



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS FIJAS
COSTA AFUERA CON MONTANTES DE TUBERÍAS
(RISERS) UTILIZANDO EL PROGRAMA SACS 5.3 V.**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR: Peña López, Carlíx D.

Rossi Trias, Dirgny.

PROFESOR GUÍA: Noriega H, José A.

FECHA: Caracas, Junio de 2015



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS FIJAS
COSTA AFUERA CON MONTANTES DE TUBERÍAS
(RISERS) UTILIZANDO EL PROGRAMA SACS 5.3 V.**

REALIZADO POR: Peña López, Carlix D.

Rossi Trias, Dirgny

PROFESOR GUÍA: Noriega H, José A.

FECHA: Caracas, Junio de 2015



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS FIJAS
COSTA AFUERA CON MONTANTES DE TUBERÍAS
(RISERS) UTILIZANDO EL PROGRAMA SACS 5.3 V.**

**Este Jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha
evaluado su contenido con el resultado: _____**

J U R A D O E X A M I N A D O R

Firma: _____
Nombre: _____

Firma: _____
Nombre: _____

Firma: _____
Nombre: _____

REALIZADO POR: Peña López, Carlis D.

Rossi Trias, Dirgny.

PROFESOR GUÍA: Noriega H, José A.

FECHA: Caracas, Junio de 2015

Se lo dedico a mis padres por haberme dado la oportunidad de estudiar en una de las mejores universidades del país como lo es la UCAB, por siempre estar allí acompañándome en mis noches de estudio y preocupaciones. A mis hermanos que durante toda la carrera me ayudaron bien sea con una tarea, examen o con algún problema informático. A los padres de mi compañera el Sr. Vincenzo y la Sra. Ingrid quienes durante años me acogieron en su casa. A mi compañera de tesis con quien empecé la carrera desde primer semestre por tenerme paciencia y por toda la ayuda que me dio a lo largo de mi vida universitaria.

Carlix D. Peña L.

A mis padres por ser el pilar de mi vida, por apoyarme durante cada etapa, por su valiosa educación y dedicación, por las palabras de aliento y la confianza que han tenido en mí a lo largo de este camino. Todo ha sido posible gracias a ellos. A mis nonnos, Levin y Amalia por ser los mejores abuelos, los más orgullosos y consentidores, esto es por y para ustedes. A mis hermanos, por valorar mis esfuerzos y darme su apoyo en todo momento. A mis sobrinos, para que vean en mí siempre un ejemplo a seguir. Y por último, y no menos importante a mi compañera de tesis y amiga Carlix por siempre haber estado presente y ser un apoyo fundamental durante toda la carrera.

Dirgny Rossi Trias

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, por darnos la fortaleza para superar los obstáculos y dificultades que se nos presentaron a lo largo de este camino y por permitirnos culminar exitosamente nuestra carrera universitaria.

Al Ingeniero José Antonio Noriega por concedernos el honor de ser nuestro Tutor y siempre orientarnos y guiarnos con su mejor disposición. Gracias profesor.

A nuestros padres y familiares por siempre estar ahí cuando lo necesitamos, brindándonos toda su ayuda y apoyo incondicional.

A los profesores, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario y fueron parte fundamental en nuestra formación como Ingenieros.

A nuestros amigos, que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional. Lo logramos. Somos Ingenieros.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xi
ABREVIATURAS	xii
SÍMBOLOS	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I EL PROBLEMA	3
1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Antecedentes	6
1.3 Alcances y Limitaciones	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo General	7
1.4.2 Objetivos Específicos.....	7
CAPITULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2.1 Plataformas Costa Afuera	9
2.2 Plataformas Costa Afuera Fijas.....	9
2.3 Montantes de tuberías	10
2.4 Tuberías ascendentes (<i>riser</i>)	10
2.5 Consideraciones para el diseño de montantes y tuberías ascendentes (<i>risers</i>).....	11
2.5.1 Protección.....	13
2.5.2 Inspección y Mantenimiento	13
2.6 Programa SACS	13
2.7 Factores ambientales que afectan a las estructuras fijas costa afuera	14
2.8 Análisis Espectral.....	14
2.8.1 Definición de masas	15

2.8.2	Espectro de respuesta	16
2.8.3	Análisis Modal	18
2.9	Interacción suelo-estructura	21
2.9.1	Curvas de transferencia de carga axial – desplazamiento (T-Z)	25
2.9.2	Curvas de capacidad de carga en la punta – desplazamiento (Q-Z).....	27
2.9.3	Curvas de resistencia lateral (P-Y).....	28
2.9.3.1	Curvas P-Y para arcillas.....	28
2.9.3.2	Curvas P-Y para arenas	30
CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO		31
3.1	Nivel de Investigación.....	32
3.2	Metodología	32
3.3.1	Normas internacionales consultadas	32
3.3.2	Recopilación de información sobre parámetros de diseños y construcción para estructuras con montantes (<i>risers</i>).....	33
3.3.3	Desarrollo del modelo de la estructura en SACS	33
3.3.4	Definir las variables ambientales para el análisis del modelo.....	33
3.3.5	Ejecución de los análisis en el modelo.....	33
CAPÍTULO IV DESARROLLO		35
4.1	Información general del modelo estudiado	35
4.1.1	Plataforma	35
4.1.2	Montante.....	37
4.1.3	Tuberías ascendentes.....	38
4.1.4	Propiedades de los materiales.....	38
4.2	Datos Ambientales	38
4.2.1	Viento.....	38
4.2.2	Oleaje	39
4.2.3	Sismo.....	40
4.2.4	Suelo.....	42
4.3	Cargas Aplicadas.....	43
4.4	Combinaciones de Carga.....	44

4.5	Modelo	45
4.5.1	Generación de la estructura en SACS.	45
4.5.2	Visualización de la Plataforma.....	48
4.5.3	Aplicación de cargas	48
4.5.4	Visualización de la estructura deformada	50
4.5.5	Observaciones	52
4.5.6	Entrada de datos ambientales	56
4.5.7	Combinaciones de Carga.....	58
4.6	Análisis previos.....	58
4.6.1	Análisis estático general.....	59
4.6.1.1	Adaptación del análisis estático para el análisis espectral	60
4.6.2	Análisis de extracción modal	61
4.7	Análisis espectral	65
4.8	Análisis no-lineal de interacción suelo-estructura	70
4.8.1	Generación de gráficas para los datos del suelo.....	74
4.8.2	Análisis de un solo pilote	75
	CAPÍTULO V RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
5.1	Análisis estáticos.....	77
5.2	Análisis de extracción modal	81
5.3	Análisis espectral	84
5.4	Análisis no-lineal de interacción suelo-estructura	92
	CAPÍTULO VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
6.1	Conclusiones	105
6.2	Recomendaciones.....	106
6.2.1	Relacionadas con el diseño de montantes	106
6.2.2	Relacionadas con el modelado de la estructura en el programa SACS	106
	BIBLIOGRAFÍA.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Recursos en la plataforma continental.....	3
Figura 2. 1: Ejemplo de plataforma fija.....	10
Figura 2. 2: Ejemplo de tubería ascendente unida a una plataforma.....	11
Figura 2. 3: Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g.....	18
Figura 2. 4: Fuerzas y deflexiones que actúan sobre un pilote.....	22
Figura 2. 5: Gráfica de relación entre fuerza y deflexión.....	23
Figura 2. 6: Dibujo esquemático de una plataforma soportada por pilotes.....	23
Figura 2. 7: Curvas típicas de transferencia de carga axial - desplazamiento en pilotes (T-Z).....	26
Figura 2. 8: Curva de Carga-Desplazamiento en la punta del pilote (Q-Z).....	27
Figura 2. 9: Valores para definir las curvas P-Y en arcillas blandas para casos de carga estáticos.....	29
Figura 2. 10: Valores para definir las curvas P-Y en arcillas blandas con casos de carga cíclicos.....	29
Figura 2. 11: Determinación de módulo k en función del ángulo de fricción ϕ	30
Figura 4. 1: Plano de planta de la plataforma.....	36
Figura 4. 2: Geometría del montante.....	37
Figura 4. 3: Structure Definition - Elevations. Definición de las elevaciones de la plataforma.....	45
Figura 4. 4: Structure Definition - Legs. Definición de los pilotes de la plataforma y su inclinación...	46
Figura 4. 5: Structure Definition - Conductors. Definición de los conductos de la plataforma.....	47
Figura 4. 6: Vista 3D de la plataforma y el soporte del riser.....	48
Figura 4. 7: Ventana "Load Members" para cargas puntuales.....	49
Figura 4. 8: Ventana "Load Members" para cargas distribuidas.....	50
Figura 4. 9: Menú de visualización de la estructura deformada.....	51
Figura 4. 10: Desplazamientos en la plataforma.....	52
Figura 4. 11: Ventana "Merge Multiple Coincident".....	53
Figura 4. 12: Ventana "Labeling Options".....	54
Figura 4. 13: Vista de cargas aplicadas a la estructura y cuadro resumen de fuerzas aplicadas.....	54
Figura 4. 14: Cuadro resumen de fuerzas y momentos aplicados.....	55
Figura 4. 15: Opciones del menú "Misc".....	55
Figura 4. 16: Ventana "SACS Analysis Options".....	56
Figura 4. 17: Secuencia de código para introducir los datos ambientales.....	57
Figura 4. 18: Secuencia de código para introducir las combinaciones de carga.....	58
Figura 4. 19: Generador de análisis estático general.....	59
Figura 4. 20: Modificaciones en el modelo para el análisis estático para el análisis espectral.....	61
Figura 4. 21: Procedimiento para la creación del archivo DYNPAC.....	63
Figura 4. 22: Opciones del archivo "Dynpac".....	64
Figura 4. 23: Archivo "Dynpac".....	64
Figura 4. 24: Opciones de análisis de extracción modal.....	65
Figura 4. 25: Generador del análisis de extracción modal.....	65

Figura 4. 26: Ventana "Dynamic Response Options"	67
Figura 4. 27: Ventana "Static plus Dynamic Spectral Combination"	68
Figura 4. 28: Ventana "Spectral Load"	69
Figura 4. 29: Generador del análisis espectral.	69
Figura 4. 30: Programa Postvue para visualizar la relación capacidad-demanda y las fuerzas de los miembros.....	70
Figura 4. 31: Ventana "Pile Super Element Creation"	72
Figura 4. 32: Secuencia de códigos para introducir los datos del suelo en archivo PSI.	74
Figura 5. 1: Resumen de casos de carga básicos.....	77
Figura 5. 2: Combinación de carga 1 para la dirección 0° - Caso 1.	78
Figura 5. 3: Combinación de carga 2 para la dirección 0° - Caso 4.	78
Figura 5. 4: Combinación de carga 3 para la dirección 45° - Caso 8.	79
Figura 5. 5: Deflexiones máximas para cada caso de carga.....	80
Figura 5. 6: Valores máximos de la relación capacidad-demanda para cada pilote.....	80
Figura 5. 7: Valores máximos de la relación capacidad-demanda para los caso de carga 8 y 11.	81
Figura 5. 8: Resumen de pesos y centros de gravedad de la estructura.	82
Figura 5. 9: Frecuencia y masas generalizadas para cada modo de vibración.	83
Figura 5. 10: Resumen de fuerzas y momentos para cada modo de vibración.	83
Figura 5. 11: Factores de participación de masa para cada modo de vibración.....	84
Figura 5. 12: Factores de participación en el análisis sísmico.	85
Figura 5. 13: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección "x" para el caso 8.	86
Figura 5. 14: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección "y" para el caso 8.....	86
Figura 5. 15: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección "x" para el caso 11.....	87
Figura 5. 16: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección "y" para el caso 11.....	87
Figura 5. 17: Desplazamientos generados por el caso 8.	88
Figura 5. 18: Desplazamientos generados por el caso 11.	88
Figura 5. 19: Combinaciones generadas para la unión de los fuerzas estáticas con las sísmicas.	89
Figura 5. 20: Resumen de fuerzas y momentos para el caso 8.....	90
Figura 5. 21: Resumen de fuerzas y momentos para el caso 8.....	90
Figura 5. 22: Relación capacidad-demanda para el análisis espectral.	91
Figura 5. 23: Fuerzas internas generadas en los miembros.....	91
Figura 5. 24: Representación gráfica del espectro sísmico generada por SACS.	92
Figura 5. 25: Descripción de los grupos de pilotes.	92
Figura 5. 26: Datos de la curva axial (T-Z).....	93
Figura 5. 27: Curva Axial (T-Z).....	94
Figura 5. 28: Datos de la curva de capacidad en la punta (Q-Z).....	95
Figura 5. 29: Curva de capacidad en la punta (Q-Z).....	95
Figura 5. 30: Datos de la curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro: 76,2cm).....	96
Figura 5. 31: Curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro:76,2cm).	96

Figura 5. 32: Datos de la curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro: 121,92cm).	97
Figura 5. 33: Curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro: 121,92cm).	97
Figura 5. 34: Fuerzas y desplazamientos de la junta "0007".	98
Figura 5. 35: Relación capacidad - demanda de las fuerzas.	98
Figura 5. 36: Resultados obtenidos a partir del análisis de un pilote.	98
Figura 5. 37: Deflexión Axial del pilote 0007 para caso de carga 1.	99
Figura 5. 38: Desplazamientos laterales del pilote 0007 para el caso de carga 1.	100
Figura 5. 39: Rotaciones laterales del pilote 0007 para el caso de carga 1.	100
Figura 5. 40: Momentos flexionantes del pilote 0007 para el caso de carga 1.	101
Figura 5. 41: Carga axial del pilote 0007 para el caso de carga 1.	101
Figura 5. 42: Fuerzas cortantes en el pilote 0007 para el caso de carga 1.	102
Figura 5. 43: Relación capacidad-demanda del pilote 0007 para el caso de carga 1.	102
Figura 5. 44: Reacción axial del suelo en el pilote 0007 para el caso de carga 1.	103
Figura 5. 45: Reacción lateral del suelo en el pilote 0007 para el caso de carga 1.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1: Parámetros para la fuerza de viento.	39
Tabla 4. 2: Parámetros para la fuerza de oleaje.	39
Tabla 4. 3: Parámetros para el espectro de sismo.	40
Tabla 4. 4: Valores del espectro sísmico.	41
Tabla 4. 5: Datos del estrato n° 1.	42
Tabla 4. 6: Datos del estrato n°2.	43
Tabla 4. 7: Resumen de cargas de flotación.	44
Tabla 4. 8: Archivos de entrada y salida del análisis estático general.	60
Tabla 4. 9: Archivos de entrada y salida para el análisis de extracción de modos.	62
Tabla 4. 10: Archivos de entrada y salida para el análisis espectral.	66
Tabla 4. 11: Archivos de entrada y salida para el análisis no-lineal de interacción suelo-estructura.	71
Tabla 4. 12: Archivos de entrada y salida para el ploteo de los datos del suelo.	75
Tabla 4. 13: Archivos de entrada y salida para el análisis de un solo pilote.	75
Tabla 5. 1: Descripción de las combinaciones de carga estático + sísmico.	89

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4. 1: Espectro sísmico según NSR-10.	42
--	----

ABREVIATURAS

- **API:** American Petroleum Institute
- **CPT:** Cone Penetration Test
- **CQC:** Complete Quadratic Combination
- **DNV:** Dek Norske Veritas
- **MMBI:** Millones de Barriles
- **MMMPc:** Miles Millones de Pies Cúbicos
- **NSR:** Normativa colombiana Sismo Resistente
- **PDVSA:** Petróleos De Venezuela Sociedad Anónima
- **SACS:** Structural Analysis Computer Systems

SÍMBOLOS

- δ : Desplazamiento
- θ : Rotación

SINOPSIS

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS FIJAS COSTA AFUERA CON MONTANTES DE TUBERÍAS (RISERS) UTILIZANDO EL PROGRAMA SACS 5.3V.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo analizar estructuralmente una plataforma fija costa afuera con montante de tuberías usando el programa SACS 5.3 V, especializado en el análisis de estructuras costa afuera, considerando los efectos sísmicos y la interacción suelo-estructura.

La norma utilizada en este trabajo fue la norma americana del American Petroleum Institute (API RP2A-WSD): *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design*, ya que esta norma es la referencia a nivel mundial para el diseño y construcción de estructuras fijas costa afuera.

Este trabajo especial de grado proporcionará al lector una breve introducción al diseño y análisis de plataformas fijas costa afuera con montantes de tuberías, y servirá como guía para el desarrollo y ejecución de los análisis antes mencionados, dado que la información disponible es escasa y de difícil acceso.

PALABRAS CLAVES: Plataformas costa afuera, montantes, SACS, sismo, interacción suelo-estructura.

REALIZADO POR: Peña López, Carlis D.

Rossi Trias, Dirgny

TUTOR: Ing. José A. Noriega H.

INTRODUCCIÓN

Los yacimientos de petróleos descubiertos en áreas costa afuera contienen el mismo tipo de hidrocarburos que aquellos que se encuentran en tierra firme, sin embargo los recursos costa afuera generan un interés particular por su volumen y potencial para desarrollarse a larga escala en el futuro. Muchos de los desarrollos en la costa ya están agotados, no son económicamente viables para explotar o no pueden desarrollarse completamente por las restricciones de propiedad o problemas geopolíticos.

La expansión de los recursos de explotación costa afuera es inevitable debido a la creciente demanda mundial de petróleo y de los productos derivados de él, esto ha impulsado el desarrollo de innumerables investigaciones y proyectos orientados al área de la ingeniería costa afuera.

Uno de los países que se encuentra actualmente en el proceso de planificación y desarrollo de proyectos de ingeniería costa afuera es Venezuela, buscando aprovechar la gran concentración de recursos que se encuentran en sus territorios marítimos, impulsado por la necesidad de aumentar su producción para incorporar estos productos al mercado interno del país.

En la actualidad se está llevando a cabo el desarrollo de un importante proyecto en la costa oriental, donde se encuentra la mayor cantidad de reservas probadas de gas del país. Este proyecto contempla la construcción de diversas estructuras y la perforación de varios pozos que surtirán de materia prima a estas instalaciones.

Los conocimientos en el área de la ingeniería costa afuera en Venezuela no han sido extensamente desarrollados ni aplicados frecuentemente debido a las pocas oportunidades de trabajo que se presentan, por los escasos o inexistentes proyectos. Es por ello que en este

Trabajo Especial de Grado se busca ampliar los conocimientos del lector sobre esta área y proveerlo de herramientas para llevar a cabo diversos análisis en estructuras de este tipo.

Como objetivo general para este trabajo, en el capítulo I, se ha planteado analizar estructuralmente una plataforma fija costa afuera con montantes de tuberías utilizando el programa SACS. En este capítulo también se presenta al planteamiento del problema, las limitaciones y los alcances de esta investigación, así como los objetivos específicos que se desean lograr.

En el capítulo II, se presentan los principales fundamentos teóricos sobre los que se basan los análisis, los factores a considerar para el diseño de una estructura con montante y algunos conceptos asociados con las plataformas costa afuera.

En el capítulo III, se presenta el tipo y nivel de la investigación, además de la metodología usada para la realización de este trabajo especial de grado.

En el capítulo IV, se encuentran los datos de la estructura estudiada, la información ambiental y se describe el procedimiento para el desarrollo de los análisis en el programa SACS.

En el capítulo V, se presentan los resultados obtenidos de los análisis estáticos y dinámicos ejecutados sobre una plataforma fija costa afuera con montante de tuberías en el programa SACS, y se analizan los resultados obtenidos y sus efectos sobre la estructura.

En el capítulo VI, se presentan las conclusiones y recomendaciones finales a las cuales se llegaron después de realizar los análisis.

CAPITULO I.

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Venezuela es uno de los países del mundo que posee las mayores reservas de hidrocarburos, aproximadamente el 25% de las reservas de petróleo del planeta se encuentran en su territorio. Adicionalmente es el 8vo país del mundo con las reservas probadas más grandes de gas natural, y el 1ero en Latinoamérica, sin embargo no es el mayor productor de ninguno de estos rubros.

Las reservas de gas natural del país alcanzan los 197.089 MMMPC, según cifras de PDVSA para el 2014. Aproximadamente el 50% de esas reservas se encuentran en las costas del territorio nacional, en el fondo de la plataforma continental que abarca 500 mil km². El aprovechamiento de estos recursos solo es posible mediante su extracción y tratamiento en plataformas costa afuera en las zonas donde se encuentran los hidrocarburos.



Figura 1. 1: Recursos en la plataforma continental.

Fuente: PDVSA

Venezuela ha visto la necesidad de incursionar a través de los años en la elaboración y ejecución de proyectos costa afuera para aumentar la producción de hidrocarburos, estos proyectos comprenden la construcción de diversas estructuras, entre ellas las plataformas costa afuera que son el pilar fundamental para la extracción y tratamiento de la materia prima.

La mayor concentración de gas natural en el territorio se encuentra en la costa nororiental, cerca del estado Sucre. Esto ha generado un gran interés en el desarrollo y construcción de instalaciones que permitan la extracción de estos importantes recursos. Hasta los momentos se tiene conocimiento de tres proyectos que se llevarán a cabo en la zona de la Cuenca Oriental en el transcurso de los próximos años.

Uno de los tres proyectos a desarrollar es el Proyecto Mariscal Sucre (PMS) que tiene como objetivo incorporar al mercado interno el gas proveniente de los desarrollos costa afuera en el oriente del país. En esta zona se encuentra el 70% de las reservas de gas no asociado y líquido condensado, específicamente en los campos Dragón, Mejillones, Río Caribe y Patao ubicados en el norte del Golfo de Paria. Se espera producir 1250 MMPC de gas no asociado y 28 MDB de líquido condensado. Para hacer realidad esta meta se tiene planificado perforar 34 pozos, instalar dos plataformas de producción, así como los sistemas de producción submarinos, líneas de recolección y sistemas de exportación necesarios, incluyendo la construcción de alrededor de 570 km de tuberías marinas, urbanismo, vialidad, muelles de construcción, servicios y plantas de adecuación y procesamiento de gas. Tiene como fecha de culminación estimada el año 2022. Este proyecto es uno de los más grandes y ambiciosos a desarrollar en el país en el área de la ingeniería costa afuera en Venezuela, no solo por su importancia comercial para el país sino también por la oportunidad que esto representa para desarrollar esta área tan poco explorada en el campo de la construcción de obras civiles.

Los otros proyectos que se están llevando a cabo en la cuenca oriental apenas ha culminado su Proyecto de Generación de Prospecto (PGP), estos se encuentran en el Golfo de Paria y en el Norte de Paria. El primero presentó unas expectativas de producción de 38,72

MMBl de crudo y 4,34 MMMPc de gas, mientras que el ubicado en el Norte de Paria generó unas expectativas de producción de 1540,9 MMBl de petróleo y 2797,2 MMMPc de gas.

El análisis, diseño y construcción de estructuras costa afuera es indiscutiblemente una de las tareas más demandantes enfrentadas por la ingeniería. Por encima de las condiciones y situaciones usuales que se conocen para las estructuras en tierra firme, las estructuras costa afuera tienen la complicación adicional de estar ubicadas en un ambiente oceánico donde los efectos de la interacción hidrodinámica y la respuesta dinámica se convierten en consideraciones mayores al momento de su diseño.

Todos los componentes que forman parte de las plataformas se ven afectados directamente por los factores ambientales que los rodean, pero es importante prestarle particular atención a las estructuras que se encargan de extraer y transportar los hidrocarburos desde el fondo marino hasta la superficie de la plataforma. Estas estructuras deben ser diseñadas para que puedan funcionar bien, para que sean seguras estructuralmente, proporcione seguridad operacional y tenga costos racionales.

Las estructuras que se mencionan anteriormente son los *montantes* de tuberías, estos son un conjunto de soportes de las tuberías que conectan el lecho marino con las instalaciones que se encuentran al nivel del mar, con fines de producción, perforación, inyección y extracción. Las consideraciones para el diseño y construcción de estos elementos no es relevante en las normativas vigentes internacionales, mucho menos en las normas venezolanas, incluso no existe mucho material escrito sobre estos importantes sistemas de tuberías.

Es por ello que es necesario comenzar a desarrollar conocimientos en esta área con la ayuda de las herramientas tecnológicas que se tienen al alcance actualmente para poder establecer los parámetros básicos que puedan servir de guía para el diseño y análisis de las estructuras con montantes de tuberías.

1.2 Antecedentes

Esta investigación pretende darle continuidad a los trabajos que se han venido llevando a cabo por estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil en la Universidad Católica Andrés Bello (UCAB) sobre las estructuras marinas, aplicando los conocimientos adquiridos y las investigaciones realizadas en trabajos anteriores relacionados con el tema, en busca de enfocar estas herramientas hacia un mejor entendimiento y estudio del problema propuesto.

- **Manual de aplicaciones del programa SACS 5.3 V a estructuras costa afuera. (2014)** Autores: Di Paolo, I. y Herrera, R. Tutor: José A. Noriega. Tesis de Grado (Ing. Civil), Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Tuvo como finalidad dar a conocer el procedimiento de diseño para plataformas costa afuera, requerido para generar el modelo estructural y realizar análisis dinámicos a la estructura.
- **Análisis de fatiga en estructuras fijas costa afuera tipo Jacket causada por oleaje marino mediante el programa SACS 5.3 V. (2014)** Autores: Berra, F. y Sánchez, V. Tutor: Manuel J. Ramírez. Tesis de Grado (Ing. Civil), Universidad Católica Andrés Bello (UCAB). Su finalidad fue dar a conocer una metodología para determinar los daños por fatiga en los miembros que componen a una plataforma fija costa afuera tipo Jacket mediante el uso de software especializado en diseño y análisis para estructuras costa afuera SACS usando la versión 5.3.

1.3 Alcances y Limitaciones

El presente trabajo de grado tiene como alcance el análisis estructural de únicamente plataformas fijas costa afuera con montantes de tuberías. Esta investigación no es aplicable para plataformas sumergibles o semi-sumergibles. Las condiciones que forman parte del análisis serán el sismo, la interacción suelo-estructura y otras variables ambientales que se incluyen indirectamente como el viento y el oleaje, las consecuencias del fenómeno de fatiga se excluyen ya que esto es otro tema de estudio y fue desarrollado en investigaciones

anteriores. Estos análisis se llevarán a cabo únicamente en el programa SACS en su versión 5.3.

Como limitaciones destacan dos aspectos importantes:

- De las condiciones ambientales que se encuentran en el sitio donde se planificó la construcción de la plataforma estudiada solo se conocen los datos del sismo, oleaje y viento. Sin embargo no se conocen los datos del suelo por ello se seleccionaron algunos valores de la norma API en conjunto con algunos valores improvisados para la conformación de un suelo cualquiera con el cual realizar los análisis planteados, esta acción puede afectar de modo positivo o negativo los resultados.
- La poca información que existe sobre el uso del programa SACS. En Venezuela no existen academias u organizaciones que se especialicen en la capacitación de profesionales para el manejo de esta poderosa herramienta. SACS es un programa bastante útil para los profesionales y empresas que tienen como campo de trabajo la ingeniería costa afuera.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Analizar estructuralmente una plataforma fija costa afuera con montante (riser) utilizando el programa SACS 5.3 V.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Establecer las pautas para el diseñar una estructura con montante.
- Modelar y diseñar una estructura con montante conocida utilizando el programa SACS 5.3 V.
- Identificar las solicitaciones a las que están sometidas una estructura con montante.
- Realizar un análisis dinámico de la estructura.
- Evaluar los efectos de la interacción suelo-estructura.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Plataformas Costa Afuera

Las plataformas costa afuera son estructuras de grandes dimensiones, de acero y concreto, enclavadas a kilómetros de tierra firme en aguas muy poco profundas o en las profundidades del océano, permiten perforar y extraer petróleo y gas natural de los yacimientos que se encuentran en el lecho marino. Tienen una gran importancia a nivel mundial, ya que estas generan un alto ingreso económico y una gran ventaja en la generación de energía e hidrocarburos. Dependiendo de la profundidad del agua y las condiciones ambientales se requieren nuevas configuraciones estructurales. Existen diversos tipos de plataformas costa afuera, se pueden clasificar según su comportamiento y geometría, entre ellas se encuentran las plataformas fijas y las flotantes.

