 19.10 m, carga muerta.	241	10%	-265
Cubierta Elev. 19.10 m, carga viva.	885		-885
Cubierta Elev. 19.10 m, carga de equipo en operación.	1,085	20%	-1,302
Cubierta Elev. 32.16 m, carga muerta.	211	10%	-232
Cubierta Elev. 32.16 m, carga viva.	672		-672
Cubierta Elev. 32.16 m, carga de equipo en operación.	527	20%	-633
Cubierta Elev. 39.83 m, carga muerta.	91	10%	-100
Cubierta Elev. 39.83 m, carga viva.	317		-317
Subestructura Accesorios.	166	10%	-182
Superestructura Accesorios.	74	10%	-82
<b>Total:</b>			<b>-9,399</b>

**Desglose de pesos de los accesorios de la Subestructura.**

Descripción	Carga Total (kg)
Ánodos (417 pzas)	-141,676
Pasillos	-13,887
Orejas de arrastre y lanzamiento	-1,303
Orejas de posicionamiento vertical	-4,652
Sistemas de inundación	-4,330
<b>Total:</b>	
	<b>-165,847</b>

**Desglose de pesos de los accesorios la Superestructura.**

Descripción	Carga Total (kg)
Muro contra incendio	-15,579
Conos de acoplamiento	-4,685
Orejas de izaje de la superestructura	-6,776
Tapa de columna	-4,888
Apoyo de grúa	-2,074
Anillo de pedestal	-2,400
Placas estrella (refuerzo de conexión viga-columna)	-15,208
Ménsulas de columnas (capiteles)	-10,272
Escaleras eje A	-5,826
Escaleras eje B	-5,826
Tapa pedestal	-783
<b>Total:</b>	
	<b>-74,317</b>

**3.7.2 CARGAS AMBIENTALES**

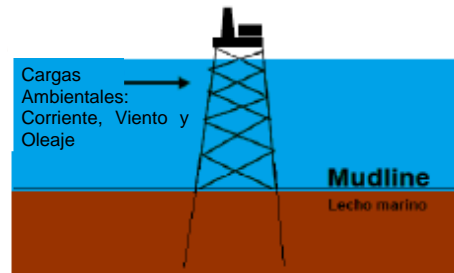
Las cargas ambientales son aquellas que actúan sobre la plataforma inducidas por fenómenos naturales como viento, corriente, oleaje y mareas, las cuales dependen de las condiciones meteorológicas y oceanográficas.

Las cargas ambientales dependen de las condiciones meteorológicas y oceanográficas de cada región, para el caso de las plataformas fijas instaladas en el Golfo de México, donde las estructuras son relativamente pequeñas o son instaladas en aguas someras, las cargas generadas se consideran como fuerzas estáticas actuando sobre la estructura.

Las cargas ambientales que actúan sobre una plataforma y se contemplan para los diversos análisis son:

- Cargas por oleaje.
- Cargas por corriente marina
- Carga por viento
- Fuerzas hidrostáticas.

La determinación de los parámetros ambientales para las condiciones de operación y tormenta, se desarrollan con base en la información de la Norma de Referencia NRF-003-PEMEX-2007 "Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México".



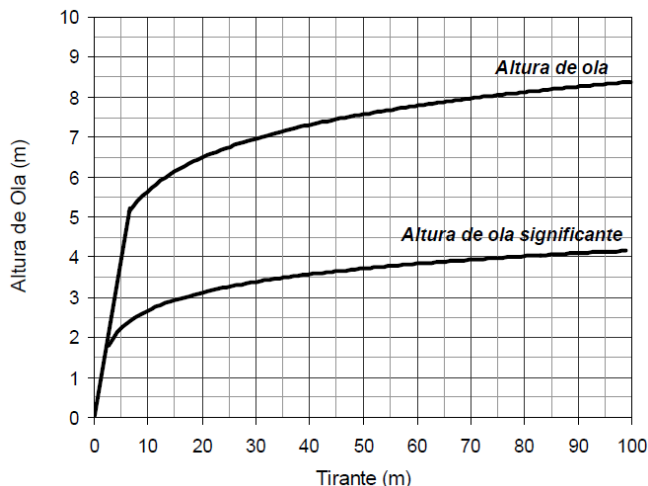
**Fig. 3.13. Cargas ambientales actuantes en una plataforma.**

Para determinar la magnitud y distribución de estas cargas sobre una plataforma marina, se utiliza la metodología propuesta por el American Petroleum Institute (API), mientras que la determinación de los parámetros ambientales para las condiciones de operación y tormenta, se desarrollan con base en la información de las gráficas incluidas en la norma de referencia NRF-003-PEMEX-2007.

### PARÁMETROS PARA CARGAS AMBIENTALES EN LA ETAPA DE OPERACIÓN

En el Anexo B de la norma NRF-003-PEMEX-2007 se especifican los parámetros meteorológicos y oceanográficos para el diseño estructural por operación de plataformas marinas fijas en las zonas del Litoral de Tabasco, Sonda de Campeche y Región Norte.

En la siguiente figura, tomada del anexo B de la norma NRF-003-PEMEX-2007, se presentan las alturas de ola máxima y significativa, en donde se toma en cuenta el efecto de rompiente, así como sus parámetros asociados en la Tabla 3.9.



**Fig. 3.14. Alturas de ola máxima y significativa por operación en el Litoral Tabasco y Sonda de Campeche.**

**Tabla 3.9. Parámetros asociados a la altura de ola máxima de operación en el Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche.**

Parámetros	
Período de la ola (s)	8.2
Altura de la marea astronómica (m)	0.76
Altura de la marea de tormenta (m)	0.3
Velocidad máxima de viento a 10 m sobre el N.M.M (m/s), promedio de 1 hr	14.4
Velocidad de corriente (cm/s)	
0% de la profundidad	30
50% de la profundidad	25
95% de la profundidad	18

**Altura de ola máxima:** Es la altura máxima que puede presentarse en la zona de estudio, ya sea para la etapa de operación o tormenta; dicha altura es utilizada en el cálculo de los esfuerzos y desplazamientos máximos en los elementos estructurales, para cada una de las dos etapas.

**Altura de ola significativa:** La altura de ola significativa se define tradicionalmente como la altura de ola media del tercio más alto de las olas ( $H_{1/3}$ ). Hoy en día se define generalmente como cuatro veces la desviación estándar de la elevación de la superficie ( $H_{m0}$ ). La altura de ola significativa puede referirse a  $H_{1/3}$  ó  $H_{m0}$  y la diferencia de magnitud entre las dos definiciones es sólo un pequeño porcentaje. Esta altura de oleaje es utilizada para realizar los análisis correspondientes a fatiga, transporte, izaje e instalación.

Para el cálculo de las solicitaciones inducidas por condiciones de operación se deben utilizar los parámetros del periodo aparente, factores de bloqueo y factores de pantalla definidos en la 21ª Edición del API-RP-2A (WSD). Además se debe emplear la velocidad del viento con lapso de promediación de una hora a 10 m sobre el NMM, asociada a la altura de ola máxima, un coeficiente de cinemática de la ola de 1.0 y coeficientes de arrastre e inercia asociados con una superficie rugosa ( $C_d = 1.05$ ,  $C_m = 1.20$ ) en elementos sumergidos y ( $C_d = 0.65$  y  $C_m = 1.60$ ) en elementos fuera del agua. Dado que el criterio propuesto en la norma NRF-003-PEMEX-2007 es omnidireccional, no se utiliza el factor de direccionalidad recomendado en el API-RP-2A (WSD).

### PARÁMETROS PARA CARGAS AMBIENTALES EN LA ETAPA DE TORMENTA

En el anexo A de la norma NRF-003-PEMEX-2007, se especifican los parámetros meteorológicos y oceanográficos para el diseño estructural por tormenta de plataformas marinas fijas en las zonas del Litoral de Tabasco, Sonda de Campeche y Región Norte.

En las Figs. 3.14, 3.15 y 3.16 se muestran la altura de la ola máxima que toma en cuenta el efecto de rompiente, velocidad del viento, la marea de tormenta y las velocidades de corriente marina.

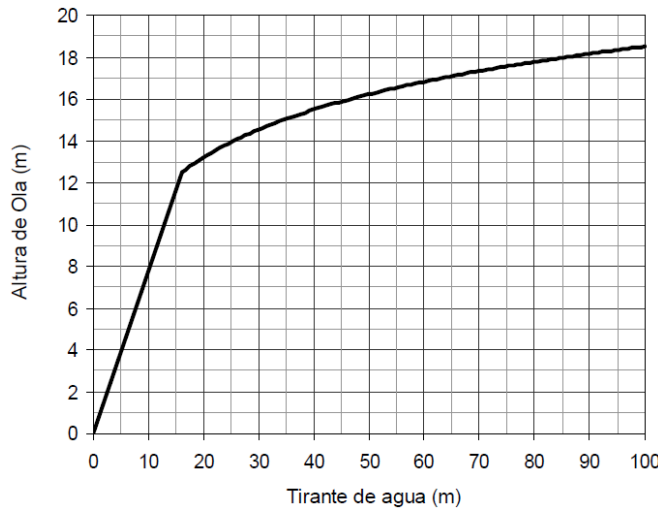


Fig. 3.15. Altura de la ola máxima de diseño por tormenta.

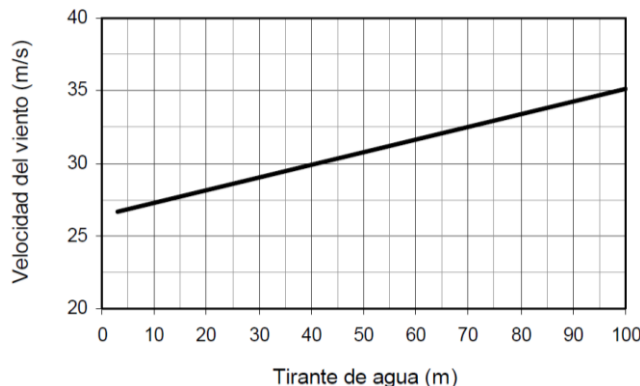
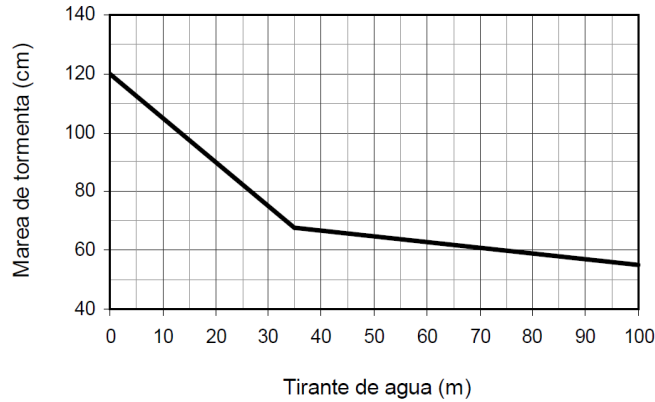


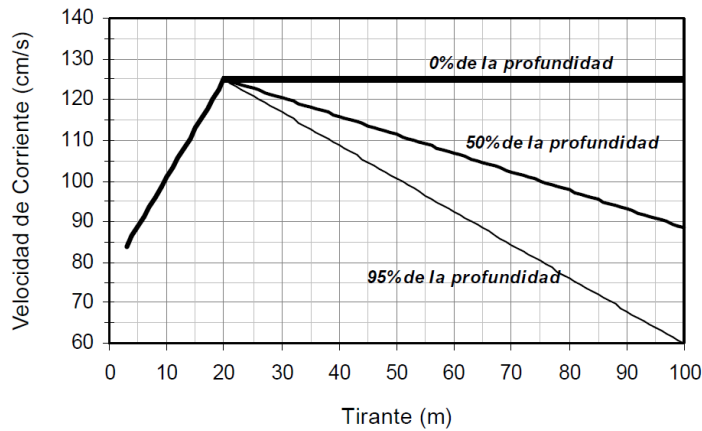
Fig. 3.16. Velocidad máxima del viento a 10 m SNM, promedio de 1 hora, Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche.





**Fig. 3.17. Mareas de Tormenta en el Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche.**

La Fig. 3.18 muestra la velocidad de corrientes a diferente profundidad, para distintos tirantes de agua. Para tirantes menores que 20 m, el perfil de corrientes es constante. En tirantes mayores que 20 m, la corriente se mantiene constante en la superficie, igual a 125 cm/s, mientras que a 50% y 95% de la profundidad, la corriente decrece linealmente con el incremento del tirante de agua.



**Fig. 3.18. Velocidades de corriente marina en Litoral de Tabasco y Sonda de Campeche.**

El grupo de parámetros se complementa, para todos los tirantes, con:

- Periodo de la ola: 12.18 s
- Marea Astronómica: 0.76 m

### FUERZAS GENERADAS POR OLEAJE

Las cargas generadas por el oleaje en una plataforma son dinámicas por naturaleza. Sin embargo para las plataformas instaladas en aguas someras, estas cargas pueden ser representadas adecuadamente por sus equivalentes estáticas. Para aguas profundas o plataformas que tienden a ser más flexibles, el análisis estático puede no describir adecuadamente las verdaderas cargas dinámicas inducidas en la plataforma, por lo cual el correcto análisis de tales plataformas requiere un análisis que implica la acción dinámica de la estructura.

Por lo cual para el procedimiento de análisis descrito y el caso en estudio se asumirá que entre la estructura y el oleaje del mar no existe una interacción dinámica, por ser estructuras instaladas en aguas someras. Dichas fuerzas producidas por el oleaje y la corriente marina dependen de la altura (H) y el periodo (T) de la ola, así como de la profundidad del fondo marino.

Las principales teorías de oleaje que se manejan en el diseño de plataformas marinas son:

- Stream Function
- Stokes de 5° orden
- Teoría lineal de oleaje de Airy

La altura de la cresta se determina a partir de la altura de la ola máxima para resistencia última. La altura de la cresta debe calcularse a partir de la teoría de oleaje que corresponda, de acuerdo a lo recomendado en el API RP 2A-WSD, Sección 2.3.1b. (21ª Edición).

El tirante máximo de agua es calculado considerando las alturas de las mareas astronómicas y de tormenta.

$$d_{max} = \text{Tirante (m)} + \text{Altura de Marea Astronómica (m)} + \text{Altura de Marea de Tormenta (m)} \quad \dots \text{ecuación 3.1.}$$

### PERIODO APARENTE DE LA OLA

El periodo de ola aparente es calculado considerando el efecto Doppler de las corrientes sobre el oleaje. Tal fenómeno determina que las corrientes en la dirección del oleaje tienden a estrechar la longitud de ola, mientras que las corrientes en oposición tienden a acortarla. Para el caso simple de una propagación de ola sobre una línea uniforme de corrientes, el período de ola aparente visto por un observador en movimiento con las corrientes, puede determinarse con la figura 2.3.1-2 de la sección 2 del API RP 2A-WSD, en la cual  $T$  es el periodo de la ola real (visto por un observador estacionario),  $V_1$  es la velocidad promedio de las corrientes en la dirección del oleaje,  $d$  es el tirante máximo de agua (incluyendo mareas) y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{(ft)}{\left(\frac{ft}{s^2}\right)(s)^2} \quad \dots \text{ecuación 3.2.} \quad \frac{V_1}{gT} = \frac{(ft)}{\left(\frac{ft}{s^2}\right)(s)} \quad \dots \text{ecuación 3.3.}$$

$$\frac{T_{app}}{T} = \lambda \rightarrow \therefore T_{app} = T \cdot \lambda = (s) \quad \dots \text{ecuación 3.4.}$$

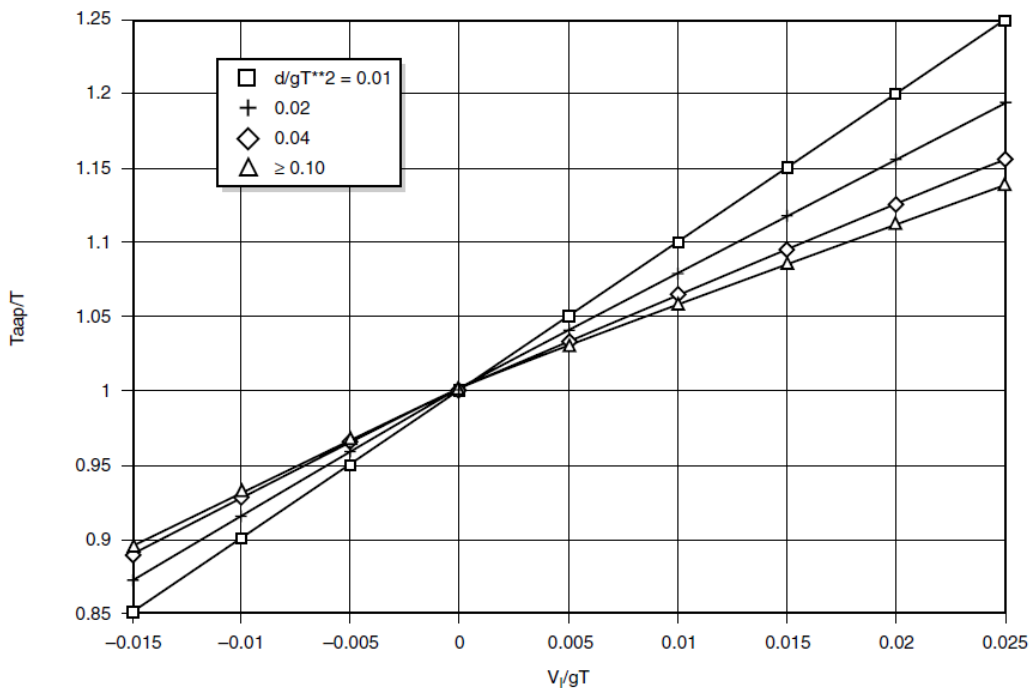


Fig. 3.19. Efecto Doppler debido a las corrientes permanentes.

### CINEMÁTICA BIDIMENSIONAL DE LA OLA

Para el periodo de ola aparente determinado ( $T_{app}$ ), el cual es específico para una altura de ola máxima  $H$  y un tirante de agua  $d$ , la cinemática bidimensional de ola puede calcularse usando la teoría de oleaje apropiada. La figura 2.3.1-3 de la sección 2 del API RP 2A-WSD muestra las regiones de aplicación de las teorías de oleaje Stream Function, Stokes 5 y Linear/Airy.

$$\frac{H}{gT_{app}^2} = \frac{(ft)}{\left(\frac{ft}{s^2}\right)(s)^2} \quad \dots \text{ecuación 3.5.} \quad \frac{d}{gT_{app}^2} = \frac{(ft)}{\left(\frac{ft}{s^2}\right)(s)^2} \quad \dots \text{ecuación 3.6.}$$

$\frac{H}{gT_{app}^2}$ : Dimensión del peralte menor de ola.

$\frac{d}{gT_{app}^2}$ : Dimensión de profundidad menor relativa.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$H$ : altura de la ola máxima.

$d$ : tirante de agua.

$T_{app}$ : Periodo aparente de la ola considerando efecto Doppler.

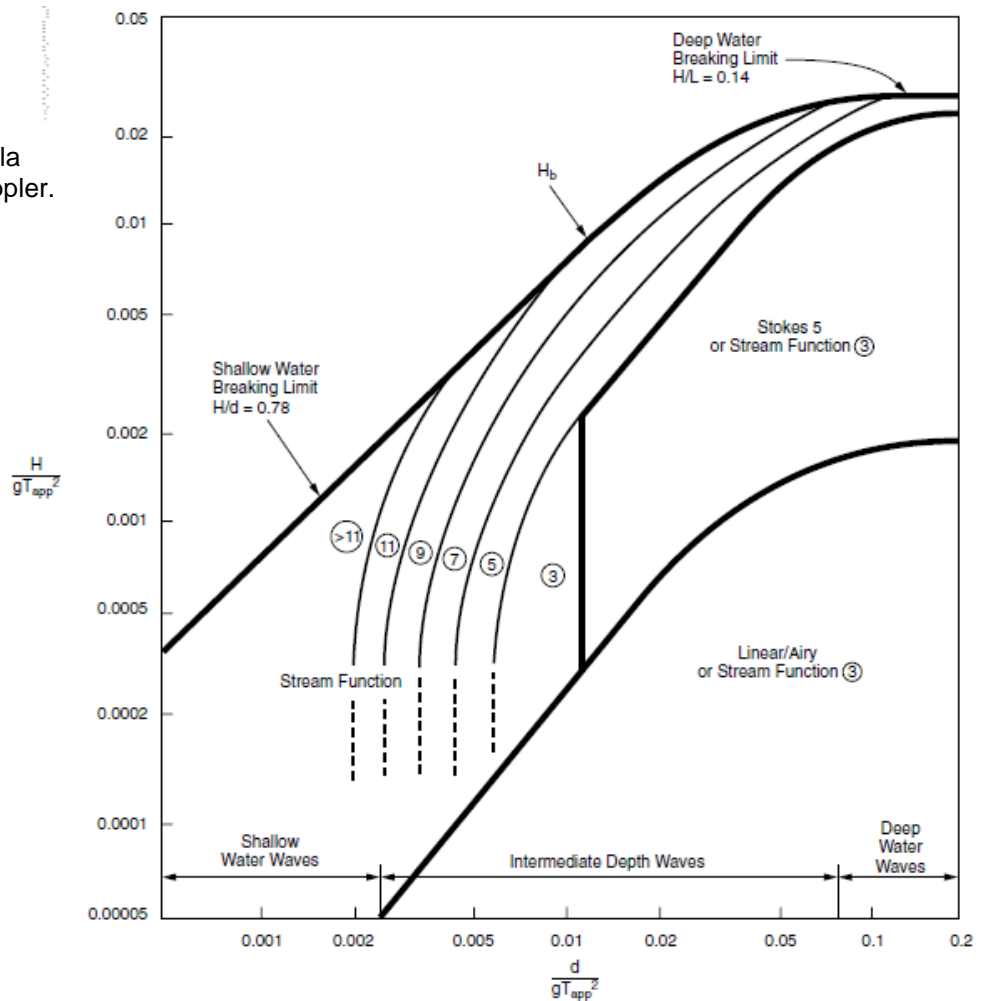


Fig. 3.20. Regiones de aplicación de las teorías de oleaje, Stream Functions, Stokes 5 y Linear/Airy.

### FACTOR DE CINEMÁTICA DE OLA

La cinemática bidimensional de ola para las teorías de Stream Function o Stokes 5 no considera para la dirección del oleaje el esparcimiento o irregularidades en la forma del perfil del oleaje. Estas características del oleaje pueden modelarse aproximadamente mediante un análisis que determine el oleaje multiplicando las velocidades y aceleraciones de la solución bidimensional del oleaje, por un factor de cinemática. Para el caso de Regiones Marinas de la Sonda de Campeche, la norma NRF-003-PEMEX-2007 considera un factor de cinemática de ola de 0.85 para tormenta y 1.00 para operación.

### FACTOR DE BLOQUEO DE CORRIENTE

La velocidad de la corriente en la vecindad de la plataforma es reducida por un valor de bloqueo. En otras palabras, la presencia de la estructura causa la divergencia del flujo. Parte del flujo va alrededor de la estructura en lugar de atravesarla, y la velocidad de la corriente dentro de la estructura se reduce. Dado que las cargas globales de la plataforma se determinan mediante la suma de las cargas locales a partir de la ecuación de Morison, se debe de utilizar la velocidad local de la corriente, para poder tomar en cuenta este efecto se utilizan los factores de bloqueo de corriente de la Sección 2.3.1.b.-4 del API RP 2A-WSD.

**Tabla 3.10. Factores de bloqueo de corriente aproximados para el Golfo de México para estructuras tipo Jacket, tomados de la sección 2.3.1.b.-4 del API "Current Blockage Factor".**

# of Legs	Heading	Factor
3	all	0.90
4	end-on	0.80
	diagonal	0.85
	broadside	0.80
6	end-on	0.75
	diagonal	0.85
	broadside	0.80
8	end-on	0.70
	diagonal	0.85
	broadside	0.80

En la siguiente tabla e imágenes se muestra como ejemplo los factores de bloqueo utilizados en la modelación de un octápodo.

# de Piernas	Dirección	Factor
8	Lado Largo	0.70
	Diagonal	0.85
	Lado Corto	0.80

**De Frente (0.70)**

**Diagonal (0.85)**

**Costado (0.80)**

El factor de bloqueo es modelado en el apartado de cargas por corrientes marinas.

### CÁLCULO DE LAS FUERZAS HIDRODINÁMICAS EN LA SUBESTRUCTURA

Para un elemento cilíndrico, la fuerza hidrodinámica depende asimismo de la relación entre la longitud de la ola y el diámetro del elemento. Cuando esta relación es grande (>5), la fuerza producida por la ola puede calcularse como la suma de la fuerza de arrastre (que relaciona la energía cinética del agua) y la fuerza de inercia (que relaciona la aceleración del agua); esta fuerza está dada por la fórmula de Morison:

El cálculo de fuerzas hidrodinámicas de oleaje en la subestructura, se pueden determinar por medio de la siguiente ecuación de Morison, (API RP 2A-WSD):

$$F = F_D + F_I = \frac{1}{2} C_d \rho A U |U| + C_m \rho V \frac{\delta U}{\delta t} \quad \dots \text{ecuación 3.7.}$$

Donde:

**F:** Vector de fuerza hidrodinámico por unidad de longitud que actúa normal al eje del miembro, lb/ft (N/m).

**F<sub>D</sub>:** Vector de fuerza de arrastre por unidad de longitud que actúa normal al eje del elemento en el plano del eje del miembro y U, lb/ft (N/m).

**F<sub>I</sub>:** Vector de fuerza de inercia por unidad de longitud que actúa normal al eje del elemento en el plano del eje del elemento y  $\alpha U/\alpha t$ , lb/ft (N/m).

**C<sub>d</sub>:** Coeficiente de arrastre.

**$\rho$ :** Densidad del agua, 1,028 kg/m<sup>3</sup>, (64.19 Lb/ft<sup>3</sup>).

**A:** Área proyectada normal al eje del cilindro por unidad de longitud (es igual a D para cilindros), ft (m).

**V:** Volumen desplazado del cilindro por unidad de longitud, (es igual a  $\pi D^2/4$  para cilindros), ft<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>).

**D:** Diámetro efectivo del miembro del cilindro, incluye el crecimiento marino, ft (m).

**U:** Velocidad horizontal de la partícula de agua (debido a la ola y/o corriente) normal al eje del miembro, ft/s (m/s).

**|U|:** Valor absoluto de U, ft/s (m/s).

**C<sub>m</sub>:** Coeficiente de inercia.

**$\frac{\delta U}{\delta t}$ :** Aceleración horizontal de la partícula de agua, normal al eje del miembro, ft/s<sup>2</sup> (m/s<sup>2</sup>).

Los valores de C<sub>m</sub> y C<sub>d</sub> están en función de la rugosidad del elemento, orientación del mismo, número de Reynolds, la relación corriente y velocidad de oleaje, por lo tanto no se pueden fijar valores para todas las condiciones. Los valores usuales para miembros cilíndricos son:

**Tabla 3.11. Coeficientes de arrastre e inercia para fuerzas de oleaje y corriente en la subestructura, recomendados por el API.**

Superficies Lisas		Superficies Rugosas	
Inercia (C <sub>M</sub> )	1.60	Inercia (C <sub>M</sub> )	1.20
Arrastre (C <sub>D</sub> )	0.65	Arrastre (C <sub>D</sub> )	1.05

La velocidad y aceleración de la partícula de agua son funciones de la altura y periodo de la ola, profundidad del agua, distancia respecto al fondo y tiempo. Existen varias teorías para calcular la velocidad y aceleración de la partícula de agua, la teoría de Airy es una solución lineal de la ecuación diferencial para el comportamiento de la partícula de agua basada en la suposición de que la altura de la ola es pequeña comparada con su longitud. Una teoría no lineal derivada por Stokes da una representación más precisa del perfil de la ola y como resultado se utiliza con mayor frecuencia para determinar las características de la partícula de la ola.

Para obtener las cargas correspondientes se incluirán en los modelos los valores correspondientes para cada caso de carga.

### CÁLCULO DE FUERZAS HIDRODINÁMICAS EN LA CUBIERTA

Las fuerzas hidrodinámicas de oleaje en la cubierta, se pueden determinar por medio de la ecuación siguiente que se deriva de la de Morison (NRF-003-PEMEX-2007):

$$F_{dk} = \frac{1}{2} \rho C_d (\alpha_{wkf}V + \alpha_{cbf}U)^2 A \quad \dots \text{ecuación 3.8.}$$

Donde:

**U:** Es la velocidad de la corriente en la superficie (0% de profundidad) asociada con la ola, (m/s).

$\alpha_{wkf}$ : Es el coeficiente de cinemática de la ola (0.85 para el Golfo de México).

$\alpha_{cbf}$ : Es el factor de bloqueo de la corriente para la subestructura tomado de la Sección 2.3.1b del API-RP-2A (WSD).

$\rho$ : Es la densidad del agua, 1,028 kg/m<sup>3</sup>, (64.19 Lb/ft<sup>3</sup>).

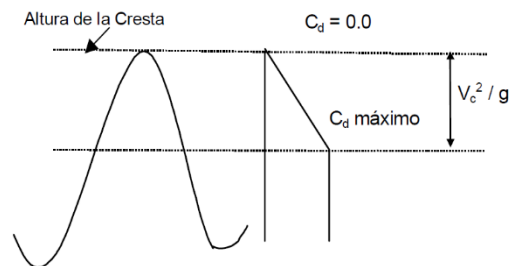
**C<sub>d</sub>:** Coeficiente de arrastre, tendrá una variación lineal respecto a la profundidad, tomando un valor 0.0 en la superficie (elevación de la cresta) y un valor máximo a una profundidad de  $V_c^2/g$  (como se muestra en la siguiente figura).

**V<sub>c</sub>:** Velocidad de la partícula de la ola en la cresta, (m/s).

**g:** Aceleración de la gravedad, (m/s<sup>2</sup>).

**V:** Volumen desplazado por el elemento, por unidad de longitud, (m<sup>2</sup>).

**A:** Área expuesta proyectada por elemento, por unidad de área, (m).



**Fig. 3.21. Grafica ilustrativa de la variación de Cd.**

**Tabla 3.12. Coeficientes de arrastre e inercia máximos para fuerzas de oleaje y corriente sobre cubierta.**

Valores máximos de C <sub>d</sub> en función de la incidencia del frente de oleaje		
Tipo de cubierta	Extremo y costado	Diagonal
Muy Equipada (sólido)	2.5	1.9
Moderadamente equipada	2.0	1.5
Vacía (sin equipo)	1.6	1.2

El área total de la cubierta (A), está definida como el área sombreada de la Fig. 3.23, es decir, el área entre el paño inferior de las vigas de los subniveles y la parte más alta del equipo “sólido” sobre la cubierta principal. En los casos en que la elevación de la cresta rebasa la parte más alta del equipo sólido sobre la cubierta, el área mojada será igual al área total. De otra manera, el área mojada será una fracción del área total, extendiéndose hasta una elevación igual a la elevación de la cresta.

La proyección del área mojada (en dirección normal a la incidencia de la ola) se calcula con la siguiente ecuación:

$$A = A_x \cos \theta_w + A_y \sen \theta_w \quad \dots \text{ecuación 3.9.}$$

Donde  $\theta_w$  es el ángulo de incidencia de la ola y  $A_x$  y  $A_y$  son las proyecciones ortogonales del área mojada.



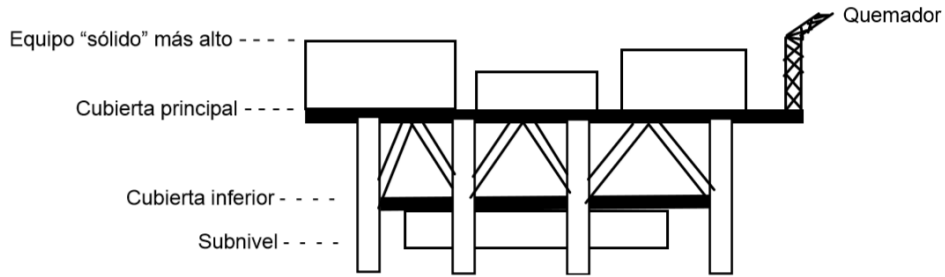


Fig. 3.22. Vista en elevación de la cubierta de la plataforma (Fuente: NRF-003-PEMEX-2007).

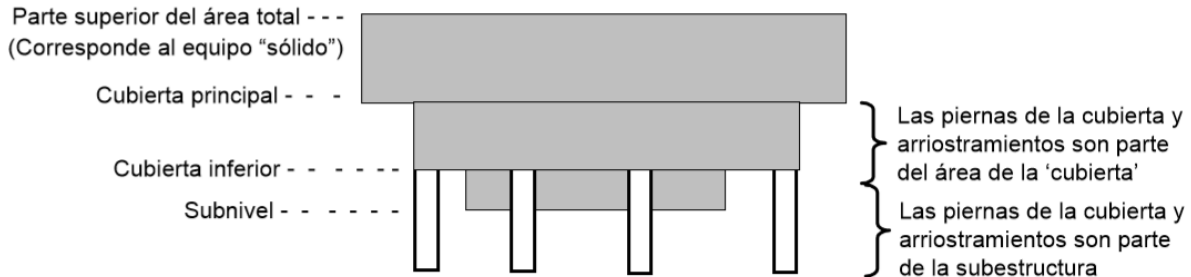


Fig. 3.23. Definición del área total de la cubierta, (Fuente: NRF-003-PEMEX-2007).

### CARGAS POR CORRIENTES MARINAS

Las corrientes marinas son debidas a tres factores principalmente, constituidas por los cambios de densidad del agua de mar, variaciones del tirante de agua por mareas y generadas por el viento.

También se consideran las cargas por mareas; existen dos tipos de mareas, las de tormenta y las astronómicas, está última depende de la atracción que ejerce la luna y el sol sobre los mares. Las mareas de tormenta son generadas principalmente por el empuje del viento sobre la superficie del mar.

Se debe considerar la presencia de ambos tipos de marea para las condiciones de cargas ambientales, por medio de la suma de sus alturas respecto al NMM.

### CARGA POR VIENTO

Las fuerzas de viento se generan en la superestructura, frecuentemente en la misma dirección que las fuerzas predominantes de oleaje, ya que por las dimensiones de la estructura y sus elementos, y de todo el equipo que sobre ella se encuentra, presenta una gran pantalla expuesta al viento lo que se traduce en grandes fuerzas actuantes. Por el contrario, en la subestructura son muy pequeñas estas fuerzas, debido a que el área expuesta al viento es mucho menor que la correspondiente de la superestructura. La fuerza del viento en una estructura es función de la velocidad del mismo, la orientación de la estructura y las características aerodinámicas de la misma y de sus miembros.

El viento ejerce presiones en las porciones de la estructura que estén por encima del NMM y en los quipos de la plataforma.

Para la modelación se aplican empujes por viento en direcciones correspondientes con el oleaje, sobre las áreas expuestas del equipo, paquetería y elementos estructurales localizados por arriba de la superficie descrita por el perfil de la ola.

Las cargas por viento son dinámicas por naturaleza pero algunas estructuras responderán a ellas de manera casi estática. Para las estructuras de acero fijas en aguas relativamente poco profundas, las cargas por viento son un contribuyente menor a las cargas globales (representan aproximadamente del 5% al 10% de las fuerzas

ambientales totales que actúan en una estructura típica costa afuera). Las cargas por vientos sostenidos deben usarse para calcular las cargas globales de viento sobre la plataforma, y las velocidades de ráfagas se deben utilizar para el diseño de elementos estructurales individuales.

Perfil del viento y ráfagas: Para las condiciones de viento fuerte la velocidad del viento de diseño  $U(z,t)$  (ft/s) a una altura  $z$ (pies) sobre el nivel del mar y que corresponde a un periodo de tiempo de promedio  $t$ (s) en el sitio de estudio (Sonda de Campeche) es:

$U_0$  (ft/s): es la velocidad media del viento de 1 hora a 32.80 ft (10 m).

La velocidad del viento a cualquier elevación respecto a la superficie del agua es:

$$U(z) = U_0 \cdot \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{z}{32.8} \right) \right] \quad \dots \text{ecuación 3.10.}$$

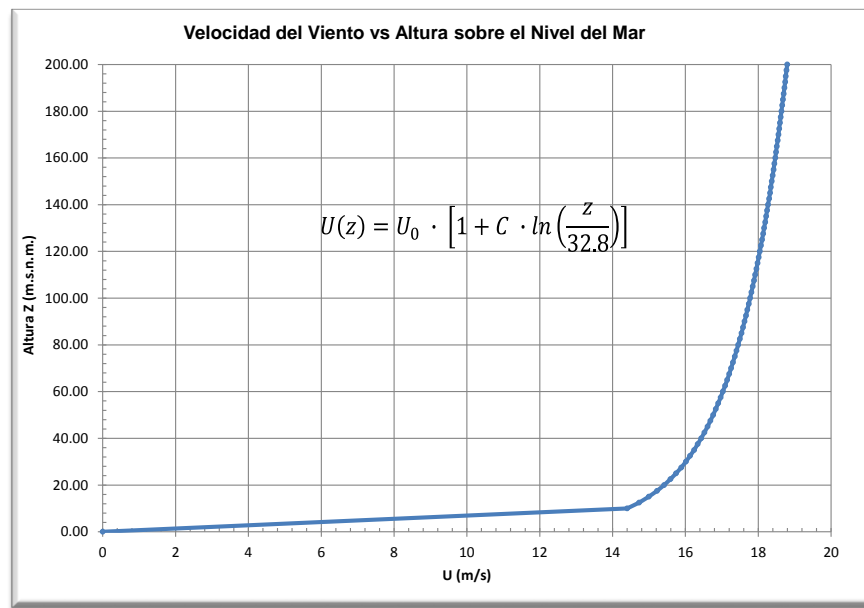
$$C = 5.73 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 0.0457 \cdot U_0)^{1/2} \quad \dots \text{ecuación 3.11.}$$

Donde:

$V_{10}$ : Velocidad del viento a una altura de 10 m (ft/s).

Z: Elevación deseada, (ft).

32.8 ft (10 m): Altura de referencia.



**Fig. 3.24. Ejemplo de la variación de la velocidad del viento con la altura, en el sitio de la plataforma del caso en estudio (Sonda de Campeche).**

Debido a que la altura de la superestructura del modelo de este trabajo tiene una altura inferior a los 40 m por arriba del NMM, no se considerará la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura, utilizándose velocidades constantes. Es importante aclarar que estas velocidades del viento están basadas en las ecuaciones publicadas por el API-RP-2A (WSD), sin embargo se deberá de considerar las velocidad de la norma NRF-003-PEMEX-2007, y en su caso utilizar las más críticas.