2.2 Plataformas Costa Afuera Fijas

Las plataformas fijas son estructuras soportadas por miembros tubulares de acero hincados en el lecho marino. Las estructuras soportan una cubierta con espacio para plataformas de perforación, instalaciones para producción y alojamiento para el equipo de trabajo. Estas plataformas, en virtud de su inmovilidad, son diseñadas para un largo periodo de uso.

El principio detrás del diseño de las plataformas fijas consiste en minimizar el periodo natural de la estructura hasta que sea menor a cuatro segundos para evitar un comportamiento resonante con las olas. La configuración estructural debe hacer cumplir este concepto.



Figura 2. 1: Ejemplo de plataforma fija
Fuente: Gold Gate Engineering Institute

2.3 Montantes de tuberías

Los montantes de tuberías son estructuras verticales destinadas a servir de soporte y protección para las tuberías ascendentes (*risers*). Los montantes de tuberías se usan en plataformas costa afuera que poseen tuberías ascendentes rígidas.

2.4 Tuberías ascendentes (*riser*)

Las tuberías ascendentes que permiten transportar productos desde el fondo marino hasta las instalaciones de producción que se encuentran en la superficie y viceversa. Son la conexión entre los desarrollos de campo submarinos y las instalaciones de producción y perforación en la superficie.

Por lo general son tuberías aisladas elaboradas para resistir las condiciones del fondo marino, pueden ser rígidas o flexibles. Existen diferentes tipos de tuberías ascendentes, entre los que se conocen las tuberías unidas a las plataformas mediante montante, tuberías flexibles y de perforación.

Las tuberías fijadas a las plataformas se utilizan principalmente en plataformas fijas y estructuras de gravedad de concreto. Este tipo de tubería está sujeto a un lado de las plataformas conectando el lecho marino con la instalación que se encuentra en la superficie. Usualmente son fabricadas por secciones, la sección más cercana al fondo marino se conecta con una línea de flujo o una tubería de exportación, y fija a la plataforma. La sección más cercana a la superficie se conecta con los equipos de procesamiento y producción que se encuentra en la plataforma.



Figura 2. 2: Ejemplo de tubería ascendente unida a una plataforma.
Fuente: Aquaterra Energy

2.5 Consideraciones para el diseño de montantes y tuberías ascendentes (risers)

Las actividades de exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas con ambientes hostiles generan la necesidad de desarrollar sistemas de montantes innovadores y capaces de asegurar la transferencia de fluidos desde el fondo marino hasta la plataforma y viceversa, con pocos o ningunos inconvenientes relacionados con las cargas ambientales y los movimientos de la plataforma.

Las aplicaciones de los sistemas de tuberías ascendentes varían de acuerdo con la profundidad del agua y las condiciones ambientales. El diseño de un montante a ser utilizado en aguas profundas es obviamente más complejo que el diseño de uno que se usará en aguas superficiales. Los sistemas de tuberías ascendentes para aguas profundas se han venido utilizando extensivamente en el Golfo de México, Brasil y en el oeste de África. Las condiciones ambientales en estos lugares se consideran de buenas a moderadas. Es probable que en un futuro no muy lejano la exploración y producción de gas y petróleo se mueva a aguas más profundas y con ambientes mucho más agresivos.

Las tuberías ascendentes (*risers*) al igual que los montantes de tuberías están sometidas a diversos tipos de cargas y deformaciones que varían desde los que se esperan por su funcionamiento diario hasta valores extremos o accidentales. El propósito del diseño apropiado de estos elementos es que estos sean capaces de soportar los efectos de las cargas que lo afecten a lo largo de su vida útil.

Predecir que cargas afectaran la estructura y el sistema de los montantes es un componente clave para determinar los elementos estructurales y los desplazamientos de las plataformas. Según la norma API RP 2RD las cargas a ser consideradas para el diseño son las siguientes:

- Cargas funcionales y de presión
- Cargas ambientales
- Cargas accidentales

Las cargas funcionales son aquellas que son una consecuencia del sistema existente y de su uso sin considerar los efectos ambientales o accidentales. Las cargas ambientales son aquellas impuestas directa o indirectamente por el ambiente oceánico, mientras que las cargas accidentales son aquellas resultantes de eventos eventuales.

2.5.1 Protección

Los montantes de tuberías deben ser instalados para proteger y resguardar a las tuberías ascendentes en áreas expuestas al impacto del tráfico marino. Estos deben ser diseñados para proveer suficiente protección contra el impacto de un barco de tamaño considerable y su velocidad al momento de entrar en contacto con la plataforma. El diseño de la estructura debe considerar las cargas y efectos que se generan en el sistema de protección de la tubería.

2.5.2 Inspección y Mantenimiento

Las tuberías ascendentes como los montantes de tuberías deben ser inspeccionados visualmente una vez al año para verificar si se han deteriorado y si se han corroído en la zona de salpique, esta zona es la parte superficial externa de la estructura o de las tuberías que periódicamente se encuentra afuera o adentro del agua por el efecto del oleaje y las mareas. Si se observan daños, se debe determinar el grado de deterioro para establecer si el sistema puede repararse o debe reemplazarse.

2.6 Programa SACS

El sistema *Structural Analysis Computer System* (SACS) es un software que ha sido desarrollado tanto para estructuras *offshore* como para aplicaciones generales de ingeniería civil.

El programa permite introducir datos estructurales como: geometría, dimensiones de los miembros, las propiedades del material y las condiciones ambientales que son necesarias para generar los archivos de entrada del programa. Luego de que se generan los archivos de entrada y se realiza el análisis, el programa produce archivos de solución común de salida que contienen desplazamientos y fuerzas internas de los elementos, entre otras cosas.

SACS consta de varios programas de análisis estructurales modulares que están interconectados entre sí, esto le permite al usuario tener interacción con los archivos de salida de un programa antes de la entrada a otro, con la finalidad de que pueda realizar una revisión del archivo y hacer la corrección pertinente. Todos los programas incluyen un conjunto estándar de valores predeterminados de ingeniería, tanto para unidades inglesas como para el sistema métrico con la finalidad de simplificar la entrada de datos. Por último, facilita el dimensionado de planos estructurales, listas de materiales, entre otras cosas.

2.7 Factores ambientales que afectan a las estructuras fijas costa afuera

Las estructuras costa afuera se ven afectadas por diferentes factores ambientales, entre los que se encuentran sismo, oleaje, viento y condiciones del suelo *in situ*. También existen otros factores que, a pesar de que no son ambientales están íntimamente relacionados a estos, como por ejemplo la fatiga y la corrosión. Para el desarrollo del presente trabajo solo se tomarán en cuenta las condiciones de sismo y suelo, ya que en las tesis previas se han desarrollado la condición de oleaje y el efecto de fatiga. Para el análisis de las estructuras en zonas sísmicas se utiliza un análisis dinámico espectral

2.8 Análisis Espectral

Para el diseño de una plataforma costa afuera ubicada en un área sísmicamente activa se deben considerar las fuerzas sísmicas. Las áreas sísmicas se consideran activas basándose en los registros sísmicos de la zona, es decir, se presta especial atención en la frecuencia de ocurrencia y en la magnitud de los movimientos telúricos.

Los sismos tienen su origen en las roturas bruscas de la corteza terrestre seguidas de la liberación casi instantánea de la energía acumulada en el interior de la tierra.

La representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un sismo se denomina acelerograma del terreno. Mediante los acelerógrafos se obtienen los valores de la aceleración del suelo que se registran en tres

direcciones perpendiculares, dos horizontales y una vertical. La toma de los datos se debe realizar en intervalos pequeños de tiempo debido que la aceleración es irregular en el tiempo.

Como esquema general del desarrollo de un análisis espectral se requiere:

- Definir las masas a ser consideradas en el análisis dinámico.
- Definir el espectro de diseño a utilizar en el análisis.
- Realizar el análisis modal dinámico.

A continuación se describe cada uno de estos pasos:

2.8.1 Definición de masas

El análisis dinámico de una estructura es, obviamente complejo de realizar por el hecho de que las fuerzas de inercia son el resultado de los desplazamientos estructurales que varían con el tiempo que a su vez están influenciadas por las magnitudes de las fuerzas de inercia, un ejemplo de esto puede ser una viga que distribuye continuamente su masa a lo largo de su longitud, los desplazamientos y aceleraciones deben ser definidos para cada punto a lo largo del eje, para que las fuerzas de inercia sean completamente definidas. Este ciclo de causa y efecto puede ser atacado directamente mediante la formulación del problema en términos de las ecuaciones diferenciales.

La idealización de masas concentradas proporciona un medio simple para delimitar el número de grados de libertad que deben ser considerados en la realización de un análisis dinámico de un sistema estructural arbitrario. El procedimiento de formación de masas concentradas (“lumped”) es más efectivo en el tratamiento de sistemas en los que una gran proporción de la masa total está concentrada en unos pocos puntos discretos.

Usualmente un porcentaje de la masa variable se considera que participa durante el sismo, ya sea por probabilidad de ocurrencia o por no estar fijamente conectadas a la estructura.

2.8.2 Espectro de respuesta

Los espectros de respuestas se pueden definir como un gráfico de respuesta máxima que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. Generalmente se expresa en términos de velocidad, aceleración o cualquier otro parámetro de interés en el eje de las ordenadas calculada para distintos factores de amortiguamiento y en el eje de las abscisas se representa la frecuencia o el periodo. Los espectros son importantes en el área del diseño sismorresistente, ya que es una herramienta fundamental de la dinámica estructural.

La obtención de los espectros de respuesta de una estructura u oscilador de un grado de libertad puede realizarse por medio de diferentes técnicas, una de ellas es la integral de Duhamel que comúnmente es usada para el análisis dinámico lineal de las estructuras sujetas a cargas variables en el tiempo. Este procedimiento se basa en el principio de superposición dando como consecuencia que sea válido únicamente para estructuras lineales, es decir, para sistemas que posean propiedades constantes durante todo el proceso dinámico como por ejemplo la masa, rigidez, etc.

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes tipos de espectros de respuesta que atienden a necesidades específicas dependiendo de cuál sea el caso. Según Crisafulli y Villafañe (2002) los espectros más comunes son:

- **Espectros de respuesta elástica:** representan parámetros de respuesta máxima para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento. Se utilizan fundamentalmente para estudiar las características del terremoto y su efecto sobre las estructuras. Las

curvas de los espectros de respuesta presentan variaciones bruscas, con numerosos picos y valles, que resultan de la complejidad del registro de aceleraciones del terremoto.

- **Espectros de respuesta inelástica:** son similares a los anteriores pero en este caso se supone que el oscilador de un grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico por acción del terremoto. Este tipo de espectros son muy importantes en el diseño sismorresistente, dado que por razones prácticas y económicas la mayoría de las construcciones se diseñan bajo la hipótesis que incursionarán en campo plástico.

Las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, descritos previamente, no pueden utilizarse para el diseño sismorresistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona.

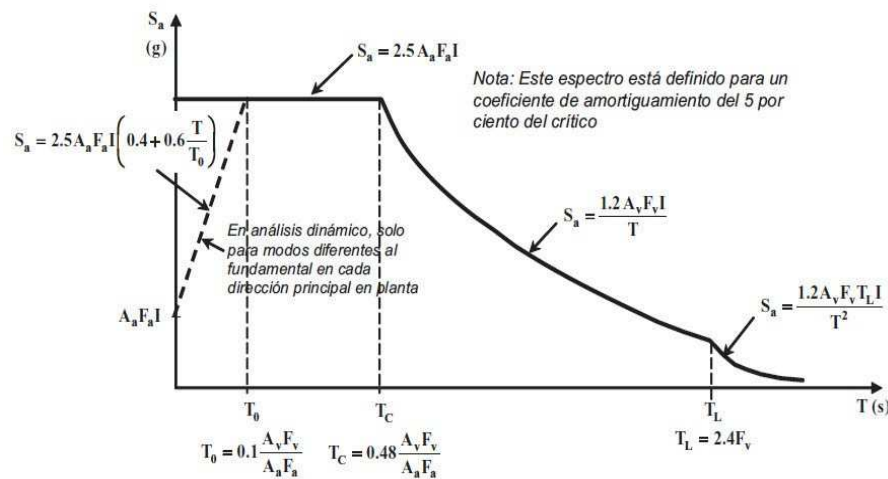


Figura 2. 3: Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g
Fuente: Reglamento colombiano de construcción sismoresistente (NSR-10)

2.8.3 Análisis Modal

El análisis modal es el proceso para determinar las características dinámicas del sistema en forma de frecuencias naturales, factores de amortiguamiento y forma de los modos, luego de obtener todos los datos necesarios se usan para formular un modelo matemático para su comportamiento dinámico. El modelo matemático obtenido es el llamado modelo modal de un sistema y su información es referida como su información modal. Este análisis es una herramienta muy utilizada en la ingeniería civil para la caracterización dinámica de las estructuras.

Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico. La mayoría de los sistemas tienen muchos modos de vibración y es la tarea del análisis modal determinar la forma de esos modos. La vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración, pero no todos están excitados al mismo grado. Es por ello que una vez conocidos los modos se debe elegir el método en que se combinaran para obtener la respuesta total de

la estructura por excitación en una dirección y para determinar los resultados de los modos combinados para los movimientos en varias direcciones.

Existen varios métodos para el cálculo de la respuesta máxima total de una estructura que dependen de las frecuencias propias del sistema. Cuando las frecuencias están bien separadas se puede usar el método de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) para obtener la respuesta máxima modal, sin embargo cuando las frecuencias poseen valores consecutivos muy cercanos entre si el método anterior puede arrojar resultados errados ya que se pueden subestimar o sobreestimar la respuesta real total de la estructura analizada, en este caso se debe usar el método de la combinación cuadrática completa (CQC) que tiene sus fundamentos en la teoría de las vibraciones aleatorias y proporciona mejores resultados que el SRSS. El método CQC calcula la respuesta máxima total de la estructura a través de la ecuación:

$$R_{MAX} = \sqrt{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q R_i \rho_{ij} R_j} \quad (2.1)$$

Donde:

R_i = es la contribución del modo i a la respuesta

ρ_{ij} = es el coeficiente de acoplamiento modal

El análisis modal está basado en la respuesta de vibración de un sistema linear dinámico de tiempo invariante que puede ser expresado como la combinación lineal de los modos naturales de vibración. Este concepto es similar a utilizar la combinación de Fourier de senos y cósenos de las ondas para representar una onda compleja. Los modos naturales de la vibración son determinados completamente por sus propiedades físicas (masa, dureza y amortiguamiento) y su distribución espacial.

Cada modo esta descrito en términos de sus parámetros modales: frecuencias naturales, los factores de amortiguación modal y las características de patrones de

desplazamiento llamados modos. El modo debe ser real y complejo. Cada uno corresponde a su frecuencia natural. El grado de participación de cada modo natural abarcando toda la vibración correspondiente es determinado por las propiedades del ambiente de excitación y por sus modos en el sistema.

El análisis modal abarca dos técnicas que son la experimental y la teórica. El análisis modal teórico recae en modelo físico de un sistema dinámico comprendiendo su masa, rigidez y propiedades de amortiguamiento. Esas propiedades deben ser dadas en forma de ecuaciones diferenciales parciales. Un ejemplo es la ecuación de la onda de una vibración uniforme con secuencia establecida de su distribución de masa y propiedades elásticas.

La solución de la ecuación provee la frecuencia natural y el modo de respuesta de vibración forzada. Sin embargo, un modelo físico más realista está comprendido con las propiedades de la masa, rigidez y amortiguamiento en términos de su distribución espacial llamadas matrices de masa, rigidez y amortiguamiento. Estas matrices son incorporadas a un conjunto de ecuaciones diferenciales normales de movimiento. El principio de superposición de un sistema dinámico lineal nos deja transformar las ecuaciones en un problema más sencillo, su solución provee la información modal del sistema. El análisis de un elemento finito moderno potencia la solución de casi todas las estructuras dinámicas lineales, además del fortalecimiento de las capacidades y adelanto del análisis modal teórico.

El análisis modal espectral, utiliza como base las frecuencias naturales de los modos de vibración junto con el espectro de diseño para la determinación de las aceleraciones que experimentarán las masas.

Los análisis modales proporcionan los desplazamientos y sollicitaciones máximas probables que permiten el diseño de las estructuras sometidas a cargas dinámicas

2.9 Interacción suelo-estructura

Las estructuras complejas no se comportan de forma independiente del suelo que las soporta.

El proceso en el que la respuesta del suelo influye el movimiento de la estructura, y el movimiento de la estructura influye la respuesta del suelo se denomina interacción suelo-estructura.

En los diseños de estructuras livianas se omiten los efectos de la interacción entre el suelo y la estructura porque los resultados no varían considerablemente, sin embargo este es un punto importante a considerar cuando se realiza el diseño de estructuras pesadas que están apoyadas en suelos relativamente suaves.

Los análisis de interacción suelo-estructura forman parte de un campo especial en la ingeniería sísmica, se considera que estos análisis tienen un efecto positivo en la respuesta sísmica de la estructura. Considerar los efectos de la interacción hace que esta sea más flexible, ya que el valor obtenido de su frecuencia natural considerando el suelo es mayor que la frecuencia natural de la misma estructura sin tomar en cuenta el suelo. En las normas de diseño se estipula que los análisis de respuesta deben ser desarrollados tomando en consideración un sistema estructural completo que incluyan la estructura, la fundación y el suelo.

Para entender mejor como se desarrolla la interacción suelo-estructura se considerará un solo pilote como el de la figura 2.6, se asumirá que la forma deformada del pilote se encuentra en un plano que contenga el eje del pilote, esto solo es válido si:

- El torque del pilote no ejerce ninguna influencia en la deflexión lateral
- Si el momento de flexión resultante en la cabeza del pilote se encuentra en un eje perpendicular a la fuerza lateral resultante.

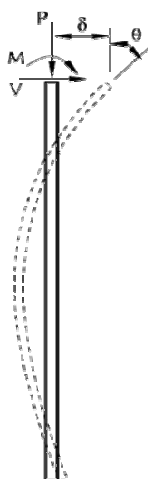


Figura 2. 4: Fuerzas y deflexiones que actúan sobre un pilote
Fuente: Manual SACS 5.3

La primera de estas condiciones puede ser aceptada bajo la restricción de pequeños desplazamientos en el análisis estructural. Las condiciones usuales bajo las que operan las estructuras costa afuera generan momentos de flexión y fuerzas laterales que apenas satisfacen la segunda condición. Vale la pena destacar que no se asume que todos los pilotes se deforman en el mismo plano, cada uno de ellos se deforma en un plano diferente.

Las gráficas de los resultados se pueden desarrollar relacionando cualquier componente de fuerza o momento en el comienzo del pilote con cualquier componente de desplazamiento o rotación en la cabeza del pilote para valores fijos de carga axial, desplazamiento o rotación. Una gráfica típica puede tener la apariencia general de la siguiente figura. La pendiente de una curva en un punto como A se define como el coeficiente de rigidez que relaciona la fuerza o el momento con el desplazamiento o rotación en ese punto A. Está en función del desplazamiento, la rotación o la carga axial.

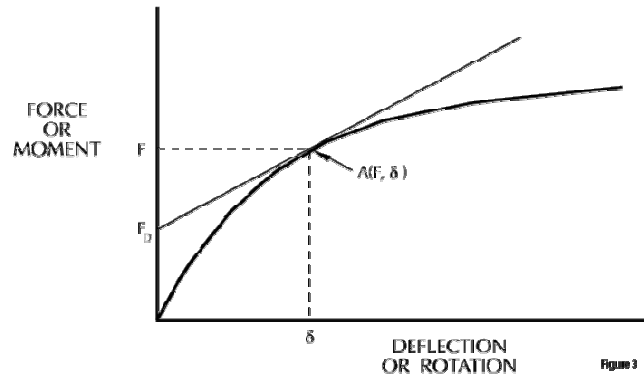


Figura 2. 5: Gráfica de relación entre fuerza y deflexión
Fuente: Manual SACS 5.3

La ecuación de la curva F vs. δ se puede escribir de la siguiente manera:

$$F = K\delta + F_0 \quad (2.2)$$

Donde, K y F_0 son función de δ , θ , y P .

Estas consideraciones son generalizadas para 6 grados de libertad en la cabeza de los pilotes y se escriben en forma de matrices.

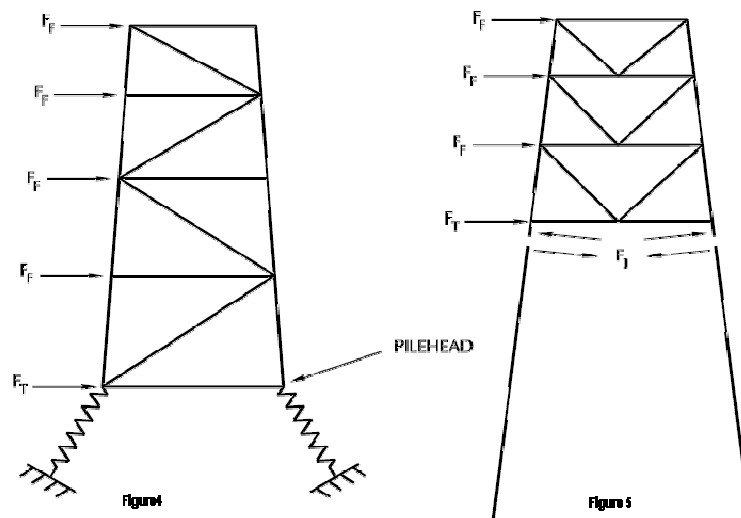


Figura 2. 6: Dibujo esquemático de una plataforma soportada por pilotes
Fuente: Manual SACS 5.3

La figura anterior es un dibujo esquemático de una plataforma soportada por pilotes. Los pilotes no lineares están simbólicamente representados por elementos similares a los resortes en la cabeza de los pilotes.

Los resortes son considerados por el programa SACS como superelementos, estos son miembros ficticios creados para cada pilote con el fin de representar de modo proporcional la relación entre la deflexión y los esfuerzos aplicados en un punto.

Se pueden crear hasta dos matrices de rigidez para cada junta en la cabeza de pilote para ser usado por los módulos dinámicos de SACS al ejecutar los análisis. El programa crea matrices tridimensionales para cada grupo de pilotes que presente propiedades de rigidez lateral en ambas direcciones laterales así como también rigidez axial. Las propiedades de rigidez se derivan del desplazamiento promedio de todos los pilotes del grupo o por los desplazamientos máximos para los casos de carga designados por los usuarios.

Las fuerzas externas son aplicadas sobre toda la estructura incluyendo a las juntas de las cabezas de los pilotes. La relación entre las fuerzas-desplazamiento para la combinación de plataforma-pilotes puede escribirse como una matriz.

Se desarrolla el análisis para cada pilote usando el vector desplazamiento de la cabeza del pilote como su condición límite. Se calcula la fuerza y el momento en la cabeza del pilote, luego se lleva a cabo un segundo análisis con un incremento añadido a los desplazamientos, resultando nuevas fuerzas y momentos. Los coeficientes de rigidez representan la magnitud de los incrementos que se le añaden a cada uno de los desplazamientos o rotaciones para calcular las nuevas fuerza o momento en la cabeza del pilote.

Este proceso se puede repetir para cada iteración en cada cabeza de pilote y para cada caso de carga. Este alcance por muy teórico que parezca, puede requerir un número grande de análisis.

El programa SACS usa un enfoque más sencillo, en vez de hacer análisis a cada pilote por cada iteración de cada caso de carga, realiza un número pequeño de análisis para producir un conjunto de curvas fuerza vs desplazamiento similares a la curva que se mostró anteriormente. Se usan los valores para la carga axial en la cabeza del pilote, deflexión lateral y rotaciones que se encuentren en el rango de los valores esperados para la solución final. El programa realiza un análisis para cada combinación de cargas y rotaciones y guarda los resultados. Para cada iteración, los desplazamientos de la cabeza del pilote son usados para determinar el coeficiente de rigidez que resulta del pilote. Este proceso es continuo hasta que se alcance una convergencia.

A continuación se describen las curvas de comportamiento del desplazamiento debido a la carga axial en el fuste del pilote (T-Z), debido a la carga axial en punta del pilote (Q-Z) y debido a una carga horizontal en el extremo libre del pilote (P-Y):

2.9.1 Curvas de transferencia de carga axial – desplazamiento (T-Z)

El pilote debe ser diseñado para resistir las cargas axiales tanto estáticas como cíclicas. La resistencia axial del suelo proviene de la combinación de la fricción o cohesión axial entre el suelo y el pilote o la transferencia de carga a través de los lados de los pilotes y su resistencia final en el extremo de la pila. La relación entre la transferencia de las fuerzas laterales suelo-pilote y la deflexión local de este a cualquier profundidad se describe usando una curva (T-Z)

Existen diversos métodos teóricos y empíricos disponibles para el desarrollo de las curvas de transferencia de carga axial y desplazamiento de los pilotes (T-Z). Estas curvas pueden ser desarrolladas a partir de las pruebas de cargas realizadas a los pilotes en suelos representativos o basados en pruebas de laboratorio que modelen el comportamiento de los pilotes. En la norma API-2A-WSD, se establecen algunas recomendaciones para generar estas curvas en caso de no poseer datos o criterios definitivos. Las curvas recomendadas se presentan a continuación en la figura 2.6:

Donde:

z = deflexión local del pilote, en mm,

D = diámetro del pilote, en mm

t = fricción o cohesión suelo-pilote, lb/ft^2 (kPa)

t_{max} = fricción o cohesión máxima suelo-pilote o unit skin friction capacity, de acuerdo con la sección 6.4 de la norma, lb/ft^2 (kPa)

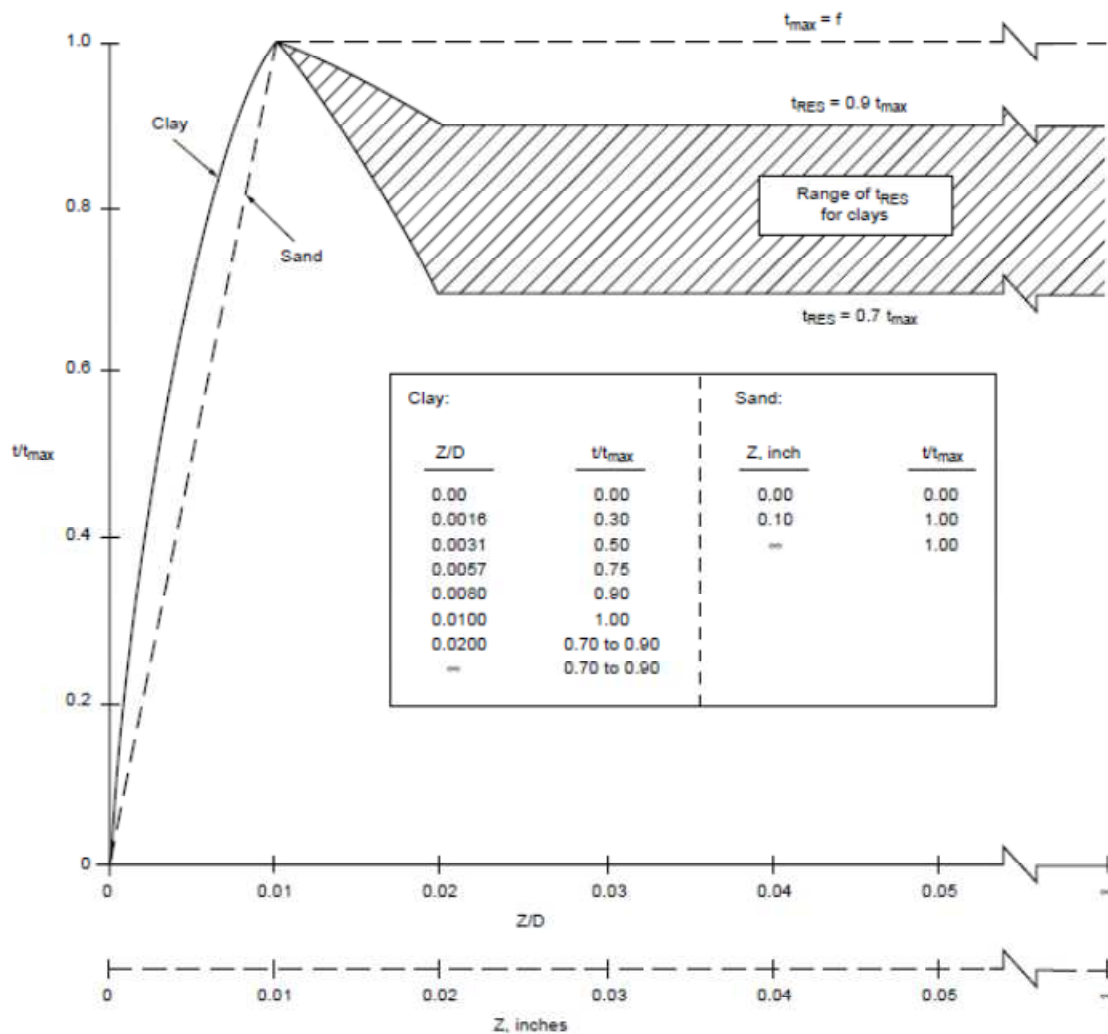


Figura 2. 7: Curvas típicas de transferencia de carga axial - desplazamiento en pilotes (T-Z)

Fuente: Manual SACS 5.3

2.9.2 Curvas de capacidad de carga en la punta – desplazamiento (Q-Z)

Los movimientos significativos de la punta de un pilote pueden lograr que se vea afectada la capacidad de carga al final del pilote. Se requiere un desplazamiento de hasta el 10% del diámetro del pilote para que se altere la capacidad de carga tanto en suelos de arcilla como en arenas. Si no se conocen los datos definitivos para este estudio la norma API-2A-WSD recomienda las siguientes curvas:

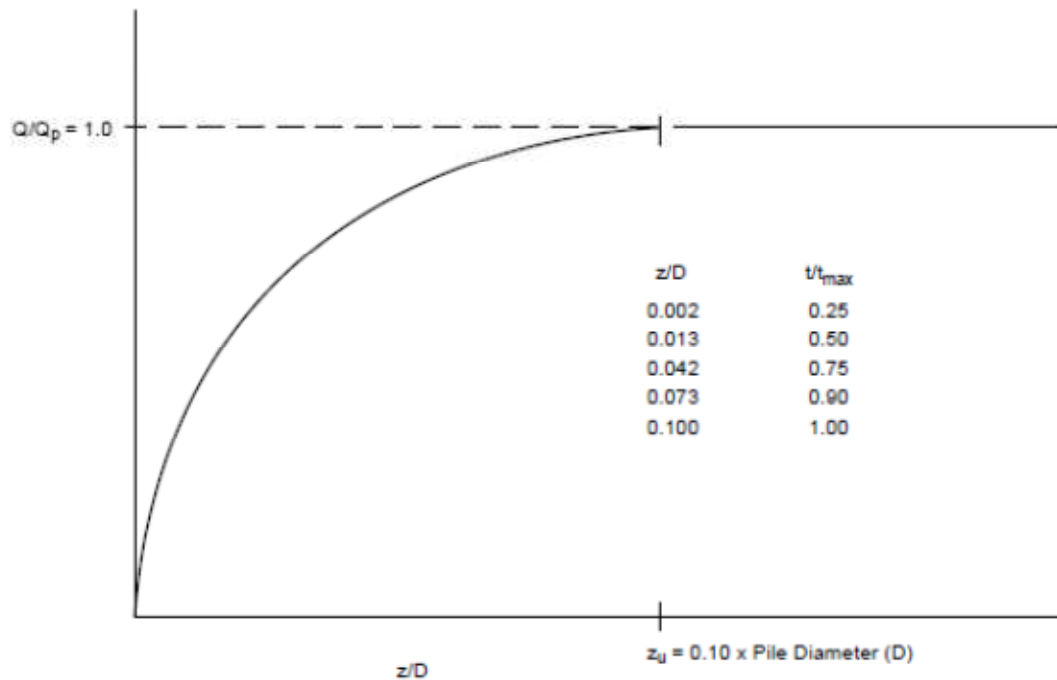


Figura 2. 8: Curva de Carga-Desplazamiento en la punta del pilote (Q-Z)

Fuente: Manual SACS 5.3.

Donde:

z = deflexión axial de punta, en mm,

D = diámetro del pilote, en mm

Q = capacidad total en la punta, lb/ft² (kPa)

Q_p = capacidad total en la punta en lb (KN), de acuerdo con lo estipulado en la sección 6.4 de la API-2A-WSD.

2.9.3 Curvas de resistencia lateral (P-Y)

Los pilotes deben ser diseñados para soportar por si solos las cargas laterales que se generan en la plataforma, bien sean estáticas o cíclicas. La resistencia lateral del suelo cercano a la superficie es importante para el diseño de las fundaciones, la socavación y la perturbación del suelo son dos factores que afectan notablemente el comportamiento del suelo y disminuyen su resistencia.

Generalmente, las arcillas se comportan como un material plástico al ser cargadas lateralmente, esto hace que se asocie la deformación suelo-pilote con la resistencia del suelo. Para facilitar este proceso, se desarrollan las curvas que relacionan la resistencia lateral del suelo con la deflexión, mejor conocidas como curvas P-Y. Estas deben ser construidas usando los datos obtenidos en el laboratorio. En el eje de las ordenadas se representa la resistencia del suelo, p , y en las abcisas la deflexión, y . A continuación se presentan las recomendaciones del American Petroleum Institute en la sección 6.8 de la norma API-2A-WSD para la generación de estas curvas.

2.9.3.1 Curvas P-Y para arcillas

La relación entre la resistencia lateral y la deflexión de pilotes en arcillas blandas generalmente no es lineal. Las arcillas duras también presentan un comportamiento no lineal pero suelen ser más frágiles que las blandas. Existen dos modelos de curvas, una para condiciones de carga estáticas y otra para cargas cíclicas. Las curvas P-Y para cargas estáticas se generan a partir de los siguientes datos:

p/p_u	y/y_c
0.00	0.0
0.50	1.0
0.72	3.0
1.00	8.0
1.00	∞

Figura 2. 9: Valores para definir las curvas P-Y en arcillas blandas para casos de carga estáticos.
Fuente: API-2A-WSD.

Donde:

p = resistencia lateral, en psi (kPa)

y = deflexión lateral, en mm

$y_c = 2.5 \epsilon_c D$, en mm

ϵ_c = tensión que ocurre a la mitad del esfuerzo máximo en ensayos de compresión no drenada en muestras de suelo no perturbadas.

Para cargas cíclicas, se toman en cuenta los mismos datos pero ahora se debe considerar la relación entre X y X_R , donde:

X = profundidad por debajo de la superficie del suelo

X_R = profundidad hasta el fondo de la zona de resistencia reducida.

$X > X_R$		$X < X_R$	
P/p_u	y/y_c	P/p_u	y/y_c
0.00	0.0	0.00	0.0
0.50	1.0	0.50	1.0
0.72	3.0	0.72	3.0
0.72	∞	$0.72 \cdot X/X_R$	15.0
		$0.72 \cdot X/X_R$	∞

Figura 2. 10: Valores para definir las curvas P-Y en arcillas blandas con casos de carga cíclicos.
Fuente: API 2A-WSD

2.9.3.2 Curvas P-Y para arenas

Las curvas carga-deflexión para arenas también son no lineares. En caso de no tener información más específica sobre estos valores las curvas aproximadas pueden obtenerse a cualquier profundidad con la siguiente expresión:

$$P = A \times p_u \times \tanh \left[\frac{k \times H}{A \times p_u} \times y \right] \quad (2.3)$$

Donde:

A = factor que diferencia las cargas estáticas de las cíclicas.

A = 0.9 para cargas cíclicas

A = $\left(3.0 - 0.8 \frac{H}{D} \right) \geq 0.9$ para cargas estáticas

p_u = capacidad ultima de carga a una profundidad H, lbs/in (kN/m)

k = modulo inicial de la reacción de la subrasante, lb/in³. (kN/m). Determinado a partir de la figura 2.10, en función del ángulo de fricción interna ϕ .

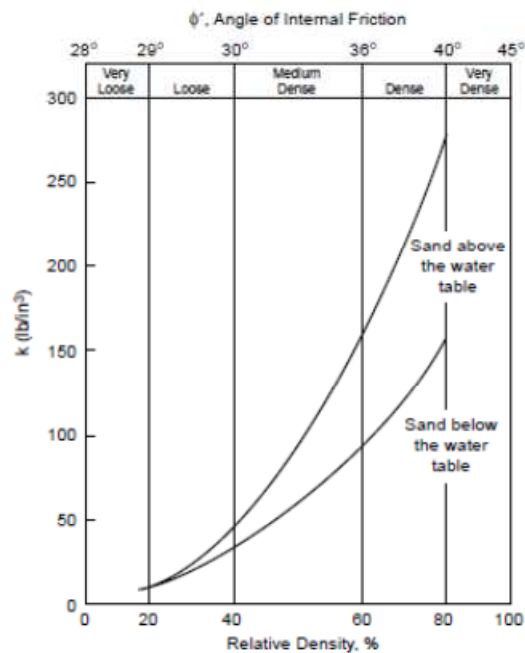


Figura 2. 11: Determinación de módulo k en función del ángulo de fricción ϕ

Fuente: API 2A-WSD

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de este Trabajo Especial de Grado se seleccionó una plataforma fija con un montante de tuberías (*riser*), que corresponde a un proyecto ubicado en la Costa Atlántica de Colombia, en el Municipio de Tolú, Departamento de Sucre, con la finalidad de analizar su comportamiento cuando está sometida a diferentes condiciones de carga. Dicho análisis es realizado con el programa SACS en su versión 5.3.

Tipo de Investigación

Según Álvarez (2005), “Toda tesis debe tener siempre una investigación documental, ya sea como diseño principal o como complemento a otro diseño de investigación que deba ser aplicado según las características particulares del proyecto de investigación.” (Pág. 50). Este Trabajo Especial de Grado incluye dos tipos de investigación que son la documental y la experimental.

Según Arias (2006), la investigación documental es “...un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales y electrónicas.” (Pág. 27).

La investigación documental será usada en este trabajo ya que se debe realizar una recopilación de información fundamental para el diseño de los componentes de una plataforma con montante (*riser*) empleando el apoyo de medios impresos, audiovisuales y electrónicos con el propósito que estos aporten nuevos conocimientos.

Según Álvarez (2005), la investigación experimental “...consiste en someter a experimentos un objeto de estudio y observar sus resultados, poner dicho objeto bajo la influencia de ciertas variaciones y en condiciones controladas por el propio investigador.” (Pág. 51).

En este caso se considera que la investigación experimental es la más relevante porque se realizará el estudio de una plataforma fija con montante (*riser*) considerando la variación e influencia de las condiciones ambientales con el propósito de establecer el diseño una plataforma con montante.

3.1 Nivel de Investigación

En cuanto al nivel, la investigación es explicativa porque su propósito es demostrar los cambios que se generan en la estructura causados por las distintas condiciones ambientales a las que está sometida.

3.2 Metodología

En el presente Trabajo Especial de Grado tiene como propósito dar a conocer el procedimiento correcto para realizar el análisis estructural a la plataforma con montante (*riser*) seleccionada a través del programa SACS, para así determinar cuáles son las variables ambientales más desfavorables a las que se encuentra sometida la estructura. Para ello se efectuaron los siguientes pasos:

3.3.1 Normas internacionales consultadas

Para el desarrollo de esta investigación se recopilaron las siguientes normas internacionales con el fin de usarlas como referencia y guía para los análisis realizados:

- Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design. (API RP2A-WSD 21e).
- Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design) (API RP 1111)

- Offshore Riser Systems (DNV-OSS-302)
- Submarine Pipelines Systems (DNV-OS-F101)
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)

3.3.2 Recopilación de información sobre parámetros de diseños y construcción para estructuras con montantes (*risers*)

Se realizó la búsqueda y recopilación de información en diversas fuentes como libros, artículos, electrónicos y distintas normas API relacionadas, para ampliar los conceptos hasta ahora conocidos de las plataformas costa afuera y los montantes para tuberías ascendentes (*risers*) con el fin de definir los aspectos que se deben tomar en cuenta para su diseño.

3.3.3 Desarrollo del modelo de la estructura en SACS

Una vez obtenida la información necesaria para ampliar los conocimientos sobre el tema de estudio, se procedió a realizar el modelo de la plataforma con montante seleccionada en el programa SACS.

3.3.4 Definir las variables ambientales para el análisis del modelo

Después de realizar el modelo en el programa SACS, se pudieron establecer como variables ambientales oleaje, viento, sismo y condiciones de suelo. En este caso particular de estudio solo se concentró en el sismo, viento y oleaje para poder realizar los análisis con el programa. Como datos del suelo se decidió utilizar los valores de referencia de la norma API para realizar el análisis de interacción suelo-estructura.

3.3.5 Ejecución de los análisis en el modelo

El programa SACS permite realizar diferentes tipos de análisis que dependen de la condición ambiental que se quiera evaluar. Para el estudio realizado se ejecutaron los análisis correspondientes a sismo e interacción suelo pilote.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO

En este capítulo se detalla el procedimiento de los análisis realizados a una plataforma fija con montante (*riser*) en el programa SACS.

4.1 Información general del modelo estudiado

El modelo estudiado corresponde a una plataforma fija con montante (*riser*), a construir en el Golfo de Morrosquillo - Colombia. Para el estudio se tomaron los factores ambientales de oleaje, viento, sismo y las condiciones de suelo, para el oleaje y el viento fueron consideradas tres direcciones, 0, 45 y 90 grados. Es importante aclarar que el programa SACS permite realizar una gran variedad de análisis, en este trabajo especial los análisis se enfocaron al sismo y la interacción suelo-estructura, adicionalmente se realizaron unos análisis previos que incluyeron los factores de oleaje y viento. Los análisis se rigen bajo los parámetros establecidos en la norma API, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design. (API RP2A-WSD).

La estructura estudiada está compuesta por una plataforma de concreto armado de 26,00 metros de largo por 15,00 metros de ancho, se considera el montante y las tuberías ascendentes, las características geométricas de estas estructuras se presentan a continuación:

4.1.1 Plataforma

Número de pilotes: 12.

Inclinación de los pilotes: 0 grados

Espesor de losa: 30,00 cm.

Diámetro de los pilotes: 48"

Espesor de pilotes: 7/8"

Vigas transversales y longitudinales: 1,00 metro de altura por 1,50 metros de ancho.

Profundidad de hincado de los pilotes: 22.5 m.

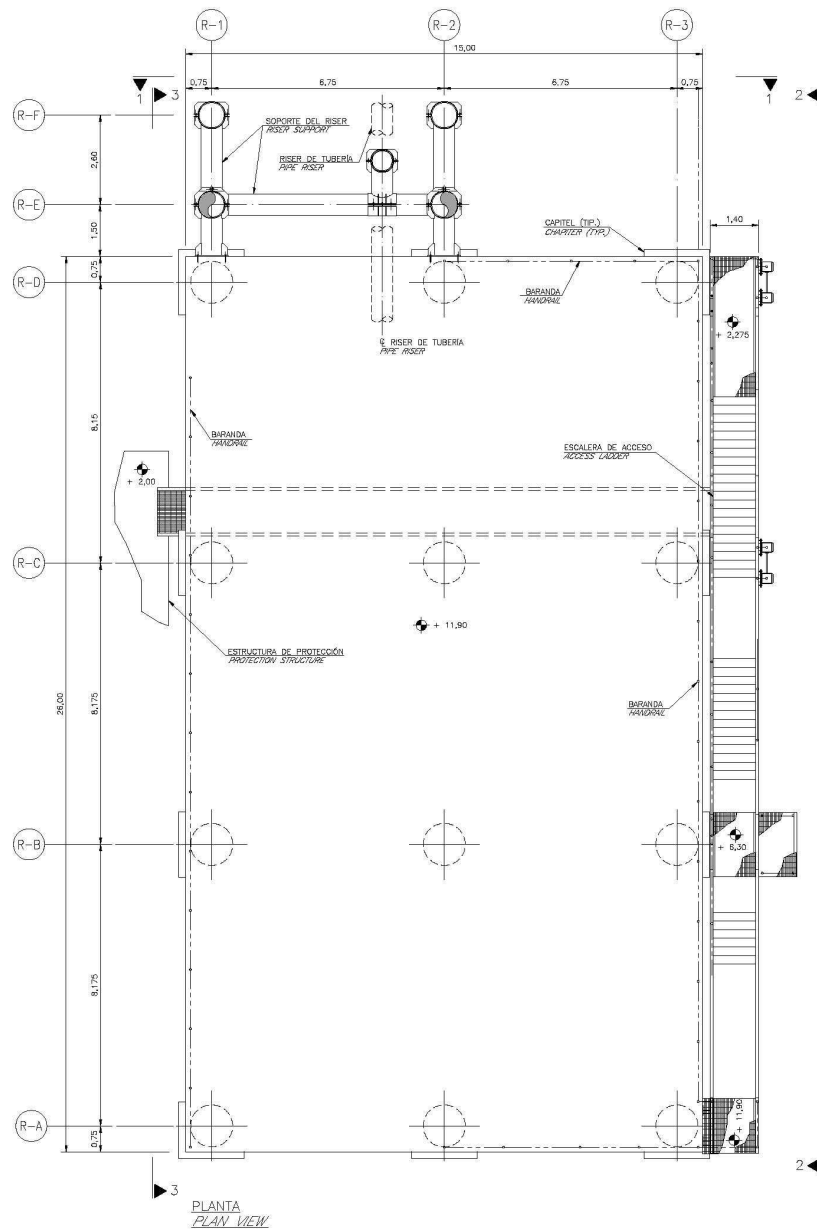


Figura 4. 1: Plano de planta de la plataforma.
Fuente: Nouel Consult.

4.1.2 Montante

Número de pilotes: 4.

Inclinación de los pilotes: 0 grados

Diámetro de los pilotes: 30"

Espesor de los pilotes: 7/8"

Arriostramiento: tubos horizontales de acero con diámetro de 24"

Espesor de los tubos de arriostramiento: 5/8"

Profundidad de hincado de los pilotes: 18 m.

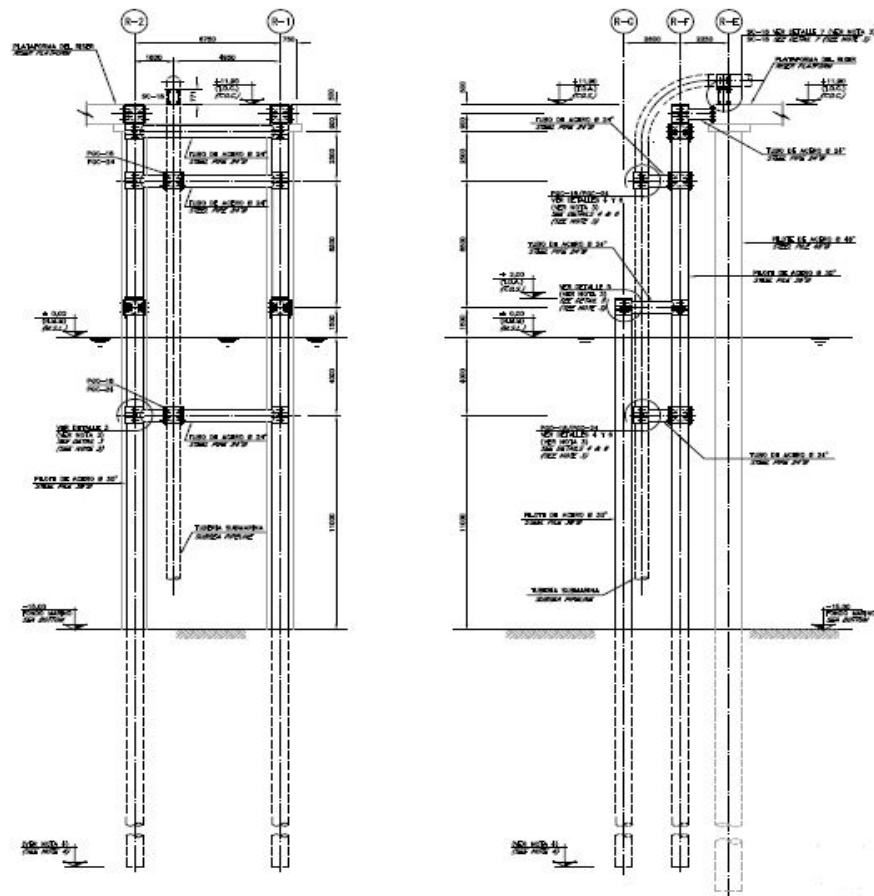


Figura 4. 2: Geometría del montante.

Fuente: Nouel Consult.

4.1.3 Tuberías ascendentes

Número de tuberías: 2.

Diámetro de las tuberías: 18”

Espesor de las tuberías: 7/8”

4.1.4 Propiedades de los materiales

Módulo de elasticidad del acero (E_s): 2.100.000 kg/cm²

Módulo de rigidez transversal (G): 78,76 kg/cm²

Densidad: 7.850 kg/m³

Esfuerzo de fluencia (F_y): 2500 kg/cm²

Resistencia del concreto f'_c : 350 kg/m²

Módulo de elasticidad del concreto (E_c): 28.806.486 kg/cm²

4.2 Datos Ambientales

A continuación se presentan los datos generales del ambiente así como los datos que se conocen para cada factor ambiental:

- Profundidad de agua: 15 m.
- Densidad del agua: 1,03 ton/m³

4.2.1 Viento

Para la estimación de las cargas de vientos sobre la estructura, el cálculo se basó en la normativa “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.”. De acuerdo con esto, los parámetros de diseños utilizados son:

Tabla 4. 1: Parámetros para la fuerza de viento.

Datos de Viento	
Categoría de la Estructura	Tipo IV.
Factor de Importancia	1,15
Exposición	Tipo D
Velocidad de Viento (km/h)	120
Zona	4
Altura de Referencia (ft)	39.36
Direcciones de Viento (°)	0,45 y 90

4.2.2 Oleaje

Los datos de oleaje proporcionados por el estudio metaoceánico son los siguientes:

Tabla 4. 2: Parámetros para la fuerza de oleaje.

Datos de Oleaje	
Tipo de ola	Stream
Altura de ola, Hmax (m)	4.39
Periodo de la ola, Tp (seg.)	8
Densidad del agua, γ (ton/m³)	1.03
Longitud de la ola, L (m)	84.3
Amplitud de paso de la ola (m)	3
Orden de la ola (stream)	13
Direcciones (°)	0, 45 Y 90

4.2.3 Sismo

Para el análisis de sismo fue utilizada la Normativa Sísmica Colombiana NSR-10 como base para el diseño del espectro.

A continuación se presenta los valores del espectro sísmico:

Tabla 4. 3: Parámetros para el espectro de sismo.

Datos de Sismo	
Zona sísmica	Intermedia
Coefficiente de aceleración, <i>A_a</i>	0,10
Coefficiente de Velocidad, <i>A_v</i>	0,15
Coefficiente de capacidad de disipación de energía, <i>R</i>	2

Tabla 4. 4: Valores del espectro sísmico.

Periodo, T (seg)	Sa (g) NSR-10 R=2	Periodo, T (seg)	Sa (g) NSR-10 R=2	Periodo, T (seg)	Sa (g) NSR-10 R=2
0	0.300	1.65	0.180	3.35	0.089
0.05	0.300	1.7	0.175	3.4	0.087
0.1	0.300	1.75	0.170	3.45	0.086
0.15	0.300	1.8	0.165	3.5	0.085
0.2	0.300	1.85	0.161	3.55	0.084
0.25	0.300	1.9	0.156	3.6	0.083
0.3	0.300	2	0.149	3.65	0.081
0.35	0.300	2.05	0.145	3.7	0.080
0.4	0.300	2.1	0.141	3.75	0.079
0.45	0.300	2.15	0.138	3.8	0.078
0.5	0.300	2.2	0.135	3.85	0.077
0.55	0.300	2.25	0.132	3.9	0.076
0.6	0.300	2.3	0.129	3.95	0.075
0.65	0.300	2.35	0.126	4	0.074
0.7	0.300	2.4	0.124	4.05	0.073
0.75	0.300	2.45	0.121	4.1	0.072
0.8	0.300	2.5	0.119	4.15	0.072
0.85	0.300	2.55	0.116	4.2	0.071
0.9	0.300	2.6	0.114	4.25	0.070
0.95	0.300	2.65	0.112	4.3	0.069
1	0.297	2.7	0.110	4.35	0.068
1.05	0.283	2.75	0.108	4.4	0.068
1.1	0.270	2.8	0.106		
1.15	0.258	2.85	0.104		
1.2	0.248	2.9	0.102		
1.25	0.238	2.95	0.101		
1.3	0.228	3	0.099		
1.35	0.220	3.05	0.097		
1.4	0.212	3.1	0.096		
1.45	0.205	3.15	0.094		
1.5	0.198	3.2	0.093		
1.55	0.192	3.25	0.091		
1.6	0.186	3.3	0.090		

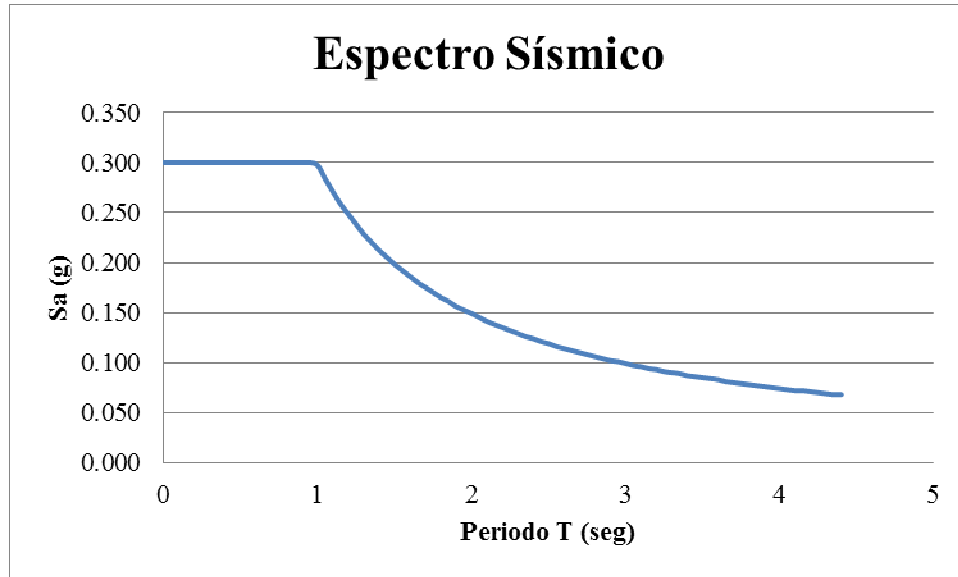


Gráfico 4. 1: Espectro sísmico según NSR-10

4.2.4 Suelo

Para el análisis se consideró un suelo compuesto por dos estratos (arcilla y arena). Abajo se presenta la descripción del suelo usado:

- Estrato N° 1: Arcilla

Tabla 4. 5: Datos del estrato n° 1.