Para convertir el efecto del viento en presión se cuenta con un análisis simplificado aceptado por las recomendaciones del API-RP-2A (WSD).

Método Simple:

Las fuerzas generadas por el viento se pueden calcular con la siguiente expresión.

$$F = \left(\frac{\rho}{2}\right) V^2 C_s A \quad \dots \text{ecuación 3.12.}$$

Donde:

**F:** Fuerza del viento (lb).

**ρ:** Densidad de masa de aire (slug/ft<sup>3</sup>), 0.0023668 slugs/ft<sup>3</sup> para temperatura y presión estándar.

**V:** velocidad del viento (ft/s).

**C<sub>s</sub>:** Coeficiente de forma (dependerá de las características geométricas que presente el área expuesta).

**A:** área expuesta del objeto (ft<sup>2</sup>).

En la ausencia de datos que indiquen el coeficiente de forma C<sub>s</sub>, el API RP 2A-WSD recomienda, para vientos con ángulos perpendiculares de aproximación con respecto al área proyectada, los siguientes coeficientes de forma:

**Tabla 3.13. Coeficientes de forma, recomendados por el API RP 2A-WSD**

Sección	Cs
<b>Vigas.....</b>	<b>1.5</b>
<b>Costado de Edificios.....</b>	<b>1.5</b>
<b>Secciones Cilíndricas.....</b>	<b>0.5</b>
<b>Área total proyectada sobre la plataforma.</b>	<b>1.0</b>

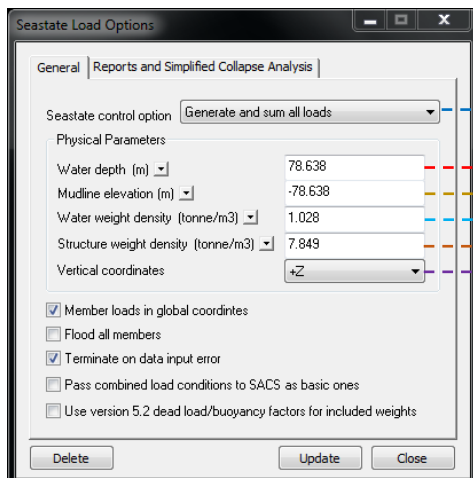
La fuerza del viento contribuye cerca del 25% del momento de volteo total en estructuras costa afuera con profundidades mayores que 46 m y un porcentaje mayor para estructuras menos profundas. La fuerza de viento depende de las condiciones de exposición y la forma de la estructura. Los componentes estructurales cargados principalmente por viento, deberán 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.

### MODELADO DE CARGAS AMBIENTALES EN EL PROGRAMA SACS


Para establecer las cargas ambientales en el programa SACS, es necesario primero definir algunos parámetros



generales, los cuales se establecerán con el comando Seastate **Seastate**, del Menú Environment, de la siguiente manera:

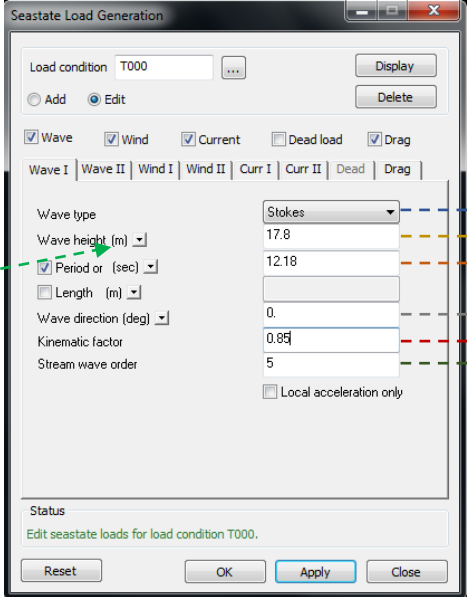


- ➡ Se recomienda utilizar la opción “Generar y sumar todas las cargas”.
- ➡ Tirante de agua.
- ➡ Elevación del lecho marino.
- ➡ Densidad del agua de mar.
- ➡ Densidad del acero con el cual se construyó la plataforma marina.
- ➡ Coordenadas del eje vertical, (+Z).

Posteriormente el ingreso de las cargas ambientales (viento, corriente y oleaje) al programa SACS, se realizará desde el Menú Environment, con ayuda del comando Seastate , de la siguiente manera:

En la siguiente ilustración se muestra la ventana de interacción para ingresar las cargas ambientales. En la cual se realiza el siguiente procedimiento:

- i. Especificar la condición de carga (con un máximo de 4 caracteres). Se establecerá una condición de carga para cada dirección de incidencia de las cargas ambientales.
- ii. Seleccionar cuales de las condiciones ambientales conforman la condición de carga, seleccionando con una (✓) cada una de ellas.
- iii. Finalmente en cada una de las pestañas que corresponden al oleaje, viento y corriente se ingresan los parámetros ambientales previamente calculados; a continuación se presenta una parte del ingreso de los parámetros de las cargas por oleaje.



Revisar las unidades con las que se esté trabajando.

Teoría de oleaje.

Altura máxima del oleaje de acuerdo al tirante del sitio.

Periodo del oleaje.

Dirección de incidencia del oleaje.

Factor de cinemática del oleaje; este ejemplo es una condición de carga por tormenta, por lo que se considera 0.85.

Orden de la función hidráulica a la cual se hará referencia para el análisis del oleaje.

### 3.7.3 CARGAS ACCIDENTALES

Las instalaciones costa afuera están sujetas a diferentes tipos de cargas accidentales, tales como colisión de botes y barcasas, impactos provocados por la caída de objetos, explosiones, etc, los cuales deberán ser analizados particularmente.

### 3.7.4 SISMO

Es otro fenómeno que también puede presentarse, influyendo en el comportamiento de la plataforma, el cual dependerá en parte de las condiciones geológicas y geofísicas correspondientes a las zonas, por lo que deberá considerarse la respuesta de la estructura ante este tipo de efecto. En el análisis, la aceleración del terreno durante el sismo se supone que es un proceso de variación de duración finita. En este caso el mejor método de análisis es el Modal Espectral. Las consideraciones sísmicas deberán incluir una investigación del subsuelo en el sitio de localización de la plataforma por inestabilidad debido al efecto de licuación, así como las características del movimiento de terreno esperado durante la vida de la plataforma.

Para el tipo y tamaño de plataformas hasta ahora manejadas en México, las condiciones que resultan de mayor relevancia para el diseño corresponden a las meteorológicas y oceanográficas. Aunque cabe señalar que a pesar de que las condiciones sísmicas han demostrado no ser dominantes en esta zona se deben tomar en cuenta dependiendo del tipo de análisis que se esté realizando; asimismo, los efectos de la presión hidrostática

tampoco resultan relevantes, ya que la conceptualización de la estructura desde el prediseño satisface los requerimientos mínimos que para estos fines recomiendan las normas de diseño aplicables. Debido a que todas estas cargas descritas anteriormente no se presentan de manera aislada, sino que en muchas de las ocasiones ocurren en forma simultánea, y que la probabilidad de ocurrencia de cada una de ellas es diferente, son combinadas entre sí de tal forma que se apeguen lo más posible a la realidad.

Por lo cual podemos concluir en el siguiente diagrama las solicitaciones que actúan en una plataforma:

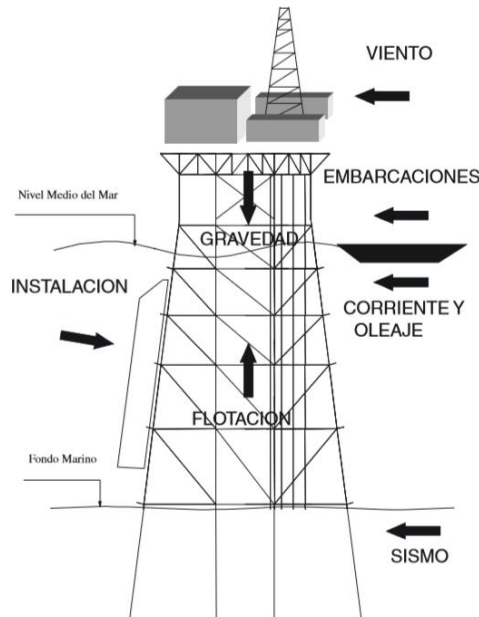


Fig. 3.25. Tipo de solicitaciones en la plataforma tipo Jacket.

### 3.8 PARÁMETROS GEOTECNICOS DE LA CIMENTACIÓN

Para realizar la estructuración de la cimentación de una plataforma, se debe considerar los parámetros y requerimientos geométricos indicados en los códigos y normatividad aplicable. La estructuración que se determine de los pilotes, se empleará como base para realizar los análisis estructurales de sitio (operación y tormenta estáticos, sísmico a nivel de resistencia y sísmico a nivel de ductilidad) y se complementará con los análisis de hincado de pilotes e izaje durante su instalación, verificando que cumpla con los requerimientos indicados en la normatividad aplicable.

Los parámetros geotécnicos de mayor importancia en el diseño de los pilotes son los relacionados con la capacidad de carga axial y la capacidad de carga lateral del pilote.

La capacidad de carga axial (a lo largo del fuste), la componen la resistencia friccionante y la resistencia en la punta del suelo, mientras que la capacidad de carga lateral del pilote se relaciona con la resistencia al cortante del suelo.

Este apartado se detalla en el Capítulo 4 “Análisis de la Interacción Suelo-Estructura”.

### 3.9 FACTORES DE DISEÑO

#### Factores de Esfuerzos Permisibles (API RP 2A-WSD)

Condición de análisis	Factor de incremento de esfuerzos
Tormenta en sitio	1.33
Operación en sitio	1.00

**Factores de Seguridad en Pilotes (API RP 2A-WSD)**

Condición de análisis	Factor de seguridad
Tormenta en sitio (pilotes)	1.50
Operación en sitio (pilotes)	2.00

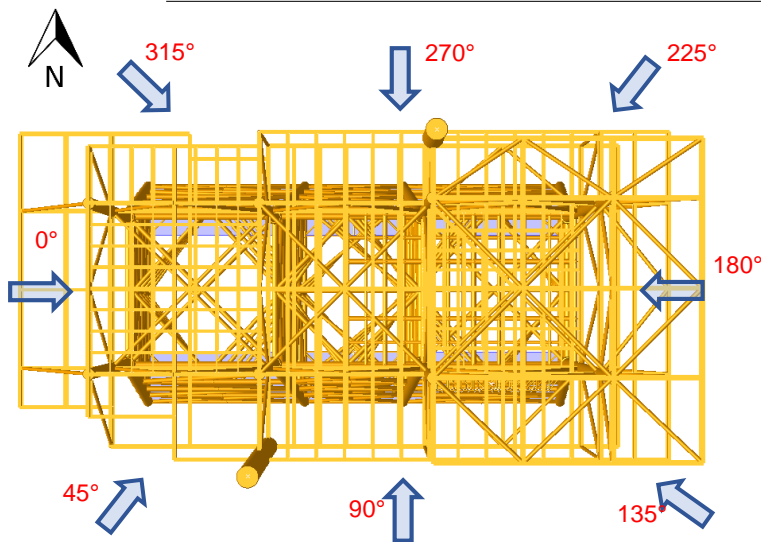
**3.10 COMBINACIONES DE CARGA**

Las combinaciones de carga empleadas en un análisis por condiciones de operación y tormenta, normalmente se dividen en 18 casos, (las combinaciones incluyen el peso propio de la estructura, accesorios, carga muerta, carga viva, carga de equipos y carga de tuberías), además de las 8 direcciones de incidencia a cada 45° (N, NW, W, SW, S, SE, E y NE).

El peso de diseño de la estructura incluirá factores de contingencia adecuados que permitan que la estructura sea más pesada de lo proyectada, con la finalidad de cubrir la incertidumbre del peso. La norma de referencia NFR-041-PEMEX-2007 indica algunos factores de contingencia de carga.

**Tabla 3.14. Factores de contingencia para diseño de la carga, transporte e izaje.**

Fuente de la Estimación de Peso	Código del Estado del Peso	Factor
Peso de componentes obtenidos por pesaje físico después de la fabricación.	A	Precisión Equipo de Medición+1%
Pesos certificados por proveedor.	B	3%
Planos aprobados para construcción. Listas de materiales. Planos de Taller.	C	5%
Datos de proveedores preliminares, volumetrías preliminares, planos para aprobación	D	10%
Equipos principales basados en catálogos o estimaciones de ingeniería. Ruteo preliminar de Tubería y Eléctrico e Instrumentación. Planos estructurales preliminares.	E	15%
Tubería basada en Diagramas de Tubería e Instrumentación, estimados de Electricidad e Instrumentación preliminares.	F	20%



La aplicación de las cargas ambientales, se analizan en ocho direcciones de incidencia consideradas como críticas, espaciadas a cada 45°, como se muestra en la figura anexa.

**Fig. 3.26. Direcciones de la aplicación de las cargas ambientales (corriente, oleaje y viento).**



## Capítulo 4

### 4. ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Los estudios del suelo marino que se requieren para la instalación de plataformas y ductos submarinos fuera de la costa para la explotación de hidrocarburos se dividen en dos partes, los cuales se pueden sintetizar de la siguiente forma:

#### ESTUDIOS GEOFÍSICOS

Estos estudios se requieren para conocer el estado superficial que guarda el sitio donde se va a instalar la estructura marina, considerando que éste se encuentre libre de cualquier obstáculo que puede impedir la correcta colocación de la estructura y cuidando que no existan bolsas de gas, fracturas o condiciones topográficas que determinen un marcado desnivel.

Dentro de estos estudios destacan la medición del tirante de agua, así como la evaluación de las condiciones del fondo marino considerando los planos y las pendientes del área en estudio y sus inclinaciones. También se requiere conocer las condiciones del suelo obteniendo muestras del fondo marino y determinar el tipo de material: en la Sonda de Campeche predominan los suelos formados por arcillas calcáreas muy blandas. Además, es necesario determinar las vetas de limo, arena y concha localizados en los suelos someros, probablemente discontinuos y que podrían contener áreas aisladas de suelo cementado, por lo que los soportes de una plataforma autoelevable o fija podrían encontrar diferencias en el tipo de suelo somero de un lugar a otro. También es necesario conocer la ubicación exacta de las bolsas de gas, las fallas geológicas que pueden cruzar el área en estudio, así como su tendencia y conocer si son activas y si han desplazado el fondo marino, lo que podría considerarse un riesgo para la localización de la estructura o línea submarina (Valdez, 2002).

#### ESTUDIOS GEOTÉCNICOS

Estos estudios se llevan a cabo a través de la estratigrafía del horizonte del suelo en donde se va a llevar a cabo la instalación de la estructura marina, con el propósito de conocer las condiciones del suelo subsuperficial que predomina, con el objeto tanto de diseñar los pilotes de cimentación como evitar cualquier problema en la perforación de pozos, a través de identificar rasgos geológicos significativos que puedan representar riesgos o impactos en la localización definida (Valdez, 2002).

Siendo este tipo de estudios geofísicos y geotécnicos complementarios uno con el otro, normalmente estos estudios tienen el siguiente alcance:

- 1) Localización del sitio en estudio,
- 2) Medición del tirante de agua,
- 3) Evaluación de la topografía del fondo marino,

- 4) Condiciones del suelo y estratigrafía,
- 5) Suelos del fondo marino,
- 6) Estratigrafía del sondeo, penetración medida en pies,
- 7) Estratigrafía acústica,
- 8) Rasgos geológicos y riesgos,
- 9) Manifestaciones de bolsas de gas,
- 10) Fallas enterradas,
- 11) Condiciones causadas por el hombre,
- 12) Resumen de condiciones en el sitio propuesto,
- 13) Evaluación de las condiciones del sitio propuesto, y
- 14) Conclusiones y recomendaciones.

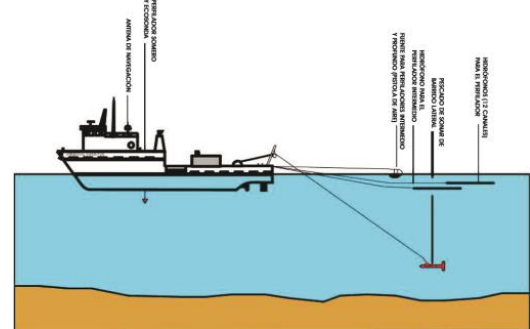


Fig. 4.1. Configuración del barco y equipo geofísico

#### 4.1 INFORMACIÓN GEOLOGICA DE LA SONDA DE CAMPECHE

La información existente en la Sonda de Campeche respecto a las formaciones superficiales se ha obtenido mediante los estudios geotécnicos y geofísicos con sísmica de alta resolución que se realizaron en esta zona. Estos estudios indican que las expresiones geológicas relevantes en el área son: formaciones de arrecifes, montículos carbonatados, paleocanales enterrados, fallas y fracturas.

En lo referente a las características del lecho marino, los estudios geofísicos han permitido dividir a la sonda en una zona norte y otra sur. Estos suelos están constituidos principalmente por sedimentos recientes, clásticos, carbonatados y térreos, teniendo como dominantes a éstos últimos. La zona sur se localiza frente a las costas limitadas por la desembocadura del Río Grijalva, Punta Xicalango e Isla del Carmen, hasta la desembocadura del Río Champotón, con una amplitud máxima fuera de la costa de 120 Km y una mínima de 36 Km; es de pendiente pronunciada con un tirante medio de 40 m, aproximadamente. Los sedimentos son arcillas y limos de manera predominante, provenientes del acarreo de los ríos Grijalva (desde el SW), San Pedro y hasta la desembocadura de la Laguna de Términos, por sus abundantes corrientes fluviales (Valdez, 2002).

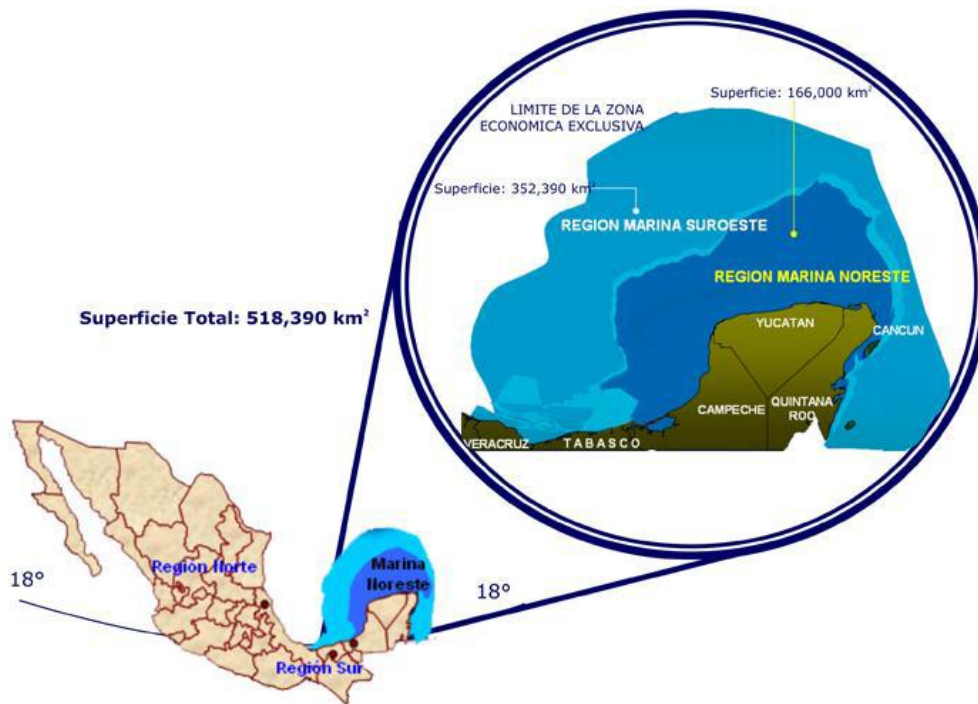


Fig. 4.2. División convencional de la Sonda de Campeche. (PEMEX).

## 4.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

Para realizar la estructuración de la cimentación de una plataforma, se debe considerar los parámetros y requerimientos geométricos indicados en los códigos y normatividad aplicable. La estructuración que se determine de los pilotes, se empleará como base para realizar los análisis estructurales de sitio (operación y tormenta estático, sísmico a nivel de resistencia y sísmico a nivel de ductilidad) y se complementara con los análisis de hincado de pilotes e izaje durante su instalación, verificando que cumpla con los requerimientos indicados en la normatividad aplicable.

Los parámetros geotécnicos de mayor importancia en el diseño de los pilotes de la cimentación son los relacionados con la capacidad de carga axial y la capacidad de carga lateral del suelo.

En la selección de los parámetros de diseño para una cimentación es muy común que se adopte como representativo la medición directa más desfavorable, o bien, el promedio de los datos disponibles. El caso de los estudio geotécnicos para plataformas marinas no es la excepción, puesto que un propósito importante del estudio geotécnico es proporcionar las capacidades de carga axial en compresión y tensión y de carga lateral, considerando el comportamiento del conjunto pilote-suelo, todo esto, en función de los parámetros mecánicos del subsuelo, variables con la profundidad, así como el tipo y la magnitud de las cargas actuantes.

Para el diseño de la cimentación de plataformas marinas tipo Jacket basado en pilotes, se tienen que involucrar ciertas propiedades del suelo, como es el caso del peso volumétrico, el ángulo de fricción y la cohesión; en lugar de escoger estos parámetros en forma de promedio como tradicionalmente se hace, es mejor estimarlos en forma puntual a la profundidad de interés.

## 4.3 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

En la actualidad, para la zona de la Sonda de Campeche, el criterio de diseño y la construcción de la cimentación de una plataforma petrolera se realiza considerando pilotes tubulares de acero.

Las plataformas ya instaladas en la Sonda de Campeche están compuestas de estructuras reticulares de tubos de acero; constan de una subestructura que va apoyada en el lecho marino y empotrada por medio de pilotes, y una superestructura que aloja los paquetes de perforación, o los equipos de producción, según el tipo o propósito de la plataforma.

Los pilotes de la cimentación se caracterizan por ser elementos esbeltos, que serán instalados en el interior de las columnas de la subestructura (concéntricos). Deberán contar con la longitud necesaria para alcanzar la profundidad requerida por diseño atendiendo la estratigrafía y la capacidad de carga axial indicada en la gráfica correspondiente.

Los pilotes que se utilizan en las plataformas como cimentación profunda, se hincan mediante martillos de impacto que usan vapor, diesel o presión hidráulica. Así el espesor de las paredes del pilote debe ser suficiente, no sólo para que esta resista las cargas axiales y las laterales, sino también los esfuerzos que recibe durante el hincado, hasta completar la longitud de penetración de diseño del pilote. En la actualidad, se sigue utilizando el método sugerido por el American Petroleum Institute (API) norma RP 2A, para el diseño de pilotes.

Los pilotes se dimensionarán para resistir los esfuerzos axiales generados por las cargas gravitacionales (cargas muertas y vivas) y los esfuerzos de flexión generados por las sollicitaciones ambientales (oleaje, corriente y viento) en diferentes condiciones de operación y tormenta extrema, así como los esfuerzos actuantes durante el proceso de hincado de los mismos.

Para realizar la estructuración y diseño preliminar de los pilotes para la cimentación de la subestructura se deben tener en consideración los siguientes aspectos:

- La interacción del suelo con la subestructura.
- La interacción del pilote con el suelo.
- Los procedimientos de fabricación, embarque, transporte e instalación.
- Los procedimientos de izaje e hincado.



**Fig. 4.3. y Fig. 4.4. Fabricación e hincado de pilotes.**

Las características mecánicas del suelo en la Sonda de Campeche, dan lugar a que el sistema suelo-pilote soporte por fricción el mayor porcentaje de las cargas axiales y la participación de la punta sea baja, a excepción de algunos sitios en donde ésta puede ser ubicada en estratos arenosos resistentes. Cabe mencionar que solamente en condiciones de carga accidentales es solicitada la participación de la punta del pilote. La fricción demandada por la carga, desarrollada entre el suelo y el pilote, origina la disminución gradual de dicha carga en función de la penetración del pilote, requiriéndose por consiguiente secciones de menor área a profundidades mayores.

Por otra parte, la subestructura ejerce sobre cada uno de los pilotes, restricción al giro al nivel de la superficie del terreno, la cual se halla en función de las propiedades de la sección del pilote, así como de la rigidez de la subestructura.

#### **4.4 CRÍTERIOS DE ESTRUCTURACIÓN**

Cada uno de los pilotes que conforma la cimentación consta de dos partes, una de ellas se halla contenida en el suelo marino penetrando a profundidades que pueden llegar a los 350'-0" (106.68m) en promedio. La otra parte sobresale del suelo, ubicándola en el interior de las piernas de la subestructura, a través de las cuales se extiende usualmente hasta la elevación (+) 25'-0" (7.62m) sobre el nivel medio del mar.

El pilote se integra de varios segmentos con diferentes espesores, de acuerdo a la magnitud de los elementos mecánicos que actúan en las inmediaciones del lecho marino, donde los elementos mecánicos son máximos. Los segmentos que conforman al pilote se conectan con soldaduras de penetración completa, de acuerdo con los requerimientos del API-RP 2A, en base a lo dispuesto por el código ANSI/AWS D1.1.

El pilote se hinca en el suelo marino por percusión, requiriendo en la punta un bisel que favorezca el corte del terreno (zapata de hincado) facilitando la penetración.

Los pilotes mantienen la misma inclinación que las piernas de la subestructura la cual tiene una pendiente de 1:8, lo cual hace necesario utilizar unas guías para su conexión con la superestructura.

Los pilotes sobresalen del suelo marino a través de las piernas de la subestructura, las cuales cuentan con elementos denominados espaciadores que reducen la holgura entre el diámetro exterior del pilote y el diámetro interior de la pierna, restringiendo su longitud libre de pandeo. En la elevación (+) 24'-0" (7.32m), se verifica la

conexión rígida entre ambos elementos (pilotes y piernas) constituyendo de esta manera el sistema en el que la subestructura se halla suspendida de los pilotes, transmitiendo sus cargas en dicha conexi3n, así como a través de los espaciadores.

La cimentaci3n deberá contar con la capacidad estructural para soportar las cargas est ticas y dinámicas actuantes sobre la plataforma sin presentar deformaciones o vibraciones excesivas, poniendo especial atenci3n a los efectos de cargas cíclicas y transitorias.

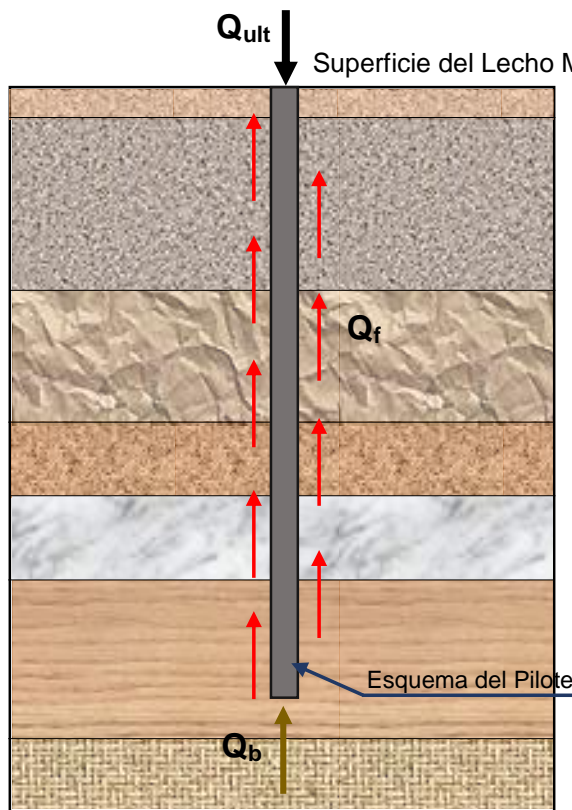
Se deberá verificar el comportamiento no lineal entre el suelo y el pilote, las deflexiones y rotaciones en los pilotes, así como en todos los puntos críticos incluyendo la cabeza de los pilotes (pile head), puntos de inflexi3n y la línea de lodos (Mudline).

De la revisi3n de capacidad de carga de la cimentaci3n, se obtienen los factores de seguridad que resultan a partir de las fuerzas máximas por compresi3n y tensi3n que se presentan en de los pilotes (pilehead). Las recomendaciones del API RP 2A-WSD, secci3n 6.3.4 "Pile penetration", recomiendan que los factores de seguridad mínimos permisibles son:

Condici3n de operaci3n: 2.00  
Condici3n de tormenta: 1.50

Una vez realizado el análisis estructural de los pilotes se deberá verificar que las deflexiones y rotaciones, no tengan magnitudes que excedan los límites permisibles de servicio durante la operaci3n de la plataforma.

La capacidad de carga axial (a lo largo del fuste), la componen la resistencia friccionante y la resistencia en la punta del pilote, mientras que la capacidad de carga lateral del pilote se relaciona con la resistencia a cortante del suelo.



De la est tica se conoce que:

$$Q_{ult} = Q_f + Q_b \quad \dots \text{ecuaci3n 4.1.}$$

$$Q_a = \frac{Q_u}{FS} \quad \dots \text{ecuaci3n 4.2.}$$

Donde:

$Q_{ult}$ : Carga Ultima  
 $FS$ : Factor de Seguridad  
 $Q_a$ : Carga Aplicada  
 $Q_b$ : Capacidad de carga en la punta del pilote.  
 $Q_f$ : Capacidad de caga por fricci3n.

Fig. 4.5. Esquema de un planteamiento de capacidad de carga axial para el diseño de pilotes.

La capacidad de carga última del pilote se determina a partir de la curva de capacidad de carga axial. Esta curva representa la capacidad del suelo a compresión y tensión del sitio en estudio.

El modelo estructural de la cimentación, incluirá los efectos de la socavación, ya que esta reduce la capacidad de carga lateral del pilote, así como su comportamiento axial.

Los esfuerzos permisibles en los pilotes serán los especificados en el AISC, para secciones roladas en caliente, incluyendo las consideraciones de la sección 3.1 y 3.3 del API RP 2A-WSD. El espesor del pilote en la zona del lecho marino está gobernado por la combinación de carga axial y momento flexionante, resultado de las cargas actuantes sobre la plataforma; la curvatura del momento flexionante en el pilote, deberá ser determinado con base en las reacciones de las curvas P-Y (esfuerzo-deformación) indicados en el estudio geotécnico.

### **ESPESOR MÍNIMO DE PARED DEL PILOTE**

La relación D/t en toda la longitud del pilote debe ser lo suficientemente pequeña para excluir que los esfuerzos por aplastamiento rebasen el esfuerzo de fluencia del material del pilote. Se debe tener en consideración las diferentes situaciones de carga ocurridas durante la instalación y la vida de servicio del pilote.

De acuerdo con el API RP 2A-WSD en su sección 6.10.6 “Minimum Wall Thickness”, para los pilotes que van a instalarse por hincado, el espesor mínimo de la pared usado no debe ser menor que:

$$t = 0.25 + \frac{D}{100} \quad \dots \text{ecuación 4.3.}$$

Donde:

t = espesor mínimo (in)

D = diámetro exterior (in)



#### 4.5 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

El proceso para llevar a cabo el análisis de la interacción suelo-estructura, es a base de un conjunto de elementos que se combinan en forma ordenada para cumplir con determinada función. A continuación se presenta un diagrama de flujo de los módulos del programa SACS que intervienen en el análisis de la cimentación.

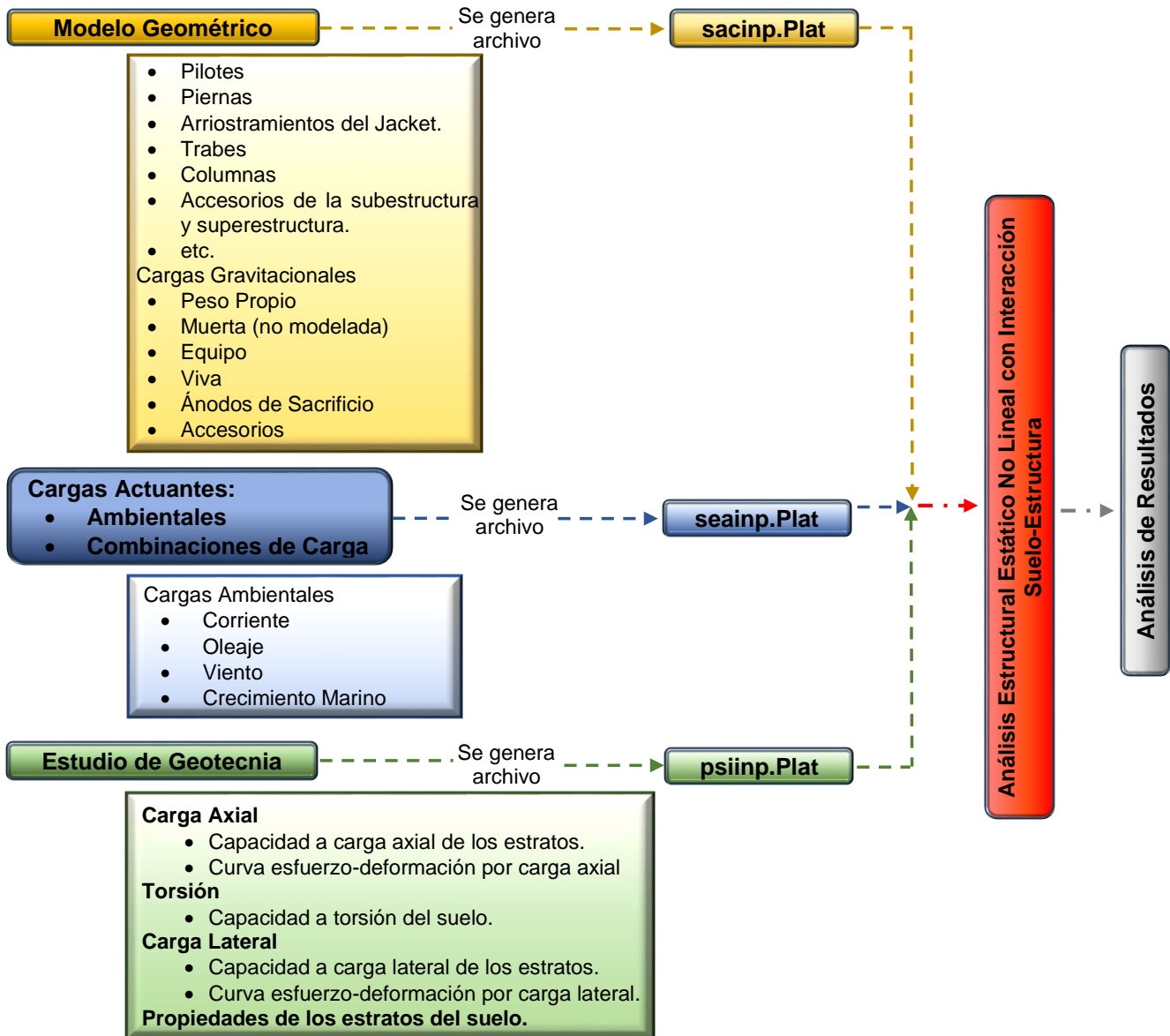


Fig. 4.6. Diagrama de flujo para llevar a cabo un análisis no lineal de la interacción suelo-estructura.

Para evaluar los elementos mecánicos en la cimentación se requieren de ciertos parámetros del suelo, los cuales se obtienen del estudio geotécnico del sitio, mismos que se describen a continuación:

**1) Curvas de transferencia de carga axial.**

El fundamento del pilote es estar diseado para resistir las cargas axiales estticas y cıcicas. La resistencia por carga axial del suelo es proporcionada por una combinaci3n de la adherencia del suelo-pilote y la capacidad de carga en la punta del pilote.

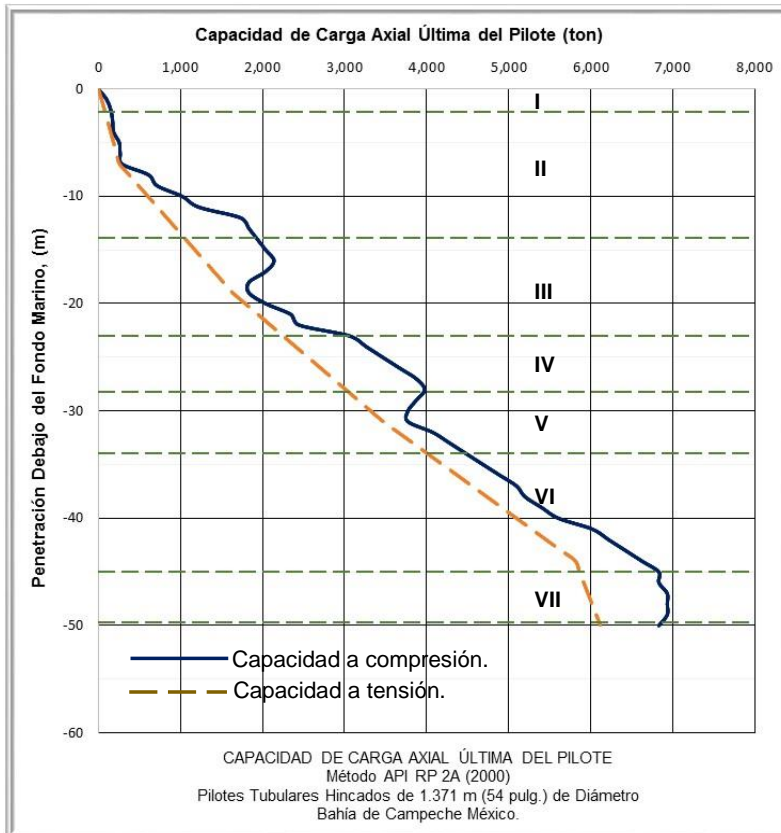
Para el desarrollo de las curvas de transferencia de carga axial pilotes-suelo se recomienda utilizar las ecuaciones del API-RP-2A-WSD, en donde la capacidad ulti3ma del pilote ( $Q_d$ ) est dada por:

$$Q_d = Q_f + Q_p = f \cdot A_s + q \cdot A_p \quad \dots \text{ecuaci3n 4.4.}$$

Donde:

- $Q_f$  = Resistencia a la fricci3n del fuste, lb (kN).
- $Q_p$  = Resistencia total en la punta del pilote, lb (kN).
- $f$  = Capacidad a la fricci3n del suelo, lb/ft<sup>2</sup> (kPa).
- $A_s$  = 3rea de la superficie lateral del pilote, ft<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>).
- $q$  = Capacidad de soporte en la punta del pilote, lb/ft<sup>2</sup> (kPa).
- $A_p$  = 3rea total de la punta del pilote, ft<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>).

Donde a partir del estudio de geotecnia, en donde se obtuvieron las caracteristicas del suelo (propiedades de todos los estratos del suelo marino de la profundidad en estudio) y con base en los par3metros y ecuaciones establecidas en el API-RP-2A-WSD, obtenemos los valores de  $f$  y  $q$ , con los cuales podemos obtener la capacidad a carga axial del suelo, tanto en el fuste como en la punta.



**Estratigrafía**

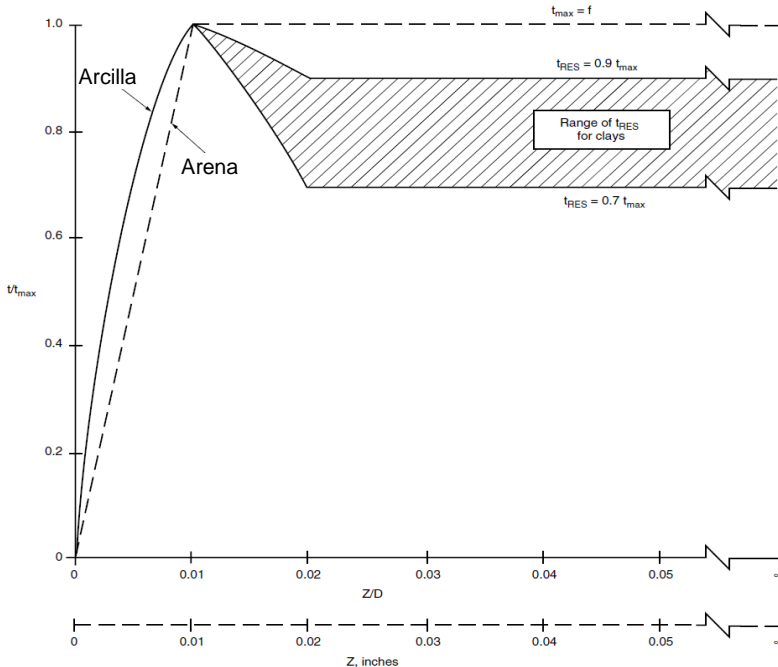
- I** **Estrato I:** Arcilla de muy blanda a blanda, gris, con fragmentos de concha. Profundidad (0 - 2) m.
- II** **Estrato II:** Arena de gruesa a fina, carbonatada, de medio densa a densa, gris claro. Profundidad (2 -14) m.
- III** **Estrato III:** Arcilla de muy dura a firme, gris, con fragmentos de concha. Profundidad (14 -23) m.
- IV** **Estrato IV:** Arcilla muy firme, gris, con fragmentos de concha. Profundidad (23 -28) m.
- V** **Estrato V:** Arena fina limosa, carbonatada, medio densa, gris, con fragmentos de concha. Profundidad (28 -34) m.
- VI** **Estrato VI:** Arcilla de muy firme a dura, gris con fragmentos de concha. Profundidad (34 -45) m.
- VII** **Estrato VII:** Arena de gruesa a fina, carbonatada, de densa a muy densa, gris. Profundidad (45 -50) m.

**Fig. 4.7. Curva de capacidad de carga axial ulti3ma, para un pilote de 54" de di3metro. Del lado derecho se muestra la estratigrafía del suelo marino.**

**2) Curvas T-Z (esfuerzo-deformación), por carga axial.**

La relación trazada de la transferencia entre el cortante suelo-pilote y la deflexión local del pilote a cualquier profundidad se describe mediante una curva (T-Z). De la misma forma la relación entre la resistencia del suelo en la punta del pilote y la deflexión del suelo en la punta del pilote se describe mediante una curva (Q-Z).

Las curvas T-Z pueden ser desarrolladas a partir de pruebas de carga del pilote en perfiles de suelos representativos de donde serán instalados, o las pruebas del suelo en laboratorio también pueden justificar las curvas T-Z para la instalación de los pilotes. En ausencia de criterios más definitivos el API-RP-2A-WSD recomienda las siguientes curvas T-Z para suelos no carbonatados. Las curvas recomendadas se muestran en la Fig. 4.8 tomada de API-RP-2A-WSD, la cual se genera con los datos anexos.



**Tabla 4.1. Datos con los que se genera la Fig. 4.8.**

Arcillas		Arenas	
Z/D	t/t <sub>max</sub>	Z (in)	t/t <sub>max</sub>
0.0000	0.00	0.00	0.00
0.0016	0.30	0.10	1.00
0.0031	0.50	∞	1.00
0.0057	0.75		
0.0080	0.90		
0.0100	1.00		
0.0200	0.70 to 0.90		
∞	0.70 to 0.90		

Donde:

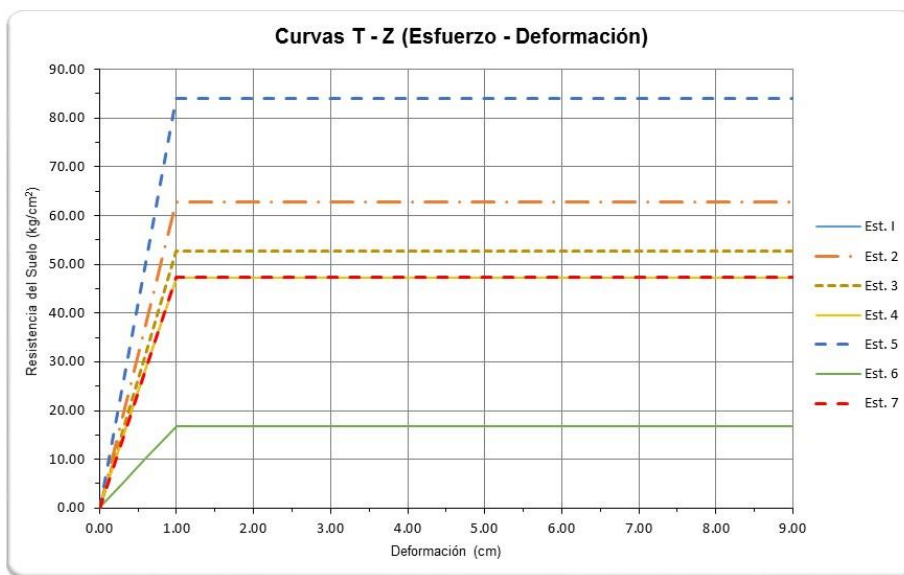
**D:** diámetro del pilote, in (mm).

**t:** Adherencia del pilote que ocasiona la deformación, lb/ft<sup>2</sup> (kPa).

**t<sub>max</sub>:** capacidad máxima del estrato por carga axial, lb/ft<sup>2</sup> (kPa).

**z:** deflexión local del pilote, in (mm).

**Fig. 4.8. Curva de transferencia típica de carga axial-desplazamientos (t-z), (Fig. 6.7.2-1 del API-RP-2A-WSD).**



Estrato II Prof. (2 - 14) m.	
Carga Axial	Deformación
(kg/cm <sup>2</sup> )	(cm)
0.00	0.00
18.82	0.30
37.64	0.60
62.77	1.00
62.77	1.50

Estrato V Prof. (28 - 34) m.	
Carga Axial	Deformación
(kg/cm <sup>2</sup> )	(cm)
0.00	0.00
25.21	0.30
50.41	0.60
84.05	1.00
84.05	1.50

**Ejemplo de los datos a utilizar en la modelación, para la interacción suelo estructura.**

**Fig. 4.9. Ejemplo de curvas esfuerzo-deformación por carga axial en un pilote de 54'' de diámetro.**

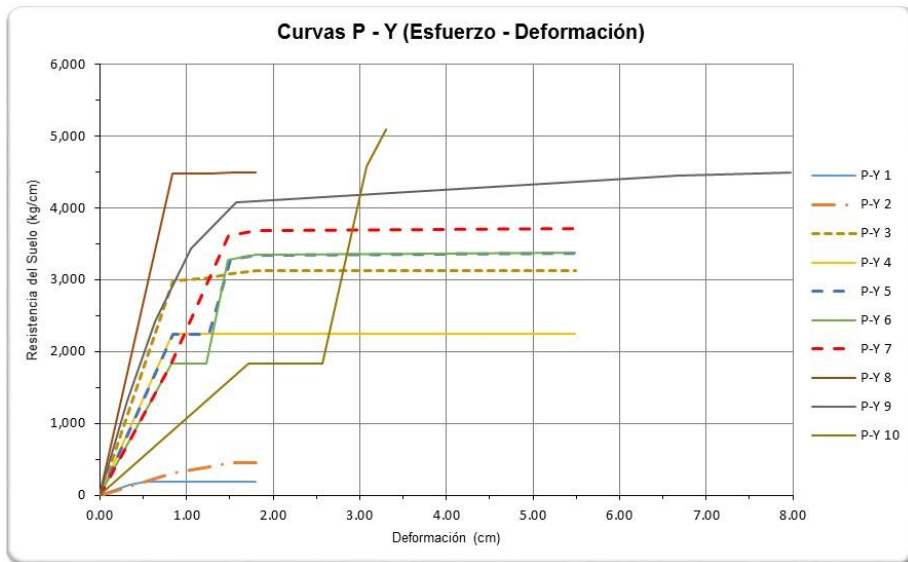
### 3) Curvas P-Y (esfuerzo-deformación), por carga lateral.

Los pilotes deben ser diseñados para soportar cargas laterales, ya sea estática o cíclica. Además, el diseñador debe tener en cuenta en el diseño los casos en que se tenga una sobrecarga de las cargas laterales sobre la plataforma, con el fin de incrementarlas en un factor de seguridad apropiado.

Los efectos de socavación y perturbación del suelo durante la instalación del pilote deben ser tomados en cuenta en el diseño, debido a la pérdida de resistencia a carga laterales del suelo.

Generalmente, bajo carga lateral los suelos arcillosos se comportan como un material plástico que hacen que sea necesario relacionar la deformación pilote-suelo a la resistencia del suelo. Para facilitar este procedimiento, las curvas de resistencia a deformación del suelo ante cargas laterales (P-Y) deben ser construidas a partir de datos de muestras de suelo de laboratorio.

La ordenada de estas curvas es la resistencia del suelo, P, y la abscisa es la deflexión del suelo, Y. Se recomienda seguir el procedimiento del apartado 6.8 del API-RP-2A-WSD, para trazar estas curvas P-Y.



P-Y 3 Prof. 9.27 m.	
Carga Lateral	Deformación
(kg/cm)	(cm)
0.00	0.00
2989.09	0.84
3031.90	1.26
3090.75	1.51
3133.56	1.80
3133.56	5.49

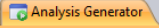
P-Y 6 Prof. 16.50 m.	
Carga Lateral	Deformación
(kg/cm)	(cm)
0.00	0.00
1831.62	0.82
1831.62	1.23
3278.02	1.48
3345.79	1.80
3374.32	5.49

**Tabla 4.2. Ejemplo de datos a utilizar en la modelación para la interacción suelo estructura.**

**Fig. 4.10. Ejemplo de curvas esfuerzo- deformación por carga lateral en un pilote de 54" de diámetro.**

## PROCEDIMIENTO PARA EL MODELADO DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA CON EL PROGRAMA SACS.

Para analizar la cimentación es necesario hacer un análisis por el método estático para las condiciones de operación y tormenta, en donde se considere la interacción suelo-estructura, el procedimiento para realizar este análisis con el programa SACS es el siguiente:


En la pestaña **Analysis Generator**  que se encuentra en la ventana principal de SACS, accederemos al Menú **Analysis Type**, en donde se seleccionara la opción **Static**. Posteriormente en el desplegado **Subtype** se elegirá la opción **Static Analysis With Pile/Soil Interaction**.


Este tipo de análisis considera material elástico lineal y geometría lineal con un comportamiento no lineal iterativo de las propiedades del suelo y del pilote. Con lo que podremos obtener:

- Las cargas generadas en la plataforma debido a las cargas gravitacionales y ambientales.
- Efectos P-delta.
- Revisión del pilote por diversos códigos.
- Revisión de la capacidad del suelo y cálculo de la profundidad del pilote.

Para este análisis se requiere generar tres archivos de datos que alimenten el programa, el primero es el archivo SACS Model File (*sacinp*), en el cual se establece la geometría de la estructura, materiales, dimensiones, y cargas gravitacionales; el segundo archivo (*seainp*) se establecen las cargas (gravitacionales y ambientales) así como las combinaciones de carga, este archivo se deriva del modelo geométrico generado en Model File; el tercer archivo es PSI Input File (*psiinp*).

El archivo PSI Input File, es de tipo de entrada de datos para generar el análisis de la cimentación, en el cual se establecen los parámetros del suelo; se debe contar con la información antes descrita y generar de la siguiente manera:

- a) Con ayuda del Módulo Data File de SACS  , generaremos el archivo de datos de entrada.
- b) El tipo de archivo de datos de entrada para el análisis de la interacción Suelo – Estructura, se generará para un análisis estático, con la modalidad de Pile Soil Interaction Input File.
- c) Una vez en la ventana principal del módulo Data File, comenzaremos a ingresar las líneas de texto con

 ayuda del comando Insert Input Line, con el cual seleccionaremos los comandos para ingresar los parámetros del suelo y de los pilotes, a continuación se muestra un ejemplo del archivo (*psiinp*).

Crterios y Consideraciones para el Modelado de Plataformas Marinas Tipo Jacket, para Tirantes de Aguas Someras

psiinp.Plataforma Octapodo											
1	ANALISIS DE INTERACCION SUELO ESTRUCTURA										
2	PSIOPT +ZMET	SM				100	0.507.849047				
3	PLTRQ SD										
4	PLGRUP										
5	PLGRUP O20	203.2	5.082038.9815.562531.1	35.							
6	PLGRUP O20	203.2	5.082038.9815.562531.1	80.			1.4775				
7	PILE										
8	PILE P1A6P1A5 O20							SOL1			
9	PILE P1B6P1B5 O20							SOL1			
10	PILE P2A6P2A5 O20							SOL1			
11	PILE P2B6P2B5 O20							SOL1			
12	PILE P3A6P3A5 O20							SOL1			
13	PILE P3B6P3B5 O20							SOL1			
14	PILE P4A6P4A5 O20							SOL1			
15	PILE P4B6P4B5 O20							SOL1			
16	SOIL										
17	SOIL TZAXIAL HEAD	7	5					SOL1			
18	SOIL T-Z	SLOCSM	5	2.00	0.0909						
19	SOIL T-Z	T-Z		14.80	0.30 28.37	0.60 47.25	1.00 47.25	1.50			
20	SOIL T-Z	SLOCSM	5	2.00 14.00	0.0909						
21	SOIL T-Z	T-Z		18.32	0.30 37.64	0.60 62.77	1.00 62.77	1.50			
22	SOIL T-Z	SLOCSM	5	14.00 23.00	0.0909						
23	SOIL T-Z	T-Z		15.80	0.30 31.60	0.60 52.66	1.00 52.66	1.50			
24	SOIL T-Z	SLOCSM	5	23.00 28.00	0.0909						
25	SOIL T-Z	T-Z		14.18	0.30 28.37	0.60 47.25	1.00 47.25	1.50			
26	SOIL T-Z	SLOCSM	5	28.00 34.00	0.0909						
27	SOIL T-Z	T-Z		25.21	0.30 50.41	0.60 84.05	1.00 84.05	1.50			
28	SOIL T-Z	SLOCSM	5	34.00 45.00	0.0909						
29	SOIL T-Z	T-Z		5.06	0.30 10.11	0.60 16.78	1.00 16.78	1.50			
30	SOIL T-Z	SLOCSM	5	45.00 150.	0.0909						
31	SOIL T-Z	T-Z		14.18	0.30 28.37	0.60 47.25	1.00 47.25	1.50			
32	SOIL BEARING HEAD	1	2					SOL1			
33	SOIL BEAR	SLOC	2	150.	.00015						
34	SOIL T-Z	T-Z		70.22	100.						
35	SOIL TORSION HEAD			1150.62	SOL1						
36	SOIL LATERAL HEAD	10	YEXP137.16					SOL1			
37	SOIL P-Y	SLOCSM	4		.010						
38	SOIL P-Y	P-Y		146.24	.34181.91	0.51181.91	0.61				
39	SOIL P-Y	SLOCSM	5	7.00	.010						
40	SOIL P-Y	P-Y		313.89	0.84403.06	1.26 453.	1.51 453.	1.80			
41	SOIL P-Y	SLOCSM	6	9.27	.010						
42	SOIL P-Y	P-Y		2989.1	0.843031.9	1.263090.7	1.513133.6	1.80			
43	SOIL P-Y	SLOCSM	6	3133.6	5.49						
44	SOIL P-Y	P-Y		12.	.010						
45	SOIL P-Y	P-Y		2241.8	0.842241.8	1.262241.8	1.512241.8	1.80			
46	SOIL P-Y	SLOCSM	6	2241.8	5.49						
47	SOIL P-Y	P-Y		14.	.010						
48	SOIL P-Y	P-Y		2241.8	0.842241.8	1.263283.4	1.513345.8	1.80			
49	SOIL P-Y	SLOCSM	6	3374.3	5.49						
50	SOIL P-Y	P-Y		16.50	.010						
51	SOIL P-Y	P-Y		1831.6	0.821831.6	1.233278.0	1.483345.8	1.80			
52	SOIL P-Y	SLOCSM	5	3372.0	5.49						
53	SOIL P-Y	P-Y		30.00	.010						
54	SOIL P-Y	P-Y		1831.6	0.823613.3	1.483691.8	1.803720.3	5.49			
55	SOIL P-Y	SLOCSM	5	39.00	.010						
56	SOIL P-Y	P-Y		4485.4	0.844485.4	1.264487.2	1.514487.2	1.79			
57	SOIL P-Y	SLOCSM	8	45.	.010						
58	SOIL P-Y	P-Y		1312.6	0.312421.9	0.633436.7	1.054082.4	1.57			
59	SOIL P-Y	SLOCSM	5	4348.1	5.314451.5	6.654487.2	7.98				
60	SOIL P-Y	P-Y		150.	.010						
61	SOIL P-Y	P-Y		1831.6	1.711831.6	2.574579.9	3.085093.6	3.30			
62	END										

Ingresar datos generales para el análisis como son: unidades, eje vertical, norma a utilizar, densidad del acero, etc.

Ingresar los datos del grupo de pilotes: diámetro, espesor, longitud del pilote, módulo de elasticidad, módulo de cortante, área de la cabeza, etc.

Ingresar los datos de cada uno de los pilotes, los cuales son: Nombre de la conexión del pilote que está al nivel del Mudline, grupo al que pertenece (definido al generar la geometría), nombre de la tabla con las características del suelo a la cual hará referencia para el análisis del pilote en cuestión, etc.

Ingresar los resultados del estudio de mecánica de suelos, referente a la capacidad de carga axial. Los datos que se ingresan para hacer un análisis no lineal son las gráficas de esfuerzo-deformación por carga axial.

Ingresar la capacidad de carga del suelo en la cabeza del pilote.

Capacidad del suelo a torsión.

Ingresar los resultados del estudio de mecánica de suelos, referente a la capacidad por carga lateral. Los datos que se ingresan para hacer un análisis no lineal son las gráficas de esfuerzo-deformación por carga lateral, los cuales se muestran en las gráficas antes presentadas.

Fig. 4.11. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (psiinp).

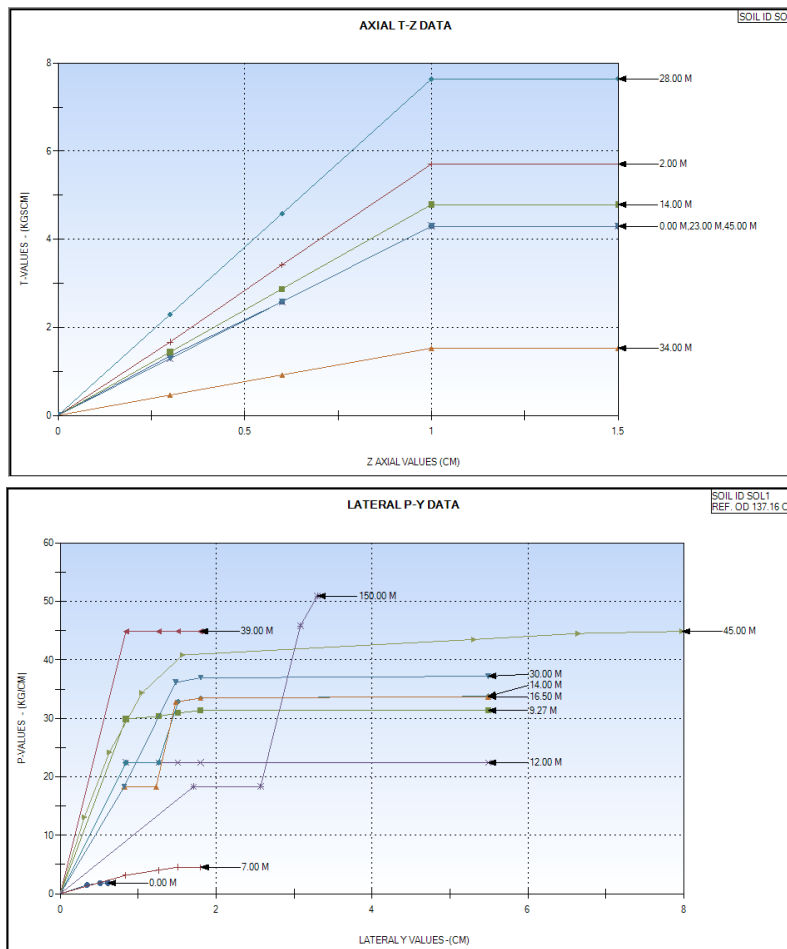


#### 4.6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA

Una vez realizadas las corridas del modelo es necesario analizar los resultados de la interacción suelo-estructura en SACS. A partir de estos podremos determinar si la estructura propuesta es correcta o en su caso se requiere una rectificación de la misma para optimizar el diseño.

Es importante corroborar las características del suelo con las que el programa está llevando a cabo el análisis, ya que de estos depende en gran medida el diseño de la cimentación. Por el tipo de estructura que estamos analizando y la importancia que tiene, es recomendable utilizar los parámetros más críticos obtenidos de la campaña de sondeos y perforaciones realizadas en sitio.

A continuación se muestra a manera de ejemplo las gráficas con las que se llevó a cabo el análisis de la cimentación, éstas son generados por SACS a partir de los datos del suelo ingresados, y nos ayudan a corroborar los datos de entrada del análisis.



**Fig. 4.12 y Fig. 4.13 Gráficas obtenidas del análisis estructural, con las cuales podemos verificar que los datos que se ingresaron al modelo estructural son correctos.**

Posteriormente se revisará el archivo (*psilst*), el cual nos presenta los resultados de los análisis llevados a cabo, aunado a esto nos brinda un resumen en donde se indican las cargas máximas que se presentan en cada uno de los pilotes, así como su correspondiente factor de seguridad, un ejemplo de esto es el extracto del archivo (*psilst*) que se muestra a continuación.

**Tabla 4.3. Ejemplo de los resultados del análisis de la interacción suelo-estructura.**

\*\*\* SOIL MAXIMUM AXIAL CAPACITY SUMMARY \*\*\*

PILE GRP	***** PILE *****				***** COMPRESSION *****				***** TENSION *****						
	JT	PILEHEAD O.D. CM	THK. CM	WEIGHT KG	PEN. M	CAPACITY (INCL. WT) KG	MAX. LOAD KG	CRITICAL LOAD KG	CONDITION SAFETY CASE FACTOR	CAPACITY (INCL. WT) KG	MAX. LOAD KG	CRITICAL LOAD KG	CONDITION SAFETY CASE FACTOR		
P1A6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10717059.9	-2896502.4	-2896502.4	0016	3.70	10908082.6	1124544.6	1124544.6	WT08	9.70
P1B6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10719673.1	-2939581.3	-2939581.3	0014	3.65	10907753.3	1234374.2	1234374.2	WT02	8.84
P2A6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10571399.4	-3900885.4	-3900885.4	0012	2.71	10764036.3	2822736.8	2822736.8	0014	3.81
P2B6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10572473.9	-3740262.0	-3740262.0	0011	2.83	10761050.1	2892755.4	2892755.4	0016	3.72
P3A6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10566822.3	-4446068.3	-4446068.3	0016	2.38	10756837.0	2944389.7	2944389.7	WT02	3.65
P3B6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10566154.1	-4260546.0	-4260546.0	0015	2.48	10757887.2	2782212.2	2782212.2	WT08	3.87
P4A6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10720657.7	-3143887.9	-3143887.9	0018	3.41	10908038.1	1073625.8	1073625.8	WT06	10.16
P4B6	020	203.20	5.08	*****	115.0	10724555.2	-3283027.1	-3283027.1	0012	3.27	10907973.4	1141001.4	1141001.4	WT04	9.56

**Características de los Pilotes**

Grupo al que pertenecen en el modelo geométrico, diámetro, espesor, peso y profundidad de penetración.

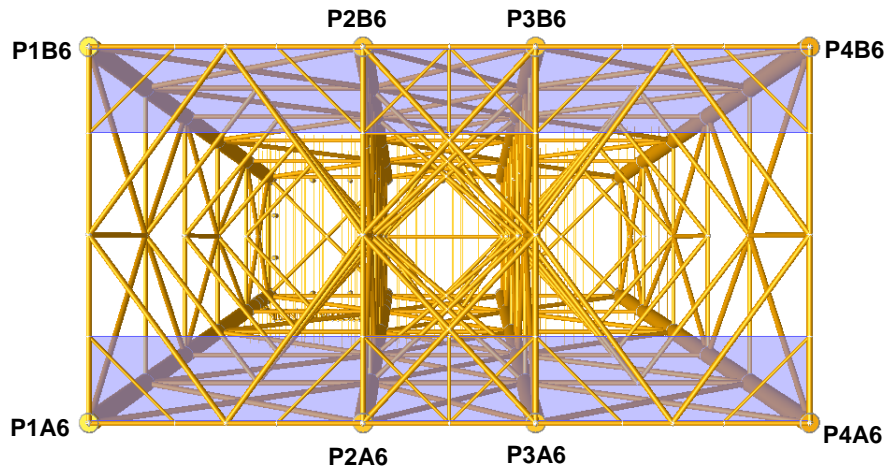
**Datos de las Cargas Máximas a Compresión que se presentan**

Capacidad de carga a compresión, carga máxima que se presenta según las combinaciones de carga, condición de carga que presenta la carga crítica y el factor de seguridad en el pilote.

**Datos de las Cargas Máximas a Tensión que se presentan**

Capacidad de carga a tensión, carga máxima que se presenta según las combinaciones de carga, condición de carga que presenta la carga crítica y el factor de seguridad en el pilote.

La Tabla 4.3 se muestran algunos de los resultados que podemos obtener de la modelación realizada en SACS para el análisis de interacción suelo estructura.



**Fig. 4.14. Ejemplo de la distribución de pilotes, en una plataforma tipo octápodo.**

## Capítulo 5

### 5. ANÁLISIS POR EL MÉTODO ESTÁTICO, DE PLATAFORMAS TIPO JACKET EN LAS ETAPAS DE OPERACIÓN Y TORMENTA

Las etapas principales que son consideradas en el análisis y diseño de una plataforma tipo Jacket son: análisis in situ (condiciones de operación y tormenta). En este análisis, el modelo estructural se somete a los efectos de las sollicitaciones ambientales y gravitacionales combinadas en una forma tal que tengan una probabilidad adecuada de ocurrencia. El objetivo de este análisis es garantizar un adecuado funcionamiento estructural de todos y cada uno de los elementos estructurales ante las sollicitaciones normales de carga a que se verá sujeta durante la mayor parte de su vida útil. Generalmente, la condición crítica (tormenta) rige el diseño de las plataformas marinas desplantadas hasta ahora en la Sonda de Campeche.

#### 5.1 CONSIDERACIONES GENERALES DE DISEÑO

El objeto del análisis in situ, es conocer los esfuerzos a los que estarán sujetos los elementos estructurales y conexiones tubulares que conforman la plataforma marina fija, así como la capacidad estructural de la misma para diferentes combinaciones de carga (cargas gravitacionales, flotación, presión hidrostática, viento, corriente y oleaje), en diferentes ángulos de incidencia. Los requerimientos de resistencia bajo las combinaciones de carga correspondientes, deben ser aplicados conforme a las recomendaciones del API-RP-2A- WSD, 21ª edición.

Las cargas empleadas en el análisis estático para las condiciones de operación y tormenta, son las cargas correspondientes a las cargas gravitacionales y a las cargas ambientales actuantes sobre la estructura, de acuerdo con los parámetros indicados en la norma de referencia NRF-003-PEMEX-2007. La aplicación de estas cargas ambientales actuando en una plataforma, se realiza en ocho direcciones de incidencia consideradas como críticas espaciadas a cada 45°, como se muestra en la Fig. 3.26 Los parámetros meteoceánicos (ambientales) que se emplean para el análisis, son obtenidos de los anexos de la norma de referencia, y son mencionados en el capítulo 3 “Análisis Estructural y Modelado de Plataformas Marinas Tipo Jacket”.

El análisis estático toma en cuenta el comportamiento lineal tanto del material como de la geometría. Es una herramienta útil para realizar evaluaciones de las fuerzas sísmicas en el caso de edificios, para el caso que estamos analizando es útil para evaluar las acciones debidas al oleaje, corriente y viento en plataformas marinas. Con lo que se busca obtener las fuerzas actuantes para cada una de las combinaciones de cargas que actúan en diferentes incidencias sobre la estructura.

Dentro de los resultados del análisis las características de respuesta más importantes son:

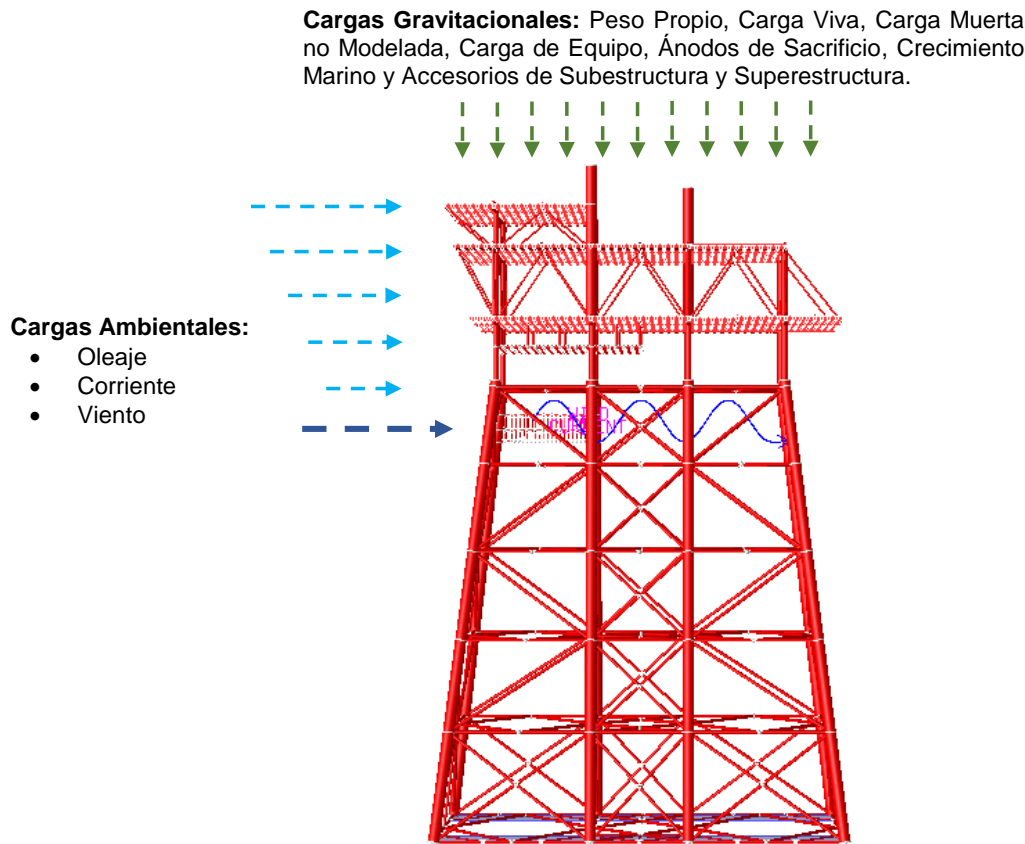
- Las demandas reales de fuerza sobre elementos potencialmente frágiles, tales como fuerza axial en columnas y pilotes, fuerza en diagonales, momentos flexionantes en las conexiones viga-columna, fuerza cortante en vigas, etc.

- La estimación de demandas de deformación para elementos que tienen que deformarse para disipar la energía impuesta a la estructura por la acción del oleaje, corriente y viento.
- Identificación de las regiones críticas de los elementos en las cuales se espera que la demanda de deformación sea alta.
- Identificación de las discontinuidades de rigidez en planta o elevación.

En el diseño estructural, los análisis que se realizan requieren la modelación o representación matemática de la estructura; esto es, describir las características de la estructura y las solicitaciones a las que se someterá, de forma tal que se simplifique la interpretación de dichos datos. Estas características deben definir el comportamiento real de la estructura en lo posible. Por lo antes mencionado, la modelación variará dependiendo del tipo de análisis que se realice.

Las cargas a las que se debe someter la plataforma en el análisis se dividen en cargas gravitacionales (cargas verticales), cargas ambientales (cargas laterales), cargas accidentales y cargas por deformaciones de la estructura.

En el siguiente diagrama se indican las cargas que inciden en una plataforma para la modelación en condiciones de operación y tormenta.



**Fig. 5.1. Diagrama de cargas que inciden en una plataforma in situ.**

Las fuerzas ejercidas por efecto de la corriente, oleaje y viento son dinámicas por naturaleza, sin embargo para elementos Jacket por ser instalados en aguas someras, los efectos dinámicos pueden despreciarse y calcularse por un método estático, llegando a obtener fuerzas mayores que nos mantienen del lado de la seguridad.

Para verificar la capacidad estructural de los elementos que conforman la plataforma, se efectúa la revisión de los esfuerzos actuantes en los elementos estructurales de acuerdo con las recomendaciones del API RP 2A-WSD.

### 5.2 DIAGRAMA DE FLUJO DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON EL PROGRAMA SACS

Para realizar un análisis estructural es necesario llevar a cabo una serie de pasos que en conjunto nos brindaran una combinación en forma ordenada para cumplir con determinada función. La secuencia de pasos para realizar un análisis estático es la siguiente:

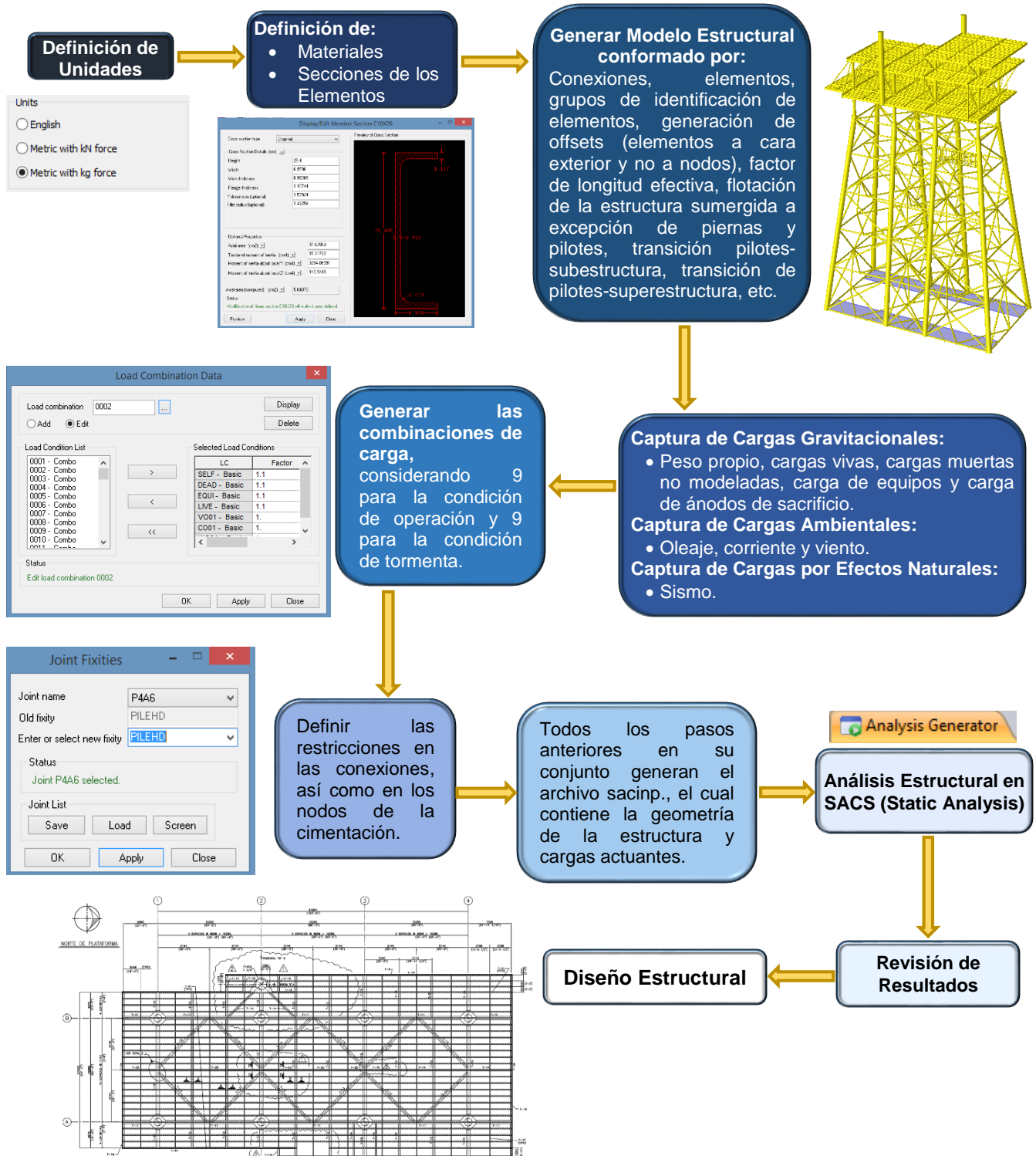


Fig. 5.2. Diagrama de flujo del análisis estructural por el método estático, de una plataforma marina tipo Jacket, con ayuda del programa SACS.

### 5.3 PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS PARA DISEÑO BAJO CONDICIONES DE OPERACIÓN Y TORMENTA

Se analiza el efecto que producirán las condiciones extremas a las que se espera se verá sujeta la estructura durante su vida útil sobre cada uno de sus componentes. Este análisis debe considerar los efectos dinámicos por naturaleza del oleaje mediante su equivalente estático.