Datos del Suelo	
Espesor del estrato, (m)	9
Esfuerzo no drenado, (kN/cm²)	0,002
Densidad sumergida, γ (ton/m³)	1,12
Peso unitario efectivo, (ton/m³)	1,9
Factor P	1

- Estrato N° 2: Arena

Tabla 4. 6: Datos del estrato n°2.

Datos de Suelo	
Espesor del estrato (m)	21
Coefficiente de presión lateral	1
Resistencia final en el extremo del pilote, (kN/cm²)	0,48
Densidad sumergida, γ (ton/m³)	1,94
Ángulo de fricción del suelo(°)	25
Límite de fricción (kN/cm²)	0.0081
Factor P	1
Peso unitario efectivo, (ton/m³)	2.05

4.3 Cargas Aplicadas

Para el desarrollo de los análisis se tomaron en cuenta diversas cargas primarias, estas cargas son:

- **Peso propio de la estructura (PP)**
Este valor es calculado directamente por el programa.
- **Sobrecarga (L)**
Sobrecarga de 2000 kg/m² aplicada sobre la estructura.
- **Viento de tormenta (WI).**
Presión constante de viento de 90 kg/m², aplicada en tres direcciones: 0, 45 y 90 grados.
- **Oleaje (WA).**
Aplicado en tres direcciones: 0, 45 y 90 grados.
- **Sismo en las direcciones X y Y, respectivamente (Sx,Sy)**

- Flotabilidad (B)

Puede calcularse a través de SACS, sin embargo en este estudio se utilizaron los valores que se obtuvieron cuando se realizó el diseño de la estructura. Es importante aclarar que la flotabilidad varía dependiendo de los siguientes parámetros:

Tabla 4. 7: Resumen de cargas de flotación.

Datos de Flotación			
Diámetro externo (pulg)	48	30	24
Espesor (pulg)	7/8	7/8	5/8
Diámetro externo (m)	1,22	0,76	0,61
Diámetro interno (m)	1,17	0,72	0.58
Peso específico del agua (t/m³)	1,03	1,03	1,03
Flotación (t/m³)	0,086	0,05	0.03

4.4 Combinaciones de Carga

Se presentan las combinaciones de carga de esfuerzos últimos utilizadas para los análisis realizados:

- 1,2 PP + 1,6 L + 1,2 B + 1,2 WA
- 1,2 PP + 1,0 L + 1,2 B + 1,2 WA + 1,6 WI
- 1,2 PP + 1,0 WA + 1,2 B ± Sx ± 0.30 Sy
- 1.2 PP + 1,0 WA + 1,2 B ± Sy ± 0.30 Sx

4.5 Modelo

A continuación se presenta de forma breve como se generó el modelo en el programa SACS 5.3v, el modelado de las estructuras se ha explicado con mayor detalle en trabajos anteriores.

4.5.1 Generación de la estructura en SACS.

Al abrir el programa, en la parte izquierda se encuentra el menú “Interactive”, en él se selecciona “Modeler”. Aparece una ventana llamada “Precede”, aquí se elige la opción “Create New Model” y se introducen los datos básicos que se conocen de la estructura. En la figura 4.3 se puede observar la ventana que aparece para introducir los datos de la plataforma, esta ventana está conformada por varios menús que permiten introducir todos los datos de los diferentes componentes de la plataforma.

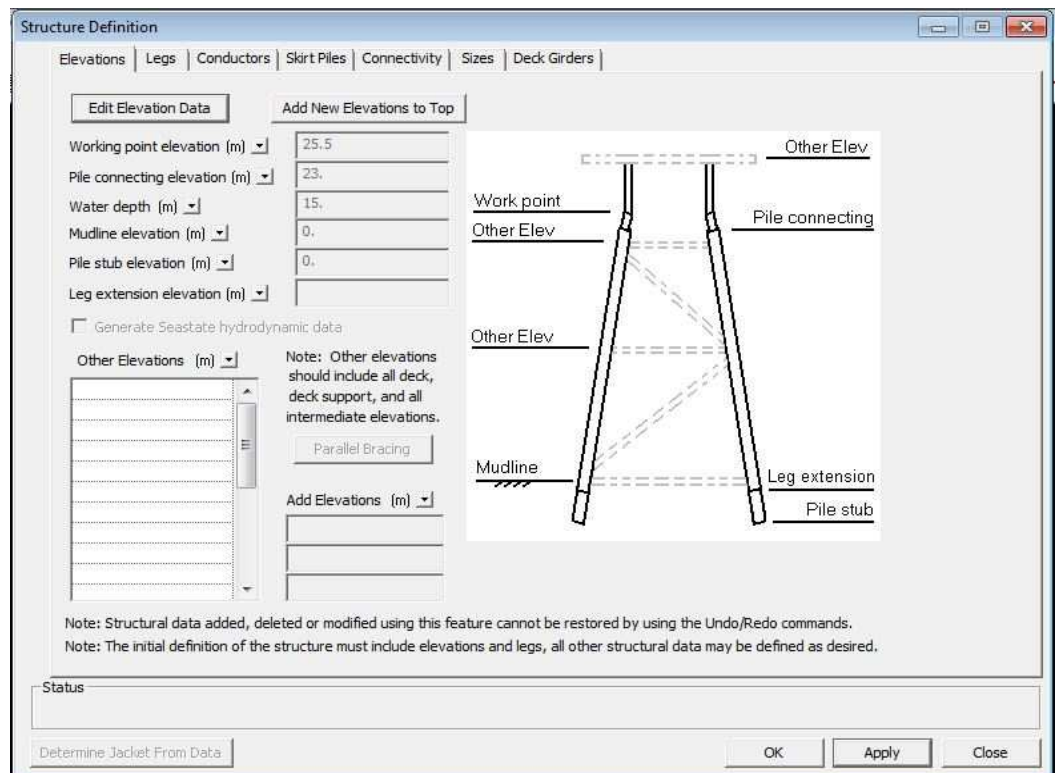
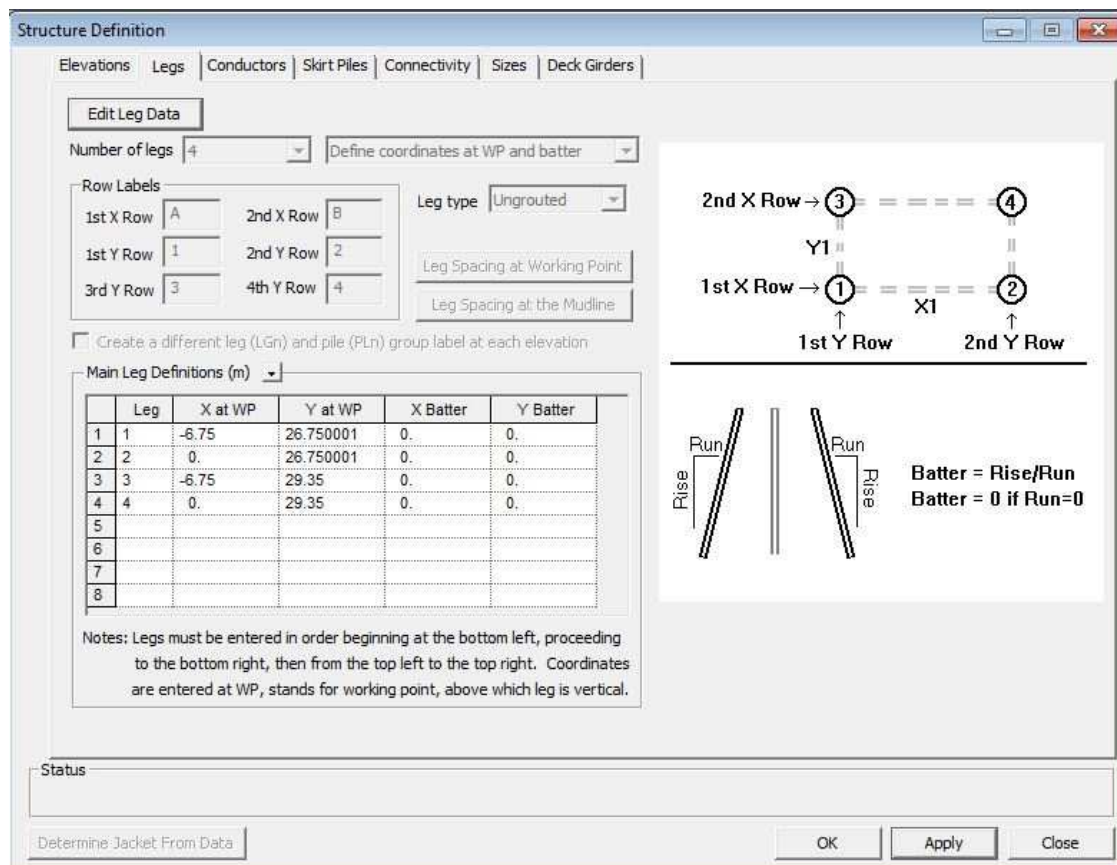


Figura 4. 3: Structure Definition - Elevations. Definición de las elevaciones de la plataforma.

Fuente: SACS 5. 3 V.

Es conveniente mencionar que el programa solo permite introducir un número y una configuración determinada de pilotes, por ejemplo: un solo pilote, tres dispuestos como un triángulo, o cuatro, seis u ocho formando un rectángulo. Para hacer el modelado más sencillo se optó por colocar solo cuatro pilotes correspondientes al montante de las tuberías, como se muestra en la figura 4.4, los demás fueron agregados manualmente una vez que se generó la estructura inicial. Los datos de ubicación e inclinación de los pilotes se introducen en la pestaña “Legs”.



The screenshot shows the 'Structure Definition' dialog box with the 'Legs' tab selected. It includes an 'Edit Leg Data' section with a 'Number of legs' set to 4 and 'Define coordinates at WP and batter' selected. Below this are 'Row Labels' for 1st X Row (A), 2nd X Row (B), 1st Y Row (1), 2nd Y Row (2), 3rd Y Row (3), and 4th Y Row (4). A 'Main Leg Definitions (m)' table is present, and a diagram on the right illustrates the leg layout with labels for '1st X Row', '2nd X Row', '1st Y Row', and '2nd Y Row'. A legend defines 'Batter = Rise/Run' and 'Batter = 0 if Run=0'.

Leg	X at WP	Y at WP	X Batter	Y Batter
1	-6.75	26.750001	0.	0.
2	0.	26.750001	0.	0.
3	-6.75	29.35	0.	0.
4	0.	29.35	0.	0.
5				
6				
7				
8				

Figura 4. 4: Structure Definition - Legs. Definición de los pilotes de la plataforma y su inclinación.

Fuente: SACS 5.3 V.

El programa permite especificar en el menú “Conductors” las tuberías ascendentes. En la figura 4.3 se especifica el número de núcleos, las coordenadas de su

ubicación y el número de tuberías que se desea colocar en cada dirección. En este caso se agregó un solo núcleo con dos tuberías con sus respectivas coordenadas.

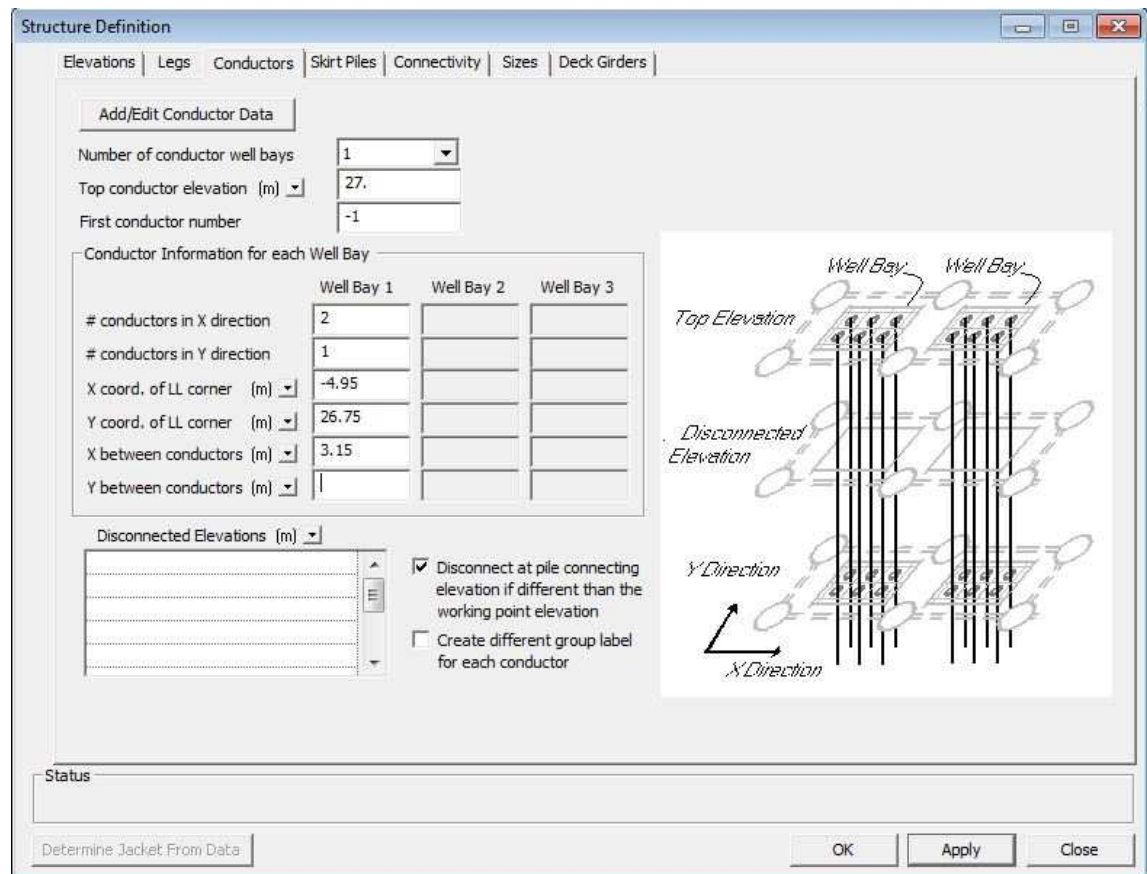


Figura 4. 5: Structure Definition - Conductors. Definición de los conductos de la plataforma.
Fuente: SACS 5.3 V.

Una vez definido los pilotes de la estructura y sus características se deben agregar los demás elementos de la plataforma, como los tapones de concreto que unen los pilotes con la plataforma, las vigas y las placas de esta, y los arriostramientos del montante. En trabajos anteriores se explica detalladamente como incluir estos elementos en el modelo de la estructura.

4.5.2 Visualización de la Plataforma

En la figura 4.6 se puede observar el modelo final de la plataforma en 3D con todos sus elementos.

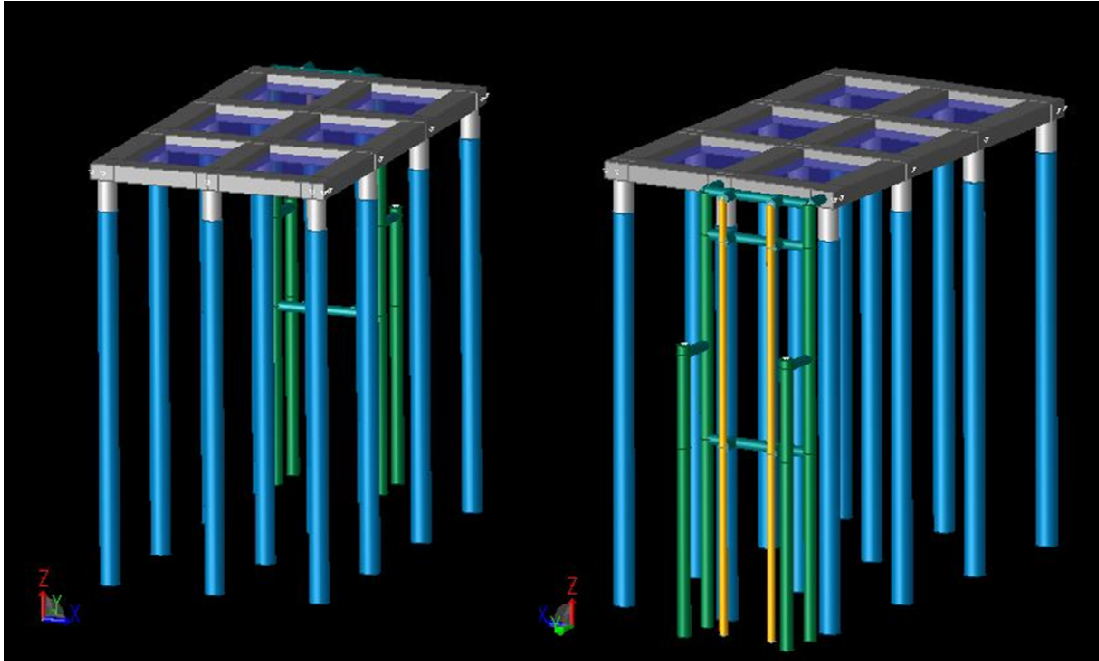


Figura 4. 6: Vista 3D de la plataforma y el soporte del riser.
Fuente: SACS 5.3 V.

4.5.3 Aplicación de cargas

La estructura está solicitada por cargas puntuales y distribuidas, a continuación se describe el procedimiento para agregar dichas cargas en el programa.

En el menú de la aplicación “Precede” aparece la pestaña “Load”, en ella se pueden seleccionar distintas opciones de carga como por ejemplo “Member” donde se puede cargar un miembro en específico o “Member Group” donde se pueden cargar todos los miembros de un mismo grupo. Para la demostración se seleccionó la opción

“Member”, debiéndose completar los campos que aparecen en la ventana “Load Member”.

En el caso de las cargas puntuales se debe seleccionar “Concentrated” en el campo “Load Category”. En la figura 4.5, se observan los campos que deben ser llenados, como el tipo de sollicitación (fuerza o momento), la dirección de aplicación de la carga, su valor (debe incluir el signo para que el programa reconozca el sentido). y la distancia de aplicación de la carga en caso de que esta no se encuentre en la junta.

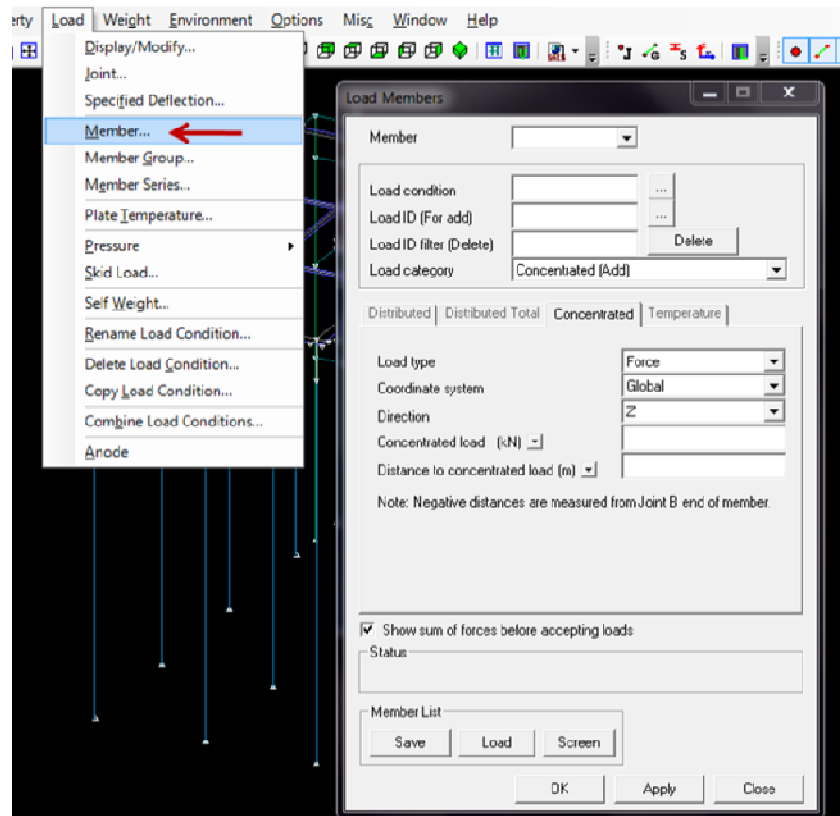


Figura 4. 7: Ventana "Load Members" para cargas puntuales.

Fuente: SACS 5.3 V.

Se debe realizar el mismo procedimiento si se desea agregar una carga distribuida, con la diferencia que se debe colocar en “Load category” la opción “Distributed”. De igual manera se debe especificar la dirección de aplicación de la carga, el tipo de fuerza y la magnitud de la carga. En el campo “Initial load value” se

introduce el valor de la carga, si se desea que la carga sea distribuida en forma rectangular se debe colocar en “Final load value” el mismo valor que se introdujo inicialmente, en caso de que se desee aplicar una carga con forma triangular o trapezoidal se deben cambiar los valores en esta casilla por el que corresponda. En la figura 4.8 se muestra la ventana “Load Member” que aparece en los casos de cargas distribuidas.

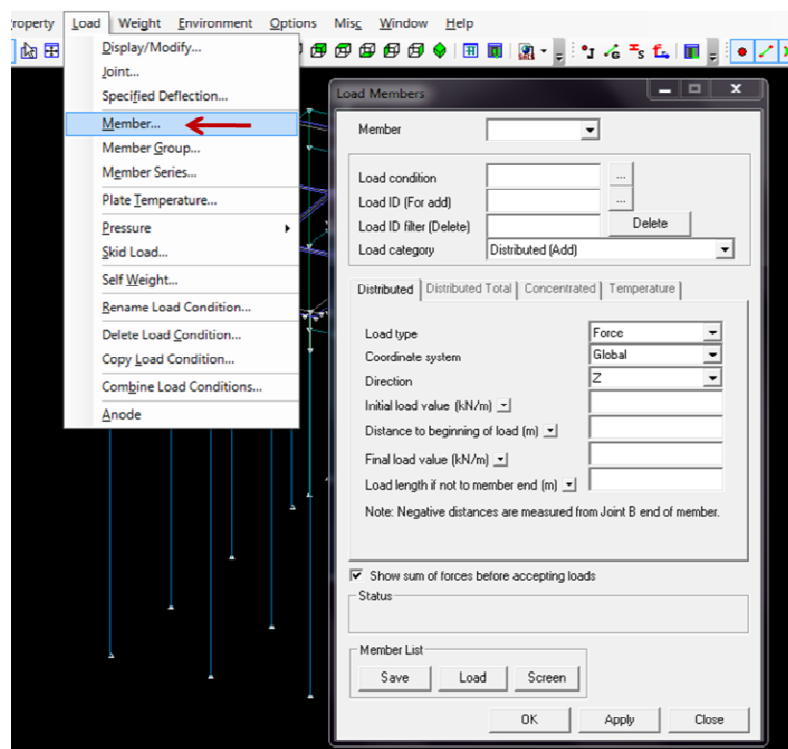


Figura 4. 8: Ventana "Load Members" para cargas distribuidas.

Fuente: SACS 5.3 V.

Para el modelo de estudio se aplicaron las siguientes cargas: Flotación en la dirección +Z y Sobrecarga en la dirección –Z.

4.5.4 Visualización de la estructura deformada

Una vez realizado el análisis deseado, el programa permite visualizar las deformaciones de la estructura luego de haber sido aplicadas las solicitaciones. Para

ello se debe abrir el archivo “psvdb.Nombre”, en la ventana que se despliega aparece la aplicación postvue. En el menú “Display” se selección la opción “Shapes”, luego en la ventana emergente se seleccionan las opciones que se desean a visualizar, como se muestra en la figura 4.9. En la figura 4.10 se muestra un ejemplo de la estructura deformada.

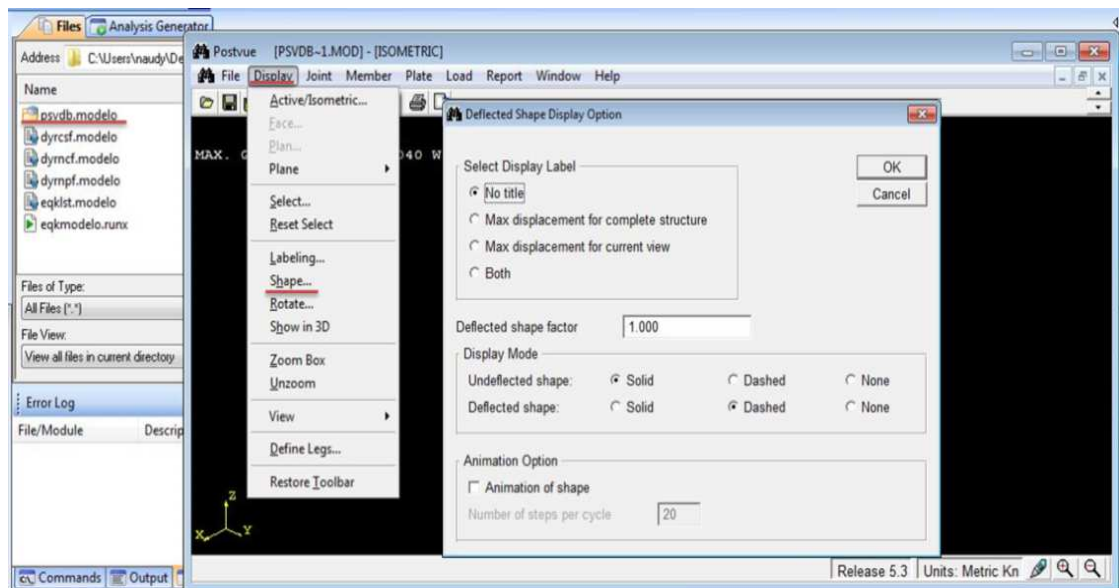


Figura 4. 9: Menú de visualización de la estructura deformada.