#### 5.3.1 PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS PARA DISEÑO BAJO CONDICIONES DE TORMENTA

Antes de comenzar a modelar una plataforma se deben calcular los parámetros referentes a las cargas ambientales. Para el cálculo de estos se aplicará el criterio del API-RP-2A, considerando los parámetros del anexo A de la norma NRF-003-PEMEX-2007.

- 1) Determinación del periodo aparente de la ola, considerando el efecto Doppler de la corriente en la ola, utilizando las ecuaciones del apartado 3.7.2 del presente trabajo; a manera de ejemplo se muestran los siguientes valores utilizados en el caso de estudio presente trabajo.

$$d_{max} = \text{Tirante (ft)} + \text{Altura de Marea Astronómica (ft)} + \text{Altura de Marea de Tormenta (ft)}$$

**Tabla 5.1. Valores del sitio en estudio, para la determinación del periodo aparente de la ola.**

Periodo de la Ola	T = 12.1 s
Tirante de agua incluyendo marea de tormenta	d = 78.638 + 0.76 + 0.60 = 80.00 m.
Velocidad promedio del perfil de la corriente	V <sub>1</sub> = (125 + 100 + 75)/3 = 100 cm/s
Aceleración de gravedad	g = 981 cm/s <sup>2</sup>

Calculamos

$$\frac{V_1}{gT} = \frac{(1.00 \text{ m})}{\left(\frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2}\right)(12.10)} = 0.00842 \quad \frac{d}{gT^2} = \frac{(80 \text{ m.})}{\left(\frac{9.81 \text{ m.}}{\text{s}^2}\right)(12.1)^2} = 0.0557$$

Con estos datos entramos a la figura 2.3.1-2 (efecto Doppler debido a la corriente) del API-RP-2A, encontrando que:

$$\frac{T_{app}}{T} = 1.0599 \rightarrow \therefore T_{app} = T \times 1.0599 = 12.91 \text{ s}$$

$$T_{app} = 12.91 \text{ s}$$

- 2) Cinemática bidimensional de la ola.

Se comienza calculando:

$$\frac{H}{gT_{app}^2} = \frac{(17.80 \text{ m.})}{\left(\frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2}\right)(12.91 \text{ s})^2} = 0.0108 \quad \frac{d}{gT_{app}^2} = \frac{(80.00 \text{ m})}{\left(\frac{9.81 \text{ m}}{\text{s}^2}\right)(12.91 \text{ s})^2} = 0.0489$$

Donde:

H: De acuerdo a la Fig. 3.15 y un tirante del sitio de 80.00 m obtenemos una altura de ola máxima de 17.80 m.

Posteriormente ingresamos a la figura 2.3.1-3 (Regiones de aplicación de las diferentes teorías de oleaje) del API-RP-2A, con la que se definirá la teoría a partir de la cual se calcularán las fuerzas debidas al oleaje.

Con los valores anteriormente obtenidos, la teoría que mejor se ajusta es Stokes de 5to orden.



3) Factor de cinemática de la ola:

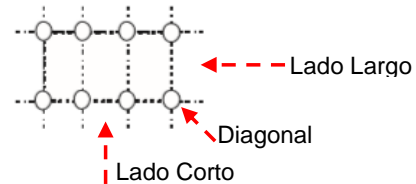
Es usado para considerar las condiciones de irregularidad de la forma y la dispersión del oleaje realmente presentes. Para el caso de regiones marinas de la Sonda de Campeche, la norma NRF-003-PEMEX-2007 considera un factor de cinemática de ola de 0.85 para tormenta.

4) Factor de bloqueo de corriente.

En las proximidades de la plataforma, la velocidad de la corriente debe ser reducida debido al bloqueo que se genera por los elementos inmersos en el agua que se oponen al flujo continuo de la corriente. La sección 2.3.1 1b-4 del API-RP-2A recomienda los siguientes valores:

**Tabla 5.2. Factor de bloqueo de corriente.**

No. de Piernas	Orientación	Factor de Bloqueo
8	Lado Largo	0.70
	Diagonal	0.85
	Lado Corto	0.80



En la Tabla 5.3 se presentan los parámetros por cargas ambientales en condición de tormenta de la plataforma modelada en el presente trabajo, los cuales fueron calculados como anteriormente se indicó y otros fueron tomados del anexo A de la norma NRF-003-PEMEX-2007.

**Tabla 5.3. Parámetros del caso en estudio para condición de tormenta, para una plataforma marina tipo octápodo, localizada en la Sonda de Campeche.**

CONDICIÓN DE TORMENTA			
No.	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Teoría de Hidrodinámica		Stokes 5
2	Tirante de Agua	m	78.638
3	Altura de Ola	m	17.8
4	Altura de Ola Significante	m	4.00
5	Coefficiente de Cinemática de la Ola		0.85
6	Período de la Ola	s	12.18
7	Altura de la Marea Astronómica	m	0.76
8	Altura de la Marea de Tormenta	m	0.60
9	Velocidad Máxima de Viento a 10 m sobre el N.M.M. (m/s), promedio de 1 hr	(m/s)	33.00
10	Velocidad de Corriente	(m/s)	
		0% de la profundidad	1.25
		50% de la profundidad	1.00
		95% de la profundidad	0.75
11	Período Aparente (Tapp)	s	12.91
12	Coeficientes de Inercia y de Arrastre		
	Coeficiente de Arrastre (Cd)	Elementos Sumergidos	1.05
	Coeficiente de Inercia (Cm)		1.20
	Coeficiente de Arrastre (Cd)	Elementos Fuera del Agua	0.65
	Coeficiente de Inercia (Cm)		1.60
13	Factor de Bloqueo de Corriente, para Plataforma de 8 Piernas	De Frente	0.70
		Diagonal	0.85
		Costado	0.80



### 5.3.2 PARÁMETROS OCEANOGRÁFICOS Y METEOROLÓGICOS PARA DISEÑO BAJO CONDICIONES DE OPERACIÓN

Las condiciones normales de operación a las que se verá sujeta la estructura durante la mayor parte de su vida útil deben también ser analizadas, por lo que es preciso obtener los parámetros correspondientes para esta condición. Para el cálculo de estos se aplicará el criterio del API-RP-2A, considerando los parámetros del anexo B de la norma NRF-003-PEMEX-2007.

El cálculo del periodo aparente de la ola en la condición de operación, se realiza con el mismo procedimiento explicado en la condición de tormenta, utilizando las ecuaciones del apartado 3.7.2 del presente trabajo:

$$d_{max} = \text{Tirante (ft)} + \text{Altura de Marea Astronómica (ft)} + \text{Altura de Marea de Tormenta (ft)}$$

$$d = 78.638 \text{ m} + 0.76 \text{ m} + 0.30 \text{ m} = \mathbf{79.70 \text{ m.}}$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{79.70 \text{ m}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (8.20 \text{ s})^2} = 0.1208$$

$$\frac{V}{gT} = \frac{0.30}{(9.81)(8.20)} = 0.00373$$

Entrando a la figura 2.3.1-2 del API-RP-2A (WSD) se obtiene:

$$\frac{T_{app}}{T} = 1.025$$

$$T_{app} = \mathbf{8.405 \text{ s}}$$

En la Tabla 5.4 se presentan los parámetros por cargas ambientales en condición de operación:

**Tabla 5.4. Parámetros del caso en estudio para condición de operación de una plataforma marina tipo octápodo, localizada en la Sonda de Campeche.**

CONDICIÓN DE OPERACIÓN			
No.	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Teoría de Hidrodinámica		Stokes 5
2	Tirante de Agua	m	78.638
3	Altura de Ola	m	8.05
4	Altura de Ola Significante	m	4.00
5	Coefficiente de Cinematica de la Ola		1.00
6	Período de la Ola	s	8.20
7	Altura de la Marea Astronómica	m	0.76
8	Altura de la Marea de Tormenta	m	0.30
9	Velocidad Máxima de Viento a 10 m sobre el N.M.M. (m/s), promedio de 1 hr	(m/s)	14.40
10	Velocidad de Corriente	(m/s)	
		0% de la profundidad	0.30
		50% de la profundidad	0.25
		95% de la profundidad	0.18
11	Periodo Aparente (Tapp)	s	8.405
12	Coefficientes de Inercia y de Arrastre		
	Coefficiente de Arrastre (Cd)	Elementos Sumergidos	1.05
	Coefficiente de Inercia (Cm)		1.20
	Coefficiente de Arrastre (Cd)	Elementos Fuera del Agua	0.65
13	Factor de Bloqueo de Corriente, para Plataforma de 8 Piernas	De Frente	0.70
		Diagonal	0.85
		Costado	0.80

### 5.4 COMBINACIONES DE CARGA

Las combinaciones de carga empleadas en un análisis por condiciones in situ, normalmente se dividen en 9 casos para cada condición (operación y tormenta), las combinaciones incluyen (peso propio de la estructura, accesorios de la subestructura, carga muerta, carga viva, carga de equipos y carga de tuberías), en conjunto con las cargas ambientales con direcciones de incidencia a cada 45° (N, NW, W, SW, S, SE, E y NE).

El peso de diseño de la estructura incluirá factores de contingencia adecuados que permitan que la estructura sea más pesada de lo proyectada, con la finalidad de cubrir la incertidumbre del peso. La norma de referencia NFR-041-PEMEX-2007 indica algunos factores de contingencia de carga.

**Tabla 5.5. Factores de contingencia para diseño de la carga, transporte e izaje.**

Fuente de la Estimación de Peso	Código del Estado del Peso	Factor
Peso de componentes obtenidos por pesaje físico después de la fabricación.	A	Precisión Equipo de Medición+1%
Pesos certificados por proveedor.	B	3%
Planos aprobados para construcción. Listas de materiales. Planos de Taller.	C	5%
Datos de proveedores preliminares, volumetrías preliminares, planos para aprobación	D	10%
Equipos principales basados en catálogos o estimaciones de ingeniería. Ruteo preliminar de Tubería y Eléctrico e Instrumentación. Planos estructurales preliminares.	E	15%
Tubería basada en Diagramas de Tubería e Instrumentación, estimados de Electricidad e Instrumentación preliminares.	F	20%

A continuación se muestran ejemplos de las combinaciones de carga aplicadas en las condiciones, de operación y tormenta, para las diferentes acciones de carga y direcciones de incidencia, con sus correspondientes factores de carga.

**Tabla 5.6. Ejemplo de las combinaciones de carga para la condición de operación.**

No.	CONDICIÓN DE OPERACIÓN	FACTORES DE CARGA								
		GRAVITACIONAL OPERACIÓN	OPERACIÓN 0°	OPERACIÓN 45°	OPERACIÓN 90°	OPERACIÓN 135°	OPERACIÓN 180°	OPERACIÓN 225°	OPERACIÓN 270°	OPERACIÓN 315°
1	PESO PROPIO (MODELADO)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
2	ACCESORIOS EN SUBESTRUCTURA	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
3	CARGA MUERTA EN CUBIERTA 3	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
4	CARGA MUERTA EN CUBIERTA 2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
5	CARGA MUERTA EN CUBIERTA 1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
6	CARGA MUERTA (EQUIPO) EN CUBIERTA 3	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
7	CARGA MUERTA (EQUIPO) EN CUBIERTA 2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
8	CARGA MUERTA (EQUIPO) EN CUBIERTA 1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
9	CARGA VIVA EN CUBIERTA 3	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
10	CARGA VIVA EN CUBIERTA 2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
11	CARGA VIVA EN CUBIERTA 1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
12	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 0° (OPERACIÓN)		1.00							
13	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 45° (OPERACIÓN)			1.00						
14	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 90° (OPERACIÓN)				1.00					
15	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 135° (OPERACIÓN)					1.00				
16	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 180° (OPERACIÓN)						1.00			
17	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 225° (OPERACIÓN)							1.00		
18	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 270° (OPERACIÓN)								1.00	
19	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 315° (OPERACIÓN)									1.00
COMBINACIONES		GRAVITACIONAL OPERACIÓN	OPERACIÓN 0°	OPERACIÓN 45°	OPERACIÓN 90°	OPERACIÓN 135°	OPERACIÓN 180°	OPERACIÓN 225°	OPERACIÓN 270°	OPERACIÓN 315°
		001	002	003	004	005	006	007	008	009

**Tabla 5.7. Ejemplo de las combinaciones de carga para la condici3n de tormenta.**

No.	CONDICIÓN DE TORMENTA	FACTORES DE CARGA									
		1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
1	PESO PROPIO (MODELADO)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
2	ACCESORIOS EN SUBESTRUCTURA	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
3	CARGA MUERTA EN CUBIERTA 3	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
4	CARGA MUERTA EN CUBIERTA 2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
5	CARGA MUERTA EN CUBIERTA 1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
6	CARGA MUERTA (EQUIPO) EN CUBIERTA 3	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
7	CARGA MUERTA (EQUIPO) EN CUBIERTA 2	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
8	CARGA MUERTA (EQUIPO) EN CUBIERTA 1	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
9	CARGA VIVA EN CUBIERTA 3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
10	CARGA VIVA EN CUBIERTA 2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
11	CARGA VIVA EN CUBIERTA 1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
12	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 0° (TORMENTA)		1.00								
13	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 45° (TORMENTA)			1.00							
14	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 90° (TORMENTA)				1.00						
15	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 135° (TORMENTA)					1.00					
16	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 180° (TORMENTA)						1.00				
17	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 225° (TORMENTA)							1.00			
18	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 270° (TORMENTA)								1.00		
19	VIENTO, CORRIENTE Y OLEAJE 315° (TORMENTA)									1.00	
COMBINACIONES		GRAVITACIONAL TORMENTA	TORMENTA 0°	TORMENTA 45°	TORMENTA 90°	TORMENTA 135°	TORMENTA 180°	TORMENTA 225°	TORMENTA 270°	TORMENTA 315°	
		010	011	012	013	014	015	016	017	018	

**5.5 DATOS DE ENTRADA PARA EL ANÁLISIS EN EL PROGRAMA SACS**

El análisis estructural de una plataforma se realiza mediante la elaboraci3n de un modelo estructural generado en un programa de c3mputo (SACS), a partir de los parámetros y consideraciones mencionados anteriormente.

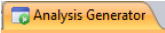
A continuaci3n se enlistan una serie de datos m3nimos requeridos para modelar y analizar una plataforma marina tipo Jacket en un programa de c3mputo (SACS):

- a) Topolog3a:
  - i. Elevaciones de plantas estructurales y puntos de inter3s (como el P.T.).
  - ii. Propuesta de estructuraci3n de la plataforma.
  - iii. Geometr3a de las plantas estructurales (nodos y miembros).
  - iv. Geometr3a de los marcos estructurales (nodos y miembros).
- b) Datos del sitio:
  - i. Tirante del agua.
  - ii. Altura de marea.
  - iii. Altura de la ola.
  - iv. Perfil de corrientes.
  - v. Velocidad del viento.
- c) Secci3n transversal de miembros estructurales:
  - i. Diámetro y espesor de tuber3as y canutos.
  - ii. En secciones abiertas, espesor y ancho de pat3n, espesor y altura del alma.
  - iii. Tipo de aceros (A-36, A-572).
- d) Crecimiento marino.
- e) Coeficientes hidrodinámicos:
  - i. Coeficiente de arrastre.
  - ii. Coeficiente de inercia.

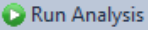
- iii. Coeficiente cinemático de la ola.
- f) Condiciones de carga
  - i. Cargas gravitacionales.
  - ii. Cargas ambientales.
- g) Combinaciones de carga.

### 5.6 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR UN ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA ESTRUCTURA CON EL PROGRAMA SACS

El análisis estático es una herramienta útil para evaluar las acciones debidas a las cargas gravitacionales y ambientales, con lo cual se podrá determinar las características de respuesta de la estructura, y así evaluar la estabilidad global de la plataforma. Para realizar este análisis es necesario hacernos de la ayuda de un programa de cómputo que nos ayude a simplificar los cálculos, para este caso utilizaremos (SACS), en el cual se realizan una serie de pasos que se mencionan a continuación, para llegar a obtener los resultados deseados.

- 1) En la pestaña **Analysis Generator**  que se encuentra en la ventana principal de SACS, accederemos al Menú **Analysis Type**, en donde se seleccionará la opción **Static**.
- 2) Posteriormente en el desplegado **Subtype** se elegirá la opción **Basic Static Analysis**.

Este tipo de análisis considera material elástico lineal y geometría lineal, dentro del cual algunos de los principales resultados que podremos obtener son:

- Fuerzas actuantes en la plataforma debido a las cargas gravitacionales y ambientales.
  - Interacción de esfuerzos en los elementos que conforman la estructura (esfuerzo actuante/esfuerzo permisible) de acuerdo a la normatividad.
  - Desplazamientos generados en la estructura.
- 3) Para este análisis se requiere generar previamente el archivo SACS Model File (*sacinp*), en el cual se establece la geometría de la estructura, materiales, dimensiones, cargas ambientales y gravitacionales, además de los parámetros descritos en el capítulo 3 “Análisis Estructural y Modelado de Plataformas Marinas Tipo Jacket”.
  - 4) Una vez generado e ingresado el archivo (*sacinp*) en el apartado Input files, se procede a iniciar el análisis. 
  - 5) Una vez terminado el análisis se generaran los siguientes archivos:




File/Module	Description	Type	Line	Message
 sacEstatico.runx	Linear Static Analysis	Analysis Run		
 saclst.estatico	Listing			No errors found
 psvdb.estatico	Postvue Database			Postvue database generated

Fig. 5.3. Ejemplo de los archivos generados para un análisis estático.

### 5.7 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO

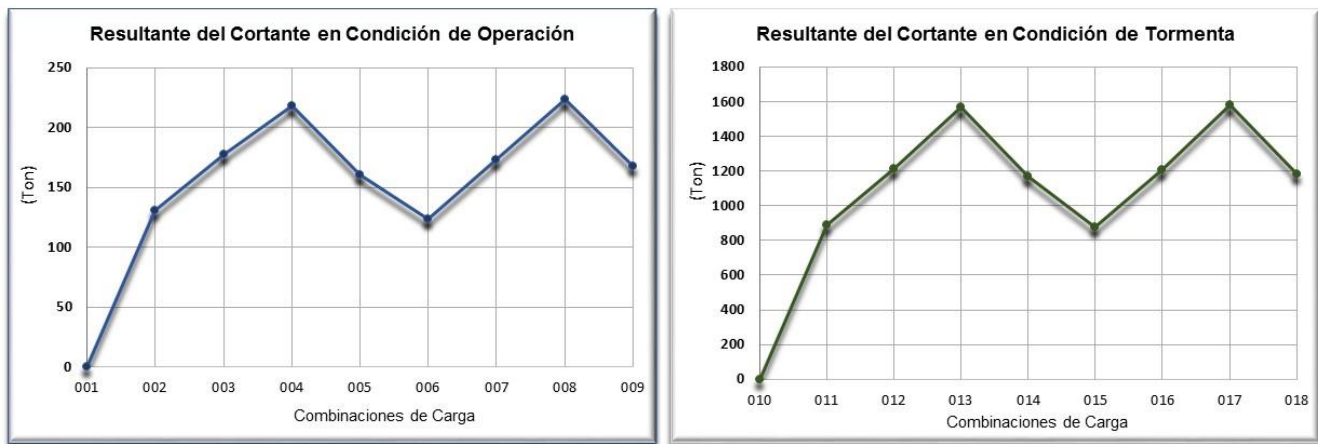
Una vez realizada la corrida del análisis estático, se genera un archivo denominado (*sac/st*) en el cual se enlista la base de datos de todos los análisis realizados, dentro de estos resultados podemos encontrar los que corresponden a las reacciones a nivel del lecho marino debido a las cargas actuantes, estas para cada una de las combinaciones.

Los resultados que se presentan a continuación, corresponden a las reacciones a nivel del suelo marino, para las combinaciones de carga presentadas anteriormente.

**Tabla 5.8. Resultados del análisis estático, a nivel del lecho marino de las diferentes combinaciones de carga.**

***** SEASTATE COMBINED LOAD CASE SUMMARY *****							
RELATIVE TO MUDLINE ELEVATION							
LOAD LABEL	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	
	(KG)	(KG)	(KG)	(KG-M)	(KG-M)	(KG-M)	
Operación	0001	0.00	0.00	-10542874.00	3656847.8	26180778.0	0.0
	0002	130664.41	1097.49	-10563146.00	3488727.0	35511688.0	125495.9
	0003	120911.38	130145.40	-10583212.00	-6292354.5	34792040.0	4340198.0
	0004	-1.72	218480.53	-10602653.00	-12708149.0	26341940.0	308245.4
	0005	-109760.13	116924.62	-10590687.00	-5173082.0	18554684.0	-3786797.2
	0006	-123288.98	-1301.09	-10576403.00	3832365.2	17454860.0	-42349.1
	0007	-117842.93	-127427.60	-10589954.00	13456310.0	17876296.0	3489220.5
	0008	25.85	-224089.44	-10591225.00	20547596.0	26119196.0	-449360.5
	0009	114110.59	-122340.83	-10578168.00	12917794.0	34207388.0	-4020822.8
	0010	0.00	0.00	-7832304.50	2005738.5	14631642.0	0.0
Tormenta	0011	891497.75	4159.60	-7884170.00	1360901.1	78724992.0	457828.9
	0012	818552.75	895010.25	-7936122.50	-66682300.0	72672664.0	10833707.0
	0013	-83.43	1566244.88	-8008132.00	-117813888.0	14864640.0	1307211.0
	0014	-785300.81	867262.75	-7968468.00	-64203120.0	-40358928.0	-8528227.0
	0015	-877562.00	-4545.19	-7934772.00	2650623.2	-48344708.0	-298292.8
	0016	-812501.38	-889677.25	-7959802.50	70380880.0	-42867060.0	7125143.0
	0017	74.09	-1580722.38	-7948591.00	123167200.0	14477976.0	-1478800.1
	0018	792535.56	-875952.88	-7924641.50	68931384.0	70234608.0	-9465838.0

A manera de ejemplo se muestran las siguientes gráficas en donde se presenta la resultante de la fuerza cortante que actúa en las direcciones (X, Y) en la elevación -78.638 m (lecho marino) y las deflexiones que se presentan en el nodo 2241, dicho nodo corresponde al punto más elevado de la superestructura que se encuentra en la elevación +47.240 m.



**Fig. 5.4 y Fig. 5.5 Ejemplo de la fuerza resultante del cortante en las direcciones (X, Y) para cada combinación de carga, en las etapas de operación y tormenta.**

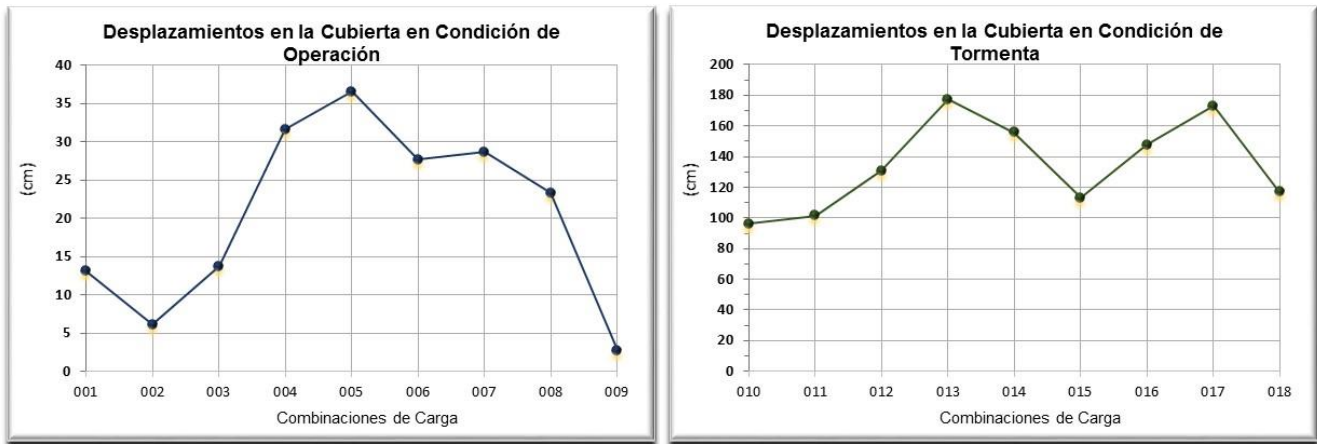


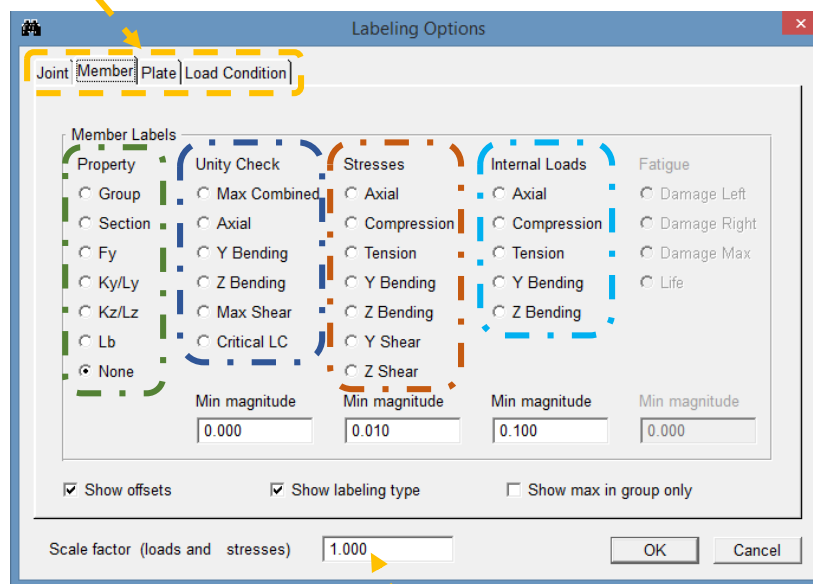
Fig. 5.6 y Fig. 5.7 Ejemplo de la resultante de los desplazamientos que se presentan en las direcciones (X,Y) del nodo 2241, el cual se encuentra en la elevación +47.240 m, para cada una de las combinaciones de carga.

Como se puede ver en los resultados mostrados en las gráficas anteriores, la condición de tormenta presenta cargas y desplazamientos mucho mayores en relación a la condición de operación, con lo cual se corrobora que generalmente el análisis crítico in situ de una plataforma es la condición de tormenta. Dentro de la memoria de cálculo que se obtiene del análisis (sac/st), podemos encontrar una relación de los elementos mecánicos de todos los elementos que conforman la estructura, de igual manera un resumen de las características de la geometría y material de todos los grupos de elementos que se definieron en el modelo.

Los resultados que se presentan en el archivo de texto (sac/st) los podemos visualizar de forma gráfica, para esto ingresamos al archivo de salida Postvue Database (psvdb), el cual nos abrirá una ventana con el modelo analizado.

Una vez adentro de la ventana POSTVUE, podremos visualizar algunos de los principales resultados de los elementos estructurales que conforman la plataforma con el comando Labeling Options, el cual se encuentra en el Menú Display, mismo que se describe a continuación:

Opciones que nos permiten mostrar la información de las conexiones, elementos barra, placas y condiciones de carga.

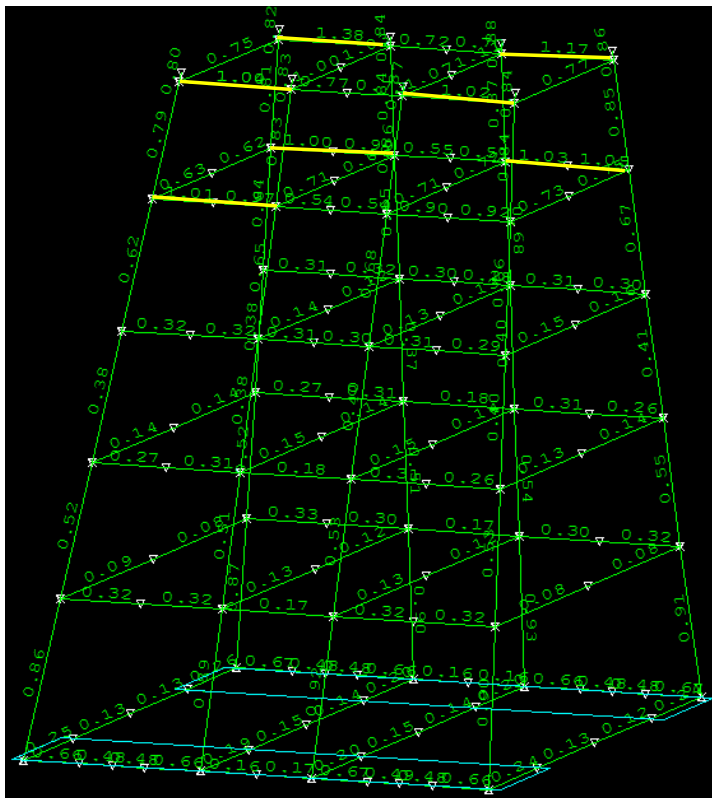


Factor de escala: nos permite obtener una mejor visualización de las cargas y esfuerzos.

Para los elementos barra del modelo tendremos las siguientes opciones:

- Visualizar las propiedades y características de cada elemento.
- Mostrar la interacción de esfuerzos (esfuerzo actuante/esfuerzo permisible) que se generan por carga axial, cortante, y la combinación de cargas que genera el mayor esfuerzo en cada elemento, etc.
- Valores de los esfuerzos máximos (carga axial, compresión, tensión, cortante, etc.) actuantes en cada elemento estructural de la plataforma.
- Valores de los cargas máximas (carga axial, compresión, tensión, etc.) actuantes en cada elemento estructural de la plataforma.

Dentro de los resultados del análisis estructural bajo condiciones de operación y tormenta, podemos obtener las relaciones máximas de interacción de esfuerzos (esfuerzo actuante / esfuerzo permisible) de los elementos propuestos que conforman la estructura (subestructura, superestructura y pilotes), la cual debe cumplir con los esfuerzos permisibles requeridos por la Normatividad, esta relación debe ser menor que 1.00.



**Fig. 5.8. Ejemplo de la relación de interacción de esfuerzos en una subestructura.**

En este ejemplo los esfuerzos permisibles en los elementos de la estructura se revisaron con las normas y recomendaciones WSD AISC 13th/API 21st.

Posteriormente después del análisis se revisó la relación de interacción de esfuerzos de los elementos propuestos, esto para la combinación de carga que genere el mayor esfuerzo en cada elemento, con lo que se obtuvo el diagrama de la Fig. 5.8.

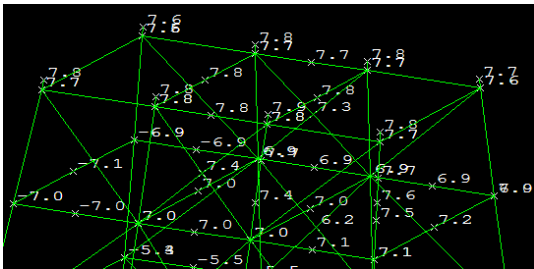
Como se ve en la mayoría de los elementos la R.I. de esfuerzos es menor que 1, sin embargo en los elementos señalados (color amarillo) los esfuerzos actuantes son mayores a los permisibles de acuerdo a la normatividad, por lo cual se deberá de hacer un redimensionamiento de estos elementos y revisar nuevamente la estructura cuidado que la R.I. de esfuerzos sea menor que 1.



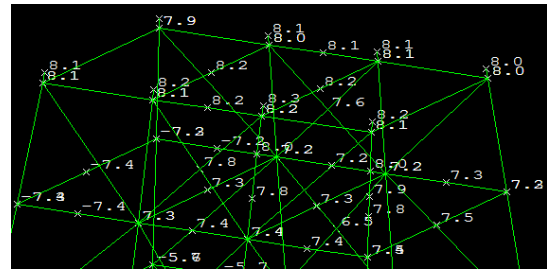
## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO CON Y SIN CONSIDERAR LA CIMENTACIÓN.

Se procedió a realizar dos análisis estáticos para la misma plataforma, con la variante que en uno se consideró la cimentación y por ende la interacción suelo-estructura y en el otro no, con el fin de encontrar la variación de los esfuerzos que se presentan en los elementos, principalmente del Jacket y pilotes los cuales son los elementos más expuestos a los efectos de las cargas ambientales; está idea surge después de revisar los resultados del análisis estático de la plataforma marina considerando la interacción suelo-estructura en el cual los desplazamientos son mayores, lo cual nos quiere decir que hay una mayor disipación de energía en la plataforma, por lo cual los elementos mecánicos deberían ser menores que en el análisis donde no se considera la interacción suelo-estructura, llegando a los siguientes resultados:

### *Desplazamientos en los nodos del primer y segundo nivel del Jacket.*

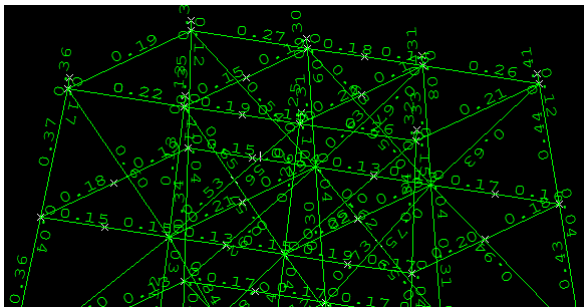


a) Sin considerar la interacción suelo estructura

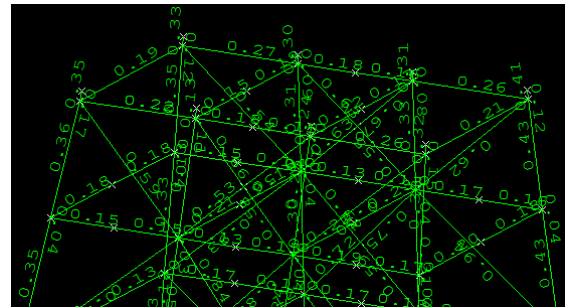


b) Considerando la interacción suelo estructura

### *R.I. de esfuerzos en los elementos del primer y segundo nivel del Jacket.*



c) Sin considerar la interacción suelo estructura



d) Considerando la interacción suelo estructura

**Fig. 5.9 a – d. Resultados de los desplazamientos y la R.I. de esfuerzos en el Jacket, considerando y sin considerar los pilotes de cimentación.**

Al analizar la estructura considerando la interacción del suelo obtenemos que hay una mayor capacidad de desplazamiento lateral, lo cual se ve reflejado en un aumento relativamente pequeño en los desplazamientos de la estructura lo cual a su vez disminuye en la misma proporción los esfuerzos que se generan en los elementos de la plataforma; con lo cual se corrobora que al tener mayor capacidad de desplazamiento lateral en la plataforma hay una mayor disipación de energía, pudiendo obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Se generan mayores desplazamientos laterales al considerar la cimentación; para este ejemplo en un promedio de 3 a 4 mm.
- Al no considerar la interacción suelo-estructura, la R.I. de esfuerzos es poco mayor con respecto a cuándo se considera la cimentación; para este ejemplo fue del orden de 1 y 2%.
- Para el diseño de los elementos se recomienda considerar los esfuerzos que se obtienen del análisis de operación y tormenta, sin considerar la cimentación, lo cual es más conservador y nos mantendrá del lado de la seguridad.
- Para revisar condiciones de servicio, en el cual se asegure un comportamiento adecuado desde el punto de vista de servicio, como pueden ser flechas máximas, periodos de vibración, deflexiones, vibraciones y desplazamientos laterales, se deberá analizar la estructura considerando la interacción suelo estructura.

# Capítulo 6

## 6. REVISIÓN DE LA CAPACIDAD ÚLTIMA DE COLAPSO DE UNA PLATAFORMA TIPO JACKET

Para un análisis en sitio se consideran dos etapas para tomar en cuenta las condiciones de tormenta. La primera etapa es el diseño, mediante un análisis estructural elástico lineal, con la denominada ola de diseño. La segunda etapa consiste en una revisión de la capacidad al colapso aplicando la ola de resistencia última de diseño y obtener el correspondiente factor de reserva de resistencia (RSR por sus siglas en inglés, Reserve Strength Ratio) que debe satisfacer el factor de reserva de resistencia mínimo indicado en la NRF-003-PEMEX-2007 PEMEX.

### 6.1 FACTOR DE RESERVA DE RESISTENCIA (RSR)

El colapso de una plataforma puede ocurrir cuando la fuerza lateral por oleaje (S) supera a la capacidad resistente (R) de la estructura. Por lo cual podemos definir como factor de reserva de resistencia (RSR) a la relación entre la capacidad última de la plataforma “R” (puede estimarse a partir de la capacidad lateral efectiva última de la estructura, mediante un análisis no lineal) respecto a la carga de diseño nominal “S” (se le puede asociar con la carga lateral ocasionada por las cargas ambientales de oleaje, corriente y viento).

$$RSR = \frac{R}{S} \quad \dots \text{ecuación 6.1.}$$

Donde:

*R*: Fuerza còrtate basal con la que colapsa la estructura.

*S*: Fuerza còrtate de referencia (fuerza de diseño por cargas ambientales).

Los RSR se calcularán utilizando como carga de referencia la correspondiente a las cargas ambientales por tormenta por ser las más críticas. La estructura será satisfactoria si su RSR es mayor que o igual al especificado en la Tabla 8.3.1 de la NRF-003-PEMEX-2007 PEMEX.

**Tabla 6.1. Factores de Reserva de Resistencia mínimos de acuerdo a la NRF-003-PEMEX-2007 PEMEX.**

Parámetros de Diseño por Oleaje	
Mínimo RSR, cuando la ola no impacta a la cubierta y/o subnivel.	1.90
Mínimo RSR, cuando la ola impacta a la cubierta y/o subnivel.	2.20

Para calcular los RSR se realiza un análisis *estático no lineal* a la plataforma en estudio, llevando la estructura al colapso con ayuda del programa SACS, el procedimiento se explica más adelante en este capítulo.

## 6.2 ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER)

Un análisis estático no lineal, más conocido como “*Pushover*”, por su nombre en inglés, cuya principal característica consiste en un empuje incremental hasta que se supone ha llegado al colapso. En éste análisis se observa cómo interviene la capacidad de la estructura, representada por la curva de capacidad.

En este tipo de análisis, el modelo de la estructura incorpora directamente las características no lineales de la relación fuerza-deformación de los elementos y componentes individuales debidas a la respuesta inelástica del material; la representación más común para este análisis es la curva de capacidad de carga o curva *pushover*, la cual corresponde a la relación entre el cortante basal y el desplazamiento en el nivel superior de la estructura.

Los análisis estáticos no lineales, nacen como una alternativa a los análisis dinámicos no lineales. Estos métodos se desarrollan como herramientas para descubrir la vulnerabilidad presente en estructuras al ser sometidos a cargas laterales como sismo, viento, oleaje, corriente, etc. (Guevara, Osorio y Vargas, 2006).

Un análisis *pushover* en plataformas marinas tipo Jacket, consiste básicamente en aplicar una carga monótonamente creciente, en este caso la carga lateral creciente es debido a las condiciones ambientales a la cual está sometida la plataforma, con lo cual la carga de referencia es incrementada en intervalos definidos hasta llevar la estructura al colapso.

Uno de los principales supuestos en que se sustenta el análisis *pushover* es en la tendencia predominante de las estructuras a vibrar en su primer modo.

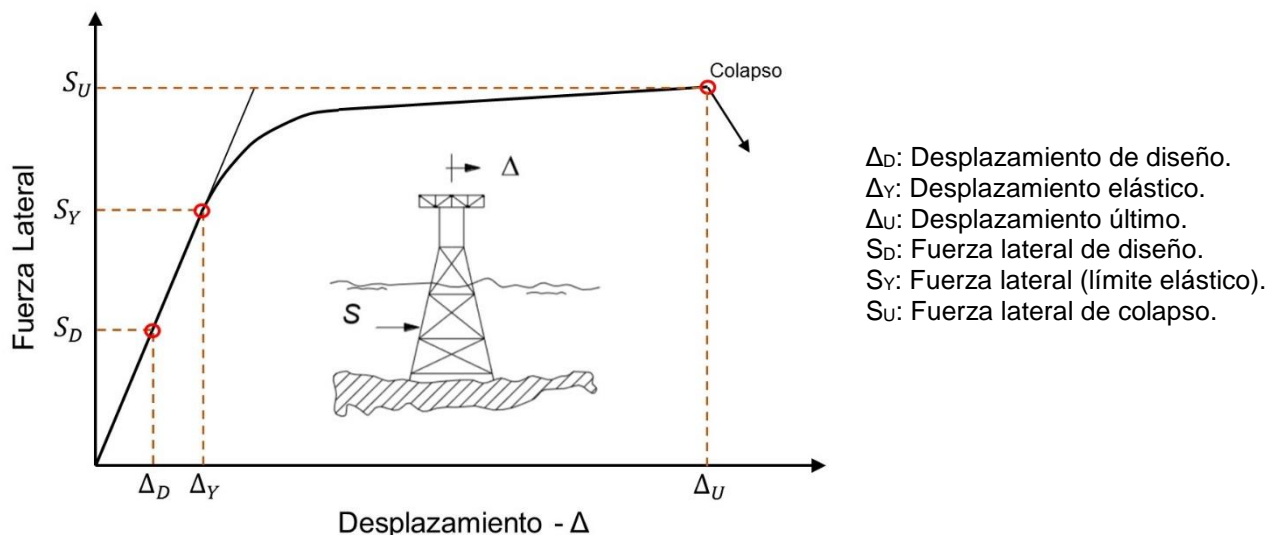




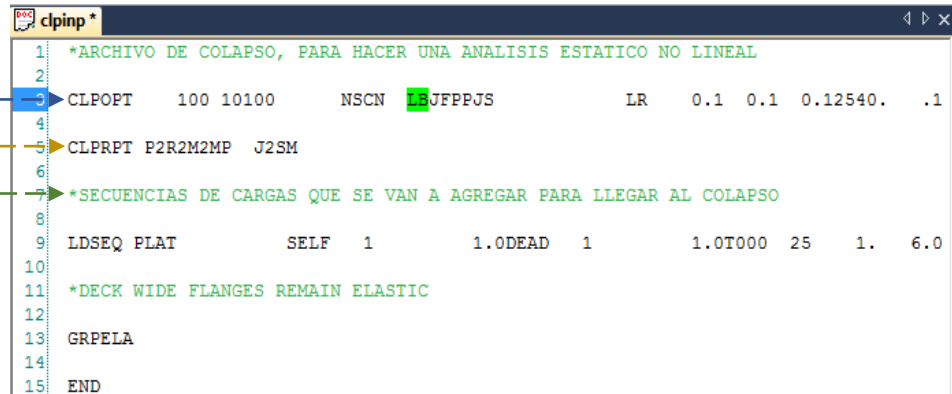
Fig. 6.1. Curva Fuerza-Desplazamiento lateral, (de capacidad o *pushover*).

## 6.3 PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL (PUSHOVER) CON AYUDA DE SACS

En las plataformas tipo Jacket es fundamental analizar la interacción de la estructura con la cimentación, para hacer el análisis no lineal lo realizaremos interactuando plataforma-cimentación. El procedimiento para realizar un análisis estático no lineal de la plataforma marina para las condiciones ambientales más críticas con ayuda del programa SACS, es el siguiente:

Para este análisis se requiere generar tres archivos de datos que alimenten al programa, el primero es el archivo SACS Model File (*sacinp*), en el cual se establece la geometría de la estructura, materiales, dimensiones, cargas y todos los parámetros descritos en el capítulo 3 “Análisis Estructural y Modelado de Plataformas Tipo Jacket”. En el segundo archivo PSI Input File (*psiinp*) se establecen los parámetros del suelo para el análisis de la cimentación. El tercer archivo es Collapse Input File (*clpinp*). El archivo Collapse Input File, es de tipo de entrada para generar el análisis de colapso de la plataforma, en el cual se establecen los parámetros de los intervalos de carga que serán aplicados, este se genera de la siguiente manera:

- Con ayuda del M3dulo Data File de SACS  , generaremos el archivo de datos de entrada.
- Una vez que abrimos el modulo Data File, seleccionaremos la pestaña "Static", y posteriormente seleccionamos el tipo de archivo Collapse Input File.
- En la ventana principal del m3dulo Data File, comenzaremos a ingresar las lneas de texto con ayuda del comando Insert Input Line , con el cual podremos ingresar los par3metros de las cargas que actuaran para llevar la estructura al colapso, a continuaci3n se muestra un ejemplo de los datos generados para el an3lisis.



```

1  *ARCHIVO DE COLAPSO, PARA HACER UNA ANALISIS ESTATICO NO LINEAL
2
3  CLPOPT  100 10100  NSCN  LEJFPPJS  LR  0.1  0.1  0.12540.  .1
4
5  CLPRPT  P2R2M2MP  J2SM
6
7  *SECUENCIAS DE CARGAS QUE SE VAN A AGREGAR PARA LLEGAR AL COLAPSO
8
9  LDSEQ  PLAT  SELF  1  1.0DEAD  1  1.0T000  25  1.  6.0
10
11 *DECK WIDE FLANGES REMAIN ELASTIC
12
13 GRPELA
14
15 END
    
```

**Fig. 6.2. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (clpinp).**

Con el comando (CLPOPT), nos abrir3 el programa una ventana adicional en donde ingresaremos las opciones generales del an3lisis de colapso, dentro de las que se encuentran:

- N3mero m3ximo de iteraciones para cada incremento de carga.
- Incluir los efectos locales en los elementos.
- Incluir el efecto de la flexibilidad en las conexiones.
- Incluir la plasticidad de los pilotes.
- Norma a partir de la cual se revisaran las conexiones.
- Tolerancia al desplazamiento de los nodos.
- Tolerancia a la rotaci3n de los nodos.
- Tolerancia a la deflexi3n de los elementos.
- Desplazamiento m3ximo de colapso.

Con el comando (CLPRPT), nos abrir3 el programa una ventana adicional en donde seleccionaremos los reportes del an3lisis que necesitemos, dentro de los cuales est3n:

- Deflexi3n en las conexiones.
- Reacciones en las conexiones.
- Reacciones en los pilotes.
- Esfuerzos en los elementos barra.
- Indicar los elementos que se plastifican.
- Desglose de los intervalos de cargas aplicadas y reporte de aquellas que ocasionan el colapso.
- Los esfuerzos, cargas y plastificaci3n en las placas.

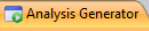
Con el comando (LDSEQ), nos abrir3 el programa una ventana adicional en donde indicaremos la secuencia de cargas con las que se llevara a cabo el an3lisis de colapso, los datos a ingresar son los siguientes:

- Nombre de la secuencia de carga.
- Ingresar cada una de las condiciones de carga (gravitaciones y ambientales).
- Intervalos de incrementos de las cargas actuantes.
- Factor de carga con el cual inicia el an3lisis.

Se generar3 un archivo de datos de colapso para cada direcci3n de incidencia de las cargas ambientales, por lo cual se tendr3n 8 archivos.

Para estos an3lisis se recomienda, que las cargas gravitacionales tengan como incrementos 1 y el factor de inicio de carga sea 0 y el de termino 1. Mientras que para las cargas laterales el n3mero de intervalos estar3 en funci3n de la exactitud que se quiera tener, un numero grande de in3rvalos ocasionar3 una demanda importante de tiempo en el equipo de c3mputo, para los factores de carga se recomienda comenzar en 0 y el factor de t3rmino de la carga aplicada tenga un valor lo suficientemente grande para que el an3lisis se realice para la falla de la plataforma y no por esta limitante.

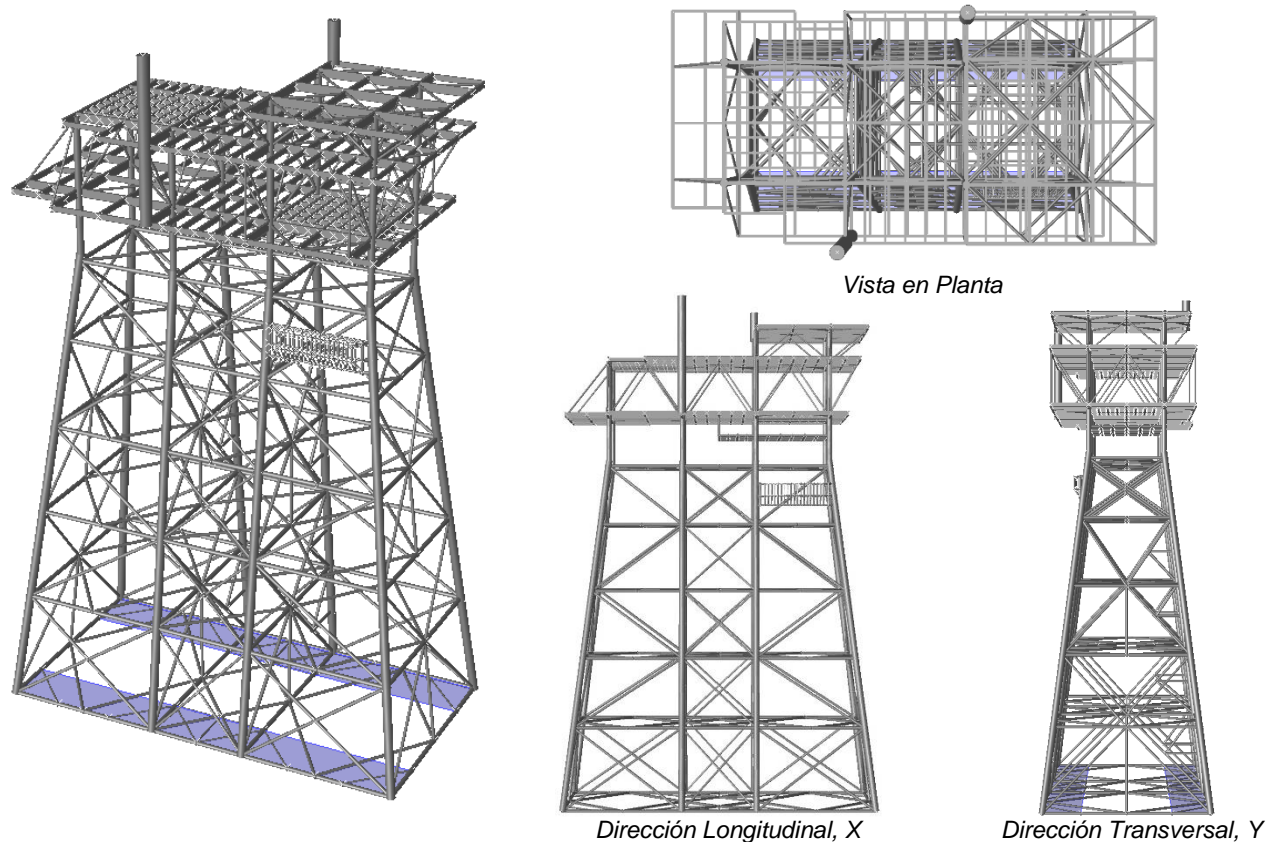
Una vez generados los tres archivos de entrada, seguiremos los siguientes pasos:

- 1) En la pestaña Analysis Generator  que se encuentra en la ventana principal de SACS, accederemos al Menú Analysis Type, en donde se seleccionara la opción Static.
- 2) Posteriormente en el desplegado Subtype se elegirá la opción Full Plastic Collapse/Pushover.
- 3) En la sub-pestaña "Analysis Options", marcaremos la opción Foundation, para tomar en cuenta la interacción de la plataforma con la cimentación.
- 4) En la sub-pestaña "Input Files", ingresaremos los archivos de datos previamente generados.

Este análisis se repetirá para cada una de las direcciones de incidencia, con lo cual se tendrán 8 análisis *pushover*.

#### 6.4 MODELO CONCEPTUAL DE LA PLATAFORMA A UTILIZAR EN EL ANÁLISIS PUSHOVER

Para el análisis estático no lineal se utilizará el modelo con el que se realizó el análisis estático, en donde la única variante es que solo se utilizaran las cargas ambientales por tormenta, al ser estas las más críticas. En la Fig. 6.3 se muestra un ejemplo del modelo geométrico de una plataforma tipo Jacket.

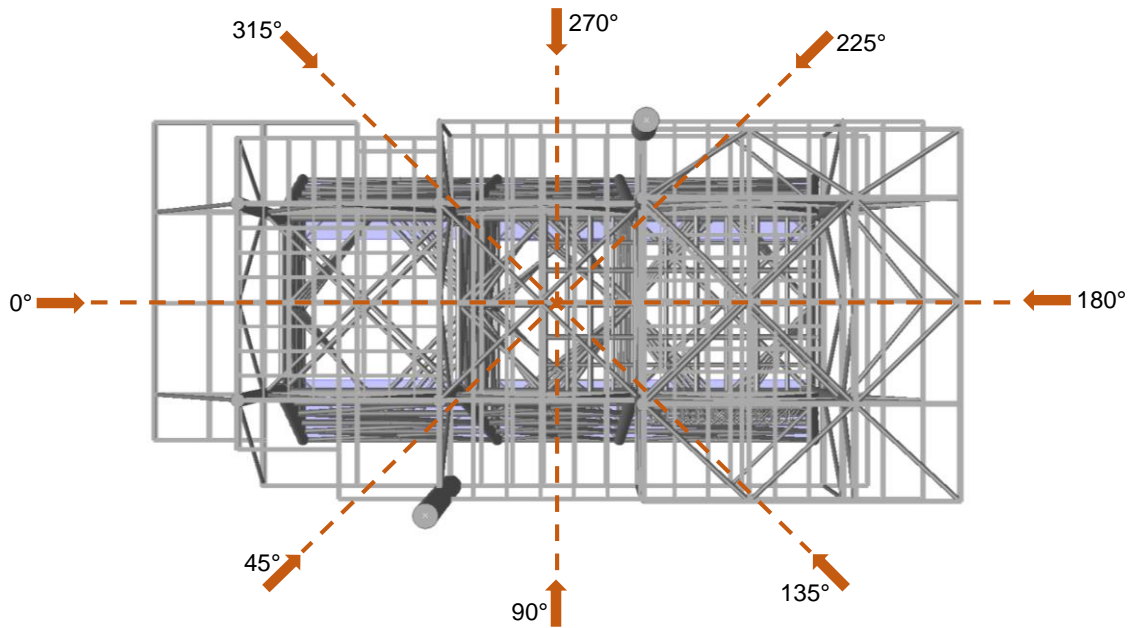


**Fig. 6.3. Modelo conceptual de una plataforma tipo Jacket.**

A dicho modelo se le realizaron diferentes análisis estáticos no lineales o pushover, cargando a la plataforma con las condiciones metaoceanicas correspondientes de tormenta. Las cargas ambientales en la plataforma se aplicaron con ocho ángulos de incidencia repartidos a cada 45°, más las cargas gravitacionales mencionadas anteriormente.

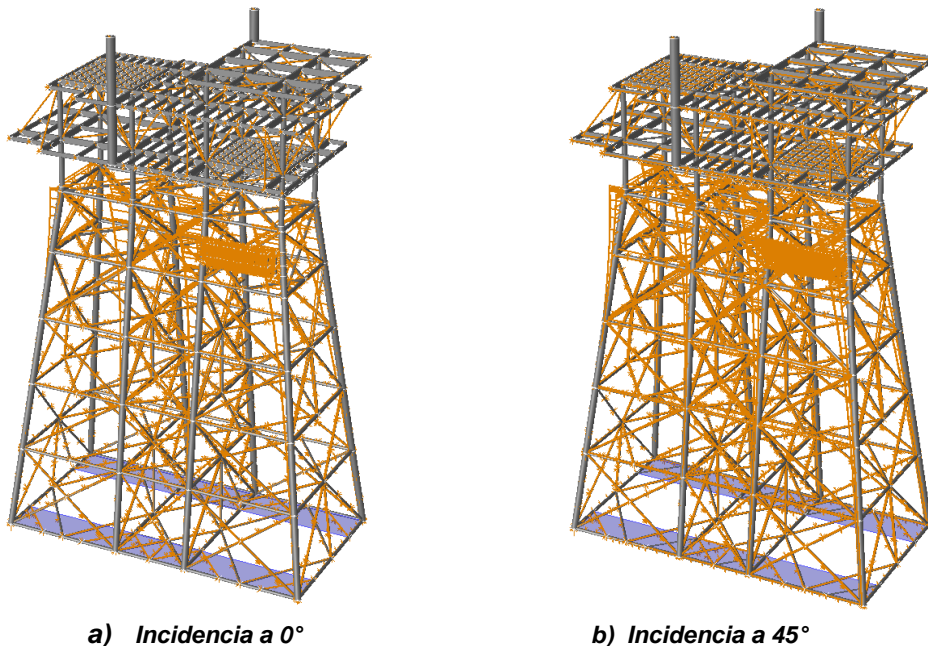


Para cada una de las incidencias se obtuvo la curva de capacidad de carga de la plataforma. Esta curva representa la evolución de la carga lateral a medida que se incrementa su desplazamiento lateral producido por un patrón de fuerzas externas. En el caso de las plataformas esta curva relaciona la fuerza cortante lateral a nivel de la línea de lodos con el desplazamiento generado en la cubierta.



**Fig. 6.4. Incidencia de cargas ambientales.**

Para llevar a cabo los análisis estáticos no lineales requeridos, se obtuvieron las cargas ambientales distribuidas a lo largo del Jacket de la plataforma, para cada incidencia de oleaje, corriente y viento, es decir, se obtuvo el patrón de carga lateral correspondiente a la carga hidrodinámica y de viento para cada ángulo de incidencia, estos resultados se obtienen del análisis estático. En las Figs. 6.4a - 6.4h se muestra la distribución de cargas laterales ambientales para los diferentes ángulos de incidencia.



**a) Incidencia a 0°**

**b) Incidencia a 45°**



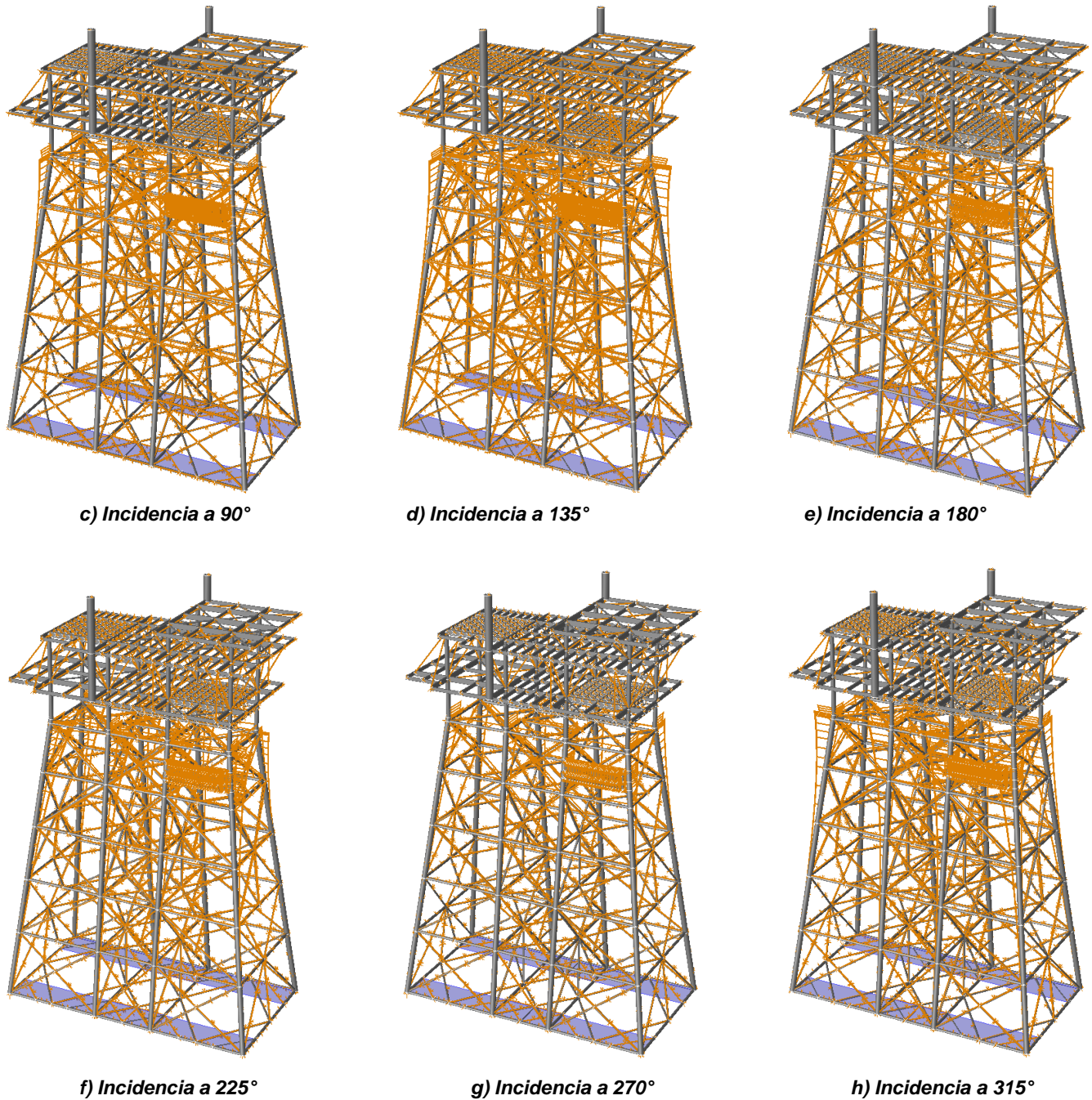


Fig. 6.5 a –h. Distribución de cargas laterales en la estructura para condiciones de tormenta.

## 6.5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL CON SACS

A partir de un análisis estático lineal de la plataforma, obtenemos las cargas actuantes, de estos resultados prestaremos atención principalmente al cortante basal sobre la plataforma en cada uno de sus ejes principales (X, Y), estas cargas serán el cortante basal de referencia, a partir de los cuales se calculará el RSR.

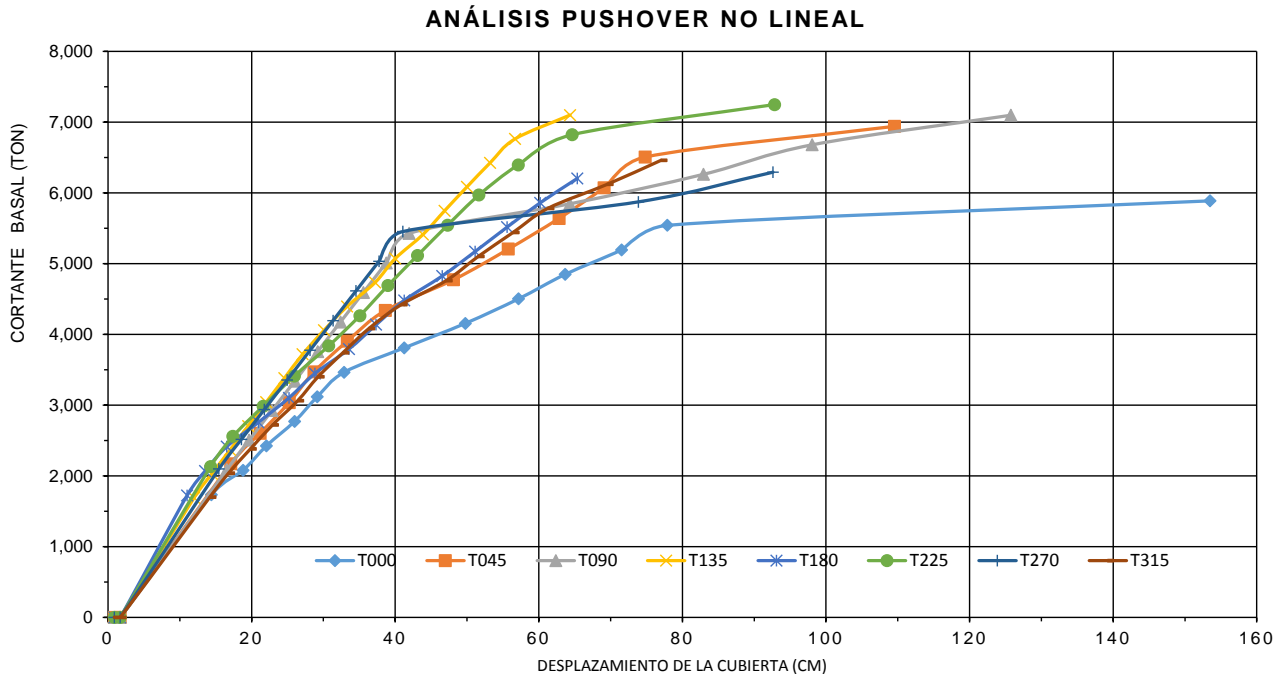
En la Tabla 6.2 y Fig. 6.6 se presenta un ejemplo de los resultados del análisis estático y *pushover* respectivamente; con el primer análisis se obtienen los cortantes basales actuantes en cada dirección de incidencia y con el segundo las curvas de capacidad estructural al colapso (desplazamiento vs cortante basal).

- La carga vertical de referencia será la suma de todas las cargas verticales que actúan en la plataforma, la cual está integrada por: peso propio, carga de equipo, carga muerta, carga viva y carga por crecimiento marino.
- El cortante basal de referencia está integrado por las cargas ambientales debido a oleaje, corriente y viento.

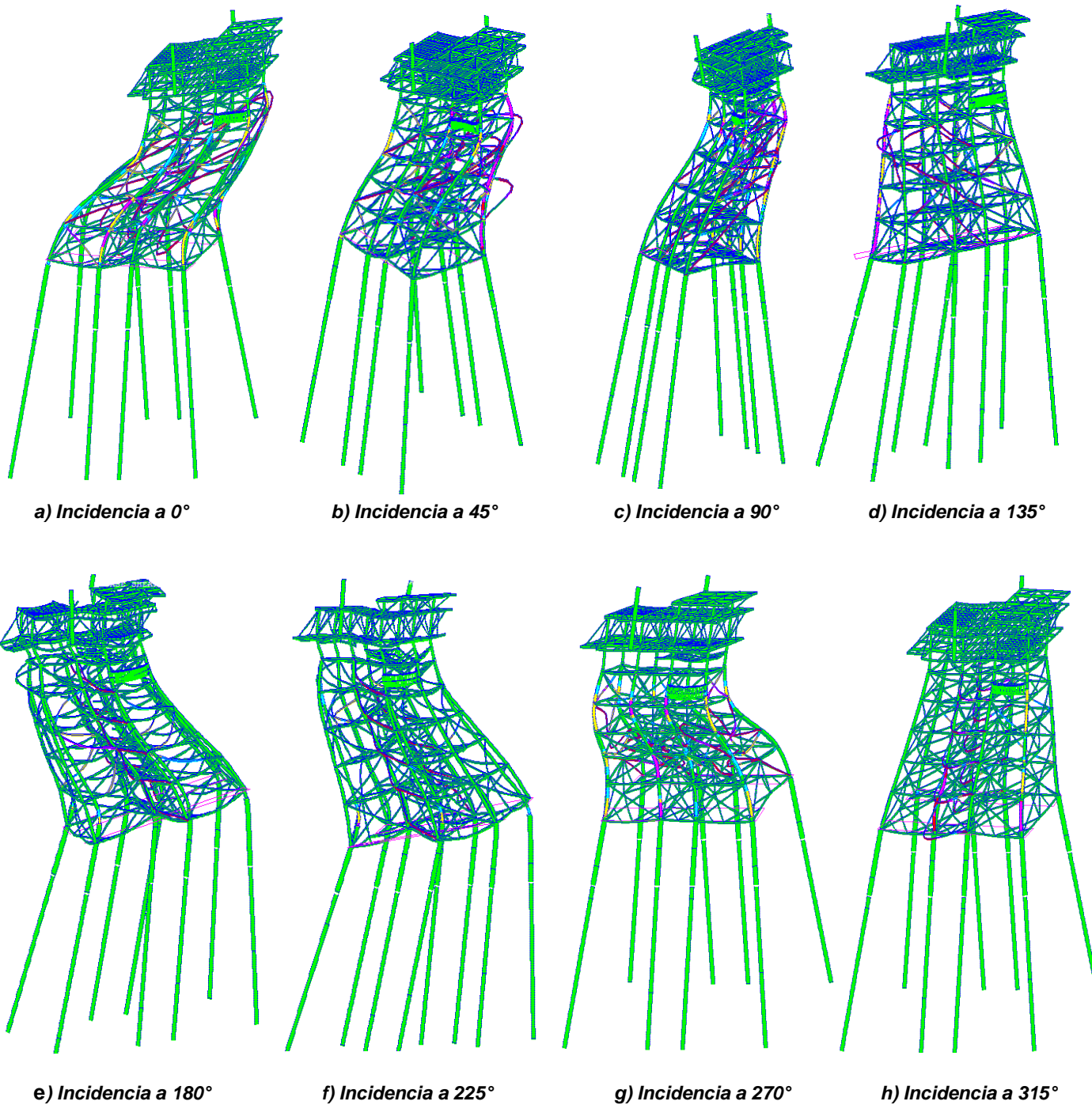
**Tabla 6.2. Ejemplo del cortante basal actuante a nivel del lecho marino, en cada una de las direcciones de incidencia, así como las cargas gravitacionales, estos obtenidos del análisis estático en SACS.**

Load Condition	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante (ton)	Fz (ton)
DEAD	-----	-----	-----	-5,254.76
SELF	-----	-----	-----	-6,191.29
T000	1,726.62	127.44	1,731.32	-----
T045	1,516.63	1,550.07	2,168.61	-----
T090	171.86	2,080.08	2,087.17	-----
T135	-1,190.01	1,200.40	1,690.29	-----
T180	-1,718.33	-129.45	1,723.20	-----
T225	-1,486.34	-1,527.84	2,131.54	-----
T270	-171.83	-2,090.10	2,097.15	-----
T315	1,194.87	-1,209.21	1,699.97	-----

Con las distribuciones de carga lateral para cada incidencia de ataque sobre el Jacket, se realizaron los análisis estáticos no lineales correspondientes. En la Fig. 6.6 se muestran las ocho curvas de capacidad de la estructura, en las Fig. 6.7 a-h se muestra la condición de falla de la plataforma (corresponde al último punto de cada una de las curvas).



**Fig. 6.6. Curvas resultantes del análisis estático no lineal (cortante basal resistente vs desplazamiento en la cubierta), para cada una de las 8 incidencias sobre la plataforma.**



**Fig. 6.7 a – h. Modos de falla de la plataforma para diferentes incidencias de cargas ambientales.**

**Factores de Reserva de Resistencia (Estructura de Diseo)**

Derivado de los anlisis pushover, se obtuvo para cada uno de ellos un factor de Reserva de Resistencia parcial, el cual se define como la relacin entre la capacidad de carga ltima de la plataforma y el valor del cortante correspondiente a fuerzas ambientales (cortante de referencia).

En la Tabla 6.3 se muestran los resultados del anlisis *pushover*, se puede apreciar que el RSR es menor para el ngulo de incidencia de 270°, es decir que la capacidad de carga es menor en esta direccin de la plataforma.

**Tabla 6.3. Ejemplo de los resultados del anlisis Pushover para una plataforma tipo Jacket.**

Incidencia de Carga		CORTANTE RESISTENTE					CORTANTE DE REFERENCIA			Factor de Sobreresistencia (RSR)
		Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante Est. Original (ton)	Estructura Modificada (ton)	Factor de Carga	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante (ton)	
+X	0°	5870.51	433.31	5,886.48	<b>5,886.48</b>	1.00	1,726.62	127.44	1,731.32	<b>3.40</b>
+X+Y	45°	4853.20	4960.22	6,939.55	<b>6,939.55</b>	1.00	1,516.63	1,550.07	2,168.61	<b>3.20</b>
+Y	90°	584.32	7072.26	7,096.35	<b>7,096.35</b>	1.00	171.86	2,080.08	2,087.17	<b>3.40</b>
-X+Y	135°	-4998.02	5041.70	7,099.23	<b>7,099.23</b>	1.00	-1,190.01	1,200.40	1,690.29	<b>4.20</b>
-X	180°	-6185.98	-466.01	6,203.50	<b>6,203.50</b>	1.00	-1,718.33	-129.45	1,723.20	<b>3.60</b>
-X-Y	225°	-5053.54	-5194.65	7,247.25	<b>7,247.25</b>	1.00	-1,486.34	-1,527.84	2,131.54	<b>3.40</b>
-Y	270°	-515.48	-6270.30	6,291.45	<b>6,291.45</b>	1.00	-171.83	-2,090.10	2,097.15	<b>3.00</b>
+X-Y	315°	4540.50	-4594.99	6,459.88	<b>6,459.88</b>	1.00	1,194.87	-1,209.21	1,699.97	<b>3.80</b>

Como podemos ver en la Tabla 6.3, la plataforma que utilizamos como ejemplo cumple con los RSR indicados en la NRF-003-PEMEX-2007 PEMEX para todas las direcciones de incidencia.

Asimismo como resultado de la geometra propuesta el tipo de falla en la plataforma ocurri como era de esperarse, la estructura presento una falla dtil, debido a que las diagonales llegaron a su mxima capacidad, como se muestra en las Figs. 6.6a – 6.6h.



# Capítulo 7

## 7. ANÁLISIS ESPECTRAL DE FATIGA

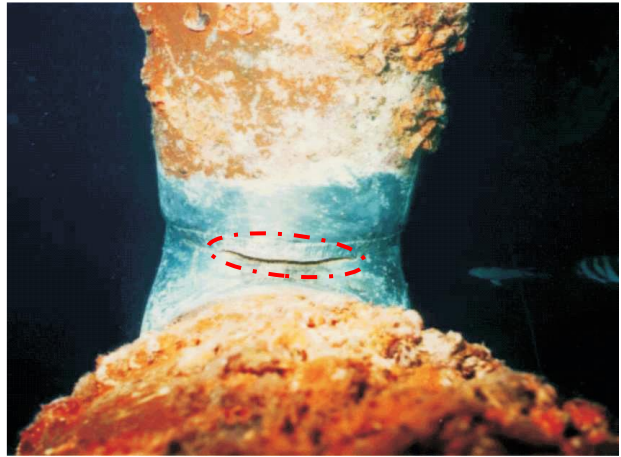
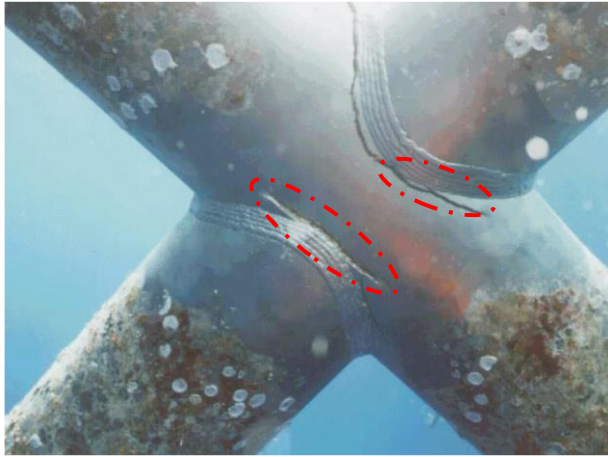
El fenómeno de fatiga puede definirse como un proceso de acumulación de ciclos de daño en un material bajo fluctuación de esfuerzos (tensiones y torsiones). Dicho daño se acumula con diminutos incrementos en el tamaño de una grieta, la cual se genera a partir de defectos microscópicos del material, como 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 es por lo general muy reducida comparada con la capacidad estática del elemento estructural.

En fatiga, los parámetros más importantes del efecto de carga es la magnitud de fluctuación de esfuerzos, comúnmente referida como intervalo de esfuerzos, definida como la diferencia entre un esfuerzo máximo (cresta) y el siguiente valle. El nivel medio, es decir, alrededor de donde ocurren las fluctuaciones de esfuerzos o la magnitud del máximo esfuerzo son relativamente de menor importancia comparados con el intervalo de esfuerzos (Martínez, 2001).

El análisis espectral por fatiga tiene como objetivo evaluar los esfuerzos cíclicos actuantes en las conexiones de los elementos tubulares que conforman la estructura, causados por la acción de las cargas gravitacionales y ambientales actuantes durante su vida útil y así calcular el tiempo de vida de las conexiones. El análisis deberá satisfacer los requerimientos y recomendaciones indicados en la normatividad aplicable, considerando la distribución de frecuencias de la altura de ola significativa y de la dirección media del vector, indicados en la Norma de Referencia NRF-003-PEMEX-2007.



*Fig. 7.1 y Fig. 7.2 Inspección submarina del Jacket.*



**Fig. 7.3 y Fig. 7.4 Grietas en las conexiones de los elementos tubulares del Jacket, originadas por el oleaje.**

## 7.1 MÉTODO DEL ANÁLISIS POR FATIGA

El único método válido en este contexto será el análisis espectral, tal como se describe en la Sección 5.2 del API-RP-2A (WSD), 21ª Edición.

El criterio de Estado Límite de Fatiga (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.

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, los 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 intervalos de esfuerzo experimentados por los ciclos de carga, características locales de la concentración de esfuerzos y el número de ciclos del intervalo de esfuerzo.