Fuente: SACS 5.3 V.

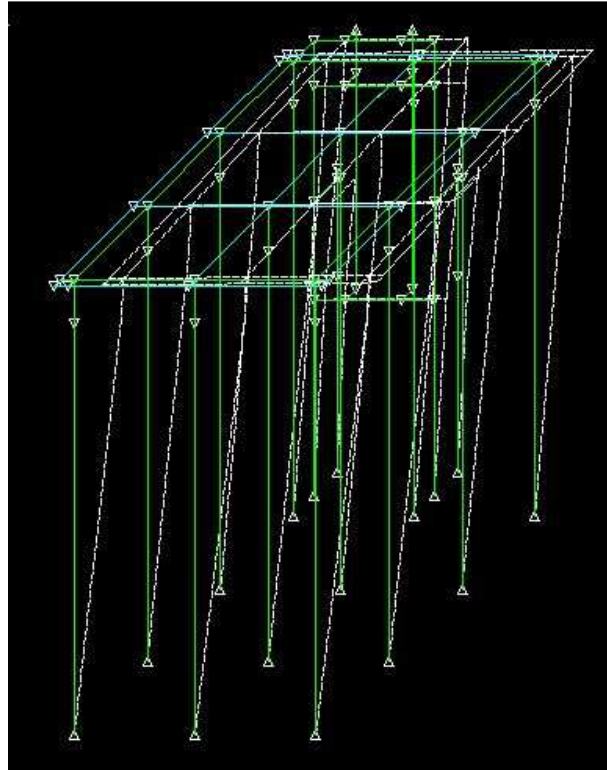


Figura 4. 10: Desplazamientos en la plataforma.
Fuente: SACS 5.3 V.

4.5.5 Observaciones

Durante el modelado de la estructura se observaron algunos detalles que vale la pena mencionar para facilitar el uso del programa y evitar la generación de errores en próximas aplicaciones, como por ejemplo el duplicado de los miembros y juntas, el duplicado de cargas, las opciones de verificación del modelo, visualización y análisis.

Cuando se procede a introducir manualmente los miembros y las juntas, existe la posibilidad que estos se dupliquen y generen inconvenientes al momento de realizar los análisis porque no pertenecen a la estructura y por lo tanto no tienen propiedades asignadas. Basta con posarse sobre el miembro para saber si está duplicado, en este caso se debe ir al menú “Member” en el programa “Precede” y seleccionar la opción “Delete”. Del mismo modo si se posa el cursor sobre una junta se puede observar si

hay algún duplicado, en este caso las juntas duplicadas se pueden unir todas a la junta principal. En el menú “Joint” se selecciona “Merge Multiple Coincident”, como se puede apreciar en la figura 4.11 y aparecerá una ventana donde se seleccionan todas las juntas duplicadas a ser unificadas y el nombre que se le desea asignar.

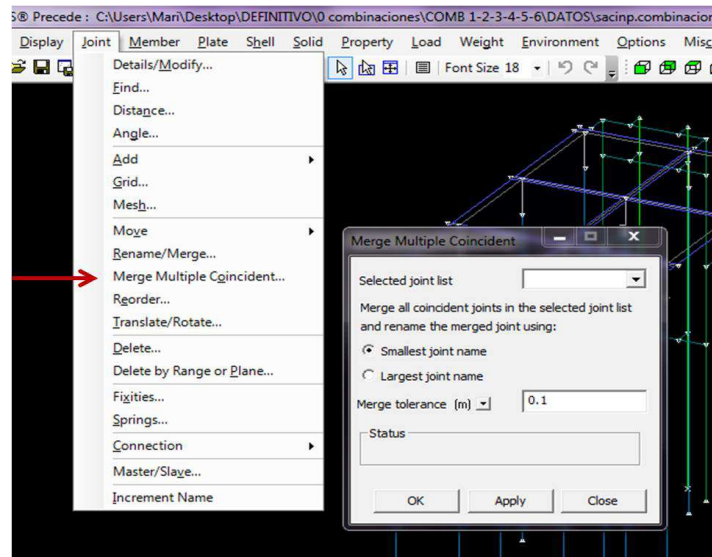


Figura 4. 11: Ventana “Merge Multiple Coincident”.
Fuente: SACS 5.3 V.

En el menú “Display” se encuentra la opción “Labeling”, esta opción permite visualizar las cargas agregadas con sus respectivas direcciones de aplicación, muestra si existen elementos que no están asignados a ningún grupo, permite visualizar los nombres de cada elemento y en qué grupo se encuentran, entre otras cosas. En la figura 4.12 se pueden observar todas las opciones que ofrece este menú.

Las cargas agregadas al modelo se pueden visualizar en la pestaña “Load”, en ella se selecciona la carga o la combinación que se desea ver y se presiona el botón “Apply”. El modelador muestra simultáneamente las cargas en la estructura y una ventana con un resumen de las cargas aplicadas, tal y como se puede observar en la figura 4.13.

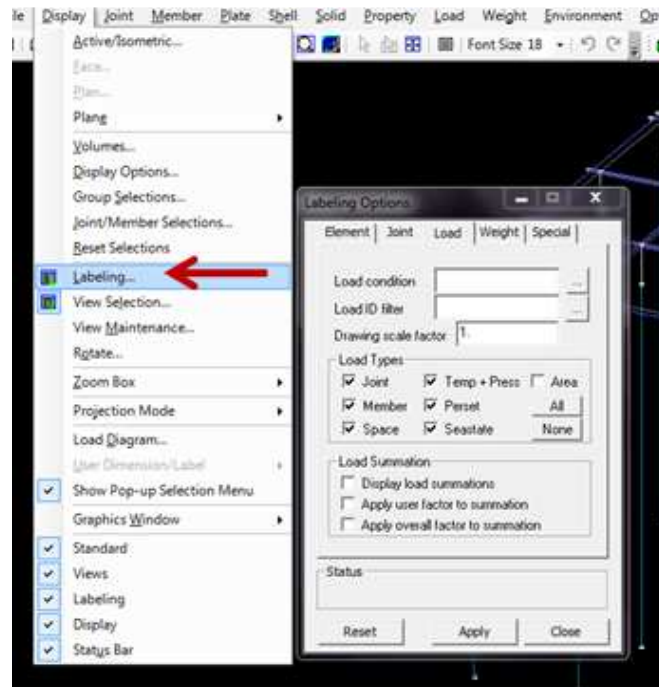


Figura 4. 12: Ventana "Labeling Options".
Fuente: SACS 5.3 V.

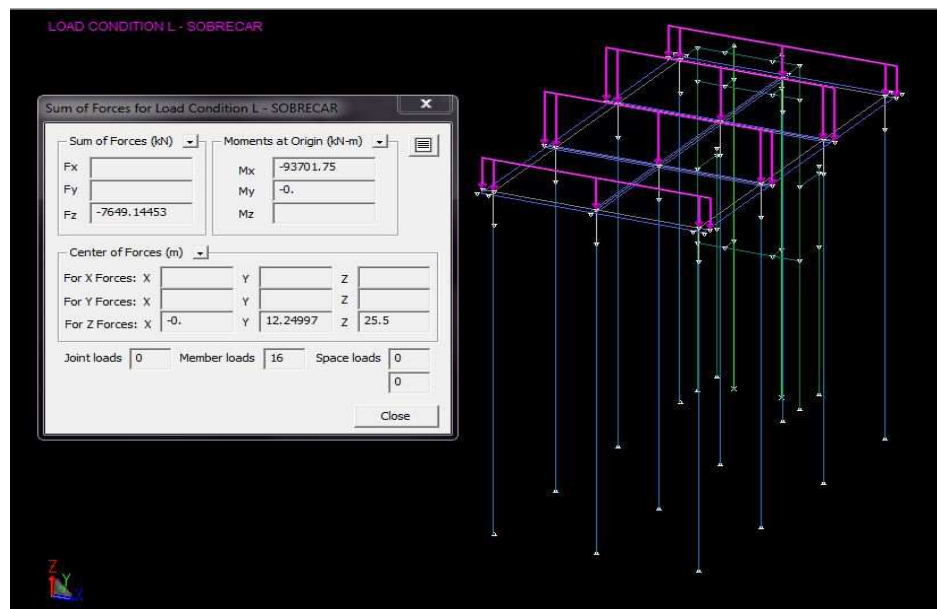


Figura 4. 13: Vista de cargas aplicadas a la estructura y cuadro resumen de fuerzas aplicadas.
Fuente: SACS 5.3 V

Se debe tener especial cuidado al momento de agregar las cargas, ya que como se puede ver en las figuras 4.8 y 4.12 existen tres botones al final de la ventana: “Ok”, “Apply” y “Close”. Una vez introducidos los datos de la carga se debe presionar el botón “Apply” y aparecerá un cuadro resumen como el de la figura 4.14, una vez comprobada la información basta con presionar el botón “Keep” y luego “Close” en la ventana “Load Members” para evitar que se dupliquen las cargas

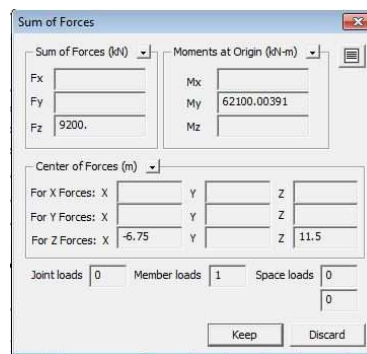


Figura 4. 14: Cuadro resumen de fuerzas y momentos aplicados.
Fuente: SACS 5.3 V.

Una manera rápida de realizar un verificación a la estructura es entrar en el menú “Misc” en el programa “Precede” y seleccionar la opción “Check Model” como se puede observar en la figura 4.15, si encuentra algún elemento o característica que genere un inconveniente o falla esta opción lo reporta.

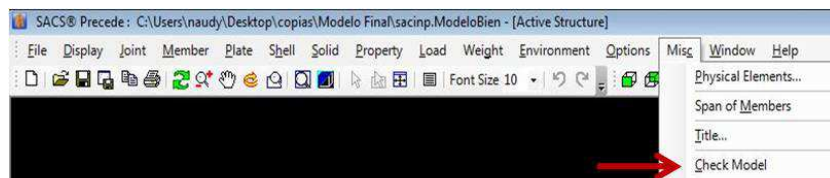


Figura 4. 15: Opciones del menú "Misc".
Fuente: SACS 5.3 V

Como último detalle a destacar se encuentran las opciones de análisis que tiene el programa. Al entrar en el menú “Options” y seleccionar “Analysis...” se genera una nueva ventana donde es posible definir la norma que definirá los métodos de

verificación de los análisis así como los diferentes resultados y verificaciones que se pueden obtener del mismo.

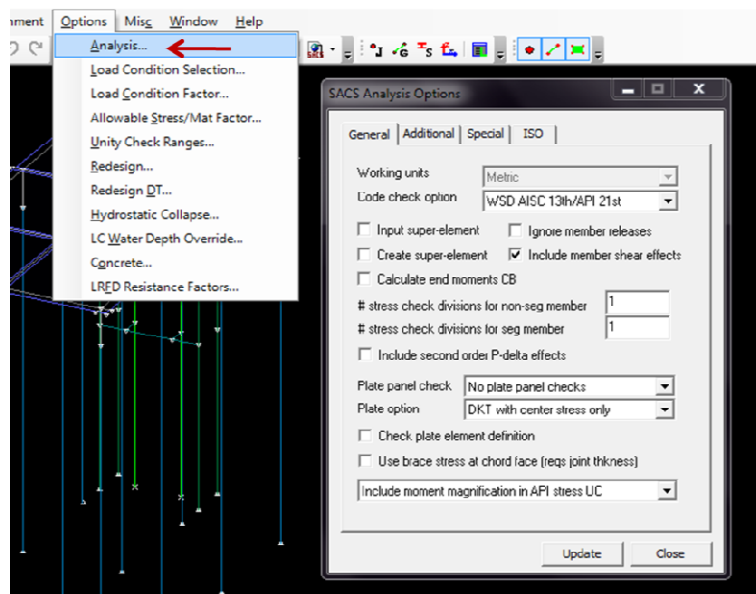


Figura 4. 16: Ventana "SACS Analysis Options".

Fuente: SACS 5.3 V.

4.5.6 Entrada de datos ambientales

Los datos ambientales como viento, oleaje y crecimiento marino se pueden introducir en el modelo de dos maneras diferentes, la primera es introduciendo los datos directamente en el "Precede" como se hizo en trabajos anteriores, o se puede abrir el archivo del modelo con el programa "Data File" que se encuentra en el menú "Interactive", de esta manera se puede ver el modelo en formato de líneas de código y se pueden apreciar los elementos, los grupos, las cargas aplicadas, las opciones de análisis, entre otras cosas. En la ejecución de este Trabajo Especial de Grado se decidió introducir los datos ambientales utilizando la segunda opción por practicidad.

Para incluir los datos ambientales en el archivo del modelo se deben cumplir los siguientes pasos:

- Abrir el archivo del modelo en el programa “Data File”
- Insertar y llenar la línea “LDOPT” (SEASTATE Options) al principio del archivo, para que el programa reconozca que los datos ambientales se encuentran en el mismo archivo del modelo.
- Insertar al final del archivo la línea “LOADCN” (Load Condition). En ella se debe especificar el nombre de la carga y los datos que solicita. Se debe generar una de estas líneas por cada condición de carga que exista. En este caso solo se tomará en cuenta el viento y el oleaje en tres direcciones cada uno, es por ello que se insertaron seis líneas con este comando. Tal como se muestra en la figura 4.17.
- En la línea siguiente se debe especificar únicamente como título la condición ambiental a introducir. En este caso se utilizó “WAVE” (Wave Generation) y “WIND” (Wind).
- A continuación se vuelve a escribir el mismo comando que se escribió como título y esta vez se introducen todos los datos sobre la condición ambiental.

```

LOADCNWI00
WIND
WIND1D          0.90000
LOADCNWA00
WAVE
WAVE1.00STRE  4.39          8.00          L          MS10 1 213
LOADCNWI45
WIND
WIND1D          0.90000  45.00
LOADCNWA45
WAVE
WAVE1.00STRE  4.39          8.00          45.00    L          MS10 1 213
LOADCNWI90
WIND
WIND1D          0.90000  90.00
LOADCNWA90
WAVE
WAVE1.00STRE  4.39          8.00          90.00    L          MS10 1 213

```

Figura 4. 17: Secuencia de código para introducir los datos ambientales.

Fuente: Model File – SACS 5.3 V

4.5.7 Combinaciones de Carga

Para agregar las combinaciones de cargas a las que se someterá el modelo se utilizó para modificar el archivo la opción del programa “Data File”. El procedimiento para generar las combinaciones es el siguiente:

- Abrir el archivo del modelo en el programa “Data File”
- Introducir como tercera línea del código el comando “LCSEL” (Load Case Selection), donde se especifican los nombres de los casos de carga que se consideraran en el análisis.
- Insertar al final del archivo la línea “LCOMB” (Load Combination Input) solo como título, y en la línea siguiente se vuelve a escribir el comando pero esta vez se incluye el nombre de la combinación a estudiar, que ya fue definido en el paso anterior. Esta opción permite introducir todas las cargas que forman parte de la combinación en conjunto con sus factores de mayoración o minoración, dependiendo del caso. Se deben introducir tantas líneas como combinaciones de carga existan, como se observa en la figura 4.18.

```
LCOMB
LCOMB 1   PP  1.2000L   1.6000B   1.2000WA001.2000
LCOMB 2   PP  1.2000L   1.6000B   1.2000WA451.2000
LCOMB 3   PP  1.2000L   1.6000B   1.2000WA901.2000
LCOMB 4   PP  1.2000L   1.0000B   1.2000WI001.2000WA001.6000
LCOMB 5   PP  1.2000L   1.0000B   1.2000WI451.2000WA451.6000
LCOMB 6   PP  1.2000L   1.0000B   1.2000WI901.2000WA901.6000
```

Figura 4. 18: Secuencia de código para introducir las combinaciones de carga.

Fuente: Model File – SACS 5.3 V.

4.6 Análisis previos

Antes de proceder a realizar el análisis espectral y de interacción suelo-estructura se deben llevar a cabo algunos análisis más básicos que se utilizan como base al momento de realizarse los estudios más complejos en el programa SACS 5.3 v. Es necesario generar los archivos de salida de los análisis estáticos, tanto el general como el especial para sismo, así

como el análisis de extracción modal que es fundamental para conocer el comportamiento dinámico de la estructura.

4.6.1 Análisis estático general

El análisis estático es el primer análisis a realizar en cualquier estructura o plataforma. Este considera el comportamiento lineal tanto del material de la estructura como de su geometría. Es capaz de generar las cargas ambientales si se le solicita. Puede tomar en cuenta los elementos de la fundación, los datos ambientales, entre otras características como se puede observar en la figura 4.19.

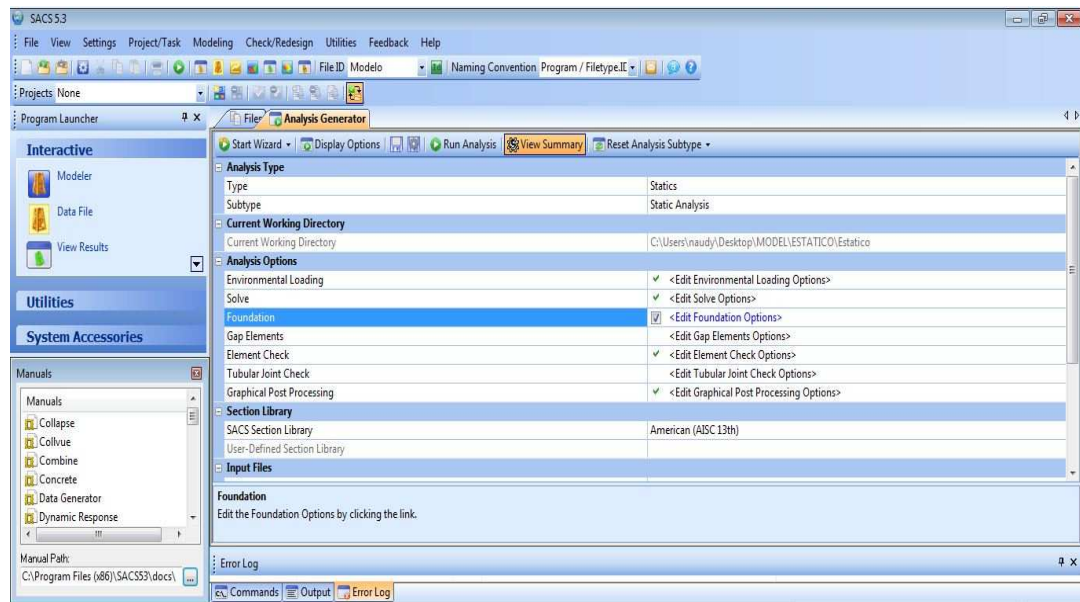


Figura 4. 19: Generador de análisis estático general.

Fuente: SACS 5.3 V.

En la tabla 4.8 se muestran los archivos que son necesarios introducir para el análisis y los archivos de salida que se generan.

Tabla 4. 8: Archivos de entrada y salida del análisis estático general.

	Archivo	Extensión
Input Files	SACS Model File	sacinp.nombre
	PSI Input File	psiinp.nombre
Output Files	Linear Static Load File	seaoci.nombre
	SACS Common Solution File	saccsf.nombre
	Postvue Data Base Directory	psvdb.nombre
	SACS Run File	sacsnombre.runx
Listing Files	Output Listing File	saclst.nombre

La generación del archivo “PSI Input File” se explicará en la sección 4.8, donde se desarrolla el análisis de interacción suelo-estructura.

4.6.1.1 Adaptación del análisis estático para el análisis espectral

Este análisis se ejecuta de la misma manera que el anterior, solo que se debe realizar una modificación en las opciones del programa. Como los resultados del análisis espectral solo son válidos para las juntas de la estructura, el programa recomienda que se tomen en cuenta solo los esfuerzos en las juntas, para realizar este cambio se debe seleccionar la opción “JO” (Stresses at the joints only) en el campo “Stress Options” de la línea “OPTIONS” (Sacs Options), como se puede observar en la figura 4.20 que se muestra a continuación:

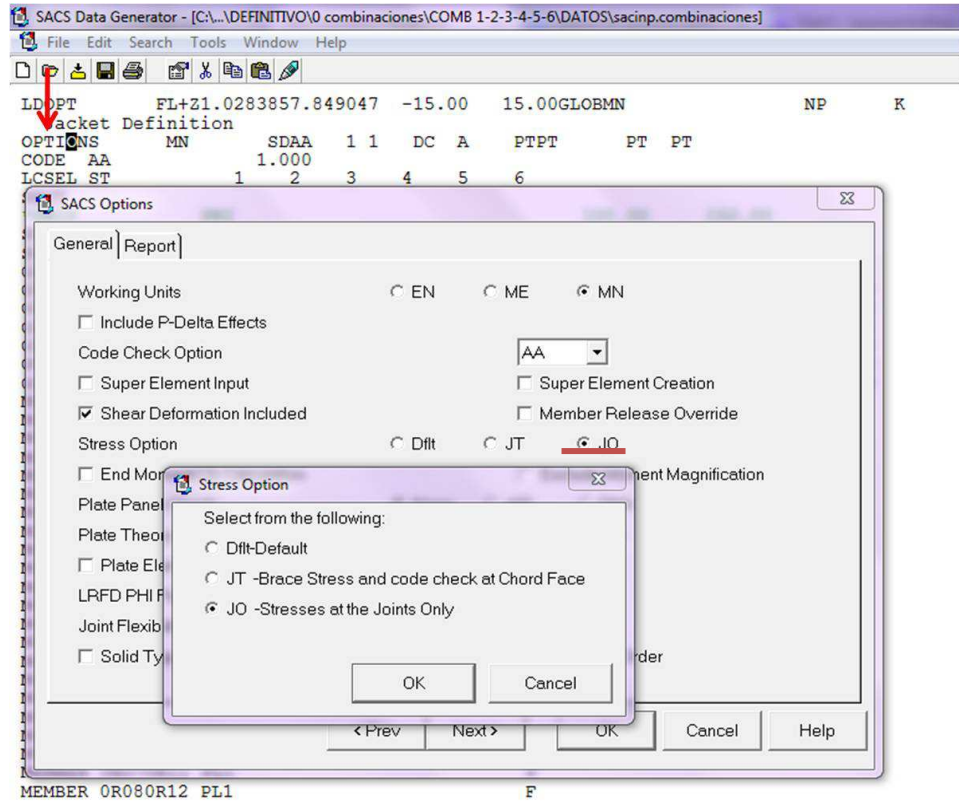


Figura 4. 20: Modificaciones en el modelo para el análisis estático para el análisis espectral.
Fuente: Model File - SACS 5.3 V.

4.6.2 Análisis de extracción modal

Este análisis es necesario para determinar los modos de vibración, la participación de masas y las frecuencias naturales de la estructura. Para realizar el análisis se necesita generar un archivo adicional además del modelo. Una vez que existan los archivos de entrada se ejecuta el programa y se obtienen los archivos de salida.

Tabla 4. 9: Archivos de entrada y salida para el análisis de extracción de modos.

	Archivo	Extensión
Input Files	SACS Model File	sacinp.nombre
	Dynpac Input File	dyninp.nombre
Output Files	Dynpac Modal Solution File	dynmop.nombre
	Dynpac Mass File	dynmass.nombre
	Postvue Data Base Directory	psvdb.nombre
	SACS Run File	sacsnombre.runx
Listing Files	Output Listing File	saclst.nombre

El archivo Dynpac Input contiene la información general del análisis dinámico, este archivo se genera en la opción “Data File” en el menú “Interactive”. Cuando aparece la ventana “Data Generator” se debe presionar la opción “Create New Data File” para generar un archivo nuevo y así poder escoger el tipo de archivo que se quiere crear, en este caso se selecciona el botón “Dynam” y posteriormente de la lista que se muestra se escoge la opción “Dynpac. Se puede apreciar mejor el proceso de generación del archivo “Dynpac” en la figura 4.21.

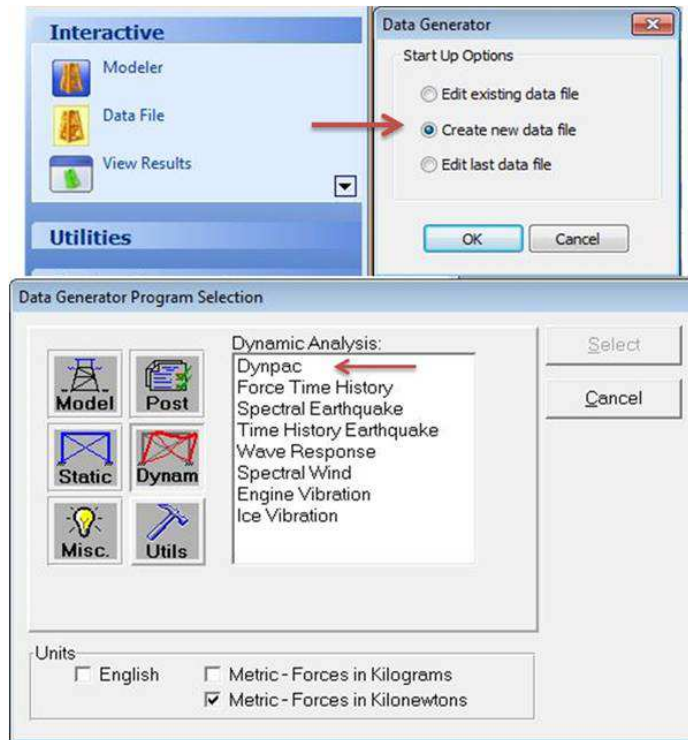


Figura 4. 21: Procedimiento para la creación del archivo DYNPAC.

Fuente: SACS 5.3V.

En la ventana emergente se deben introducir la cantidad de modos que se desean estudiar, la condición de inundación de los miembros, el tipo de método para la conversión de masas que se usará, entre otras cosas. También permite cambiar las propiedades de los elementos si se desea. En este caso, en la línea de código “DYNOPT” (DYNPAC Options) se introdujeron los siguientes datos:

- Unidad de medida: sistema métrico
- Número de modos: 12
- Método para el cálculo de la masa: Se seleccionó el método “Lumped”, que ubica toda la masa de los elementos en los nodos.
- Cargas a ser convertidas en masas: Se tomó la opción de SA, que convierte en masa las cargas definidas en el modelo además de la masa calculada por la opción del Dynpac.