El método de diseño de ELF considerado para estructuras de acero es el daño acumulado de Miner, esta aplicación normalmente sigue tres pasos:

- 1) Definir el histograma del intervalo de esfuerzo cíclico.
- 2) Seleccionar la curva S-N relevante.
- 3) Calcular el daño acumulado por fatiga.

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.

El método espectral por fatiga hace uso de la probabilidad de incidencia de oleaje para determinar los intervalos de esfuerzo y el número de ciclos asociado, actuando sobre las soldaduras de las juntas tubulares de la estructura. Una vez determinado el número de ciclos de los intervalos de esfuerzos que actúan sobre el material, es posible determinar el daño que estos producirán al compararlos con los ciclos permisibles de acuerdo con los datos indicados en las curvas S-N (ver sección 7.10).

El análisis se realiza a nivel de resistencia; se distribuyen las masas de la cubierta en los puntos nodales y se determinan sus formas y periodos naturales de vibrar. El comportamiento no-lineal que existe con la interacción entre el suelo y los pilotes, es representado a través de la generación de una matriz de rigidez equivalente del suelo, mediante la creación de un súper elemento.



## 7.2 FACTOR DE SEGURIDAD

En general la vida por fatiga de diseño de cada conjunto y miembro no debe ser inferior a la vida útil prevista de la estructura multiplicada por un factor de seguridad.

Para condiciones in situ, el factor de seguridad para la fatiga en componentes de acero depende de la consecuencia de falla (es decir, que tan crítico es el elemento) y la inspeccionabilidad en servicio. Elementos críticos son aquellos cuya única falla podría ser catastrófica. Por lo cual el API recomienda los siguientes factores.

**Tabla 7.1. Factores de seguridad para revisión por fatiga.**

Falla Crítica	Elemento Inspeccionable	Elemento No Inspeccionable
No	2	5
Si	5	10

Para fines de este estudio se utilizara un factor de seguridad de 2.00, para la estimación de la vida útil de las juntas, por lo que las conexiones tubulares deberán cumplir con un periodo mínimo de 20 años, con el respectivo factor de seguridad, es decir al menos 40 años.

## 7.3 MODELO ESTRUCTURAL

La determinación de la vida estimada de las juntas, se realiza con ayuda del Módulo **FATIGUE** del programa estructural SACS, el cual requiere de un archivo de entrada el cual contiene el espectro de oleaje para cada dirección de incidencia.

El modelo estructural que se emplea en la realización del análisis espectral por fatiga, es el mismo modelo estructural utilizado en el análisis estático bajo condiciones de operación y tormenta. Las cargas empleadas en el modelo se clasifican en gravitacionales y ambientales, estas últimas extraídas de la distribución de frecuencias y dirección media del vector indicados en el Anexo C "Distribución de frecuencias de la altura de ola significativa y de la dirección media del vector para diferentes campos en el Golfo de México" de la Norma de Referencia NRF-003-PEMEX-2007 "Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México".

Esta información oceanográfica para el análisis de fatiga, se presenta en tablas para cada área del Golfo de México: Sonda de Campeche, Activo de explotación Litoral Tabasco y Región Norte.

## 7.4 CARGAS ACTUANTES EN EL ANÁLISIS POR FATIGA

Las plataformas marinas se ven sujetas durante su vida a diferentes condiciones de carga de magnitudes variables producidas por diferentes factores. Al realizar el análisis por fatiga, únicamente son consideradas aquellas que producen mayores variaciones en los esfuerzos de las juntas. Al ser las fuerzas que producen el oleaje las cargas que representan mayor influencia en los esfuerzos, estas son utilizadas principalmente durante el análisis (en caso de existir otra carga con características dinámicas y que produzca efectos notables sobre las juntas, estas deberán ser consideradas). El criterio que se sigue en la diferenciación de las otras cargas es el siguiente.

**Tabla 7.2. Cargas aplicadas en el análisis por fatiga.**

Cargas Estáticas o constantes	Cargas Dinámicas utilizadas en el análisis
Gravedad	Fuerzas producidas por el oleaje
Flotación	
Operación	
Viento	
Corriente	

Criterios y Consideraciones para el Modelado de Plataformas Marinas Tipo Jacket, para Tirantes de Aguas Someras

Dentro de las cargas gravitacionales se encuentran las generadas por el peso propio de la estructura (incluye crecimiento marino y flotación), carga muerta no modelada, carga viva, accesorios, peso de equipo y tuberías. Para las cargas ambientales, se utilizará la distribución de frecuencias de la altura de ola y dirección media del vector, para el ejemplo de este trabajo se muestra la información tomada del anexo C de la NRF-003-PEMEX-2007.

Los nodos que tienen mayores esfuerzos por los efectos de fatiga se encuentran en el Jacket, especialmente los nodos que conectan a las piernas.

**Tabla 7.3. y Tabla 7.4. Ejemplo de la distribución de frecuencias de la altura de ola significativa y dirección media del vector, respectivamente, para las áreas especificadas (Anexo C, NRF-003-PEMEX-2007).**

Sonda de Campeche

Información oceanográfica para el análisis de fatiga en las áreas indicadas.  
Áreas: Abkatúm, Chuc "B", Pool Caan.

**Altura de Ola Significante**

Altura de Ola Significante (m)	Periodo Pico (s)												Total		
	0.50	1.50	2.50	3.50	4.50	5.50	6.50	7.50	8.50	9.50	10.50	11.50		12.50	
0.000 - 0.2499			0.0027	0.0002	0.0005	0.0001									0.0035
0.250 - 0.4999			0.0034	0.0522	0.0187	0.0034	0.0015	0.0005	0.0002						0.0799
0.500 - 0.7499				0.0878	0.0965	0.0261	0.0060	0.0033	0.0004	0.0002	0.0001	0.0001			0.2205
0.750 - 0.9999				0.0162	0.1461	0.0674	0.0092	0.0100	0.0012	0.0002	0.0001	0.0003			0.2507
1.000 - 1.2499				0.0006	0.0760	0.0863	0.0105	0.0137	0.0030	0.0005	0.0002				0.1908
1.250 - 1.4999				0.0002	0.0043	0.0822	0.0138	0.0079	0.0057	0.0011	0.0001				0.1153
1.500 - 1.7499					0.0003	0.0288	0.0180	0.0063	0.0032	0.0023	0.0007				0.0596
1.750 - 1.9999					0.0002	0.0053	0.0142	0.0067	0.0019	0.0024	0.0012				0.0319
2.000 - 2.2499					0.0001	0.0006	0.0069	0.0058	0.0015	0.0014	0.0010	0.0001			0.0174
2.250 - 2.4999						0.0001	0.0017	0.0039	0.0015	0.0013	0.0009				0.0094
2.500 - 2.7499							0.0004	0.0024	0.0014	0.0010	0.0009				0.0061
2.750 - 2.9999							0.0001	0.0014	0.0016	0.0010	0.0010				0.0051
3.000 - 3.2499								0.0006	0.0014	0.0006	0.0008	0.0001			0.0035
3.250 - 3.4999									0.0001	0.0004	0.0003	0.0007	0.0001		0.0016
3.500 - 3.7499										0.0006	0.0004	0.0004			0.0014
3.750 - 3.9999										0.0001	0.0003	0.0006	0.0001		0.0011
4.000 - 4.2499											0.0003	0.0002	0.0001		0.0006
4.250 - 4.4999											0.0001	0.0002			0.0003
4.500 - 4.7499											0.0001	0.0001			0.0002
4.750 - 4.9999												0.0002	0.0001		0.0003
5.000 - 5.2499												0.0002			0.0002
5.250 - 5.4999															0.0000
5.500 - 5.7499												0.0001			0.0001
5.750 - 5.9999													0.0001		0.0001
6.000 - 6.2499															0.0000
6.250 - 6.4999													0.0001		0.0001
6.500 - 6.7499													0.0001		0.0001
6.750 - 6.9999													0.0001		0.0001
7.000 - 7.2499															0.0000
7.250 - 7.4999															0.0001
<b>Total</b>	0.0000	0.0000	0.0061	0.1572	0.3427	0.3003	0.0823	0.0626	0.0241	0.0135	0.0097	0.0014	0.0001	1.0000	

**Dirección Media del Vector**

Altura de Ola Significante (m)	Dirección Media del Vector															Total		
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW		NNW	
0.000 - 0.2499			0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001		0.0005	0.0006	0.0009	0.0003	0.0002	0.0004	0.0001	0.0001	0.0001	0.0036
0.250 - 0.4999	0.0004	0.0004	0.0003	0.0004	0.0003	0.0004	0.0011	0.0024	0.0044	0.0127	0.0156	0.0175	0.0113	0.0076	0.0041	0.0010	0.0010	0.0799
0.500 - 0.7499	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0005	0.0005	0.0012	0.0039	0.0104	0.0275	0.0472	0.0640	0.0375	0.0179	0.0073	0.0012	0.0012	0.2204
0.750 - 0.9999	0.0003	0.0004	0.0004	0.0003	0.0008	0.0005	0.0012	0.0039	0.0177	0.0293	0.0470	0.0701	0.0498	0.0205	0.0079	0.0010	0.0010	0.2511
1.000 - 1.2499	0.0002	0.0003	0.0002	0.0002	0.0009	0.0010	0.0053	0.0139	0.0234	0.0346	0.0481	0.0393	0.0173	0.0051	0.0008	0.0008	0.1908	
1.250 - 1.4999	0.0003	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0005	0.0044	0.0120	0.0163	0.0197	0.0266	0.0222	0.0089	0.0027	0.0004	0.1149	
1.500 - 1.7499	0.0001	0.0001	0.0001				0.0001	0.0007	0.0049	0.0078	0.0121	0.0091	0.0095	0.0101	0.0029	0.0015	0.0007	0.0597
1.750 - 1.9999							0.0001	0.0006	0.0037	0.0073	0.0073	0.0033	0.0047	0.0031	0.0007	0.0005	0.0003	0.0316
2.000 - 2.2499	0.0001							0.0005	0.0032	0.0049	0.0042	0.0024	0.0014	0.0004	0.0001	0.0001		0.0173
2.250 - 2.4999								0.0002	0.0025	0.0031	0.0022	0.0008	0.0003	0.0001				0.0092
2.500 - 2.7499				0.0001	0.0002	0.0001	0.0005	0.0019	0.0021	0.0009	0.0003							0.0061
2.750 - 2.9999					0.0001	0.0002	0.0001	0.0017	0.0021	0.0007	0.0002							0.0051
3.000 - 3.2499					0.0002			0.0013	0.0012	0.0006	0.0001							0.0034
3.250 - 3.4999						0.0002	0.0001	0.0007	0.0006	0.0001								0.0017
3.500 - 3.7499						0.0001	0.0001	0.0007	0.0007	0.0001								0.0017
3.750 - 3.9999						0.0001	0.0001	0.0004	0.0006	0.0001								0.0013
4.000 - 4.2499								0.0003	0.0001	0.0001								0.0005
4.250 - 4.4999								0.0002	0.0001									0.0003
4.500 - 4.7499								0.0002	0.0001									0.0003
4.750 - 4.9999								0.0002										0.0002
5.000 - 5.2499								0.0002	0.0001									0.0003
5.250 - 5.4999							0.0001											0.0001
5.500 - 5.7499								0.0001										0.0001
5.750 - 5.9999							0.0001											0.0001
6.000 - 6.2499																		0.0000
6.250 - 6.4999									0.0001									0.0001
6.500 - 6.7499							0.0001											0.0001
6.750 - 6.9999																		0.0000
7.000 - 7.2499																		0.0000
7.250 - 7.4999								0.0001										0.0001
7.500 - 7.7499																		0.0000
<b>Total</b>	0.0018	0.0016	0.0016	0.0016	0.0026	0.0038	0.0081	0.0422	0.0897	0.1382	0.1812	0.2425	0.1740	0.0763	0.0293	0.0055	1.0000	

El diagrama de dispersión de oleaje mostrado en la Tabla 7.3, se reducirá a 8 direcciones de incidencia del oleaje sobre la estructura, espaciadas a cada 45° (N, NW, W, SW, S, SE, E y NE). La aplicación de las incidencias de oleaje sobre la estructura se hace corresponder con su orientación geográfica y con el sistema de coordenadas del modelo estructural.

## 7.5 PARÁMETROS UTILIZADOS

Las condiciones ambientales son descritas por diagramas de dispersión y la probabilidad de ocurrencia de los estados del mar.

Usando: estadísticas, frecuencia de ocurrencia de los estados del mar, duración e intervalo de esfuerzos es posible obtener la contribución anual de daños por fatiga para cada estado de mar, usando la regla de Miner y la curva S-N apropiada.

El daño total por fatiga en un punto de esfuerzo, es la acumulación de todos los daños debido a los estados de mar en todas las direcciones y sus probabilidades de ocurrencia.

## 7.6 PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS ESPECTRAL POR FATIGA

A continuación se hace una descripción del procedimiento para realizar un análisis por fatiga, el cual será utilizado en este trabajo. El método espectral hace uso de herramientas como la probabilidad para determinar los intervalos de esfuerzo y el número de ciclos asociados a estos intervalos, los cuales actúan sobre las soldaduras de las juntas tubulares. Al ser determinado el número de ciclos de los intervalos de esfuerzos que actúan sobre el material, es posible determinar el daño que estos producirán al compararlos con los ciclos permisibles de acuerdo con los datos existentes en las curvas S-N (Intervalo de Esfuerzos vs Número de Ciclos). Los pasos del análisis por fatiga utilizando el método espectral pueden definirse de la siguiente forma:

- i. De acuerdo con la información meteorológica y oceanográfica de las características de las olas individuales (estados de mar) del sitio así como su probabilidad de incidencia, se conforman los espectros de oleaje con los cuales se analizará la plataforma.
- ii. El espectro de oleaje representa el contenido de frecuencias de distintos estados de mar. Existen distintas formulaciones para obtener dichos espectros, como las propuestas por Pierson-Moskowitz o Jonswap.
- iii. Se realiza un análisis de la plataforma teniéndose como única condición de carga el oleaje, en el cual se considera el efecto de las olas individuales sobre la plataforma, cada una de ellas con diferente altura, periodo y dirección (estado de mar). La modelación de las olas individuales se realiza utilizando la teoría de oleaje que mejor represente su comportamiento, de acuerdo con sus características y con las condiciones de profundidad del sitio de interés, algunas teorías de oleaje aplicables son Airy, Stokes 5to. orden y Stream Function. Este análisis se realiza para cada oleaje que se puede presentar en el sitio y para cada dirección de incidencia. Como resultado, se obtendrán los esfuerzos y los elementos mecánicos actuantes en cada miembro que incide en una junta tubular para cada estado de mar y para cada dirección. Los análisis que pueden ser aplicados son: estático, dinámico en el dominio del tiempo y de la frecuencia.
- iv. Una vez obtenidos los esfuerzos para cada punto crítico, se afectan éstos por sus correspondientes Factores de Concentración de Esfuerzos (SCF por sus siglas en inglés, sección 7.8), los cuales dependen del tipo de conexión y del esfuerzo aplicado en la misma, obteniendo así los esfuerzos efectivos que actúan en las juntas.
- v. Con los esfuerzos efectivos y con la ola que los produce, se obtiene las funciones de transferencia para cada punto crítico (sección 7.9). Las funciones de transferencia serán generadas para cada dirección de incidencia. Éstas nos representan la relación existente entre los esfuerzos en un punto crítico y una ola definida por un periodo y altura de ola.
- vi. Multiplicando el espectro de oleaje correspondiente a cada estado de mar por la función de transferencia asociada a cada dirección, se obtienen las densidades espectrales de los esfuerzos para

cada estado de mar y cada dirección. Finalmente se tendrá un número de densidades espectrales para cada punto crítico igual a la combinación de estados de mar y direcciones que actúan sobre la plataforma.

- vii. El número de ciclos del intervalo de esfuerzos se determina mediante los momentos espectrales de orden 0 y 2 de la densidad espectral de los esfuerzos, y en función de la frecuencia con la que se presenten los estados de mar y la dirección de los mismos.
- viii. El número de ciclos de los intervalos de esfuerzos actuantes son comparados con los correspondientes a las curvas S-N y así es determinado el daño que produce ese estado de mar, al actuar en una dirección específica en cada punto crítico.
- ix. El daño producido es acumulado, aplicando la regla de Miner, por todos los estados de mar que actúan en las diferentes direcciones, obteniendo el daño acumulado del punto crítico.
- x. Con la información del daño producido en los puntos críticos de cada junta, es posible determinar su vida de servicio, esto se calcula con el inverso del daño acumulado, lo cual determina el número de años de la vida por fatiga para cada junta de la estructura.

### 7.7 CLASIFICACIÓN DE JUNTAS

En las juntas de los elementos tubulares que constituyen al Jacket, existen diferentes configuraciones que se pueden producir debido a la forma en que inciden los elementos. Estas juntas son nombradas como K, Y, X, T y N, dependiendo de su distribución, en la Fig. 7.5 se presentan las configuraciones típicas de juntas tubulares. En ocasiones los miembros principales (CHORD) son reforzados con una placa y en otras realizando un cambio completo en la sección del elemento en el punto donde inciden las diagonales (este refuerzo es llamado CAN). Los materiales utilizados en las placas de refuerzo o en los segmentos de los cambios de sección, comúnmente son aceros con esfuerzos de fluencias mayores al de los elementos incidentes.

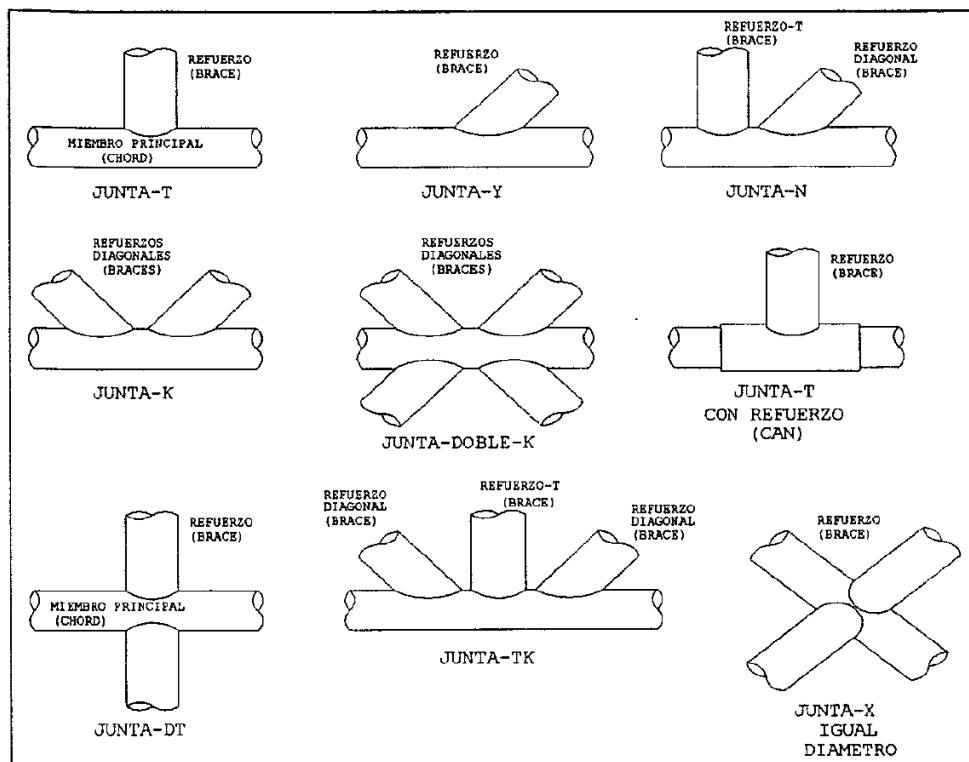


Fig. 7.5. Configuraciones típicas de juntas tubulares.

## 7.8 FACTOR DE CONCENTRACIÓN DE ESFUERZOS

Como resultado de la configuración de las juntas tubulares y los abruptos cambios en la geometría que éstas presentan, los esfuerzos en las juntas se ven afectados, dando como resultado una distribución que no es uniforme, generándose zonas en las que se presentan concentraciones de esfuerzos, por lo que los esfuerzos nominales (axial o flexión) en miembros tubulares, se incrementan considerablemente en la zona adyacente de la soldadura de la junta. Lo anterior es conocido como “concentración de esfuerzos” y la localización donde ocurre la máxima concentración es conocida como “hot spot”; la relación del “hot spot” entre el esfuerzo nominal es llamado Factor de Concentración de Esfuerzos (SCF).

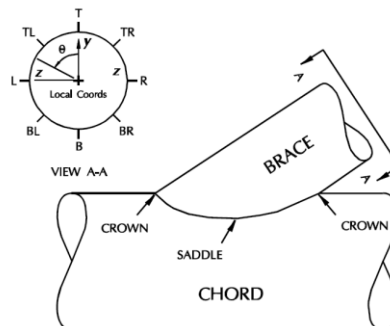
Por otro lado los factores de concentración de esfuerzos son altamente dependientes de parámetros como: las características geométricas, el tipo de soldadura así como el tipo de esfuerzo aplicado en las conexiones tubulares.

La presencia de orificios, cuñas etc. hace que aparezcan esfuerzos mayores en algunas zonas de los elementos.

Los factores de concentración de esfuerzos para las juntas tubulares que integran la plataforma, se determinan con el criterio de Efthymiou para 8 puntos de la junta, identificados en la Fig. 7.6 (Top, Top Right, Right, Bot Right, Bot, Bot Left, Left y Top Left). Este criterio determina los factores de concentración de esfuerzos a partir de ecuaciones aplicables de acuerdo a la configuración de la junta (K, T, Y, X o N), además, considera la influencia de la longitud y restricciones de apoyo del elemento principal (CHORD), en la reducción del SCF en los puntos R y L (saddle).

La figura siguiente identifica los 8 puntos en los cuales se determinan los factores de concentración de esfuerzos.

BRACE: Elemento de refuerzo.  
CHORD: Elemento principal.



**Fig. 7.6. Localización de puntos para el cálculo de los SCF.**

Los esfuerzos calculados mediante el análisis estructural, son los esfuerzos nominales en el miembro principal o secundario. Por lo cual para calcular la vida por fatiga de una conexión, se deben multiplicar los esfuerzos nominales por el factor de concentración de esfuerzos, para obtener los esfuerzos efectivos.

El concepto de concentración de esfuerzos, tiene un significado único para problemas en el plano que involucran la definición de esfuerzo promedio. Entonces, si se barrena un agujero en una placa sometida a tensión, el esfuerzo presente en el elemento es constante siempre y cuando se mida a una distancia apreciable del agujero, pero el esfuerzo tangencial en el borde del agujero se vería incrementado considerablemente (Stress Concentration Factors for Simple Tubular Joints).

Este cambio o incremento en el esfuerzo en el borde es denominado concentración de esfuerzos, por lo que es importante determinar el Factor de Concentración de Esfuerzos.

K: Factor de Concentración de Esfuerzos.

S: Esfuerzo promedio a una distancia del agujero.

S<sup>''</sup>: Tensión media en la sección neta.

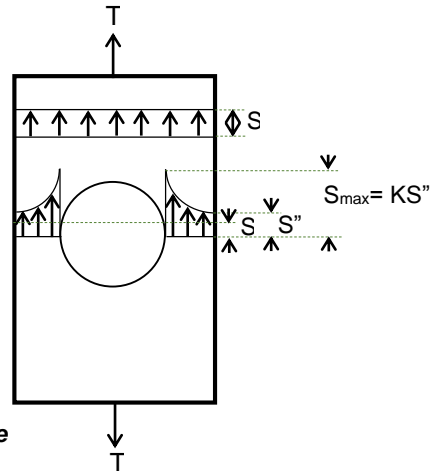


Fig. 7.7. Esquema del origen del Factor de Concentración de Esfuerzos.

Esta situación se presenta, no solamente en caso de un agujero, si no donde hay cambios súbitos en la sección transversal.

El Factor de Concentración de Esfuerzos (K) puede ser obtenido por métodos teóricos y experimentales.

**El factor K es definido como** 
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \dots \text{ecuación 7.1.}$$

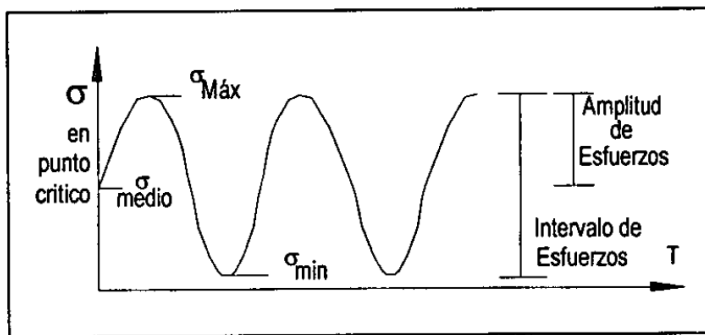
Donde:

$\sigma_{nom}$ : El esfuerzo nominal es determinado por el esfuerzo simple en los materiales, generalmente, el esfuerzo nominal es determinado usando el área transversal de la sección.

$\sigma_{max}$ : El esfuerzo máximo es obtenido por un método experimental, existen valores recomendados para cada tipo de conexión.

### 7.9 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Las funciones de transferencia son generadas con base en las amplitudes o intervalos de esfuerzos que actúan en los puntos críticos de la plataforma, estos se generan por la variación de estos valores conforme transita la ola sobre la estructura (Silva, 1991).



La Fig. 7.8 muestra la variación de esfuerzos en el punto crítico en función del tiempo, es posible identificar el valor máximo, mínimo y medio de estos esfuerzos, con lo que es posible calcular los intervalos o amplitudes de esfuerzos de acuerdo a las siguientes expresiones:

**Intervalo  $\sigma$**  
$$= \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \dots \text{ecuación}$$

**Amplitud  $\sigma$**  
$$= \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \dots \text{ecuación}$$

**$\sigma_{medio}$**  
$$= \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \dots \text{ecuación 7.4.}$$

Fig. 7.8. Variación de esfuerzos en un punto crítico de la plataforma.

Es factible realizar el análisis de fatiga con base en las amplitudes o intervalos de esfuerzos, debido a que existen curvas S-N para ambos casos, con los cuales se pueda estimar el periodo de vida de elementos y conexiones.

Para obtener las funciones de transferencia es necesario efectuar:

- a. **Análisis estructural:** Se analiza la plataforma en su totalidad, sometida al oleaje individual en las 8 direcciones, considerando la posición más crítica para cada altura de ola. Se definen los periodos de



oleaje a los cuales estará expuesta la estructura, en el sonda de Campeche son hasta 12.50 seg; en este ejemplo fue 100 el número de olas y para cada ola se consideraron 18 posiciones diferentes, con lo que se obtuvieron 1800 condiciones de carga para cada dirección de incidencia, de las cuales solo 100 (las máximas) fueron usadas para efectuar el análisis de todas las conexiones de la plataforma; con estos resultados se prepara el archivo de esfuerzos nominales.

- b. **Cálculo del Factor de Concentración de Esfuerzos:** A la fecha existen estudios analíticos que emplean técnicas de elemento finito y experimentos en diversos tipos de juntas bajo distintas condiciones de carga que ofrecen formulaciones para obtener el FCE. El API RP 2A recomienda valores de FCE no menores que 6 para conexiones de plataformas. Para el análisis en SACS, la teoría para determinar el FCE es definida en el archivo *ftginp*, el cual se detallara más adelante.

Cálculo de esfuerzos en los Hot-Spots.- Una vez calculados los esfuerzos nominales y los factores de concentración de esfuerzos en los puntos de interés, estos se multiplican para obtener los “Esfuerzos en los Hot Spots” o esfuerzos amplificados.

Un estado de mar está definido por un periodo (seg) con su respectiva altura de oleaje (m); dicha altura es calculada con la teoría de oleaje que mejor se ajuste a la zona en estudio.

Los valores de la función de transferencia se obtienen dividiendo el intervalo o amplitud de esfuerzos entre la altura de ola que lo produce y representa la relación existente entre un estado del mar definido por una ola y su período, así como la amplitud de esfuerzos producidos en el punto crítico.

$$H(\omega_i) = \frac{\sigma_i}{H_i} = \frac{(\text{ton}/\text{m}^2)}{m} \quad \dots \text{ecuación 7.5.}$$

Donde:

- i = representa al i-esimo estado de mar que actúa en esa dirección.
- $\sigma_i$  = Amplitud o intervalo de esfuerzos producidos por el estado de mar i.
- $H_i$  = Altura de la ola del estado de mar i.
- $\omega_i$  = Frecuencia del estado de mar i.

Las funciones de transferencia de esfuerzos en los elementos estructurales son generadas analizando la estructura para una serie de 8 direcciones de incidencia del oleaje. En este caso, normalmente se utiliza la teoría de ola de Airy para generar las cargas aplicadas.

Las funciones de transferencia se generan en SACS al realizar el análisis estático con las condiciones ambientales establecidas en el archivo (*seainp*), con este análisis se calculan la fuerzas actuantes en la plataforma para cada uno de los estados de mar, en dicho análisis se transitan las olas sobre la estructura, obteniendo la posición de la ola que genera los esfuerzos críticos sobre las conexiones. La representación de las funciones de transferencia es a través de una relación cortante basal y el periodo de oleaje.

En la Fig. 7.9, se muestra una función de transferencia ejemplo, teniendo como variables el cortante basal y el periodo.

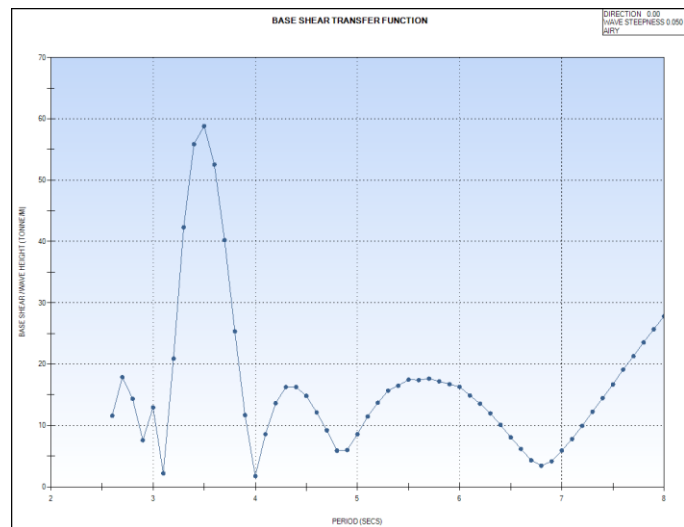


Fig. 7.9. Ejemplo de función de transferencia (Dirección a 0°, cortante basal)

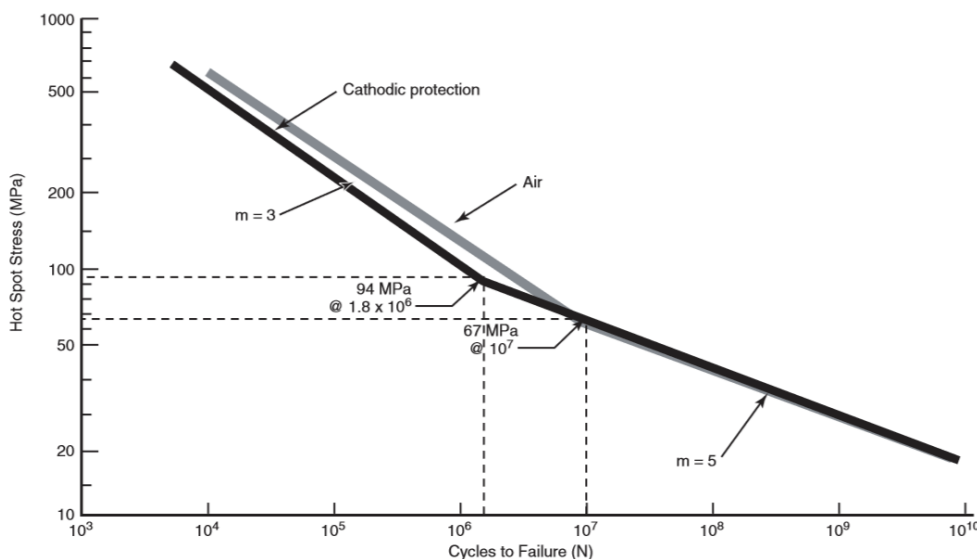
## 7.10 CURVAS S-N

Al someter un material a la acción de una carga que oscila con el transcurso del tiempo, se obtiene un esfuerzo actuante variable. Si el esfuerzo que esta carga produce es de una magnitud suficiente, después de un determinado número de ciclos se iniciará la aparición de una grieta en el punto de mayor concentración de esfuerzos. Este esfuerzo no necesita exceder el valor del esfuerzo de fluencia del material para producir la aparición de grietas, así que el material podrá mantener su comportamiento dentro de un intervalo elástico y aun así presentar grietas y fallas debidas a la fatiga. Una vez que la grieta aparece, crecerá y se propagará en dirección ortogonal a la dirección de la carga (Silva, 1991).

Una forma gráfica de describir el comportamiento del material ante la fatiga es a través de la construcción de las curvas S-N, las cuales fueron desarrolladas a base de pruebas de laboratorio en donde un espécimen es sujeto a un intervalo de esfuerzos constante hasta que surgía la presencia de una grieta; el número de ciclos necesarios para producir esta falla es contabilizado y posteriormente graficado.

La gráfica S-N (en escala logarítmica) contiene el valor del intervalo o la amplitud de esfuerzos (S) aplicados al espécimen y el número de ciclos (N) necesarios para producir la falla. La Fig. 7.10 muestra una curva S- N que se puede emplear durante el análisis de fatiga de una plataforma para el diseño de juntas tubulares, la cual es propuesta por el API RP 2A-WSD en el capítulo 5.5, se deberá verificar que durante el análisis se considere el efecto del espesor en la curva S-N, ya que la curva propuesta por el API es para un espesor de tubería de 5/8 in, esto será de acuerdo a como se especifica en el apartado 5.5.2 del API RP 2A-WSD.

La determinación de la vida estimada de las juntas, se realiza con ayuda del módulo **FATIGUE** del programa estructural SACS. El archivo de entrada contiene el espectro de oleaje para cada dirección de incidencia y el factor de seguridad para la determinación de la vida en juntas **(2.00)**.



De acuerdo con la normatividad aplicable (API RP 2A-WSD), las conexiones tubulares deben asegurar el cumplimiento de una vida útil de 20 años considerando un factor de seguridad de 2.00.

Fig. 7.10. Curva S-N empleada en el análisis de fatiga, (API RP 2A-WSD).

## 7.11 CRITERIOS Y CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO DEL ANÁLISIS ESPECTRAL POR FATIGA EN EL PROGRAMA SACS

Para conocer el deterioro a través del tiempo de las juntas tubulares por efectos de fatiga, principalmente en aquellas áreas muy localizadas como son los arriostramientos horizontales de los primeros niveles del Jacket bajo el agua, se realiza un análisis espectral por fatiga como a continuación se describe. Este análisis lo podemos realizar con ayuda del programa SACS, el cual a través de la suma de daños ocasionados por las

diferentes alturas de oleaje y direccin de incidencia a travs del tiempo, calcula un periodo de vida estimado de las conexiones tubulares y elementos barra.


Para comenzar el anlisis en SACS se parte del punto, en donde se cuenta con la siguiente informacin:

- Modelo geomtrico de la plataforma marina, archivo (*sacinp*).
- Parmetros meteorolgicos y oceanogrficos asociados a los estados de mar. La distribucin anual de condiciones normales (altura de ola significativa y periodo), as como su direccin media.

Para llevar a cabo el anlisis de fatiga se requiere a su vez realizar un anlisis esttico previo, para conocer el comportamiento del intervalo de esfuerzos que se generan en las conexiones y elementos de la plataforma para cada estado de mar. Esto se lleva a cabo modelando en SACS el efecto de las olas individuales sobre la plataforma, cada ola con diferente altura, periodo y direccin, obteniendo as un ciclo de esfuerzos para cada tipo de ola que se pudiera presentar en la plataforma.

Una vez que se conocen los intervalos de esfuerzos a los cuales estn sometidas principalmente las conexiones, se calcula los (Hot Spots o Factor de Concentracin de Esfuerzos), como se mencion previamente en este captulo.

Para llevar a cabo este anlisis esttico se seguirn los pasos descritos en el captulo 5 “Anlisis por el Mtodo Esttico, de una Plataforma Tipo Jacket en las Etapas de Operacin y Tormenta”, tomando en cuenta las siguientes variantes:

- 1) Guardar el archivo (*sacinp*) con el contenido nicamente de la geometra de la estructura con las cargas gravitacionales, “Model data only”.
- 2) Generar el archivo de datos (*seainp*) con el modulo Data File  , en el cual se establecern las caractersticas de cada tipo de ola que se puede presentar en el sitio como son: la teora de oleaje que mejor represente el comportamiento del oleaje en la zona en estudio, periodo de oleaje, tirante de agua, elevacin del nivel de lodos, etc. A continuacin se presenta un ejemplo de este archivo de datos.

```

seainp.Plataforma
1 LDOPT NF+Z1.0283857.849047 -78.64 78.64GLOBME TRL NPNP K
2 * ARCHIVO DE ENTRADA DE LAS CARGAS DEL MAR
3 FILE S
4 CDM AP --- Ingreso de los coeficientes de arrastre y de inercia.
5 GRPOV
6 MGROV
7 MGROV 58.64 68.64 2.54 --- Espesor del crecimiento marino
8 MGROV 68.64 78.64 5.00 de acuerdo a la elevacin.
9 GRPOVAL 001 F
10 GRPOVAL 020NF
11 LOAD
12 LOADCN 1
13 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 0°
14 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 18AIRYPF
15 LOADCN 2
16 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 45°
17 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 45. 18AIRYPF
18 LOADCN 3
19 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 90°
20 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 90. 18AIRYPF
21 LOADCN 4
22 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 135°
23 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 135. 18AIRYPF
24 LOADCN 5
25 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 180°
26 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 180. 18AIRYPF
27 LOADCN 6
28 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 225°
29 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 225. 18AIRYPF
30 LOADCN 7
31 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 270°
32 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 270. 18AIRYPF
33 LOADCN 8
34 * FUNCION DE TRANSFERENCIA PARA PERIODOS A 315°
35 GNTRF AL 10 0.05 12.5 1.00 315. 18AIRYPF
36 END
    
```

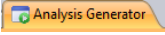
Parámetros generales de las condiciones ambientales a las cuales estará sujeta la plataforma como son; tirante de agua, elevación del fondo marino, densidad del agua, densidad del acero, coordenadas verticales, coordenadas a utilizar en los elementos, flotación en los elementos y combinaciones de carga.

Condiciones específicas para un grupo de elementos; por ejemplo aqu se puede determinar que el grupo de los pilotes no sea afectado por el crecimiento marino.

Parámetros de las olas individuales: teora hidrulica que mejor se ajuste al oleaje de la zona en estudio y periodo del oleaje, con los cuales se calcularan las fuerzas y esfuerzos actuantes sobre la plataforma para cada estado del mar, a partir de estos datos se generan las Funciones de Transferencia que posteriormente sern utilizadas en el anlisis de fatiga, esto para cada una de las 8 direcciones de incidencia.

Fig. 7.11. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (*seainp*).

Una vez que se cuenta con los archivos de los puntos 1) y 2) se procede a hacer el análisis estático en el programa SACS de la siguiente manera:

- 1) En la pestaña **Analysis Generator**  que se encuentra en la ventana principal de SACS, accederemos al Menú **Analysis Type**, en donde se seleccionará la opción **Static**. Posteriormente en el desplegado **Subtype** se elegirá la opción **Basic Static Analysis**.
- 2) En el menú que se despliega de este tipo de análisis, realizaremos una modificación en “Analysis Options: Environmental Loading”, en donde indicaremos que el archivo de las condiciones ambientales no será tomado del Modelo, en vez de esto se ingresara como un archivo de datos anexo.
- 3) Finalmente en el apartado del Menú Input Files, ingresaremos los archivos de datos generados previamente; 1) *sacinp*, 2) *seainp*, y se comienza el análisis.

Una vez que termina el programa de realizar el análisis, se generan los siguientes archivos, en donde se integran los resultados del análisis estático bajo las condiciones ambientales establecidas.

Name /	Description	Size	Type
psvdb.Estatico	Postvue Database		File Folder
sacsf.Estatico	SACS Common Solution	234,877 KB	Common Solution
sacEstatico.runx	Run File	11 KB	Run
sacinp.Plataforma Octapodo	SACS Model File	352 KB	Input
saclst.estatico	SACS Output Listing	250,042 KB	Output Listing
seainp.Plataforma	Seastate Input	3 KB	Input
seanpcf.Estatico	Seastate Neutral Chart	23 KB	Neutral Chart
seanpf.Estatico	Seastate Neutral Picture	277 KB	Neutral Picture
seaooci.Estatico	Seastate Output Structural Data	196,870 KB	Output Structural Data

Dentro de la información que contienen estos archivos, esta la que se muestra a continuación, en la cual se desglosan los parámetros ambientales de la carga actuante sobre la plataforma, para cada condición de oleaje (teoría de oleaje, periodos, tirante de agua, elev. del fondo marino, etc.) indicados en el archivo (seainp).

```

WAVE THEORY ***** AIRY
WAVE HEIGHT ***** 11.825 M
WATER DEPTH ***** 78.640 M
WAVE PERIOD ***** 12.500 SECS
WAVE LENGTH ***** 236.504 M
ANGLE FROM X TOWARD Y ** 0.000 DEGREES
MUDLINE ELEVATION ***** -78.640 M
WAVE CELERITY ***** 18.920 M /SEC
MAX. NO. SEG/MEMBER **** 10
MIN. NO. SEG/MEMBER **** 1
CREST POSITION ***** 0.000 M
CONNECTIVE ACCELERATION TERMS EXCLUDED
CREST WATER DEPTH ***** 84.55 M
TROUGH WATER DEPTH ***** 72.73 M
    
```

A partir de los parámetros indicados en la modelación (teoría de oleaje, tirante de agua, periodo de ola y elevación del nivel de lodos), el programa calcula para cada condición de oleaje que se le indique, altura de ola, longitud de ola, aceleración de la ola y tirante de agua en la cresta de la ola. Estos datos son con los que calculan las cargas actuantes en cada dirección de incidencia.

**Fig. 7.12. Extracto de algunos resultados hidráulicos, obtenidos de la modelación en SACS.**

Los esfuerzos que se generan en las conexiones y elementos de la plataforma, se establecerán en un archivo tipo (*sacsf*), el cual se genera como parte de los resultados del análisis estático.

A continuación se presenta un extracto de los resultados de este análisis para un estado de mar. La forma de presentar los resultados de manera global es a partir del cortante basal producido por el oleaje.

Crterios y Consideraciones para el Modelado de Plataformas Marinas Tipo Jacket, para Tirantes de Aguas Someras

```

***** RESULTS FOR LOAD CASE      1 *****

      11.8 M. WAVE AT      0.0 DEG

***** SUMMATION OF FORCES AND MOMENTS FOR LOAD CASE      1 *****
(MOMENTS ABOUT MUDLINE AT ELEVATION  -78.64 M. )

      SUM FX      SUM FY      SUM FZ      SUM MX      SUM MY      SUM MZ
      KG          KG          KG          KG-M        KG-M        KG-M

PLATE HYDRODYNAMIC          0.000          0.000          0.000          0.000          0.000          0.000
SEASTATE GENERATED 393145.281      1971.161      -84740.039      -233723.391      23428974.000      375323.125
USER INPUT              0.000          0.000          0.000          0.000          0.000          0.000
    
```

Fig. 7. 13. Ejemplo de los resultados del análisis de la interacción suelo-estructura.

Posteriormente para conocer el periodo de vida de las conexiones y de los elementos, se realizará un análisis por fatiga, para el cual se requiere generar un archivo de datos con extensión (*ftginp*), en el cual se establecerá la distribución de frecuencias de las alturas de ola significativa y dirección media del vector para el área específica, esto para cada una de las 8 direcciones de incidencia.

Las consideraciones principales para generar el archivo (*ftginp*), son las siguientes:

- 1) Los diagramas de distribución de frecuencias de la dirección del oleaje, se reducirá a 8 direcciones de incidencia sobre la plataforma, espaciadas a cada 45° (N, NW, W, SW, S, SE, E y NE). La aplicación de las incidencias de oleaje sobre la estructura se hace corresponder con su orientación geográfica y con el sistema de coordenadas del modelo estructural (Fig. 3.26).
- 2) La norma NRF-003-PEMEX-2007 proporciona información para 16 direcciones de incidencia del oleaje, por lo cual al hacer la consideración de utilizar únicamente ocho direcciones, se deberá interpolar linealmente cada una de las frecuencias de incidencia, para obtener la suma unitaria de todas las probabilidades de incidencia.

Tabla 7.5. Del caso en estudio, se muestra la información del área Abkatúm, Chuc “B”, Pool, Caan, considerando únicamente las 8 direcciones de incidencia:

No.	Altura de Ola Significante		Altura Media (m)	Dirección Media del Vector de Oleaje								Probabilidad Total de la Altura de Oleaje
	(m)	(m)		270°	225°	180°	135°	90°	45°	0°	315°	
				N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
1	0.000	0.2499	0.125		0.0002	0.0002	0.0002	0.0010	0.0018	0.0004	0.0002	0.0041
2	0.250	0.4999	0.375	0.00082	0.0006	0.00061	0.0023	0.0090	0.0319	0.0231	0.0084	0.0768
3	0.500	0.7499	0.625	0.00082	0.0006	0.00102	0.0025	0.0213	0.0967	0.0768	0.0149	0.2146
4	0.750	0.9999	0.875	0.00061	0.0008	0.00164	0.0025	0.0362	0.0963	0.1020	0.0162	0.2562
5	1.000	1.2499	1.125	0.00041	0.0004	0.00041	0.0020	0.0285	0.0709	0.0805	0.0104	0.1935
6	1.250	1.4999	1.375	0.00061	0.0004	0.00041	0.0010	0.0246	0.0403	0.0455	0.0055	0.1184
7	1.500	1.7499	1.625	0.0002	0.0002		0.0014	0.0160	0.0186	0.0207	0.0031	0.0602
8	1.750	1.9999	1.875				0.0012	0.0149	0.0068	0.0063	0.0010	0.0303
9	2.000	2.2499	2.125	0.0002			0.0010	0.0100	0.0049	0.0008	0.0002	0.0172
10	2.250	2.4999	2.375				0.0004	0.0063	0.0016	0.0002		0.0086
11	2.500	2.7499	2.625			0.00041	0.0010	0.0043	0.0006			0.0063
12	2.750	2.9999	2.875			0.0002	0.0002	0.0043	0.0004			0.0051
13	3.000	3.2499	3.125			0.00041		0.0025	0.0002			0.0031
14	3.250	3.4999	3.375				0.0002	0.0012				0.0014
15	3.500	3.7499	3.625				0.0002	0.0014				0.0016
16	3.750	3.9999	3.875				0.0002	0.0012				0.0014
17	4.000	4.2499	4.125					0.0002				0.0002
18	4.250	4.4999	4.375					0.0002				0.0002
19	4.500	4.7499	4.625					0.0002				0.0002
20	4.750	4.9999	4.875									0.0000
21	5.000	5.2499	5.125					0.0002				0.0002
22	5.250	5.4999	5.375									0.0000
23	5.500	5.7499	5.625									0.0000
24	5.750	5.9999	5.875									0.0000
25	6.000	6.2499	6.125									0.0000
26	6.250	6.4999	6.375									0.0000
27	6.500	6.7499	6.625									0.0000
28	6.750	6.9999	6.875									0.0000
29	7.000	7.2499	7.125									0.0000
30	7.250	7.4999	7.375				0.0002					0.0002
31	7.500	7.75	7.625									0.0000
<b>Probabilidad Total de la Dirección de Incidencia</b>				<b>0.0037</b>	<b>0.0033</b>	<b>0.0053</b>	<b>0.0166</b>	<b>0.1837</b>	<b>0.3711</b>	<b>0.3563</b>	<b>0.0600</b>	<b>TOTAL</b>
												<b>1.0000</b>

3) Las alturas de ola significativa actuantes en cada dirección de incidencia serán aquellas que tengan alguna probabilidad de ocurrencia, de acuerdo a la Tabla 7.5.

Uno de los requisitos del programa SACS para ingresar las frecuencias de cada una de las alturas de oleaje, es que la suma de las frecuencias de ocurrencia de todas estas en la dirección de incidencia correspondiente sea igual a 1.00, por lo cual una vez que se identifican las alturas de oleaje que actúan en esa dirección, se normalizan, obteniendo que la suma de sus frecuencias de ocurrencia sea igual a 1.00.

Para aclarar este punto se muestra el siguiente ejemplo del área Abkatúm, Chuc “B”, Pool, Caan, en el cual se establecen las alturas de oleaje en la incidencia a 0°, normalizando las frecuencias de ocurrencia.

**Tabla 7.6. Ejemplo del caso en estudio de las probabilidades de incidencia de las alturas de oleaje que se presentan en la dirección a 0°, normalizadas para obtener una suma de frecuencias igual a la unidad.**

No.	Altura de Ola Significante		Altura Media (m)	Altura de Ola Significante (m), para Dirección 0°												Probabilidad Total de la Altura de Oleaje	
	(m)	(m)		Periodos Pico (segundos)													
				0.50	1.50	2.50	3.50	4.50	5.50	6.50	7.50	8.50	9.50	10.50	11.50		12.50
1	0.000	0.2499	0.125			0.0028	0.0002	0.0005	0.0001								0.0036
2	0.250	0.4999	0.375			0.0035	0.0533	0.0191	0.0035	0.0015	0.0005	0.0002					0.0816
3	0.500	0.7499	0.625				0.0897	0.0986	0.0267	0.0061	0.0034	0.0004	0.0002	0.0001	0.0001		0.2252
4	0.750	0.9999	0.875				0.0165	0.1492	0.0688	0.0094	0.0102	0.0012	0.0002	0.0001	0.0003		0.2561
5	1.000	1.2499	1.125				0.0006	0.0776	0.0882	0.0107	0.014	0.0031	0.0005	0.0002			0.1949
6	1.250	1.4999	1.375				0.0002	0.0044	0.084	0.0141	0.0081	0.0058	0.0011	0.0001			0.1178
7	1.500	1.7499	1.625					0.0003	0.0294	0.0184	0.0064	0.0033	0.0023	0.0007			0.0609
8	1.750	1.9999	1.875					0.0002	0.0054	0.0145	0.0068	0.0019	0.0025	0.0012			0.0326
9	2.000	2.2499	2.125					0.0001	0.0006	0.0070	0.0059	0.0015	0.0014	0.0010	0.0001		0.0178
10	2.250	2.4999	2.375						0.0001	0.0017	0.0040	0.0015	0.0013	0.0009			0.0096
<b>Probabilidad Total del Periodo de Oleaje</b>				<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	<b>0.0062</b>	<b>0.1606</b>	<b>0.3501</b>	<b>0.3067</b>	<b>0.0836</b>	<b>0.0593</b>	<b>0.0190</b>	<b>0.0096</b>	<b>0.0044</b>	<b>0.0005</b>	<b>0.0000</b>	<b>TOTAL</b>
																	<b>1.0000</b>

Una vez teniendo analizados los datos oceanográficos con los que se realizara el análisis de fatiga, se procede a generar el archivo de datos (*ftginp*). A continuación se muestra un extracto a manera de ejemplo de este tipo de archivo.



```

ftginp.Plataforma *
1  ANÁLISIS POR FATIGA
2  FTOPT  20.  1.0  2.  SMAXP  SK
3  FTOPT2  PTPVC  PV  AWS  TI2  LPEFT
4  JNTSEL  RM  SM  CA1  CA2  CA3  CA4  CB1  CB2  CB3  CB4
5  JNTOVR  L1A1  API
6  JNTOVR  L2A1  API
7  JNTOVR  L3A1  API
8  JNTOVR  L4A1  API
9  JNTOVR  L1B1  API
10 JNTOVR  L2B1  API
11 JNTOVR  L3B1  API
12 JNTOVR  L4B1  API
13 GRPSEL  RM  020
14 SCFSEL  MSH
15 RELIEF
16 SEAS
17 FTCASE  1  0.3563  1.0  SPC
18 SCATD  D  1.0  1.0  PM
19 SCNAV  0.125  0.375  0.625  0.875  1.125  1.375  1.625  1.875  2.125  2.375
20 SCPER  2.500.00280.0035
21 SCPER  3.500.00020.05330.08970.01650.00060.0002
22 SCPER  4.500.00050.01910.09860.14920.07760.00440.00030.00020.0001
23 SCPER  5.500.00010.00350.02670.06880.0882  0.0840.02940.00540.00060.0001
24 SCPER  6.50  0.00150.00610.00940.01070.01410.01840.01450.00700.0017
25 SCPER  7.50  0.00050.00340.0102  0.0140.00810.00640.00680.00590.0040
26 SCPER  8.50  0.00020.00040.00120.00310.00580.00330.00190.00150.0015
27 SCPER  9.50  0.00020.00020.00050.00110.00230.00250.00140.0013
28 SCPER  10.50 0.00010.00010.00020.00010.00070.00120.00100.0009
29 SCPER  11.50 0.00010.0003  0.0001
    
```

Fig. 7.14. Ejemplo de los comandos ingresados al programa SACS, para generar el archivo (ftginp).

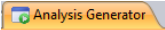
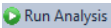
- > Selección del grupo de elementos que no serán revisados por fatiga, en este caso debido a que los pilotes van concéntricamente en las piernas no se revisaran, ya que todos los daños se lo llevan las conexiones del Jacket.
- > Selección del método de cálculo del factor de concentración de esfuerzos.
- > Parámetros generales para el análisis espectral de fatiga por oleaje para el caso 1 que corresponde a la dirección de oleaje de 0°. Es importante hacer notar la consideración que se tomó, para la dirección a 0° (W) se solicita la fracción de vida a la que estará sometida la plataforma en esta incidencia, este dato corresponde a la suma de las frecuencias del oleaje en esta dirección, en este ejemplo es igual a 0.3563; la suma de todas las direcciones será igual a la unidad.  
Posteriormente para esta dirección de oleaje, se ingresará el diagrama de frecuencias, en donde para cada periodo de oleaje y altura de ola significativa se ingresara su frecuencia.
- > Se definen los periodos para cada altura, que inciden sobre la estructura en la dirección correspondiente.

Parámetros generales del análisis por fatiga, en donde se establece: años de vida de diseño, factor de seguridad, periodo de vida en servicio (20 años), opciones del reporte de resultados, curva S-N a la cual está asociado el material a utilizar y definir la teoría con la cual se determinaran los FCE, en este ejemplo se utilizó la teoría de Eftthymiou.

Opciones generales de fatiga, en donde establecemos los resultados que queremos obtener del análisis, dentro de los cuales están el reporte del orden de vida de las conexiones y elementos.

Ya que los elementos de la subestructura son aquellos que reciben casi todo los daños por fatiga, el análisis se limita a aquellas conexiones que estén propensas a daños por fatiga. Los nodos que se coloquen en este punto serán el límite superior de las conexiones que serán analizadas. En este ejemplo se limitó hasta los nodos donde se conectan los pilotes y columnas de la superestructura.

Ya que se cuenta con los 3 archivos de datos: 1) Datos de los estados del mar, con los que se realizó el análisis estático, el cual tienen la extensión (*seainp*); 2) Solución del análisis estático, en donde encontraremos las fuerzas estáticas por cargas ambientales y la respuesta de la plataforma, con extensión (*saccsf*); y 3) Archivo de datos en el cual se establecen las distribuciones de frecuencias de la altura de oleaje y dirección del mismo, este archivo tiene la extensión (*ftginp*); se procede a realizar el análisis de fatiga en SACS de la siguiente manera:

- 1) En la pestaña **Analysis Generator**  que se encuentra en la ventana principal de SACS, accederemos al Menú **Analysis Type**, en donde se seleccionara la opción **Post Processing**. Posteriormente en el desplegado **Subtype** se elegirá la opción **Spectral Fatigue**.
- 2) En el submenú Input Files, se ingresan los 3 archivos explicados previamente, (*seainp*, *saccsf* y *ftginp*).
- 3) Finalmente comenzar en análisis, 

### 7.12 RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR FATIGA

La fatiga es un importante modo de falla a considerar en el dimensionamiento de estructuras. En la estructura tipo Jacket las conexiones son los principales elementos de la estructura que están sometidos a mayores esfuerzos, además de los esfuerzos residuales que tienen debido a la soldadura. Al realizar el análisis por fatiga, podemos localizar los nodos que son más vulnerables a presentar un daño debido a los efectos cíclicos del oleaje.

En este trabajo se realizó el análisis de fatiga para determinar el periodo de vida de las conexiones utilizando un análisis estático para evaluar la respuesta de la estructura ante distintos vectores de carga. En el extracto de resultados del análisis por fatiga que se presenta a continuación, se muestran las conexiones con mayor daño.

Los resultados son en base al tiempo en que tardan en aparecer y propagarse las grietas, hasta el punto en que falla la conexión.

En el caso en estudio se obtuvo que la primera grieta aparecerá y posteriormente fallará en la conexión L4B2 (conexión principal) después de 44.97 años, cabe resaltar que dicho resultado tiene un factor de seguridad de 2, tal como lo recomienda el API RP 2A-WSD.

Con lo que se puede concluir que en el transcurso de esos 45 años se estima crecerá una grieta de una conexión principal, hasta llegar al punto en que el acero disponible no es suficiente para soportar las cargas actuantes y falle la conexión comprometiendo la estabilidad de la estructura.

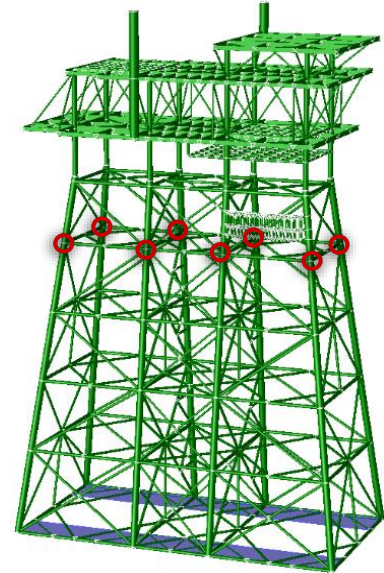


Fig. 7.15. Localización de las conexiones del caso en estudio, con el menor periodo de vida.

Tabla 7.7. Extracto de los resultados del análisis por fatiga.

JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	ORIGINAL	WT	JNT	MEM	CHORD	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS *	FATIGUE RESULTS	
ID	ID	ID	ID	(CM)	(CM)	TYP	TYP	(M)	(CM)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	
													DAMAGE LOC SUC LIFE	
LEG 1 EJE A													Daño Anual	
L1A2	L1A3-L1A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80	3.66	4.89	2.25	3.86	0.99481-2 L 2010.444	
L1A2	L1A2-L1A1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80	3.85	4.72	2.50	4.83	0.2836053 R 70.52055	
LEG 1 EJE B														
L1B2	L1B3-L1B2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80	3.68	4.86	2.25	3.90	0.0124892 R 1601.382	
L1B2	L1B2-L1B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80	3.91	4.70	2.49	4.84	0.3030071 L 66.00506	
LEG 2 EJE A														
L2A2	L2A2-L2A1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68	6.06	6.35	3.37	7.55	0.3149335 R 63.50546	
L2A2	L2A3-L2A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68	6.56	7.29	3.61	8.34	0.0206840 L 966.9330	
LEG 2 EJE B														
L2B2	L2B3-L2B2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68	3.86	5.65	2.52	4.86	0.0510097 L 392.0821	
L2B2	L2B2-L2B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68	5.85	6.32	3.36	7.54	0.3575447 L 55.93705	
LEG 3 EJE A														
L3A1	L3A1-L4A1	018	TUB	81.28	1.905	T	BRC	2.90	2.37	4.39	2.78	5.15	0.0000000 T INFINITE	
L3A2	L3A3-L3A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	10.73	3.61	5.73	2.52	4.70	0.0498858 L 400.9160	
LEG 3 EJE B														
L3B2	L3B2-L3B3	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68	3.88	5.52	2.52	4.92	0.0362540 R 551.6635	
L3B2	L3B2-L3B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68	6.19	6.63	3.38	7.59	0.4034238 R 49.57566	
LEG 4 EJE A														
L4A1	L4A1-L4B1	018	TUB	81.28	1.905	K	BRC	2.91	-19.05	2.59	4.97	3.22	6.57	0.14051-6 L 14234.+4
L4A2	L4A3-L4A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	10.85	3.50	4.83	2.25	3.83	0.0357943 R 558.7484	
LEG 4 EJE B														
L4B2	L4B3-L4B2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80	3.68	4.83	2.25	3.90	0.0249192 L 802.5925	
L4B2	L4B2-L4B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80	3.92	4.79	2.47	4.72	0.4498067 R 44.97586	

## Capítulo 8

### **8. REVISIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE UNA PLATAFORMA TIPO JACKET EN FUNCIÓN DE LOS DAÑOS OCASIONADOS POR FATIGA**

Se propone un criterio para evaluar la capacidad estructural que tendrá una plataforma marina tipo Jacket después de cierto periodo de tiempo en servicio. A partir de la capacidad estructural podemos conocer la reserva de resistencia para evitar el colapso ante la presencia de cargas gravitacionales y ambientales.

La formulación para la revisión de la capacidad estructural se basa en las cargas que actúan sobre la plataforma tanto gravitacionales como laterales (oleaje, viento y corriente), y de la carga que resiste la estructura considerando la degradación del material por los efectos de fatiga a través del tiempo.

Se realizará un análisis por fatiga para conocer el deterioro de la estructura por el crecimiento de grietas ocasionadas por el oleaje, a partir de este análisis podremos conocer el número de ciclos (el número de ciclos posteriormente se transformara en periodo de vida) que la plataforma podrá estar expuesta, hasta que el crecimiento de las grietas llegue a un tamaño tal que el área de acero de los elementos y conexiones más críticos tengan el área mínima necesaria para que la estructura al menos soporte las cargas gravitacionales y ambientales de diseño, lo que conoceremos como el punto de falla, ya que de continuar la plataforma en servicio la grieta aumentara de tamaño, lo que ocasionará que la estructura colapse ante las cargas de diseño.

Una vez conocido el periodo de vida de los elementos y conexiones más críticos que llevan la estructura al colapso, se calcularán los Factores de Reserva de Resistencia (RSR) considerando una degradación lineal del acero a través del tiempo debido a los efectos por fatiga, se consideraran 5 condiciones de la estructura; a) estructura recién instalada, b), c) y d) 10, 20 y 30 años en servicio respectivamente y e) análisis en el punto crítico donde la estructura tiene una capacidad igual a las fuerzas actuantes de diseño en la dirección de incidencia más crítica.

#### **8.1 METODOLOGÍA**

Para obtener el periodo de vida de las conexiones, se procederá a realizar el análisis por fatiga de la estructura, revisando los nodos del Jacket, principalmente aquellos en donde se conectan las piernas y las diagonales principales, este análisis se realizará de la manera como se indicó en el capítulo 7, con lo que buscamos obtener el número de ciclos que soporta la estructura bajo una serie de esfuerzos, los cuales son transformados a tiempo, este tiempo será el periodo de vida de las conexiones. Se identificará aquella conexión principal que tenga el menor periodo de vida y lleve la estructura al colapso. Dicho periodo será nuestro valor de referencia del periodo de vida de toda la estructura, a través del cual se degradara linealmente el material.

Posteriormente, será necesario tener dos condiciones de frontera en cuanto al área de acero para poder hacer la variación lineal; 1) acero suministrado en el diseño, 2) acero mínimo requerido por la plataforma para tener la capacidad suficiente de soportar las cargas, con estos valores se realizará la variación lineal en el tiempo del área de acero en los elementos, considerando la degradación de este por las grietas originadas.

Para conocer el área de acero mínima requerida, se realizará el análisis estático no lineal (*pushover*) en las 8 direcciones de incidencia para conocer cuál de estas es la más crítica, posteriormente se irán deteriorando todos los elementos del Jacket hasta encontrar que en el análisis de la incidencia más crítica la capacidad última de la estructura es igual a las cargas actuantes de diseño, es decir  $RSR = 1$ , cuando se llegue a este punto obtendremos el área mínima de acero que se requiere en los elementos del Jacket.

Es importante destacar que una de las consideraciones realizadas para este análisis es: la degradación del material en los elementos y conexiones que tendrá el Jacket en su totalidad será en la misma proporción a la degradación del acero de la conexión más crítica, por lo cual el periodo de vida de la estructura será la de dicha conexión.

La estructura se analizará para las siguientes condiciones:

- i. Estructura en condiciones de diseño,
- ii. Con 10 años en servicio,
- iii. Con 20 años en servicio,
- iv. Con 30 años en servicio, y
- v. En el punto crítico en donde la capacidad estructural es igual a las cargas de diseño actuantes.

Para obtener la capacidad última se procede a realizar los análisis no lineales (*pushover*) con ayuda del programa SACS, para que posteriormente se obtengan los Factores de Reserva de Resistencia (RSR) de la estructura en las 8 direcciones de incidencia, para cada una de las 5 condiciones de las estructura.

## 8.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS POR FATIGA

La evaluación del análisis por fatiga que se realiza actualmente, haciendo énfasis en los aspectos aleatorios que están involucrados y de algunos modelos utilizados para representar tanto las condiciones metaoceánicas y las cargas que la originan, así como las respuestas estructurales se desarrolla en el capítulo 7.

Este estudio permite establecer que se deben seleccionar modelos específicos para cada sitio y proponer procedimientos y recomendaciones para el tratamiento de la fatiga de este tipo de estructuras.

Una estructura sometida a condiciones de carga, esfuerzos y deformaciones durante su vida útil, originadas por sus características de operación y exposición a eventos naturales (viento, corriente y oleaje), generalmente sufre, a medida que pasa el tiempo un deterioro gradual en sus propiedades mecánicas, esto da lugar a que se debilite la capacidad estructural, como consecuencia el valor del Factor de Reserva de Resistencia cambia (generalmente disminuye), a medida que pasa el tiempo.

Los resultados de Brown and Root reportan que en el segundo nivel de arriostamiento horizontal inferior al NMM, es la zona que reporta mayor número de juntas dañadas por fatiga; mientras que los resultados de CPI and Mc Dermott reportan como zona de mayor incidencia, el último nivel de arriostamiento horizontal; estos resultados se revalidaron en este trabajo, ya que las conexiones que resultaron con mayores daños fueron en los arriostamientos del segundo nivel del Jacket.

Siguiendo la metodología del análisis de fatiga a partir de estadísticas, frecuencia de ocurrencia de los estados de mar y su duración, se evalúa usando la regla de Miner y la curva S-N apropiada, la contribución anual de daños por fatiga para cada estado de mar.

El daño total por fatiga en un punto de esfuerzo, es la acumulación de todos los daños debido a los estados de mar en todas las direcciones y sus frecuencias de ocurrencia.

Al ordenar los resultados de los daos en las juntas de acuerdo al marco o elevaci3n a la que pertenecen, es posible apreciar que las juntas con mayor dao y en consecuencia con menor vida de servicio est3n ubicados en el segundo nivel de arriostramiento. En la Tabla 8.1 se muestran los resultados de las conexiones cr3ticas, resultados que son obtenidos del an3lisis espectral por fatiga en el programa SACS, dentro de estos resultados tenemos: las caracter3sticas geom3tricas del elemento, los factores de concentraci3n de esfuerzos, el dao por fatiga que tendr3 la conexi3n en el periodo de vida que se halla estipulado en los par3metros iniciales de diseo (20 aos), localizaci3n dentro de la conexi3n donde se espera la falla (como se muestra en la Fig. 7.6) y finalmente con estos resultados se obtiene el periodo estimado de vida de las conexiones.

**Tabla 8.1. Extracto de los resultados del an3lisis espectral por fatiga.**

JOINT	MEMBER	GRUP	TYPE	ORIGINAL	WT	JNT	MEM	CHORD	GAP	* STRESS	CONC.	FACTORS *	FATIGUE	RESULTS			
		ID	ID	OD	(CM)	TYP	TYP	LEN.	(CM)	AX-CR	AX-SD	IN-PL	OU-PL	DAMAGE	LOC	SVC	LIFE
								LEG 1 EJE A									
L1A2	L1A3-L1A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80		3.66	4.89	2.25	3.86	0.99481-2	L	2010.444	
L1A2	L1A2-L1A1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80		3.85	4.72	2.50	4.83	0.2836053	R	70.52055	
								LEG 1 EJE B									
L1B2	L1B3-L1B2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80		3.68	4.86	2.25	3.90	0.0124892	R	1601.382	
L1B2	L1B2-L1B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80		3.91	4.70	2.49	4.84	0.3030071	L	66.00506	
								LEG 2 EJE A									
L2A2	L2A2-L2A1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68		6.06	6.35	3.37	7.55	0.3149335	R	63.50546	
L2A2	L2A3-L2A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68		6.56	7.29	3.61	8.34	0.0206840	L	966.9330	
								LEG 2 EJE B									
L2B2	L2B3-L2B2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68		3.86	5.65	2.52	4.86	0.0510097	L	392.0821	
L2B2	L2B2-L2B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68		5.85	6.32	3.36	7.54	0.3575447	L	55.93705	
								LEG 3 EJE A									
L3A1	L3A1-L4A1	018	TUB	81.28	1.905	T	BRC	2.90		2.37	4.39	2.78	5.15	0.0000000	T	INFINITE	
L3A2	L3A3-L3A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	10.73		3.61	5.73	2.52	4.70	0.0498858	L	400.9160	
								LEG 3 EJE B									
L3B2	L3B2-L3B3	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68		3.88	5.52	2.52	4.92	0.0362540	R	551.6635	
L3B2	L3B2-L3B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.68		6.19	6.63	3.38	7.59	0.4034238	R	49.57566	
								LEG 4 EJE A									
L4A1	L4A1-L4B1	018	TUB	81.28	1.905	K	BRC	2.91	-19.05	2.59	4.97	3.22	6.57	0.14051-6	L	14234.+4	
L4A2	L4A3-L4A2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	10.85		3.50	4.83	2.25	3.83	0.0357943	R	558.7484	
								LEG 4 EJE B									
L4B2	L4B3-L4B2	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80		3.68	4.83	2.25	3.90	0.0249192	L	802.5925	
L4B2	L4B2-L4B1	001	TUB	160.02	3.810	TK	CHD	15.80		3.92	4.79	2.47	4.72	0.4498067	R	44.97586	

Resaltando en color amarillo las conexiones del Jacket que cuentan con el menor periodo de vida; la conexi3n con la vida m3s cr3tica resulto ser de 45 aos, esta edad es de acuerdo a los par3metros y factores de seguridad indicados en el cap3tulo 7 "An3lisis Espectral por Fatiga".



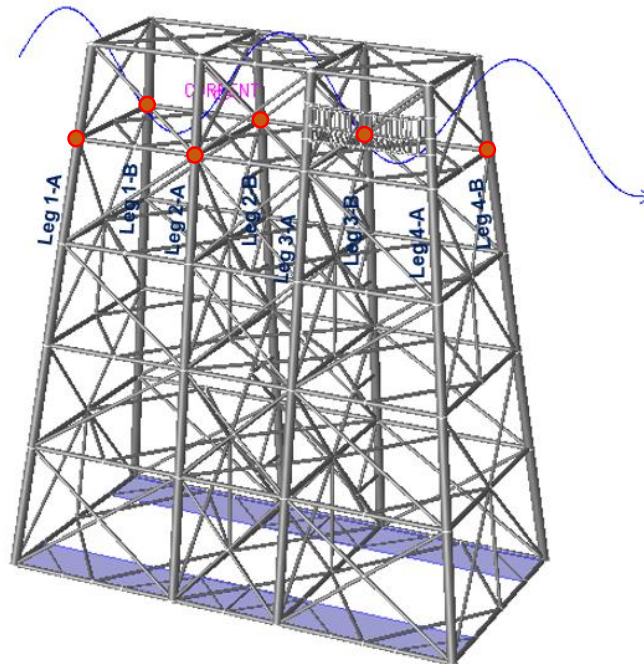


Fig. 8.1. Ejemplo de la localización de las conexiones más críticas en el Jacket.

### 8.3 FACTORES DE RESERVA DE RESISTENCIA (RSR)

Como se mencionó previamente el colapso de la plataforma ocurre cuando las fuerzas gravitacionales y ambientales (laterales) son mayores que la capacidad de la estructura.

El RSR se calculará para cada una de las 8 direcciones de incidencia; por la geometría y cargas que actúan en la plataforma, está tendrá diferente capacidad para cada dirección en la que inciden las fuerzas. Para obtener este factor será necesario primero conocer la capacidad estructural (R) y las cargas de diseño (S).

Las fuerzas de diseño (S) debido a las cargas ambientales y gravitacionales serán obtenidas del análisis estático para la condición de tormenta, por ser éstas las más críticas. La aplicación de todas las fuerzas se transformaran a un cortante a nivel del lecho marino, por lo cual nuestro valor de referencia será el cortante basal.

En cuanto a la capacidad estructural (R), se obtendrá a partir de un análisis elástico no lineal (*pushover*), el cual se basa en incrementar las cargas laterales de diseño gradualmente hasta obtener el factor de carga que ocasiona que la estructura colapse.

El RSR será un indicador de la capacidad estructural con la que la plataforma cuenta, ya que es resultado de (R/S).

#### 8.3.1 RSR's DE LA PLATAFORMA EN CONDICIONES DE DISEÑO

Para conocer los RSR's de la plataforma en el momento en que es instalada en sitio, se procede a realizar el análisis estático no lineal con la geometría con la que fue diseñada; en la Tabla 8.2 se presentan las dimensiones de los elementos principales del Jacket que influyen en el colapso de la estructura.



**Tabla 8.2. Geometría de los elementos principales del Jacket de la plataforma, en condiciones de diseño (plataforma recién instalada).**

Grupo en SACS	Elemento en el Jacket	Geometría de Diseño		
		Diámetro (in)	Espesor (in)	Material (kg/cm <sup>2</sup> )
O01	Elementos de las 8 piernas.	63.00	1.50	3,500
O02	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos de los extremos.	22.00	0.80	3,500
O03	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos intermedios.	26.00	0.87	3,500
O05	Diagonales del eje longitudinal (X).	25.00	1.00	3,500

En la Tabla 8.3 se presentan los resultados de los análisis estáticos no lineales, mostrando en ella: la dirección de incidencia de las cargas laterales, el cortante basal resistente de la estructura, el cortante basal actuante en la plataforma debido a las cargas de diseño y finalmente los RSR que se tiene en cada una de las direcciones.

**Tabla 8.3. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket, con la geometría de diseño.**

Incidencia de Carga		CORTANTE RESISTENTE				CORTANTE DE REFERENCIA			Factor de Sobreresistencia (RSR)
		Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante Est. Original (ton)	Estructura Modificada (ton)	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante (ton)	
+X	0°	5870.51	433.31	5,886.48	<b>5,886.48</b>	1,726.62	127.44	1,731.32	<b>3.40</b>
+X+Y	45°	4853.20	4960.22	6,939.55	<b>6,939.55</b>	1,516.63	1,550.07	2,168.61	<b>3.20</b>
+Y	90°	584.32	7072.26	7,096.35	<b>7,096.35</b>	171.86	2,080.08	2,087.17	<b>3.40</b>
-X+Y	135°	-4998.02	5041.70	7,099.23	<b>7,099.23</b>	-1,190.01	1,200.40	1,690.29	<b>4.20</b>
-X	180°	-6185.98	-466.01	6,203.50	<b>6,203.50</b>	-1,718.33	-129.45	1,723.20	<b>3.60</b>
-X-Y	225°	-5053.54	-5194.65	7,247.25	<b>7,247.25</b>	-1,486.34	-1,527.84	2,131.54	<b>3.40</b>
-Y	270°	-515.48	-6270.30	6,291.45	<b>6,291.45</b>	-171.83	-2,090.10	2,097.15	<b>3.00</b>
+X-Y	315°	4540.50	-4594.99	6,459.88	<b>6,459.88</b>	1,194.87	-1,209.21	1,699.97	<b>3.80</b>

De acuerdo a estos resultados la dirección con la incidencia más crítica es a 270°, sin embargo el RSR cumple con el mínimo (1.90) recomendado por la norma NRF-003-PEMEX-2007 PEMEX.

### 8.3.2 RSR's EN EL PUNTO CRÍTICO DE LA PLATAFORMA (RSR = 1)

Para encontrar el espesor mínimo de acero requerido en los elementos principales del Jacket (piernas y diagonales), se realizaron varios análisis (*pushover*), disminuyendo el espesor de los elementos del Jacket en forma gradual hasta encontrar que el RSR sea igual a 1, es decir que las cargas actuantes sean iguales a las cargas resistentes, esto para la dirección de análisis más crítico.