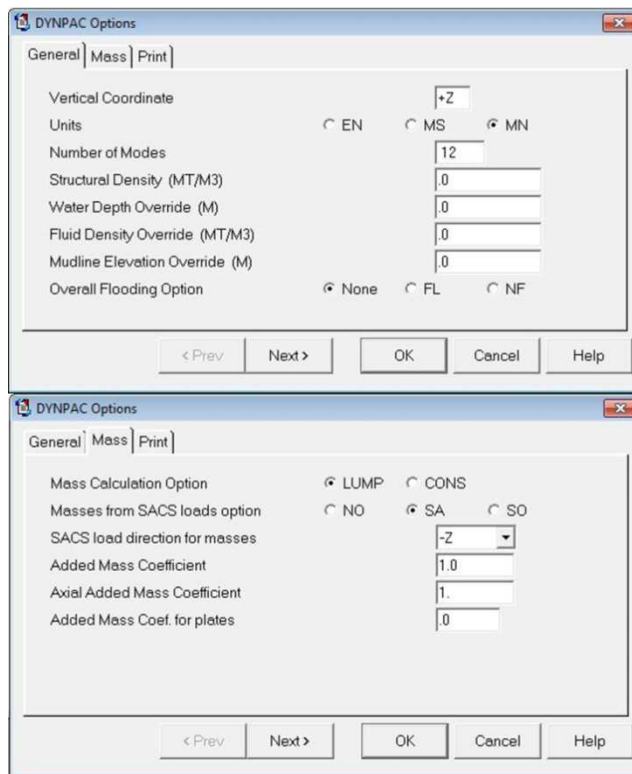


Figura 4. 22: Opciones del archivo "Dynpac".
Fuente: SACS 5.3 V.



Figura 4. 23: Archivo "Dynpac".
Fuente: Dynpac File - SACS 5.3 V.

Previo a realizar el análisis, es necesario verificar en la ventana de "Display Options" en la interfaz principal del programa, que en el módulo "Modal Extraction" este seleccionada la opción "Yes" en el campo "Use Dynpac Input File", como se puede observar en la figura 4.24, para que se pueda incluir este archivo en el análisis. Luego de incluir el Dynpac se procede a realizar el análisis.

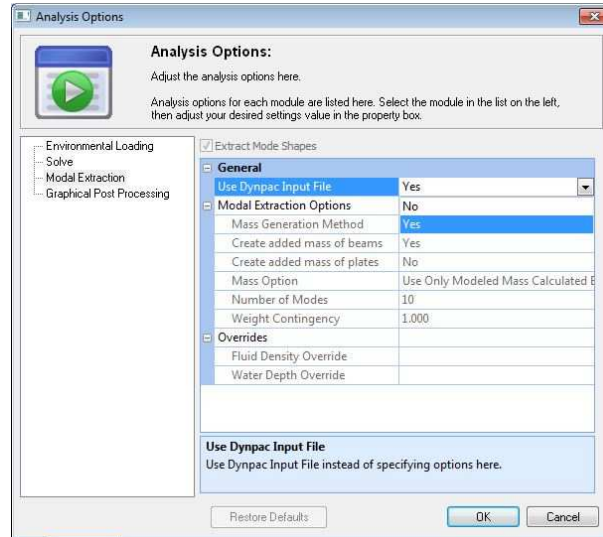


Figura 4. 24: Opciones de análisis de extracción modal.
Fuente: SACS 5.3 V.

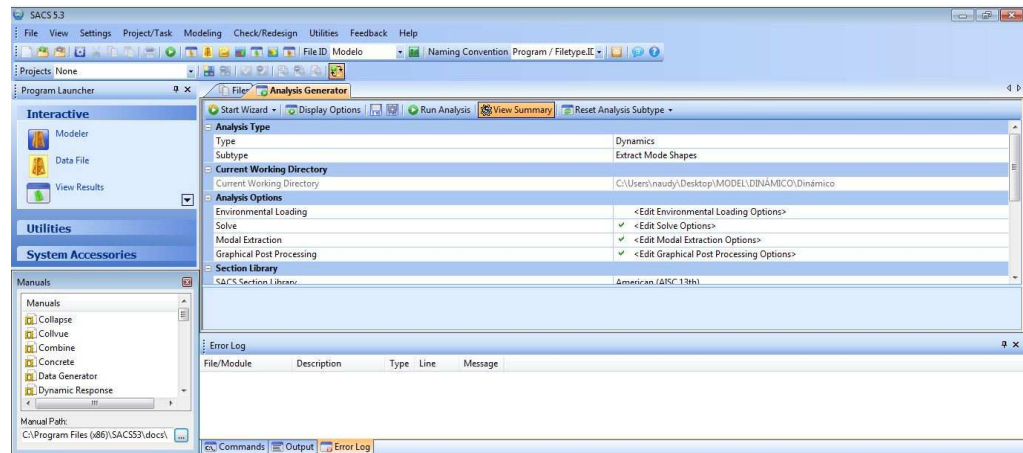


Figura 4. 25: Generador del análisis de extracción modal.
Fuente: SACS 5.3 V.

4.7 Análisis espectral

El análisis espectral es usado para determinar la respuesta de una estructura con respecto a un espectro sísmico de diseño. Este análisis al igual que los anteriores necesita archivos de entrada para poder ejecutar el análisis y generar los archivos de salida. Es

importante mencionar que en este análisis se pueden incluir o no las cargas estáticas, en este estudio si se tomaron en cuenta.

Tabla 4. 10: Archivos de entrada y salida para el análisis espectral.

	Archivo	Extensión
Input Files	SACS Model File	sacinp.nombre
	Earthquake Input File	dyninp.nombre
	Dynpac Modal Solution File	dynmop.nombre
	Dynpac Mass File	dynmass.nombre
	Static Common Solution File	saccsf.nombre
Output Files	Static + Seismic Common Solution File	dyrcsf.nombre
	Earthquake Plot File	dyrnpf.nombre
	Earthquake Neutral Chart File	dyrnch.nombre
	Postvue Data Base Directory	psvdb.nombre
	SACS Run File	eqknombre.runx
Listing Files	Output Listing File	eqklst.nombre

El archivo Earthquake es donde se introduce los datos del sismo, tal como es el espectro, en caso de no tener datos el programa permite utilizar el espectro sísmico establecido en la norma API RP2A-WSD para generar la solución. Para desarrollar el análisis se creó el archivo Earthquake, donde se incluyen las cargas estáticas.

Este archivo se genera en la opción “Data File” en el menú “Interactive”. Cuando aparece la ventana “Data Generator” se debe seleccionar la opción “Create New Data File” para generar un archivo nuevo y así poder escoger el tipo de archivo que se quiere crear, en este caso se selecciona el botón “Dynam” y posteriormente de la lista que se muestra se escoge la opción “Spectral Earthquake”. En la nueva ventana que se generó se deben insertar las siguientes líneas de código:

- “DROPT” (Dynamic Response Options): donde se selecciona la opción de análisis, se establecen el número de modos, la altura de fondo y en base a que parámetros se desean los resultados en las juntas (aceleración, desplazamiento y velocidad).

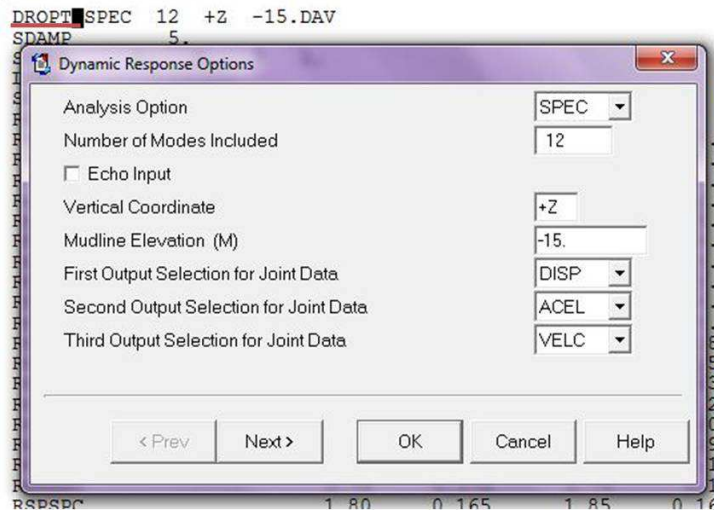


Figura 4. 26: Ventana "Dynamic Response Options".

Fuente: SACS 5.3 V.

- “SDAMP” (Structural Damping): donde se indica el valor de amortiguamiento de la estructura.
- “STCMB” (Static + Seismic Combination): este comando le hace saber el programa que se desea combinar los resultados estáticos con los sísmicos, se crean cuatro combinaciones: dos para la verificación de los miembros y dos para la verificación de las juntas, una de las combinaciones contempla la tensión axial y la otra la compresión. Se deben especificar los factores de carga para la combinación de las cargas sísmicas, el programa recomienda que el factor de carga para la verificación de los elementos y las juntas sea uno, como se puede observar en la figura 4.27. También se deben especificar las cargas estáticas que serán tomadas en cuenta para los resultados y sus factores de carga.

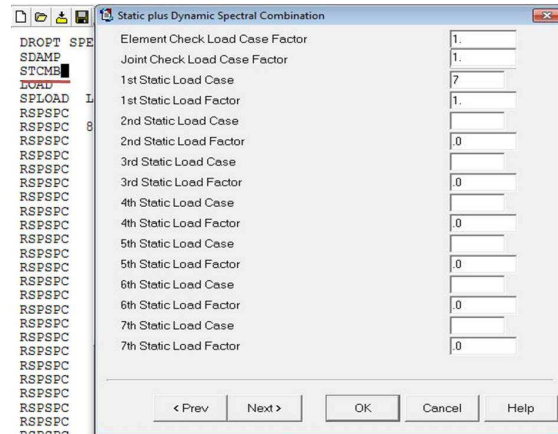


Figura 4. 27: Ventana "Static plus Dynamic Spectral Combination".

Fuente: SACS 5.3 V.

- “LOAD” (Load): en esta línea no se coloca ningún dato, es simplemente para especificar que la información de la carga sísmica se encuentra a continuación.
- “SPLOAD” (Spectral Load): donde se define el espectro que se va a utilizar, las consideraciones del amortiguamiento, el tipo de combinación modal, los factores de respuesta para la dirección en la que se va a aplicar el sismo y la manera en que se presentaran los resultados. Ver figura 4.28.
- “RSPSPC” (Spectral Response): este comando es necesario si se va a introducir en el programa los valores del espectro en función de dos direcciones, se deben introducir tantas líneas como pares de datos existan. En la primera solo se debe especificar el número de espectros a usar, en la segunda se introducen el número de datos que se conocen, la relación de amortiguamiento y los primeros pares de valores del espectro. En las líneas siguientes se terminan de colocar los datos del espectro de respuesta.
- “RSFUNC” (Response Function): esta línea permite seleccionar una junta del modelo para que el programa muestre su comportamiento y resultados en el archivo de salida.

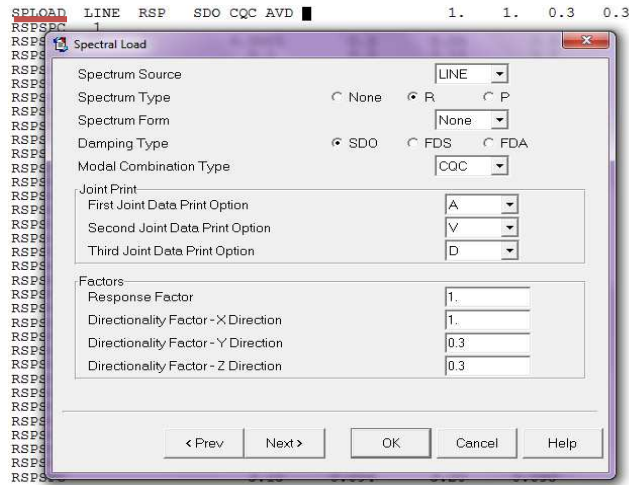


Figura 4. 28: Ventana "Spectral Load".
Fuente: SACS 5.3 V.

Para realizar el análisis espectral se debe seleccionar en “Analysis Type” para la opción de “Dynamics” y como subtipo la opción de “Spectral Earthquake”. Luego se introducen los archivos de entrada que correspondan y se ejecuta el análisis en “Run Analysis”.

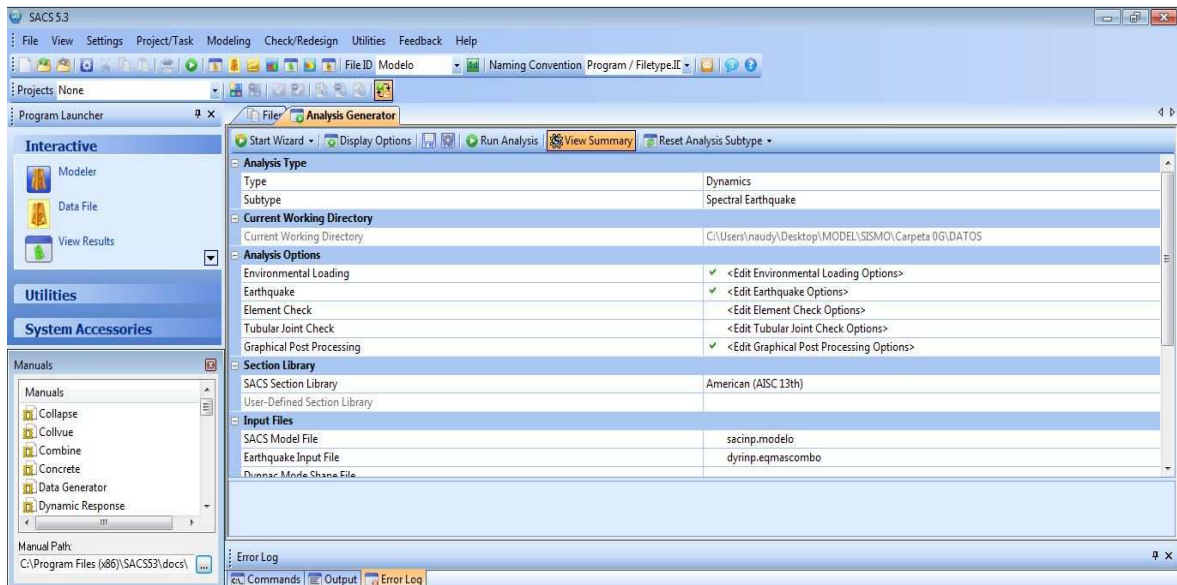


Figura 4. 29: Generador del análisis espectral.
Fuente: SACS 5.3 V.

Luego de ejecutar el análisis se procede a abrir el programa Postvue para poder visualizar el modelo dinámico y los resultados de la relación capacidad-demanda y las fuerzas obtenidas para cada uno de los miembros. Al abrir el archivo “psvdb.Nombre” se debe seleccionar en el menú “Report” la opción “Member” y en este submenú marcar la opción “Element Unity Check”, como se puede observar en la figura 4.30.



Figura 4. 30: Programa Postvue para visualizar la relación capacidad-demanda y las fuerzas de los miembros.
Fuente: SACS 5.3 V.

4.8 Análisis no-lineal de interacción suelo-estructura

Para la interacción del suelo con la estructura el programa considera a los pilotes como un superelemento que se comporta de acuerdo a los resultados del análisis de la interacción del pilote con el suelo.

El análisis no lineal de interacción suelo-estructura analiza el comportamiento de los pilotes sujetos a una o más condiciones de carga. La deflexión de los pilotes y el comportamiento no lineal del suelo se consideran a todo lo largo del pilote. En la tabla 4.11 se encuentran los archivos de entrada para poder ejecutar el análisis y los archivos de salida correspondientes.

Tabla 4. 11: Archivos de entrada y salida para el análisis no-lineal de interacción suelo-estructura.

	Archivo	Extensión
Input Files	SACS Model File	sacinp.nombre
	PSI Input File	psiinp.nombre
Output Files	Linear Static Load File	seaoci.nombre
	SACS Common Solution File	psicsf.nombre
	Postvue Data Base Directory	psvdb.nombre
	SACS Run File	psinombre.runx
Listing Files	Output Listing File	psilst.nombre

El archivo PSI genera la solución axial del pilote, utilizando las fuerzas axiales internas resultantes. En general los suelos presentan un comportamiento no lineal tanto para cargas axiales como transversales, por lo tanto, se utiliza un procedimiento iterativo para encontrar la influencia del pilote en la deflexión de la estructura. Este archivo se genera en la opción “Data File” en el menú “Interactive”, cuando aparece la ventana “Data Generator” se debe presionar la opción “Create New Data File” para generar un archivo nuevo y así poder escoger el tipo de archivo que se quiere crear, en este caso se selecciona el botón “Static” y posteriormente de la lista que se muestra se escoge la opción “Pile Soil Interaction”. En la nueva ventana que se generó se deben insertar las siguientes líneas de código: “PSIOPT” (PSI Option): esta línea debe estar presente en cualquier archivo PSI. En ella se especifica los parámetros generales del análisis, el tipo de análisis y los resultados que se desean reportar.

- “LCSEL” (Load Case Selection): donde se especifican los nombres de los casos de carga que se consideraran en el análisis.
- “PILSUP” (Pile Super Element Creation): este comando se usa para hacerle saber al programa que se creará un superelemento sobre el cual se aplicaran las cargas del PSI. Como se puede observar en la figura 4.31, en esta línea se debe especificar como parte de las opciones del superelemento si se desea que el programa tome el

promedio de las cargas y las deflexiones en la cabeza del pilote o si toma la máxima deflexión para cualquier pilote con la carga seleccionada.

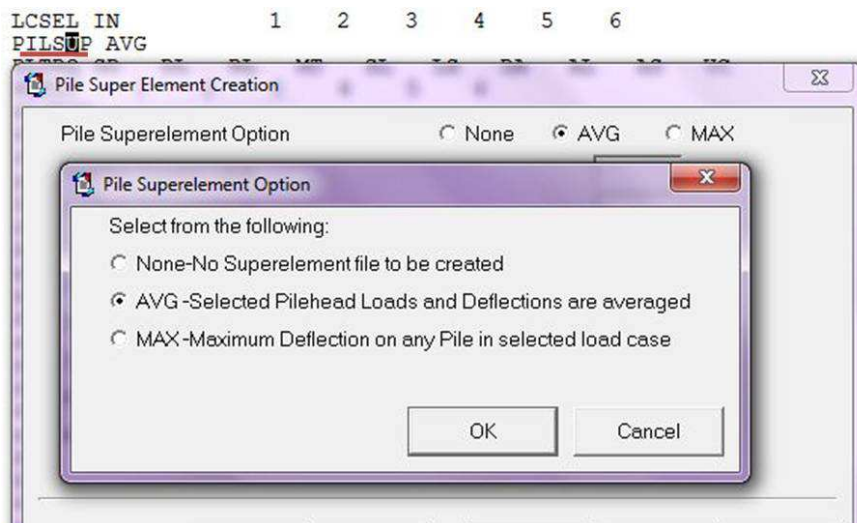


Figura 4. 31: Ventana "Pile Super Element Creation".

Fuente: SACS 5.3. V

- “PLTRQ” (Plot Request): se usa para especificar todo lo referente al modo en que se muestran y reportan los resultados
- “PLTLC” (Load Case Plot Selection): este comando es usado para definir las cargas a ser mostradas en el archivo de salida.
- “PLGRUP” (Pile Group): debe insertarse una primera vez para que solo se encuentre como título y luego se inserta una línea por cada grupo de pilote que exista en la estructura. En ella se especifican todos los datos referentes a los pilotes como por el ejemplo al grupo que están asignados, el diámetro, el material y sus propiedades, entre otras cosas.
- “PILE” (Pile): en este comando se incluye “PILE” para señalar al programa los pilotes que se desean incluir en el análisis. Se escribe una primera vez solo como título y en las siguientes se coloca la información de cada uno de los pilotes que se desean estudiar, como su geometría y el suelo que será utilizado para el análisis.
- “SOIL” (Soil): se inserta solo como título.

- “SOIL TZAPI HEAD” (T-Z API Axial): se usa para definir el nombre del suelo a usar, el número de estratos que se disponen y el método CPT que se usará.
- “SOIL API AXL SLOC” (API Axial Stratum): este comando permite especificar las propiedades del suelo para cada estrato. Estos son los datos que usa el programa para determinar las curvas P-Y y T-Z. Se debe insertar esta línea para cada uno de los estratos del suelo.
- “SOIL TORSION HEAD” (Torsion Linear or Adhesion): esta línea permite generar la resistencia torsional del pilote que resulta de la adhesión o fricción del suelo que lo rodea. Si no se disponen de los datos necesarios se deja como título la línea.
- “SOIL LATERAL HEAD” (Lateral Soil): este comando se utiliza para introducir información sobre el pilote y la cantidad de estratos que este atraviesa.
- “SOIL API LAT SLOC” (API Lateral Soil): en esta línea se introducen todas las propiedades del suelo para cada estrato, esta información sirve como dato para generar las curvas P-Y siguiendo las recomendaciones de la API.

Es este caso existen pilotes con diámetros diferentes en un mismo suelo. En “PLGRUP” se especifica los dos grupos existentes de pilotes que son “PL1” y “PL2” con sus respectivas características. Para que el programa pueda ejecutar el análisis en ambos grupos de pilotes se deben crear dos secuencias como se puede ver en la figura 4.32, que vayan desde “SOIL TZAPI HEAD” hasta “SOIL API LAT SLOC” diferenciando entre ellas el nombre del suelo, para la primera secuencia se usó “SOL1” y para la segunda “SOL2”.

```

SOIL
SOIL TZAPI HEAD 2 1. 1.SOL1 UWA
SOIL API AXL SLOC 9. 30. CLAY 0.002 1.12
SOIL API AXL SLOC 9. 30. SAND 1. 0.48 1.94 25. 0.0081
SOIL TORSION HEAD SOL1
SOIL LATERAL HEAD 2 76.2 1.0SOL1
SOIL API LAT SLOC CLAY 9. 1.0 0.002 1.9 1.0
SOIL API LAT SLOC SANDSB 9. 30. 1.0 2.05 25. 1.0
SOIL TZAPI HEAD 2 1. 1.SOL2 UWA
SOIL API AXL SLOC 9. CLAY 0.002 1.12
SOIL API AXL SLOC 9. 30. SAND 1. 0.48 1.94 25. 0.0081
SOIL TORSION HEAD SOL2
SOIL LATERAL HEAD 2 121.92 1.0SOL2
SOIL API LAT SLOC CLAY 9. 1.0 0.002 1.9 1.0
SOIL API LAT SLOC SANDSB 9. 30. 1.0 2.05 25. 1.0

```

Figura 4. 32: Secuencia de códigos para introducir los datos del suelo en archivo PSI.
Fuente: Model File – SACS 5.3 V.

Una vez generados el archivo PSI se procede a realizar la ejecución del análisis no lineal de interacción suelo-estructura. Para la ejecución se debe ir a la ventana principal del programa seleccionar en “Analysis Type” para “Type” la opción de “Statics” y para “Subtype” la opción de “Static Analysis Non-Linear Pile/Structure Interaction”. Luego se introducen los archivos de entrada que correspondan y se ejecuta el análisis en “Run Analysis”.

4.8.1 Generación de gráficas para los datos del suelo

Este análisis se conoce como “Plot Soil Data” y permite graficar la información que se tiene del suelo, enfocado principalmente en la generación numérica y gráfica de las curvas de comportamiento del suelo, tanto axial como lateral.

Para ejecutar este análisis se debe seleccionar como tipo de análisis la opción “Utilities”, y como subtipo “Plot Soil Data”. En la tabla 4.12 se presentan los archivos de entrada necesarios para correr el análisis y los archivos de salida que se obtendrán:

Tabla 4. 12: Archivos de entrada y salida para el ploteo de los datos del suelo.

	Archivo	Extensión
Input Files	PSI Input File	psiinp.nombre
Output Files	Soil Data Neutral Picture File	pilnfp.nombre
	Soil Data Neutral Chart File	pilncf.nombre
	SACS Run File	psinombre.runx
Listing Files	Output Listing File	psilst.nombre

Para que el programa ejecute el análisis se debe usar el mismo archivo PSI que se generó para el análisis estático.

4.8.2 Análisis de un solo pilote

Esta función permite llevar a cabo la interacción suelo-estructura de un solo pilote sin incluir las cargas estáticas ni las características del modelo. Solo se toma en cuenta la geometría de los pilotes y las propiedades del suelo donde se encuentran.

Tabla 4. 13: Archivos de entrada y salida para el análisis de un solo pilote.

	Archivo	Extensión
Input Files	Pile Input File	pilinp.nombre
Output Files	Pile Neutral Picture File	pilnfp.nombre
	SACS Run File	pilnombre.runx
Listing Files	Pile Output Listing File	pillst.nombre

El archivo necesario para ejecutar este análisis se denomina Pile, este es un archivo exactamente igual al PSI, con la única diferencia que debe tener otro tipo de extensión para que el programa lo reconozca. Se puede hacer una copia del archivo PSI y a este cambiarle su extensión a “pliinp.nombre”. Vale la pena destacar que este análisis se puede llevar a cabo tanto en un solo pilote como en un grupo de estos.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los análisis estáticos, de extracción modal, espectral y la interacción suelo-estructura que fueron ejecutados sobre una plataforma fija costa afuera con montante de tuberías en el programa SACS, y se analizan los resultados obtenidos y sus efectos sobre la estructura.

5.1 Análisis estáticos

La primera información que proporciona el análisis estático son las fuerzas y momentos resultantes basales que generan las cargas básicas sobre la estructura, en la figura 5.1 se encuentra una tabla resumen de estos resultados.

***** SEASTATE BASIC LOAD CASE SUMMARY *****							
LOAD CASE	LOAD LABEL	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
		(KN)	(KN)	(KN)	(KN-M)	(KN-M)	(KN-M)
1	PP	0.000	0.000	-11007.842	-142448.641	-1657.655	0.000
2	B	0.000	0.000	183.948	2759.061	108.476	0.000
3	L	0.000	0.000	-7649.144	-93701.766	0.000	0.000
4	WI00	312.417	0.000	0.000	0.000	10024.210	-4445.228
5	WA00	69.800	0.000	0.000	0.000	1133.770	-1013.560
6	WI45	220.912	204.321	0.000	-6411.316	7088.188	-3240.304
7	WA45	41.578	41.578	0.000	-666.929	666.929	-421.004
8	WI90	0.000	288.954	0.000	-9066.967	0.000	-137.254
9	WA90	0.000	46.489	0.000	-748.283	0.000	0.000

Figura 5. 1: Resumen de casos de carga básicos.
Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Como se mencionó en el capítulo anterior, es necesario generar dos soluciones estáticas diferentes, una para el análisis general y otra para el análisis sísmico.

Para desarrollar el análisis estructural de la plataforma se establecieron tres carga básicas; peso propio, carga viva o variable y flotabilidad, estas cargas se combinan con el viento y el oleaje, tanto para el viento como para el oleaje y por ser la estructura simétrica se consideraron tres direcciones: 0°, 45° y 90°. Las combinaciones usadas en el análisis estático son:

- 1,2 PP + 1,6 L + 1,2 B + 1,2 WA
- 1,2 PP + 1,0 L + 1,2 B + 1,2 WA + 1,6 WI

A continuación se muestran como ejemplos en las figuras 5.2 y 5.3 las combinaciones de las cargas básicas con el oleaje y el viento en la dirección 0°, en estas figuras se puede apreciar con mayor detalle cómo están estructuradas las combinaciones seleccionadas para el análisis general, y el resumen de fuerzas y momentos que están generan.