Finalmente después de reducir en un 54% los espesores de las piernas y 45% las diagonales principales del Jacket, se obtuvieron los siguientes factores de reserva de resistencia en la estructura.

$$RSR_{critico} = \frac{Capacidad\ Estructural}{Fuerzas\ Actuantes\ de\ Diseño} = 1 \quad \dots \text{ecuación 8.1.}$$

**Tabla 8.4. Geometría de los elementos principales del Jacket de la plataforma, en la condición más crítica.**

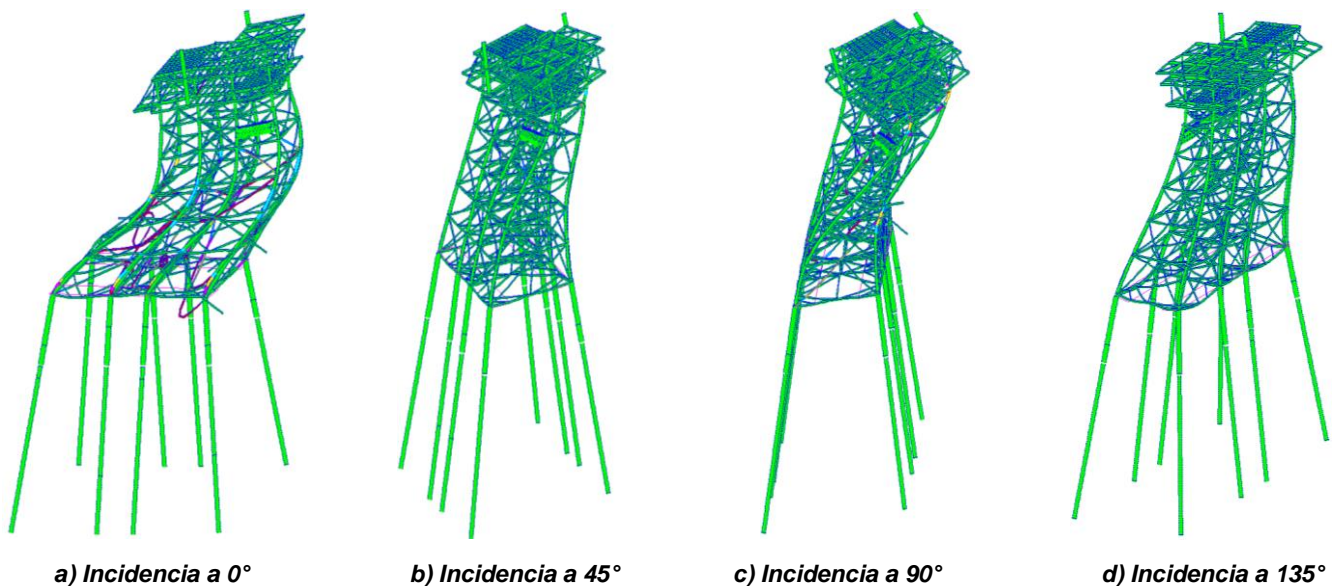
Grupo en SACS	Elemento en el Jacket	Geometría con 45 años		
		Diámetro (in)	Espesor (in)	Material (Fy) (kg/cm <sup>2</sup> )
O01	Elementos de las 8 piernas.	63	0.69	3,500
O02	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos de los extremos.	22	0.44	3,500
O03	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos intermedios.	26	0.48	3,500
O05	diagonales del eje longitudinal (X).	25	0.55	3,500

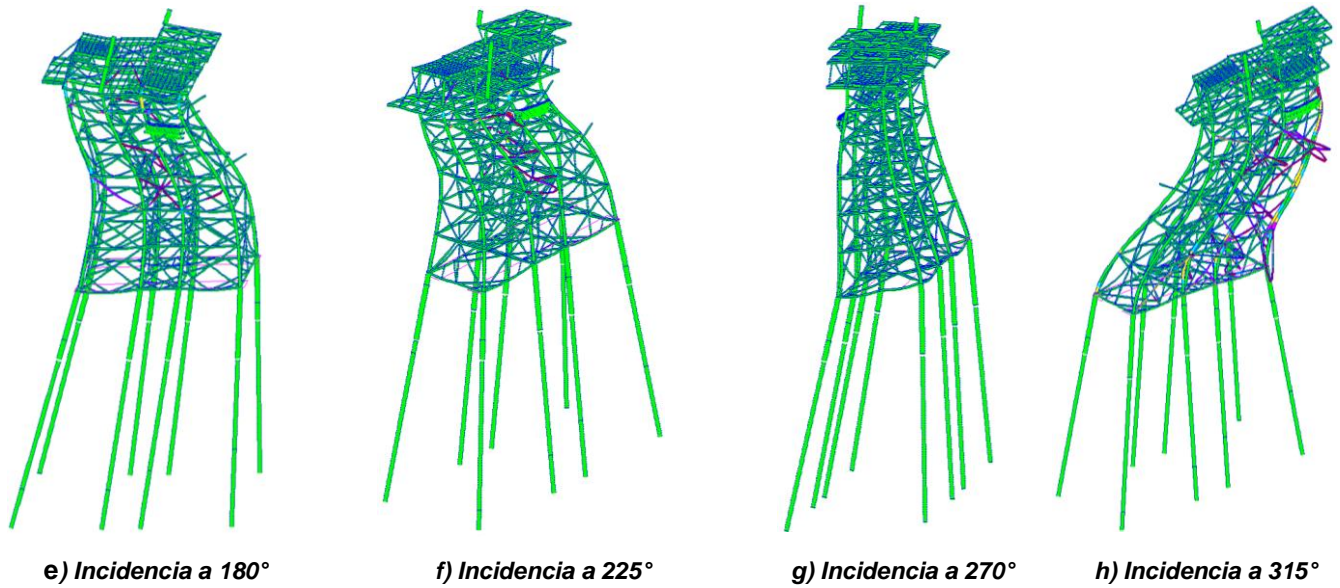
**Tabla 8.5. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket, reduciendo al espesor crítico los elementos del Jacket.**

Incidencia de Carga		CORTANTE RESISTENTE				CORTANTE DE REFERENCIA			Factor de Sobrerresistencia (RSR)
		Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante Est. Original (ton)	Estructura Modificada (ton)	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante (ton)	
+X	0°	2246.05	165.68	5,193.95	<b>2,252.16</b>	1,726.62	127.44	1,731.32	<b>1.30</b>
+X+Y	45°	1593.38	1628.48	6,939.55	<b>2,278.33</b>	1,516.63	1,550.07	2,168.61	<b>1.05</b>
+Y	90°	171.86	2081.40	5,844.06	<b>2,088.48</b>	171.86	2,080.08	2,087.17	<b>1.00</b>
-X+Y	135°	-1607.68	1621.70	7,099.23	<b>2,283.54</b>	-1,190.01	1,200.40	1,690.29	<b>1.35</b>
-X	180°	-1977.36	-148.86	5,858.87	<b>1,982.95</b>	-1,718.33	-129.45	1,723.20	<b>1.15</b>
-X-Y	225°	-1859.01	-1910.87	6,820.94	<b>2,665.95</b>	-1,486.34	-1,527.84	2,131.54	<b>1.25</b>
-Y	270°	-214.78	-2614.27	5,872.02	<b>2,623.08</b>	-171.83	-2,090.10	2,097.15	<b>1.25</b>
+X-Y	315°	2271.90	-2299.12	6,459.88	<b>3,232.26</b>	1,194.87	-1,209.21	1,699.97	<b>1.90</b>



En las Figs. 8.2a – 8.2h, se muestra la condición de falla del modelo para cada incidencia de las fuerzas laterales, los elementos en color morado son aquellos que se plastifican y posteriormente fallan.





Nota: Las figuras tienen un factor de deformación de 20, para visualizar de mejor manera el modo de falla.

**Fig. 8.2 a – h. Modo de falla de la plataforma para diferentes incidencias de cargas ambientales.**

### **8.3.3 DEGRADACIÓN LINEAL DEL ACERO POR LOS DAÑOS OCASIONADOS POR EL EFECTO DE FATIGA**

Partiendo de las condiciones de frontera necesarias para estimar la degradación del acero a través del tiempo, de los elementos principales del Jacket que son: configuración geométrica de diseño y la configuración geométrica requerida en el Jacket para poder tener al menos que la capacidad estructural última es igual a las fuerzas actuantes por las cargas de diseño, así mismo haciendo referencia al periodo de vida de la conexión más crítica que se comprometa la estabilidad de la estructura, se realizó una variación lineal con respecto al tiempo de los elementos del Jacket, con lo que se podrá estimar el espesor efectivo para cada uno de estos elementos a determinado tiempo en servicio de la plataforma.

En la Fig. 8.3 se muestra la degradación del espesor de las piernas del Jacket en función del tiempo y de los daños ocasionados por la fatiga.

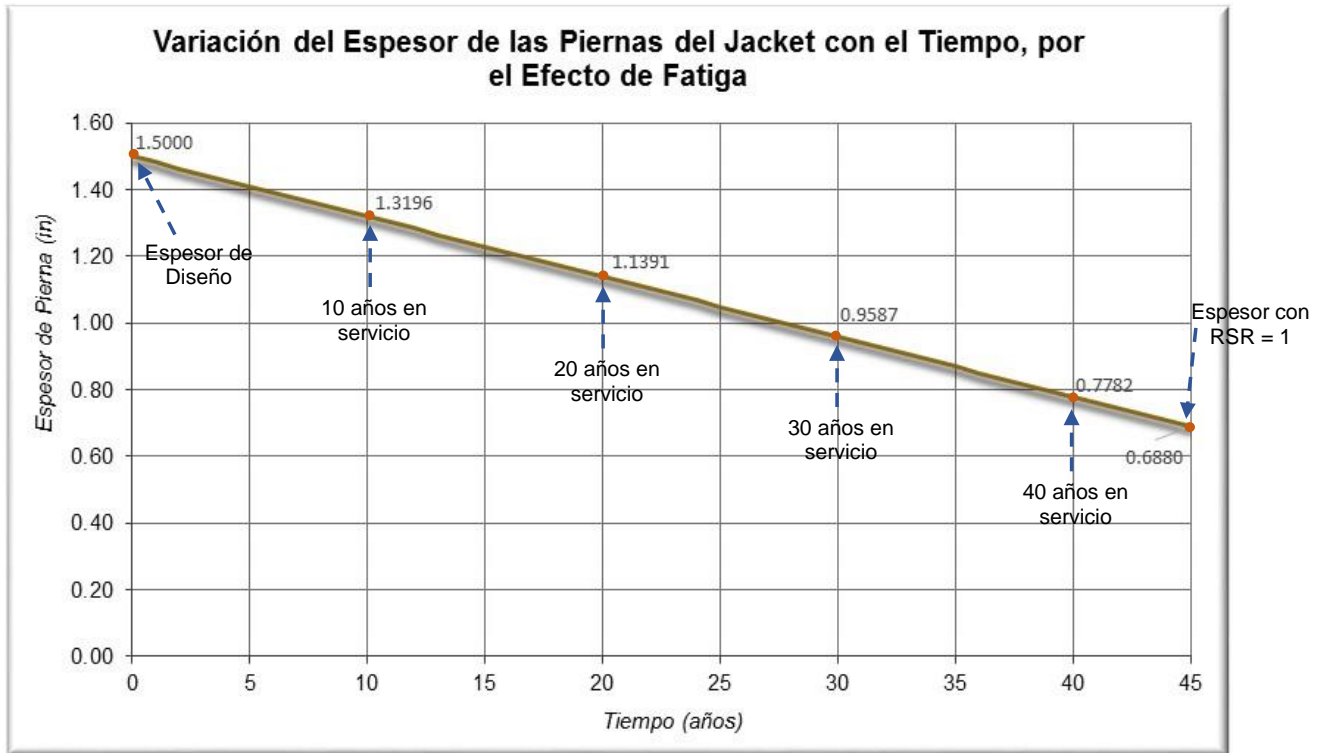


Fig. 8.3. Variación del espesor de las piernas del Jacket en función del periodo de vida y el daño por fatiga.

### 8.3.4 RSR's DE LA PLATAFORMA CON 10 AÑOS EN SERVICIO

Dado que el efecto de la fatiga es la pérdida de área de la sección debido a grietas, se procederá a revisar la capacidad de la estructura a través del tiempo y tomando en cuenta el debilitamiento de los elementos principales del Jacket debido a los efectos de fatiga.

La geometría para la estructura (Jacket), después de un periodo de vida de 10 años en servicio será la mostrada en la Tabla 8.6 Así mismo los valores del RSR para esta condición se muestran en la Tabla 8.7.

Tabla 8.6. Geometría de los elementos principales del Jacket, después de degradarse el material durante 10 años por los efectos de fatiga.

Grupo en SACS	Elemento en el Jacket	Geometría con 10 años		
		Diámetro (in)	Espesor (in)	Material (Fy) (kg/cm <sup>2</sup> )
O01	Elementos de las 8 piernas.	63	1.32	3,500
O02	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos de los extremos.	22	0.72	3,500
O03	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos intermedios.	26	0.79	3,500
O05	diagonales del eje longitudinal (X).	25	0.90	3,500

**Tabla 8.7. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket con 10 años de vida considerando los efectos de fatiga.**

Incidencia de Carga		CORTANTE RESISTENTE				CORTANTE DE REFERENCIA			Factor de Sobreresistencia (RSR)
		Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante Est. Original (ton)	Estructura Modificada (ton)	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante (ton)	
+X	0°	4834.54	356.84	5,193.95	<b>4,847.69</b>	1,726.62	127.44	1,731.32	<b>3.00</b>
+X+Y	45°	4549.88	4650.21	6,939.55	<b>6,505.83</b>	1,516.63	1,550.07	2,168.61	<b>3.00</b>
+Y	90°	446.83	5408.20	5,844.06	<b>5,426.62</b>	171.86	2,080.08	2,087.17	<b>2.80</b>
-X+Y	135°	-4760.02	4801.62	7,099.23	<b>6,761.17</b>	-1,190.01	1,200.40	1,690.29	<b>4.00</b>
-X	180°	-5498.65	-414.23	5,858.87	<b>5,514.23</b>	-1,718.33	-129.45	1,723.20	<b>3.40</b>
-X-Y	225°	-4459.01	-4583.52	6,820.94	<b>6,394.63</b>	-1,486.34	-1,527.84	2,131.54	<b>3.20</b>
-Y	270°	-446.75	-5434.26	5,872.02	<b>5,452.59</b>	-171.83	-2,090.10	2,097.15	<b>3.00</b>
+X-Y	315°	4301.53	-4353.15	6,459.88	<b>6,119.89</b>	1,194.87	-1,209.21	1,699.97	<b>3.80</b>

### 8.3.5 RSR's DE LA PLATAFORMA CON 20 AÑOS EN SERVICIO

La geometría para la estructura (Jacket), después de un periodo de 20 años en servicio será la mostrada en la Tabla 8.8 Así mismos los valores del RSR para esta condición se muestran en la Tabla 8.9.

**Tabla 8.8. Geometría de los elementos principales del Jacket, después de degradarse el material durante 20 años por los efectos de fatiga.**

Grupo en SACS	Elemento en el Jacket	Geometría con 20 años		
		Diámetro (in)	Espesor (in)	Material (Fy) (kg/cm <sup>2</sup> )
O01	Elementos de las 8 piernas.	63	1.14	3,500
O02	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos de los extremos.	22	0.64	3,500
O03	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos intermedios.	26	0.70	3,500
O05	diagonales del eje longitudinal (X).	25	0.80	3,500

**Tabla 8.9. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket con 20 años de vida considerando los efectos de fatiga.**

Incidencia de Carga		CORTANTE RESISTENTE				CORTANTE DE REFERENCIA			Factor de Sobreresistencia (RSR)
		Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante Est. Original (ton)	Estructura Modificada (ton)	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante (ton)	
+X	0°	4489.21	331.35	5,193.95	<b>4,501.43</b>	1,726.62	127.44	1,731.32	<b>2.60</b>
+X+Y	45°	4246.55	4340.20	6,939.55	<b>6,072.11</b>	1,516.63	1,550.07	2,168.61	<b>2.80</b>
+Y	90°	412.46	4992.18	5,844.06	<b>5,009.19</b>	171.86	2,080.08	2,087.17	<b>2.40</b>
-X+Y	135°	-3808.02	3841.30	7,099.23	<b>5,408.94</b>	-1,190.01	1,200.40	1,690.29	<b>3.20</b>
-X	180°	-5154.98	-388.34	5,858.87	<b>5,169.59</b>	-1,718.33	-129.45	1,723.20	<b>3.00</b>
-X-Y	225°	-4161.74	-4277.94	6,820.94	<b>5,968.32</b>	-1,486.34	-1,527.84	2,131.54	<b>2.80</b>
-Y	270°	-446.75	-5434.26	5,872.02	<b>5,452.59</b>	-171.83	-2,090.10	2,097.15	<b>2.60</b>
+X-Y	315°	4062.55	-4111.31	6,459.88	<b>5,779.90</b>	1,194.87	-1,209.21	1,699.97	<b>3.40</b>

### 8.3.6 RSR's DE LA PLATAFORMA CON 30 AÑOS EN SERVICIO

La geometría para la estructura (Jacket), después de un periodo de 30 años en servicio será la mostrada en la Tabla 8.10 Así mismos los valores del RSR para esta condición se muestran en la Tabla 8.11.

**Tabla 8.10. Geometría de los elementos principales del Jacket, después de degradarse el material durante 30 años por los efectos de fatiga.**

Grupo en SACS	Elemento en el Jacket	Geometría con 30 años		
		Diámetro (in)	Espesor (in)	Material (Fy) (kg/cm <sup>2</sup> )
O01	Elementos de las 8 piernas.	63	0.96	3,500
O02	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos de los extremos.	22	0.56	3,500
O03	Diagonales del eje transversal (Y), en los marcos intermedios.	26	0.61	3,500
O05	diagonales del eje longitudinal (X).	25	0.70	3,500

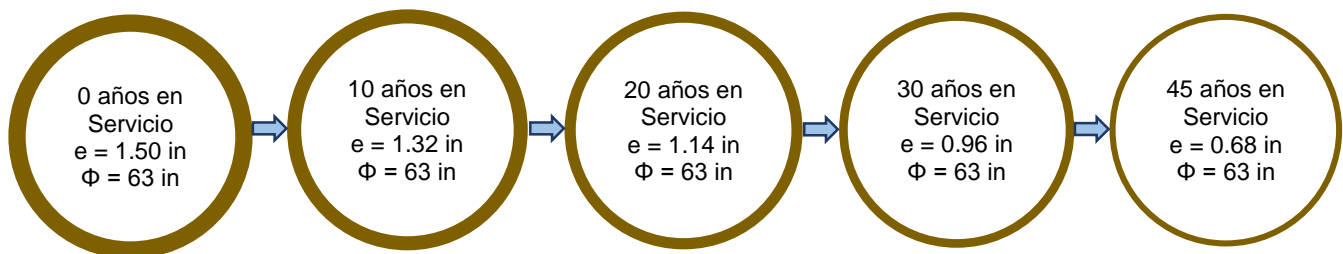
**Tabla 8.11. Resultados del análisis pushover para una plataforma tipo Jacket con 30 años de vida considerando los efectos de fatiga.**

Incidencia de Carga	CORTANTE RESISTENTE				CORTANTE DE REFERENCIA			Factor de Sobre-resistencia (RSR)
	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante Est. Original (ton)	Estructura Modificada (ton)	Fx (ton)	Fy (ton)	Resultante (ton)	
+X 0°	3798.57	280.38	5,193.95	<b>3,808.90</b>	1,726.62	127.44	1,731.32	<b>2.20</b>
+X+Y 45°	3639.90	3720.17	6,939.55	<b>5,204.66</b>	1,516.63	1,550.07	2,168.61	<b>2.40</b>
+Y 90°	309.34	3744.14	5,844.06	<b>3,756.89</b>	171.86	2,080.08	2,087.17	<b>1.80</b>
-X+Y 135°	-3094.02	3121.05	7,099.23	<b>4,394.76</b>	-1,190.01	1,200.40	1,690.29	<b>2.60</b>
-X 180°	-3780.32	-284.78	5,858.87	<b>3,791.03</b>	-1,718.33	-129.45	1,723.20	<b>2.20</b>
-X-Y 225°	-3567.21	-3666.81	6,820.94	<b>5,115.71</b>	-1,486.34	-1,527.84	2,131.54	<b>2.40</b>
-Y 270°	-378.02	-4598.22	5,872.02	<b>4,613.73</b>	-171.83	-2,090.10	2,097.15	<b>2.20</b>
+X-Y 315°	3106.66	-3143.94	6,459.88	<b>4,419.92</b>	1,194.87	-1,209.21	1,699.97	<b>2.60</b>

Es importante hacer notar que después de 30 años la plataforma ya no cumple con el RSR mínimo solicitado por la norma NRF-003-PEMEX-2007.

### 8.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS

Ilustrativamente en la Fig. 8.4 se muestra cómo va disminuyendo el espesor de los elementos a través del tiempo, por causa de los efectos de fatiga.



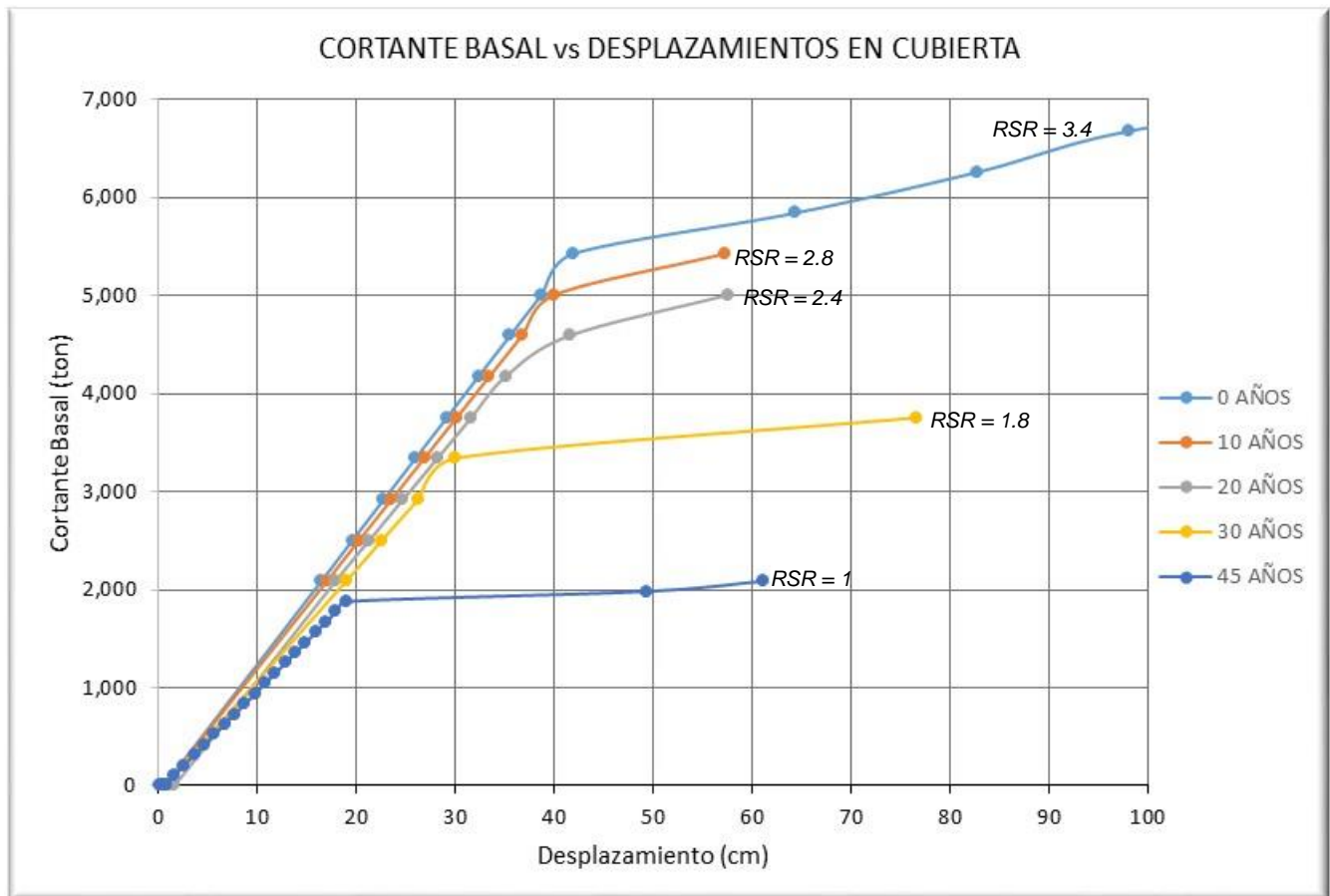
**Fig. 8.4. Variación del espesor de las piernas del Jacket a través del tiempo, debido a las grietas ocasionadas por la fatiga.**



En la Fig. 8.5 se muestran las curvas pushover en la incidencia a 90°, que relacionan la capacidad del cortante basal con los desplazamientos en la cubierta, en todos los casos se tiene un intervalo elástico, después se plastifica el material hasta llegar al punto de falla. Es evidente que los daños que causa la fatiga en la plataforma son significativos.

Para generar las siguientes curvas se realizaron las siguientes consideraciones:

- La degradación del material es lineal a través del tiempo.
- La demanda estructural es constante en el tiempo.



Dato: cortante basal de diseño por cargas ambientales en la incidencia a 90° = 2,087.17 ton

**Fig. 8.5. Ejemplo de la capacidad estructural de la plataforma tipo Jacket a través del tiempo, considerando el daño ocasionado por fatiga, incidencia a 90°.**

### 8.5 COMENTARIOS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Las estructuras marinas están sometidas a cargas aleatorias durante su vida útil, producto de las condiciones climatológicas y oceanográficas propias de su ambiente. Cada elemento y junta estructural sufren cambios en sus esfuerzos internos, debido a la acción de dichas cargas, provocando que el material se fatigue. El problema de la fatiga se manifiesta, en forma muy localizada, en puntos donde existen incrementos considerables del esfuerzo actuante (conocidos como puntos críticos), generándose en el material fisuras imperceptibles a la vista, para ir creciendo e incluso alcanzar el espesor total del material, pudiendo comprometer la estabilidad de la estructura.

El criterio que se presenta tiene la ventaja que puede adaptarse a diferentes tipos de fenómenos naturales como sismo, viento, oleaje y corriente marina. Los resultados del ejemplo ilustrativo (plataforma marina con crecimiento de grietas causadas por fatiga) hacen ver que para evaluar el Factor de Reserva de Resistencia que las normas mexicanas de PEMEX solicitan sea revisado y cumplan con cierto parámetro, se debe realizar considerando tanto la degradación de la capacidad estructural como la influencia en la demanda estructural, obteniendo que es más crítico el considerar el deterioro de la capacidad estructural.

En las plataformas tipo Jacket se encontró un patrón de falla en las conexiones principalmente, donde las conexiones más propensas a la falla y a obtener un periodo de vida menor son aquellos nodos donde se conectan piernas y diagonales del Jacket, así mismo los nodos del primer y segundo nivel de arriostramiento. Mientras que los elementos de la superestructura no presentan ningún daño debido a la fatiga, sin embargo sería recomendable revisar el daño por fatiga en los elementos y conexiones de la superestructura debido a la vibración de los equipos de gran tamaño.

El conocimiento preciso de la respuesta por fatiga conduciría a optimizar los recursos de inspección, sin embargo por los factores antes mencionados así como las incertidumbres de las inspecciones se recomienda usar un criterio conservador tanto para el diseño como para las inspecciones de las plataformas marinas.

Se recomienda la calibración y determinación de los principales parámetros que están involucrados en los análisis probabilísticos de fatiga (espectros de oleaje, curvas S-N, factores de concentración de esfuerzo, etc.) para que puedan ser utilizados en un futuro análisis de plataformas marinas localizadas en la Sonda de Campeche y reducir de esta manera las incertidumbres existentes en los análisis.

## Capítulo 9

### 9. CONCLUSIONES

- I. Este trabajo se realizó en base a planos de una plataforma existente, sin embargo cuando se encomienda al ingeniero realizar el diseño de una plataforma se comienza por revisar las bases de diseño definitivas en donde se establecen: dimensiones, función de la estructura, equipos a instalar, personal, etc. que son requeridos para el correcto funcionamiento de la estructura, posteriormente se cuantificaran las cargas gravitacionales y ambientales para comenzar a proponer dimensiones en los elementos estructurales hasta llegar a un diseño óptimo, todo esto en función de los parámetros del suelo y de las características hidráulicas del sitio.
- II. Para el diseño global de una plataforma marina tipo Jacket, considerando cada una de las etapas en las que se encontrará la estructura durante su periodo de vida se deben realizar diversos análisis, los que se revisan en la presente tesis son referidos a la plataforma puesta en sitio, analizando las etapas de operación, tormenta y fatiga, sin embargo para tener un análisis completo de la estructura es necesario complementar el presente trabajo haciendo los análisis de transporte, izaje, embarque, flotabilidad y abandono seguro de la subestructura.
- III. Para simplificar los análisis estructurales se consideró utilizar el método estático; si consideramos utilizar el método dinámico podríamos esperar que los esfuerzos sean poco menores al análisis estático, ya que en este tipo de estructuras de aguas someras en donde su altura es menor que 120 m no se presenta una amplificación dinámica importante, por esto mismo, en el API RP 2A-WSD se establece que para tirantes de agua en donde se encuentran instaladas la mayoría de las plataformas tipo Jacket, las cargas de oleaje pueden ser representadas adecuadamente mediante cargas estáticas equivalentes.
- IV. Del análisis por fatiga podemos decir que las plataformas marinas se encuentran sometidas a la acción cotidiana del viento, corriente y oleaje los cuales generan un número muy grande de ciclos de esfuerzos de carga y descarga que se traducen en daños estructurales por fatiga. La concentración de estos esfuerzos en las diferentes juntas depende de su geometría, de cómo sea aplicada la carga, del tipo de apoyo, así como de la relación  $D/t$  y el ángulo de los elementos en que inciden los perfiles tubulares en la junta.

El valor de los daños por fatiga está en función de la curva S-N a la cual se le asocie, por lo cual es importante considerar que hay curvas S-N que han sido desarrolladas basándose en modelos ensayados al aire libre, considerándose que se le proporcionará a la plataforma suficiente protección catódica, en algunos casos esta protección puede no cumplir completamente con su trabajo o no existir, con lo cual la conexión se verá afectada modificando su correspondiente curva S-N (debido a la pérdida de material por la corrosión), consideración que deberá de tomarse en cuenta al momento de analizar los resultados.

El análisis de fatiga de una plataforma tipo Jacket, por lo general es realizado en 8 direcciones de incidencia debido a las cargas cíclicas que genera el oleaje, sin embargo los resultados obtenidos nos dicen que mientras mayor sea la información del oleaje modelado, mayor será la certidumbre de los resultados obtenidos, por lo cual se recomienda utilizar la información completa del anexo C de la norma NRF-003-PEMEX-2007, el cual proporciona información del oleaje para 16 direcciones de incidencia.

Otro aspecto importante de hacer notar es que las vibraciones debido al equipo instalado no son consideradas en el análisis de fatiga, sin embargo tendrán un efecto en los intervalos de esfuerzos producidos en las juntas de la superestructura, en ocasiones esta omisión se realiza debido a que el equipo es colocado en fechas posteriores a la instalación de la plataforma, como resultado de modificaciones o remodelaciones a la misma durante su vida en servicio, para lo cual es recomendable analizar la estructura en general haciendo las consideraciones de las nuevas cargas con su modo de vibrar, o analizando localmente el efecto de la fatiga.

Finalmente del análisis por fatiga podemos concluir que de acuerdo con los resultados obtenidos, dicho análisis es una estimación del periodo de vida que pueden tener las conexiones, principalmente del Jacket, lo cual en su momento nos permitirá establecer periodos de inspección de la estructura.

- V. A la fecha no se cuenta con una norma que nos defina como considerar los daños estructurales por el efecto de la fatiga en el tiempo, sin embargo hay recomendaciones prácticas realizadas por Det Norske Veritas (DNV) en su publicación DNV-RP-C203 "Fatigue Design of Offshore Steel Structures" para considerar el efecto de la fatiga en el tiempo, ya que la capacidad estructural última de las plataformas fijas se ve deteriorada muy considerablemente debido a estos daños que se producen a lo largo de la vida en servicio, ocasionados principalmente por el oleaje. Por lo cual surgió la idea de realizar una propuesta práctica para evaluar la capacidad estructural a través del tiempo considerando los daños por fatiga.

Esta propuesta de análisis se basa en tres consideraciones conservadoras, por lo cual este planteamiento se considera adecuado para ser utilizado como un indicador al obtener la capacidad estructural considerando los daños originados por la fatiga de una plataforma que ha estado en servicio. La misión de esta propuesta es tener un parámetro que considere los efectos de la fatiga sobre la estructura, y tener herramientas que ayuden a programar las inspecciones de la plataforma; actualmente en la Sonda de Campeche hay más de 250 plataformas, las cuales requieren inspecciones, por lo cual se deben optimizar los recursos para dichas inspecciones estructurales.

En caso de considerar la instalación de equipos estando la plataforma en servicio, será necesario calcular los RSR's de la estructura considerando los daños ocasionados por la fatiga, estos valores nos dan un criterio de la capacidad estructural con las masas adicionales, del mismo modo estos RSR's son la base para evaluar la confiabilidad estructural. El índice de confiabilidad estructural, deberá cumplir con el mínimo requerido por la norma NRF-003-PEMEX-2007; una vez hecha esta revisión podremos determinar si la plataforma está en condiciones de recibir el nuevo equipo comportándose adecuadamente, o en caso contrario requerirá una reestructuración.

## REFERENCIAS

- Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C., IMCA (2012). *Manual de Construcción en Acero – Diseño por Esfuerzos Permisibles*. Limusa, México D.F.
- National Association of Corrosion Engineers (NACE). Standard RP-0176-76 (1976), “Control of Corrosion on Steel, Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production”.
- National Association of Corrosion Engineers (NACE). Standard RP-0176-07 (2007), “Control of Corrosion on Steel, Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production”.
- NRF-003-PEMEX-2007 PEMEX: *Diseño y Evaluación De Plataformas Marinas Fijas en el Golfo de México*.
- NRF-041-PEMEX-2007: *Carga, Amarre, Transporte e Instalación de Plataformas Costa Afuera*.
- NRF-137-PEMEX-2006: *Diseño de Estructuras de Acero. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios*.
- NRF-173-PEMEX-2009: *Diseño de Accesorios Estructurales para Plataformas Marinas*.
- NRF-175-PEMEX-2007. *Acero Estructural para Plataformas Marinas. Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios*.
- *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design*.  
API RECOMMENDED PRACTICE 2A-WSD (RP 2A-WSD)  
TWENTY-FIRST EDITION, DECEMBER 2000  
ERRATA AND SUPPLEMENT 1, DECEMBER 2002  
ERRATA AND SUPPLEMENT 2, OCTOBER 2005
- Ahumada Hernández Carlos (2013). *Análisis y Modelación de una Plataforma Marina*. Tesina de Especialización en Ingeniería (Estructuras), UNAM. México.
- Barranco Cecilia Federico (2012). *Sistemas Flotantes para la Producción de Petróleo en Aguas Profundas Mexicanas*. V Congreso Nacional de la Academia de Ingeniería. México.
- Brown and Root International, Inc. y J. Mc Dermott. Inc and CPI Ingeniería y Administración de Proyectos, S.A. de C.V. (1996). *Análisis estructural por fatiga de 15 plataformas marinas ubicadas en la Sonda de Campeche*. Estudio.
- Caballero Díaz José Ramón (2014). *Ingeniería Costa Afuera Orientada al Diseño Estructural de una Plataforma Marina Fija Tipo Jacket, Para Tirantes de Aguas Someras, Instalada en el Golfo De México*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería (Civil), Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Carrera Espinoza Rafael (2007). *Análisis de Esfuerzos Estáticos en un Nodo de Seis Elementos de la Subestructura (Jacket) de una Plataforma Marina de Producción Tipo Octápoda Fija PB-KU-S*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras), UNAM. México.
- Chopra, A.K. (2000). *Dynamics of Structure Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 2ª edición, Prentice Hall; Nueva Jersey.
- De Buen López de Heredia Óscar (1980). *Estructuras de Acero Comportamiento y Diseño*, Editorial Limusa. México.

- De Buen López de Heredia Óscar (2010). *Estructuras de Acero Comportamiento y Diseño*, Editorial Limusa. México.
- García Tenorio Mario, Campos Dante, Heras Rodríguez Enrique y Zaldo García Alejandro (2000). *Evaluación del Análisis Espectral por Fatiga de Plataformas Marinas Tipo Jacket*. XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural (SMIE). León, Guanajuato. México.
- Guevara Morales Nicolás Elías, Osorio Rodríguez Sergio Antonio y Vargas Edgardo Arturo (2006). *Evaluación de la Capacidad Estructural del Edificio de la Biblioteca de las Ingenierías y Arquitectura, Utilizando Análisis Estático No Lineal (Pushover)*. Tesis de Licenciatura (Ingeniería Civil), Universidad de El Salvador. San Salvador.
- Health and Safety Executive (1997). *Stress Concentration Factors for Simple Tubular Joints*. Primera Publicación. London.
- Martínez Saucedo Gilberto (2001). *Análisis Espectral de Fatiga en una Plataforma Marina Fija Tipo Jacket, ubicada en la Sonda de Campeche, México*, Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras), UNAM. México.
- Rodríguez Hernández José Luis (2009). *Diseño de Estructuras Flotantes de Producción de Hidrocarburos Sujetas a Fatiga*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería (Civil), Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
- Silva Ballesteros Jorge (1991). *Análisis de Fatiga de Plataformas Marinas*. Artículo. IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. México.
- Valdés M. Víctor (2005) A. *Curso de Ingeniería Civil Costa Afuera –Apuntes de Clase, Tomo I*. Segunda Edición. México.
- Valdés M. Víctor (2005) B. *Curso de Ingeniería Civil Costa Afuera –Apuntes de Clase, Tomo II*. Primera Edición. México.
- Valdez Llamas Yolanda Patricia (2002). *Análisis Geoestadístico de la Estratigrafía del Suelo Marino en un Área de la Sonda de Campeche*, Tesis de Maestría en Ingeniería (Geotecnia), UNAM. México.
- Villaseñor Mejía Carlos (2010). *Modelación y Análisis Estructural de una Plataforma Autoelevable Considerando Interacción Suelo-Estructura*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras), UNAM. México.
- Wilson James F. (2003). *Dynamics of Offshore Structures*. Editorial John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, E.U.
- <http://cuentame.inegi.org.mx/economia/petroleo/default.aspx?tema=S>
- <http://www.pep.pemex.com/Paginas/Informacion.aspx>
- <http://www.bentley.com/es-MX/Products/SACS/>