1		1.2 * PP + 1.6 * L + 1.2 * B + 1.2 * WA00					
PP	120.00	USER GENERATED LOADS					
L	160.00	USER GENERATED LOADS					
B	120.00	USER GENERATED LOADS					
WA00	120.00	4.4 M. WAVE AT 0.0 DEG					
		FX (KN)	FY (KN)	FZ (KN)	MX (KN-M)	MY (KN-M)	MZ (KN-M)
PP		0.000	0.000	-13209.411	-170938.375	-1989.186	0.000
L		0.000	0.000	-12238.631	-149922.828	0.000	0.000
B		0.000	0.000	220.737	3310.873	130.172	0.000
WA00		83.760	0.000	0.000	0.000	1360.524	-1216.271
TOTAL		83.760	0.000	-25227.305	-317550.312	-498.491	-1216.271

Figura 5. 2: Combinación de carga 1 para la dirección 0° - Caso 1.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

4		1.2 * PP + 1.0 * L + 1.2 * B + 1.2 * WI00 + WA00					
PP	120.00	USER GENERATED LOADS					
L	100.00	USER GENERATED LOADS					
B	120.00	USER GENERATED LOADS					
WI00	120.00	WIND					
WA00	160.00	4.4 M. WAVE AT 0.0 DEG					
		FX (KN)	FY (KN)	FZ (KN)	MX (KN-M)	MY (KN-M)	MZ (KN-M)
PP		0.000	0.000	-13209.411	-170938.375	-1989.186	0.000
L		0.000	0.000	-7649.144	-93701.766	0.000	0.000
B		0.000	0.000	220.737	3310.873	130.172	0.000
WI00		374.901	0.000	0.000	0.000	12029.053	-5334.274
WA00		111.679	0.000	0.000	0.000	1814.032	-1621.695
TOTAL		486.580	0.000	-20637.818	-261329.250	11984.069	-6955.969

Figura 5. 3: Combinación de carga 2 para la dirección 0° - Caso 4.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Como se mencionó anteriormente en la sección 4.6.1.1, se deben hacer algunos cambios en la configuración del análisis estático si este va a ser usado como dato para ejecutar

posteriormente el análisis de espectral. Es por ello que se debieron crear seis archivos diferentes para ejecutar el análisis estático con el fin de incluir las tres direcciones (0°, 45° y 90°) en las siguientes combinaciones de carga que consideran el sismo:

- 1,2 PP + 1,0 WA + 1,2 B ± Sx ± 0.30 Sy
- 1.2 PP + 1,0 WA + 1,2 B ± Sy ± 0.30 Sx

En la siguiente figura se presentan los resultados del análisis estático en la dirección de 45° para ilustrar las combinaciones de carga con las cuales se ejecutó el análisis sísmico, posteriormente se incluirán las fuerzas sísmicas en dos direcciones.

8	1.2	*	PP + 1.2	*	B + 1.2	*	WA45				
PP	120.00		USER GENERATED LOADS								
B	120.00		USER GENERATED LOADS								
WA45	120.00		4.4 M. WAVE AT		45.0 DEG						
			FX		FY		FZ		MX		MY
			(KN)		(KN)		(KN)		(KN-M)		(KN-M)
											MZ
											(KN-M)
PP	0.000		0.000		-13209.411		-170938.375		-1989.186		0.000
B	0.000		0.000		220.737		3310.873		130.172		0.000
WA45	49.893		49.893		0.000		-800.315		800.315		-505.205
TOTAL	49.893		49.893		-12988.674		-168427.812		-1058.699		-505.205

Figura 5. 4: Combinación de carga 3 para la dirección 45° - Caso 8.
Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Como parte de los resultados que se obtienen una vez realizado el análisis se encuentran los desplazamientos para cada junta por cada caso de carga. En la figura 5.5 se pueden observar las máximas deflexiones que se generan en las juntas más críticas del modelo. En la dirección “x” la junta que más se desplaza es la junta “0014” en todos los casos de carga, con valores que se encuentran aproximadamente entre 0.05cm y 1,95cm, esta junta está ubicada en la parte superior de los pilotes conectado con el tapón de concreto, cercano a la altura de la plataforma. La junta “0040” es la junta que más se desplaza en la dirección “z”, cerca de 3cm para todos los casos de carga. Las juntas que más se desplazan en la dirección “y” son las juntas que se encuentran en el montante con desplazamientos entre 0,2cm y 1,6cm.

LOAD CASE	*** X-DIRECTION ***		*** Y-DIRECTION ***		*** Z-DIRECTION ***	
	JOINT	DEFLECTION CM	JOINT	DEFLECTION CM	JOINT	DEFLECTION CM
1	0014	0.2421	0R10	0.4290	0040	-3.4405
2	0014	0.2355	0R10	0.4540	0040	-3.4407
3	0014	0.1875	0R10	0.4559	0040	-3.4409
4	0014	1.9593	0R06	0.3365	0040	-3.4020
5	0014	1.4516	0R14	1.2501	0040	-3.3770
6	0014	0.1568	0R14	1.6257	0040	-3.3503
7	0014	0.1100	0R06	0.1899	0040	-3.2632
8	0014	0.1035	0R10	0.2123	0040	-3.2634
9	0014	0.0556	0R10	0.2142	0040	-3.2636

Figura 5. 5: Deflexiones máximas para cada caso de carga.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Es importante comprobar si los miembros se encuentran en capacidad de resistir los esfuerzos generados por las combinaciones de carga aplicadas, estas verificaciones se realizan de acuerdo con la norma API RP2A-WSD. Si la relación capacidad-demanda determinada por el programa es mayor a uno, el miembro no cumple, y por lo tanto deberá ser reemplazado por un miembro con mayor capacidad. En la figura 5.6 se muestra un resumen de los valores máximos de la relación capacidad-demanda en los pilotes y en qué caso de carga ocurren.

MEMBER	GROUP ID	MAXIMUM COMBINED UNITY CK	LOAD COND NO.
0000-0012	PL2	0.178	3
0001-0013	PL2	0.237	1
0002-0014	PL2	0.191	4
0003-0015	PL2	0.246	2
0004-0016	PL2	0.309	1
0005-0017	PL2	0.248	2
0006-0018	PL2	0.246	2
0007-0019	PL2	0.306	1
0008-0020	PL2	0.248	2
0009-0021	PL2	0.162	3
0010-0022	PL2	0.214	3
0011-0023	PL2	0.181	5

Figura 5. 6: Valores máximos de la relación capacidad-demanda para cada pilote.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

En general, todos los miembros cumplen con la relación capacidad-demanda satisfactoriamente. Los esfuerzos en los pilotes representan entre el 16% y el 30% de su capacidad, es decir, los pilotes solo necesitan un porcentaje bajo de su capacidad para resistir las cargas aplicadas.

Para las combinaciones de carga donde se incluyen el sismo los valores de la relación capacidad-demanda también cumplen con un amplio margen. En la figura 5.7 se pueden apreciar los resultados para el caso de carga ocho en la dirección 45°, en este caso se señala la condición crítica donde ocurre el valor máximo de la relación.

MEMBER	GRP	MAXIMUM UNITY CHECK	LOAD CASE NO.	MEMBER	GRP	MAXIMUM UNITY CHECK	LOAD CASE NO.
0000-0012	PL2	0.078	8	0000-0012	PL2	0.08	11
0001-0013	PL2	0.117	8	0001-0013	PL2	0.12	11
0002-0014	PL2	0.080	8	0002-0014	PL2	0.08	11
0003-0015	PL2	0.113	8	0003-0015	PL2	0.11	11
0004-0016	PL2	0.134	8	0004-0016	PL2	0.13	11
0005-0017	PL2	0.114	8	0005-0017	PL2	0.11	11
0006-0018	PL2	0.116	8	0006-0018	PL2	0.12	11
0007-0019	PL2	0.135	8	0007-0019	PL2	0.13	11
0008-0020	PL2	0.116	8	0008-0020	PL2	0.12	11
0009-0021	PL2	0.071	8	0009-0021	PL2	0.07	11
0010-0022	PL2	0.103	8	0010-0022	PL2	0.10	11
0011-0023	PL2	0.074	8	0011-0023	PL2	0.07	11

Figura 5. 7: Valores máximos de la relación capacidad-demanda para los caso de carga 8 y 11.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

5.2 Análisis de extracción modal

Las consideraciones de masa son reportadas por el programa indicando, en forma de pesos, como se componen para los distintos componentes.

```

SACS Release 5.3          admin          DATE 08-MAY-2015  TIME 17:39:55  DYN PAGE 6
JACKET DEFINITION

***** WEIGHT AND CENTER OF GRAVITY SUMMARY *****

***** ITEM DESCRIPTION *****          ***** WEIGHT *****          ***** CENTER OF GRAVITY *****
              X              Y              Z              X              Y              Z
              KN              KN              KN              M              M              M

PLATE ELEMENTS                2868.427    2868.427    2868.427          0.000    12.249    25.499
PLATE ELEMENT ADDED MASS      2868.427    2868.427    2868.427          0.000     0.000     0.000
MEMBER ELEMENTS                8139.670    8139.670    8139.670         -0.204    13.184    21.604
LOAD CASES CONVERTED TO WEIGHTS 12920.104  12920.104  12920.104         -0.128    12.838    23.045
***** TOTAL *****          26796.628  26796.628  26796.628         -0.124    11.506    20.403
    
```

Figura 5. 8: Resumen de pesos y centros de gravedad de la estructura.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

En la figura 5.8 se pueden apreciar los pesos de los elementos de la estructura y sus centros de gravedad, también se observa el valor de las cargas del modelo convertidas en peso. En este caso las únicas cargas que fueron tomadas en cuenta para ser convertidas a peso en la ejecución de este análisis fueron el peso propio, la sobrecarga y la masa que fue añadida a la estructura, calculada por el programa. Se consideró el 100% del peso propio de la estructura y solo un 25% de la sobrecarga aplicada.

El programa al realizar el análisis dinámico determina la frecuencia natural y el periodo de la estructura para cada modo de vibración. En la figura 5.9 se puede apreciar que los valores del período y la frecuencia natural son muy semejantes en los dos primeros modos, estos modos corresponden a los grados de libertad “x” e “y”, por lo que la estructura posee un comportamiento similar en estas dos direcciones. El período fundamental de la estructura es 1,86 segundos y posee una frecuencia natural de 0,5372 cps.

SACS IU-FREQUENCIES AND GENERALIZED MASS

MODE	FREQ.(CPS)	GEN. MASS	EIGENVALUE	PERIOD(SECS)
1	0.537246	1.5430628E+03	8.7759477E-02	1.8613451
2	0.553226	2.1006650E+03	8.2762687E-02	1.8075785
3	0.719667	9.3300901E+02	4.8907624E-02	1.3895307
4	1.033920	6.9029674E+00	2.3695511E-02	0.9671925
5	1.033920	6.9029674E+00	2.3695511E-02	0.9671925
6	1.034551	6.8609523E+00	2.3666627E-02	0.9666028
7	1.034551	6.8609523E+00	2.3666627E-02	0.9666028
8	2.206055	5.2125911E+01	5.2048434E-03	0.4532979
9	2.212103	5.1586017E+01	5.1764195E-03	0.4520585
10	2.218158	5.2246660E+01	5.1481972E-03	0.4508245
11	2.224896	5.1734013E+01	5.1170658E-03	0.4494593
12	3.554452	3.8608778E+01	2.0049102E-03	0.2813373

Figura 5. 9: Frecuencia y masas generalizadas para cada modo de vibración.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

***** M O D A L R E A C T I O N S U M M A R Y *****

MOMENTS ABOUT ORIGIN

MODE	FORCE-X KN	FORCE-Y KN	FORCE-Z KN	MOMENT-X KN-M	MOMENT-Y KN-M	MOMENT-Z KN-M
1	-522.797	-64.630	-0.026	1913.5	-12688.0	4731.2
2	84.464	-655.326	-0.721	13319.5	1111.5	-1246.3
3	-118.635	-38.851	-0.130	-212.4	-2487.2	7330.3
4	0.000	-7.741	0.105	92.4	0.4	26.1
5	0.000	-7.741	0.105	92.4	0.4	26.1
6	-7.733	0.000	0.000	0.0	-89.5	215.7
7	-7.733	0.000	0.000	0.0	-89.5	215.7
8	-6.467	-0.161	-0.202	-28.1	2124.6	55.4
9	-4.708	-0.725	-1.314	-122.5	1384.4	88.5
10	-0.025	5.618	-310.764	-1146.2	4.2	0.4
11	-0.245	-4.682	-204.770	-5868.6	17.3	2.7
12	2.604	-269.370	42.686	13236.7	1768.5	-32.6

Figura 5. 10: Resumen de fuerzas y momentos para cada modo de vibración.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Los valores de las fuerzas generadas en cada uno de los modos de vibración aparecen reflejados en la figura 5.10. En el primer modo de vibración se genera una fuerza de - 552,797 kN siendo esta la más significativa en dirección “x”, ocurre algo muy similar en el segundo modo con la diferencia que en este la fuerza más significativa es en la dirección “y” con un valor de -655,326 kN. Se observa que las fuerzas y los momentos máximos generados se encuentran en la dirección “x” para el primer modo de vibración y en la dirección “y” para el segundo modo.

MODE	***** MASS PARTICIPATION FACTORS *****			***** CUMULATIVE FACTORS *****		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.9447903	0.0144404	0.0000000	0.9447900	0.0144400	0.0000000
2	0.0161111	0.9699180	0.0000012	0.9609001	0.9843580	0.0000001
3	0.0249896	0.0026802	0.0000000	0.9858910	0.9870390	0.0000001
4	0.0000000	0.0033758	0.0000006	0.9858910	0.9904140	0.0000002
5	0.0000000	0.0033758	0.0000006	0.9858910	0.9937900	0.0000002
6	0.0033812	0.0000000	0.0000000	0.9892720	0.9937900	0.0000002
7	0.0033812	0.0000000	0.0000000	0.9926530	0.9937900	0.0000002
8	0.0000151	0.0000000	0.0000000	0.9926680	0.9937900	0.0000002
9	0.0000000	0.0000002	0.0000006	0.9926760	0.9937900	0.0000003
10	0.0000000	0.0000111	0.0339329	0.9926760	0.9938020	0.0339360
11	0.0000000	0.0000077	0.0146996	0.9926760	0.9938090	0.0486360
12	0.0000005	0.0052325	0.0001314	0.9926770	0.9990420	0.0487670

*** EFFECTIVE WEIGHT	X	21959.842 KN
	Y	21959.842 KN
	Z	21959.842 KN

Figura 5. 11: Factores de participación de masa para cada modo de vibración

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Como ya se ha mencionado los modos más influyentes son los dos primeros, esto se evidencia al observar que el porcentaje de participación de masas en la dirección “x” correspondiente al primer modo de vibración posee un valor de 94,48% y el porcentaje en la dirección “y” que corresponde al segundo modo posee un valor de 96,99%.

5.3 Análisis espectral

Anteriormente se mencionó que el análisis se hizo en tres direcciones debido a las cargas ambientales aplicadas. En este análisis se usaron los casos de carga 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Al momento de ejecutar el análisis se especificaron los factores de respuesta del sismo para cada dirección en cada combinación, a continuación se presentan los resultados obtenidos de este análisis para la dirección 45° en las dos combinaciones que considera sismo.

MODE	***** MASS PARTICIPATION FACTORS *****			***** CUMULATIVE FACTORS *****		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.8670709	0.0132525	0.0000000	0.867071	0.013253	0.000000
2	0.0147858	0.8901317	0.0000011	0.881857	0.903384	0.000001
3	0.0229339	0.0024598	0.0000000	0.904791	0.905844	0.000001
4	0.0000000	0.0030981	0.0000006	0.904791	0.908942	0.000002
5	0.0000000	0.0030981	0.0000006	0.904791	0.912040	0.000002
6	0.0031031	0.0000000	0.0000000	0.907894	0.912040	0.000002
7	0.0031031	0.0000000	0.0000000	0.910997	0.912040	0.000002
8	0.0000138	0.0000000	0.0000000	0.911011	0.912040	0.000002
9	0.0000073	0.0000002	0.0000006	0.911018	0.912040	0.000003
10	0.0000000	0.0000102	0.0311416	0.911018	0.912050	0.031144
11	0.0000000	0.0000071	0.0134904	0.911018	0.912057	0.044635
12	0.0000004	0.0048021	0.0001206	0.911018	0.916860	0.044755
*** TOTAL MASS						
X	2438.028 MT					
Y	2438.028 MT					
Z	2438.028 MT					

Figura 5. 12: Factores de participación en el análisis sísmico.
Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

El resultado de la participación de masas es el mismo para los tres casos. En la figura 5.12 se puede apreciar que la mayor participación se encuentra en los dos primeros modos, con un porcentaje de 86,70% en “x” en el primer modo y 89,01% en “y” en el segundo modo. Estos valores son importante ya que definen en qué proporción influye la masa en una dirección determinada.

En las figuras que se encuentran a continuación las respuestas para el sismo en la dirección “x” y en la dirección “y”, aplicando el método CQC (Combinación cuadrática completa) ya que este considera la correlación entre los valores modales máximos, de esta manera se obtienen los valores más probables de desplazamientos y fuerzas.

***** RESPONSES FOR CQC METHOD IN X DIRECTION *****

MODE	FREQUENCY (CPS)	ACCELERATION (G)	VELOCITY (CM/SEC)	DISPLACEMENT (CM)	BASE SHEAR (KN)	BASE MOMENT (KN-M)	VERT LOAD (KN)	DAMPING RATIO
1	0.5372	0.187062	54.33164	16.095331	3338.053	134051.359	0.165	2.000
2	0.5532	-0.021531	-6.07289	-1.747081	-454.480	-18221.094	-0.496	2.000
3	0.7197	0.052290	11.33774	2.507348	123.230	4816.705	0.128	2.000
4	1.0339	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
5	1.0339	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
6	1.0346	0.313918	47.34837	7.284056	22.177	589.227	0.000	2.000
7	1.0346	0.313918	47.34837	7.284056	22.177	589.227	0.000	2.000
8	2.2061	0.007625	0.53936	0.058912	0.099	31.198	0.003	2.000
9	2.2121	0.005578	0.39348	0.028310	0.053	15.050	0.015	2.000
10	2.2182	0.000029	0.00206	0.000148	0.000	0.078	0.018	2.000
11	2.2249	0.000286	0.02008	0.001436	0.003	3.589	0.116	2.000
12	3.5545	-0.001597	-0.07009	-0.003138	-0.333	-6.753	-0.053	2.000

** X-DIRECTION BASE SHEAR = 0.336E+04 KN
 ** Y-DIRECTION BASE SHEAR = 363. KN
 ** X-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.146E+05 KN-M
 ** Y-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.135E+06 KN-M
 ** Z-DIRECTION VERTICAL LOAD = 0.455 KN

Figura 5. 13: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección “x” para el caso 8.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

***** RESPONSES FOR CQC METHOD IN Y DIRECTION *****

MODE	FREQUENCY (CPS)	ACCELERATION (G)	VELOCITY (CM/SEC)	DISPLACEMENT (CM)	BASE SHEAR (KN)	BASE MOMENT (KN-M)	VERT LOAD (KN)	DAMPING RATIO
1	0.5372	0.006938	2.01520	0.596987	123.811	4972.057	0.006	2.000
2	0.5532	0.050119	14.13657	4.066880	1057.945	42415.320	1.154	2.000
3	0.7197	0.005138	1.11398	0.246356	12.108	473.259	0.013	2.000
4	1.0339	0.093806	14.15749	2.179311	6.642	178.879	0.090	2.000
5	1.0339	0.093806	14.15749	2.179311	6.642	178.879	0.090	2.000
6	1.0346	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
7	1.0346	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
8	2.2061	0.000057	0.00403	0.000290	0.001	0.233	0.000	2.000
9	2.2121	0.000258	0.01819	0.001309	0.002	0.696	0.001	2.000
10	2.2182	-0.001961	-0.13796	-0.009899	-0.022	-5.217	-1.211	2.000
11	2.2249	0.001641	0.11508	0.008232	0.015	20.565	0.664	2.000
12	3.5545	0.049557	2.17555	0.097413	10.331	209.613	1.637	2.000

** X-DIRECTION BASE SHEAR = 109. KN
 ** Y-DIRECTION BASE SHEAR = 0.106E+04 KN
 ** X-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.425E+05 KN-M
 ** Y-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.437E+04 KN-M
 ** Z-DIRECTION VERTICAL LOAD = 2.09 KN

Figura 5. 14: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección "y" para el caso 8.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

***** RESPONSES FOR CQC METHOD IN X DIRECTION *****

MODE	FREQUENCY (CPS)	ACCELERATION (G)	VELOCITY (CM/SEC)	DISPLACEMENT (CM)	BASE SHEAR (KN)	BASE MOMENT (KN-M)	VERT LOAD (KN)	DAMPING RATIO
1	0.5372	0.056119	16.29949	4.828599	1001.416	40215.410	0.050	2.000
2	0.5532	-0.006459	-1.82187	-0.524124	-136.344	-5466.328	-0.149	2.000
3	0.7197	0.015687	3.40132	0.752205	36.969	1445.012	0.038	2.000
4	1.0339	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
5	1.0339	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
6	1.0346	0.094175	14.20451	2.185217	6.653	176.768	0.000	2.000
7	1.0346	0.094175	14.20451	2.185217	6.653	176.768	0.000	2.000
8	2.2061	0.002288	0.16181	0.011673	0.030	9.359	0.001	2.000
9	2.2121	0.001673	0.11805	0.008493	0.016	4.515	0.004	2.000
10	2.2182	0.000009	0.00062	0.000044	0.000	0.023	0.005	2.000
11	2.2249	0.000086	0.00602	0.000431	0.001	1.077	0.035	2.000
12	3.5545	-0.000479	-0.02103	-0.000942	-0.100	-2.026	-0.016	2.000

** X-DIRECTION BASE SHEAR = 0.101E+04 KN
 ** Y-DIRECTION BASE SHEAR = 109. KN
 ** X-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.437E+04 KN-M
 ** Y-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.404E+05 KN-M
 ** Z-DIRECTION VERTICAL LOAD = 0.136 KN

Figura 5. 15: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección "x" para el caso 11.
Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

***** RESPONSES FOR CQC METHOD IN Y DIRECTION *****

MODE	FREQUENCY (CPS)	ACCELERATION (G)	VELOCITY (CM/SEC)	DISPLACEMENT (CM)	BASE SHEAR (KN)	BASE MOMENT (KN-M)	VERT LOAD (KN)	DAMPING RATIO
1	0.5372	0.023127	6.71733	1.989956	412.702	16573.521	0.020	2.000
2	0.5532	0.167065	47.12189	13.556266	3526.482	141384.406	3.848	2.000
3	0.7197	0.017126	3.71325	0.821188	40.359	1577.531	0.042	2.000
4	1.0339	0.312688	47.19162	7.264370	22.139	596.262	0.301	2.000
5	1.0339	0.312688	47.19162	7.264370	22.139	596.262	0.301	2.000
6	1.0346	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
7	1.0346	0.000000	0.00000	0.000000	0.000	0.000	0.000	2.000
8	2.2061	0.000190	0.01342	0.000968	0.002	0.776	0.000	2.000
9	2.2121	0.000860	0.06064	0.004363	0.008	2.319	0.002	2.000
10	2.2182	-0.006537	-0.45988	-0.032997	-0.073	-17.390	-4.037	2.000
11	2.2249	0.005469	0.38359	0.027439	0.051	68.550	2.212	2.000
12	3.5545	0.165189	7.25184	0.324710	34.438	698.711	5.457	2.000

** X-DIRECTION BASE SHEAR = 363. KN
 ** Y-DIRECTION BASE SHEAR = 0.353E+04 KN
 ** X-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.142E+06 KN-M
 ** Y-DIRECTION OVERTURNING MOMENT = 0.146E+05 KN-M
 ** Z-DIRECTION VERTICAL LOAD = 6.97 KN

Figura 5. 16: Respuesta de la estructura por el método CQC en la dirección "y" para el caso 11.
Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Los resultados presentados son consistentes dado que se había observado que en el primer modo había más participación de masa en la dirección “X”, y el análisis realizado para esta dirección concuerda con ese resultado, ya que las velocidades y los desplazamientos son

mayores para el primer modo, así como las fuerzas cortantes y los momentos generados también lo son. Lo mismo ocurre con el segundo modo en la dirección “Y”.

JOINT	***** TRANSLATIONAL *****			***** ROTATIONAL *****		
	X CM	Y CM	Z CM	X RAD	Y RAD	Z RAD
0R03	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R07	3.359	1.854	0.030	0.0022	0.0052	0.0010
0R13	6.780	2.761	0.045	0.0007	0.0059	0.0015
0R11	6.484	2.727	0.045	0.0007	0.0059	0.0015
0R01	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R05	3.825	1.693	0.050	0.0022	0.0040	0.0011
0R02	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R06	3.825	1.649	0.046	0.0021	0.0040	0.0011
0R04	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R08	3.357	1.808	0.029	0.0021	0.0052	0.0010
0R14	6.777	2.699	0.044	0.0007	0.0059	0.0015
0R12	6.481	2.665	0.044	0.0007	0.0059	0.0015
0R09	6.827	2.728	0.062	0.0014	0.0061	0.0017
0R10	6.826	2.666	0.057	0.0014	0.0061	0.0017
0R15	10.175	3.977	0.080	0.0018	0.0029	0.0024
0R16	10.177	3.900	0.071	0.0018	0.0029	0.0024
0R17	10.798	4.332	0.083	0.0009	0.0019	0.0026
0R18	10.796	4.253	0.073	0.0009	0.0018	0.0027
0009	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0021	10.660	4.136	0.078	0.0012	0.0033	0.0025
0048	11.122	4.335	0.083	0.0004	0.0013	0.0026
0050	11.248	4.387	0.179	0.0004	0.0013	0.0026
0033	11.248	4.335	0.082	0.0004	0.0013	0.0026

Figura 5. 17: Desplazamientos generados por el caso 8.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

JOINT	***** TRANSLATIONAL *****			***** ROTATIONAL *****		
	X CM	Y CM	Z CM	X RAD	Y RAD	Z RAD
0R03	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R07	3.359	1.854	0.030	0.0022	0.0052	0.0010
0R13	6.780	2.761	0.045	0.0007	0.0059	0.0015
0R11	6.484	2.727	0.045	0.0007	0.0059	0.0015
0R01	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R05	3.825	1.693	0.050	0.0022	0.0040	0.0011
0R02	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R06	3.825	1.649	0.046	0.0021	0.0040	0.0011
0R04	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0R08	3.357	1.808	0.029	0.0021	0.0052	0.0010
0R14	6.777	2.699	0.044	0.0007	0.0059	0.0015
0R12	6.481	2.665	0.044	0.0007	0.0059	0.0015
0R09	6.827	2.728	0.062	0.0014	0.0061	0.0017
0R10	6.826	2.666	0.057	0.0014	0.0061	0.0017
0R15	10.175	3.977	0.080	0.0018	0.0029	0.0024
0R16	10.177	3.900	0.071	0.0018	0.0029	0.0024
0R17	10.798	4.332	0.083	0.0009	0.0019	0.0026
0R18	10.796	4.253	0.073	0.0009	0.0018	0.0027
0009	0.000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
0021	10.660	4.136	0.078	0.0012	0.0033	0.0025
0048	11.122	4.335	0.083	0.0004	0.0013	0.0026
0050	11.248	4.387	0.179	0.0004	0.0013	0.0026
0033	11.248	4.335	0.082	0.0004	0.0013	0.0026

Figura 5. 18: Desplazamientos generados por el caso 11.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

En la sección 4.7 se mencionó que al combinar las cargas estáticas con las sísmicas el programa generaba cuatro nuevas combinaciones para la verificación de los elementos y las juntas, como se observa en la figura 5.19 estos casos de carga consideran los resultados de los análisis estáticos y las respuestas sísmicas que se obtienen en este análisis. En la tabla 5.1 se puede apreciar con mayor detalle que representan estas combinaciones, y a continuación en las figura 5.20 y 5.21 se encuentran los resultados obtenidos después de analizar estas nuevas combinaciones para los casos de carga 8 y 11.

```

***** COMBINE PROGRAM OPTIONS *****
JACKET DEFINITION

LOAD CASE  NUMB COMB  AMOD  LOAD CASE DESCRIPTION  UNIT ORIG  FACTOR  SIGN CHANGE  ROT DEFL  STRES
              COMB  TYPE  FACT              LC =
              1     2
1          1  PRST  1.000  EQK + STAT MEMB      P  8      1.000000  000 000  0
              2     2      S  1      1.000000  000 000  0
2          1  PRSC  1.000  EQK + STAT MEMB      P  8      1.000000  000 000  0
              2     2      S  1      1.000000  000 000  0
3          1  PRST  1.000  EQK + STAT JOIN      P  8      1.000000  000 000  0
              2     2      S  1      2.000000  000 000  0
4          1  PRSC  1.000  EQK + STAT JOIN      P  8      1.000000  000 000  0
              2     2      S  1      2.000000  000 000  0

NUMBER OF FINAL LOAD CASES ..... 4

NUMBER OF COMMON SOLUTION FILES .... 2
    
```

Figura 5. 19: Combinaciones generadas para la unión de los fuerzas estáticas con las sísmicas.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Tabla 5. 1: Descripción de las combinaciones de carga estático + sísmico

Caso de Carga	Tipo de Combinación	Descripción
1	PRST	Chequeo de elementos por norma, tensión axial sísmica
2	PRSC	Chequeo de elementos por norma, compresión axial sísmica
3	PRST	Chequeo de juntas por norma, tensión axial sísmica
4	PRSC	Chequeo de juntas por norma, compresión axial sísmica

```

FORCES AND MOMENTS SUMMARY
*** MOMENTS SUMMED ABOUT ORIGIN ***

***** KN *****
LOAD CASE  FORCE(X)  FORCE(Y)  FORCE(Z)  MOMENT(X)  MOMENT(Y)  MOMENT(Z)
1          3429.877  1173.598  7492.014  127264.656  51664.188  -39778.664
2          3429.877  1173.598  7492.014  127264.656  51664.188  -39778.664
3          6859.755  2347.196  14883.035  251713.844  102987.523  -79557.328
4          6859.755  2347.196  14883.035  251713.844  102987.523  -79557.328
    
```

Figura 5. 20: Resumen de fuerzas y momentos para el caso 8.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

```

FORCES AND MOMENTS SUMMARY
*** MOMENTS SUMMED ABOUT ORIGIN ***

***** KN *****
LOAD CASE  FORCE(X)  FORCE(Y)  FORCE(Z)  MOMENT(X)  MOMENT(Y)  MOMENT(Z)
1          1113.834  3493.135  6417.519  150346.141  20731.768  -13816.091
2          1113.834  3493.135  6417.519  150346.141  20731.768  -13816.091
3          2227.667  6986.271  12734.048  297876.812  41122.691  -27632.182
4          2227.667  6986.271  12734.048  297876.812  41122.691  -27632.182
    
```

Figura 5. 21: Resumen de fuerzas y momentos para el caso 11.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

En las figuras anteriores se puede observar el resumen de fuerzas y momentos que se generaron al unir las fuerzas estáticas con las sísmicas para los casos 8 y 11.

A continuación en las figuras 5.22 y 5.23 se presentan los resultados obtenidos para la relación capacidad-demanda de los pilotes de la plataforma como los del montante de tuberías y las fuerzas internas generadas en los miembros seleccionados para las combinaciones de cargas utilizadas para realizar el análisis espectral.

En estas figuras se puede observar que la mayoría de los valores de la relación capacidad-demanda son muy cercanos a uno, es decir que su capacidad es muy cercana a su demanda, lo ideal sería que presentaran un margen más amplio entre estos dos factores.

MEMBER	GRP	MAX. UNITY CHECK	LOAD COND NO.
0R01-0R05	PL1	0.62	2
0R02-0R06	PL1	0.63	2
0R03-0R07	PL1	0.43	2
0R04-0R08	PL1	0.43	2
0006-0018	PL2	0.92	2
0007-0019	PL2	0.96	2
0008-0020	PL2	0.93	2
0009-0021	PL2	0.81	2
0010-0022	PL2	0.84	2
0011-0023	PL2	0.83	2

Figura 5. 22: Relación capacidad-demanda para el análisis espectral.

Fuente: Postvue – SACS 5.3 V.

SACS-IV SYSTEM MEMBER INTERNAL LOADS SUMMARY REPORT											
MEMBER	GRP	MAX. UNITY CHECK	LOAD COND NO.	DIST FROM END	AXIAL	SHEAR Y	SHEAR Z	TORSION	BENDING Y-Y	BENDING Z-Z	
				m	kN	kN	kN	kN-m	kN-m	kN-m	
0R01-0R05	PL1	0.62	2	0.0	-1816.8	-237.57	-92.138	256.35	-1171.6	-3185.8	
0R02-0R06	PL1	0.63	2	0.0	-1414.6	-264.93	-88.193	256.15	-1145.1	3415.2	
0R03-0R07	PL1	0.43	2	0.0	-1798.4	-236.57	98.741	256.49	-1302.4	3191.9	
0R04-0R08	PL1	0.43	2	0.0	-1250.4	203.37	-89.018	255.96	1117.8	-2800.6	
0006-0018	PL2	0.92	2	0.0	-658.62	-103.57	-35.105	-54.044	329.09	-834.55	
0007-0019	PL2	0.96	2	0.0	-690.73	-103.53	-34.051	54.145	325.50	-833.29	
0008-0020	PL2	0.93	2	0.0	-380.60	-31.576	-44.240	-48.281	383.61	-518.20	
0009-0021	PL2	0.81	2	0.0	-385.02	31.392	-43.888	48.413	380.60	-517.82	
0010-0022	PL2	0.84	2	0.0	-350.43	100.86	-31.275	-60.366	-47.961	-565.79	
0011-0023	PL2	0.83	2	0.0	-385.11	-99.952	-32.746	-60.625	-49.215	562.21	

Figura 5. 23: Fuerzas internas generadas en los miembros.

Fuente: Postvue – SACS 5.3 V.

Además del archivo de salida el programa permite escoger la posibilidad de generar gráficos que reflejen los resultados obtenidos. En la figura 5.24 se encuentra la gráfica generada por SACS del espectro sísmico introducido, es el mismo al presentado en el gráfico 4.1 de la sección 4.2.3, solo que cambia la escala a logarítmica.

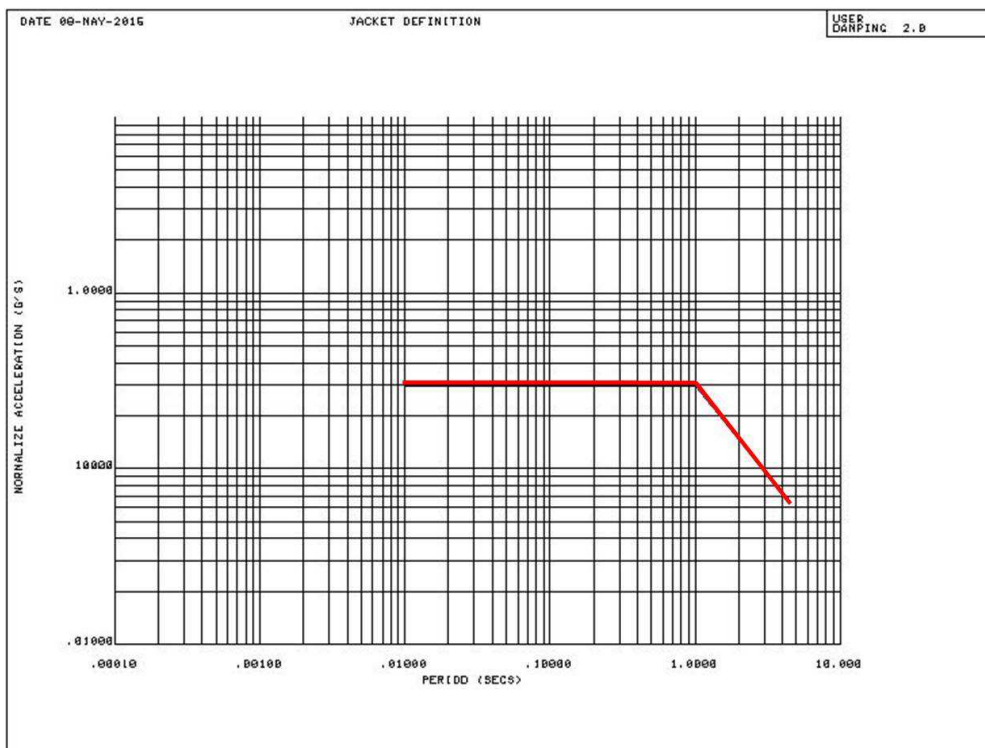


Figura 5. 24: Representación gráfica del espectro sísmico generada por SACS.
Fuente: Neutral Picture File – SACS 5.3 V.

5.4 Análisis no-lineal de interacción suelo-estructura

El programa SACS permite modelar la interacción suelo pilote, para ello en primer lugar genera las curvas de comportamiento del suelo (curva T-Z y P-Y). Estas curvas de comportamiento sirven para definir el comportamiento no lineal de un pilote ficticio denominado super elemento, el cual conecta la estructura con el suelo y modela el comportamiento de los pilotes.

```

* * P I L E   G R O U P   D E S C R I P T I O N   * *

```

LABELS GROUP	SECTION	TUBE SECTION		MATERIAL PROPERTIES			SEGMENT LENGTH H	SURFACE DIMENSIONS		T FACTOR	BEARING AREA H**2
		O.D. CM	TW CM	E*10-3 N/MM2	G*10-3 N/MM2	FY N/MM2		AS CM	BS CM		
PL1		76.20	2.223	205.90	77.24	245.10	18.00	76.20	2.22	1.00	0.46
PL2		121.92	2.223	205.90	77.24	245.10	22.50	121.92	2.22	1.00	1.17

Figura 5. 25: Descripción de los grupos de pilotes.
Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V

En este caso existen dos tipos de pilote; PL1 y PL2 por lo que se requiere definir las características de los mismos, En la figura 5.25 se muestra un resumen de los datos introducidos para cada grupo de pilotes, este análisis se realizó para los 12 pilotes que conforman la plataforma y cuatro del soporte del montante.

El primer objetivo del análisis es generar las curvas de comportamiento del suelo, en este caso existen pilotes de dos diámetros diferentes, es por ello que el programa debe generar curvas para cada diámetro.

Por otra parte el suelo definido posee dos estratos, uno muy débil de nueve metros de profundidad constituido por arcilla, y otro más fuerte de 21 metros de arena.

Una de las primeras curvas que el programa genera es la que relaciona la transferencia de carga axial con el desplazamiento vertical (T-Z), para observar el efecto de la cohesión o fricción del suelo contra las paredes del pilote. En las siguientes figuras se encuentran los valores para cada uno de los estratos, estas curvas son independientes del diámetro del pilote.

```

** AXIAL SOIL STIFFNESS TABLE **
SOIL TABLE ID          SOL1
NUMBER OF SOIL STRATA = 2
NUMBER OF POINTS/CURVE = 30
    
```

STRATA DESCRIPTION	APPLIED FACTOR	FROM DEPTH H	TO DEPTH H	T		Z		T		Z		T		Z	
				N/MM2	CH	N/MM2	CH	N/MM2	CH	N/MM2	CH	N/MM2	CH		
1 T VERSUS Z/D	1.0000	0.00	9.00	0.0000	0.000	0.0047	0.002	0.0079	0.003	0.0118	0.006	0.0141	0.008	0.0157	0.010
2	1.0000	9.00	30.00	0.0000	0.000	0.0810	0.254	0.0810	0.508						

Figura 5. 26: Datos de la curva axial (T-Z).

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

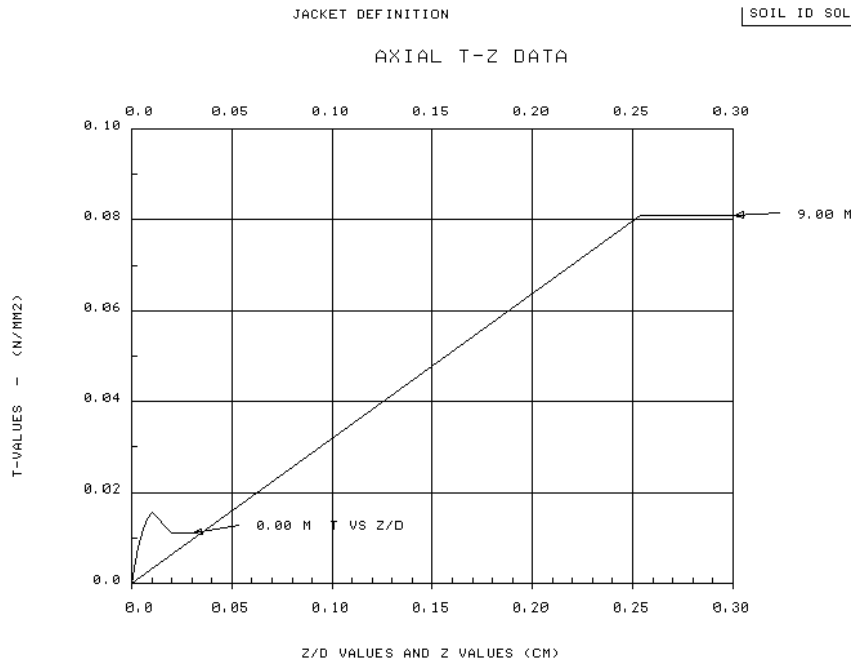


Figura 5. 27: Curva Axial (T-Z).
Fuente: Neutral Picture File – SACS 5.3 V.

Los resultados obtenidos muestran ocho puntos que se generan para el primer estrato de arcilla de espesor de 9 metros y para el segundo estrato de arena con un espesor de 21 metros se generaron solo tres puntos, cuyos valores de deflexión, cohesión y fricción se encuentran en la figura 5.26, la representación graficas de estos valores se aprecia en la figura 5.27.

Como segunda curva generada es la de capacidad de carga en la punta-desplazamiento (Q-Z) que expresa la capacidad de carga final que puede tener el pilote en la punta. Los resultados obtenidos son iguales para ambos diámetros, en las figuras 5.28 y 5.29 se muestran las curvas obtenidas.

** END-BEARING SOIL STIFFNESS TABLE **

SOIL TABLE ID SOL1
 NUMBER OF SOIL STRATA = 2
 NUMBER OF POINTS/CURVE = 7

STRATA DESCRIPTION	APPLIED FACTOR	FROM DEPTH H	TO DEPTH H	T		Z		T		Z		T		Z	
				N/MM2	CM	N/MM2	CM	N/MM2	CM	N/MM2	CM	N/MM2	CM		
1 T VERSUS Z/D	1.0000	0.00	9.00	0.0000	0.000	0.0450	0.002	0.0900	0.013	0.1350	0.042	0.1620	0.073		
				0.1800	0.100	0.1800	0.120								
2 T VERSUS Z/D	1.0000	9.00	30.00	0.0000	0.000	1.2001	0.002	2.4001	0.013	3.6002	0.042	4.3202	0.073		
				4.8002	0.100	4.8002	0.120								

Figura 5. 28: Datos de la curva de capacidad en la punta (Q-Z).
 Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

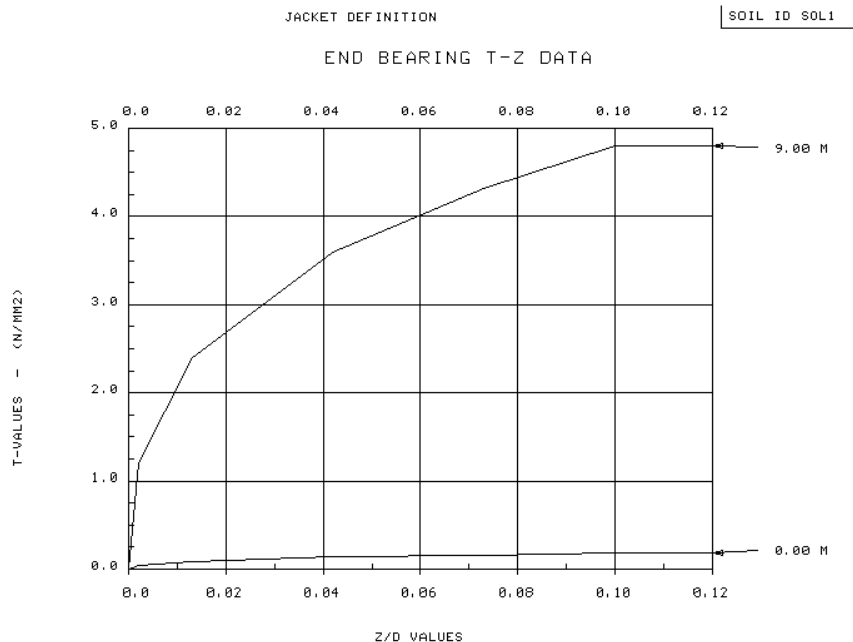


Figura 5. 29: Curva de capacidad en la punta (Q-Z).
 Fuente: Neutral Picture File – SACS 5.3 V.

Por último, el programa genera la curva de resistencia lateral (P-Y) que representa el comportamiento lateral del suelo. Como era de esperarse los resultados fueron diferentes para cada diámetro, ya que la resistencia y la deflexión son diferentes para cada pilote debido a sus características geométricas.

** LATERAL SOIL STIFFNESS TABLE **

SOIL TABLE ID = SOL1
 NUMBER OF SOIL STRATA = 2
 NUMBER OF POINTS/CURVE = 30
 P-Y DATA DIAMETER = 76.200 CM

STRATA DESCRIPTION	APPLIED FACTOR	FROM DEPTH H	TO DEPTH H	P		Y		P		Y		P		Y	
				KN/CM	CH	KN/CM	CH	KN/CM	CH	KN/CM	CH	KN/CM	CH		
1	1.0000	0.00	9.00	0.0000	0.000	0.3155	0.254	0.4527	0.762	0.6858	2.540	0.9876	7.620		
				1.3717	20.320	1.3717	38.100								
2	1.0000	9.00	30.00	0.0000	0.000	4.0194	0.762	7.9598	1.524	12.1160	2.362	16.0074	3.200		
				20.1850	4.190	24.1154	5.257	28.2850	6.628	32.2826	8.381	36.2782	11.200		
				38.3046	13.942	39.5093	17.447	39.9274	20.190	40.3275	45.713	40.3275	54.855		

Figura 5. 30: Datos de la curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro: 76,2cm).
Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

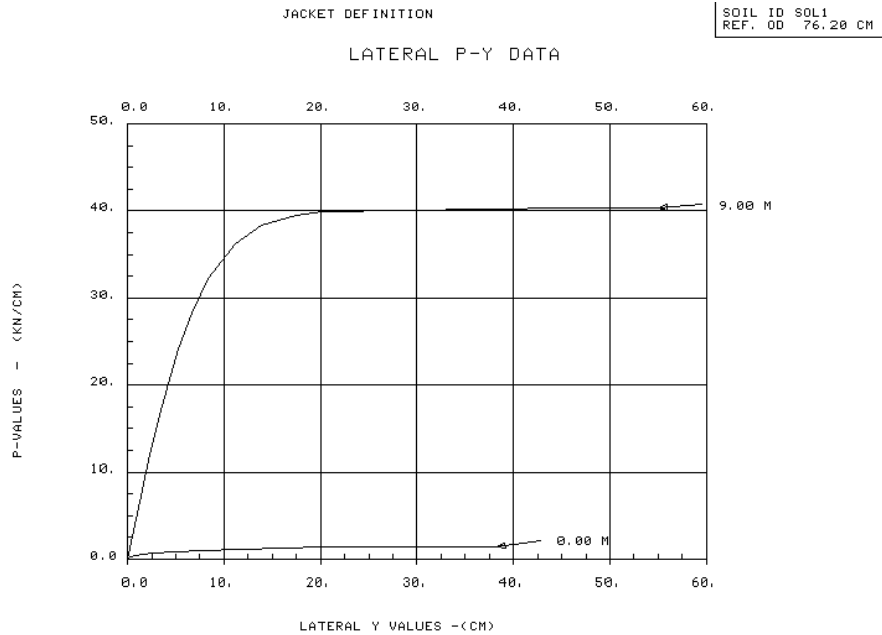


Figura 5. 31: Curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro:76,2cm).
Fuente: Neutral Picture File – SACS 5.3 V.

** LATERAL SOIL STIFFNESS TABLE **

SOIL TABLE ID = SOL2
 NUMBER OF SOIL STRATA = 2
 NUMBER OF POINTS/CURVE = 30
 P-Y DATA DIAMETER = 121.920 CM

STRATA DESCRIPTION	APPLIED FACTOR	FROM DEPTH M	TO DEPTH M	P		Y		P		Y		P		Y	
				KN/CM	CM	KN/CM	CM	KN/CM	CM	KN/CM	CM	KN/CM	CM		
1	1.0000	0.00	9.00	0.0000	0.000	0.5048	0.254	0.7242	0.762	1.0973	2.540	1.5802	7.620		
				2.1947	20.320	2.1947	38.100								
2	1.0000	9.00	30.00	0.0000	0.000	6.4311	1.219	12.7356	2.438	19.3857	3.779	25.6119	5.120		
				32.2960	6.705	38.5847	8.411	45.2561	10.605	51.6521	13.409	58.0451	17.919		
				61.2874	22.308	63.2149	27.915	63.8839	32.304	64.5241	73.141	64.5241	87.769		

Figura 5. 32: Datos de la curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro: 121,92cm).

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

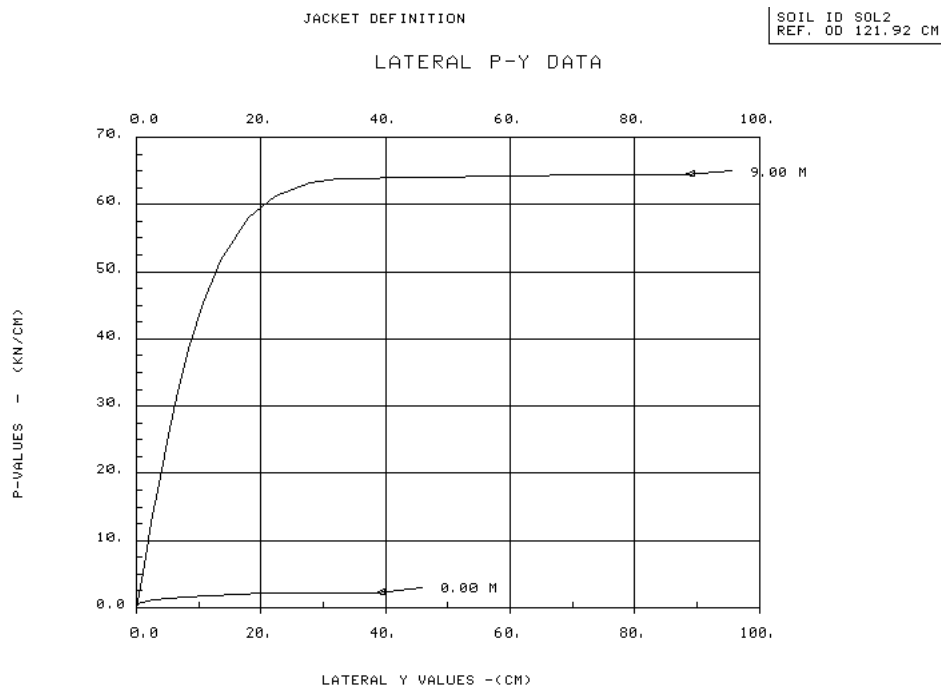


Figura 5. 33: Curva de resistencia lateral (P-Y) (Diámetro: 121,92cm).

Fuente: Neutral Picture File – SACS 5.3 V.

Una vez generadas las curvas características del suelo, el programa procede a calcular para cada pilote la deflexión, las fuerzas internas y los esfuerzos que se generan en estos elementos para cada caso carga. En las figuras 5.34 y 5.35 se muestran los resultados obtenidos para la junta “0007” que corresponde a la cabeza del pilote.

PILE JT.	GRP	LOAD CASE	***** PILEHEAD FORCES *****			* PILEHEAD DISPLACEMENTS *		
			AXIAL KN	LATERAL KN	MOMENT KN-M	AXIAL CM	LATERAL CM	ROTATION RAD
0007	PL2	1	-3101.22	8.83	20.9	0.39	0.02	0.000057
		2	-3098.87	4.71	19.4	0.38	0.01	0.000029
		3	-3099.03	0.57	17.2	0.38	0.01	0.000025
		4	-2447.07	39.01	235.8	0.30	0.17	0.000533
		5	-2436.18	32.49	207.8	0.30	0.15	0.000462
		6	-2432.97	25.82	188.2	0.30	0.13	0.000404

Figura 5. 34: Fuerzas y desplazamientos de la junta "0007".

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

PILE JT.	GRP	LOAD CASE	DEPTH M	***** STRESSES AT MAX. UNITY CHECK *****				UNITY CHECK	
				AXIAL	FBY	FBZ	SHEAR		COMB.
0007	PL2	1	0.0	-37.10	0.50	-0.69	0.20	-37.95	0.257
		2	0.0	-37.07	0.03	-0.79	0.11	-37.86	0.257
		3	0.0	-37.08	0.49	-0.50	0.01	-37.77	0.256
		4	1.1	-29.05	10.64	-0.28	0.19	-39.70	0.257
		5	1.1	-28.92	9.31	-0.33	0.14	-38.24	0.249
		6	0.9	-28.93	8.26	0.01	0.17	-37.19	0.243

Figura 5. 35: Relación capacidad - demanda de las fuerzas.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Como se mencionó anteriormente, estos cálculos son realizados a unas distancias determinadas a lo largo del pilote. En este caso el programa segmentó el pilote en 100 secciones para los pilotes de la plataforma que tienen una profundidad de hincado de 22,5 metros, y para el pilote del montante que solo se hincó 18 metros generó 80 secciones. Estos cálculos permiten que el programa arroje resultados más exactos, en la figura 5.36 se pueden apreciar los resultados que se obtienen a partir de los análisis ejecutados sobre cada pilote.

* PILE HEAD ID 0007 *

DISTANCE FROM PILEHEAD M	***** DEFLECTIONS *****			***** INTERNAL LOADS *****			***** STRESSES *****				UNITY CHECK
	LATERAL CM	AXIAL CM	ROTATION RAD	BENDING MOMENT KN-M	SHEAR KN	AXIAL LOAD KN	BENDING STRESS N/MM2	AXIAL STRESS N/MM2	SHEAR STRESS N/MM2	COMBINED STRESS N/MM2	
0.0	-0.003	0.385	0.00002	-16.95	1.94	-3101.47	-0.69	-37.10	0.05	-37.79	0.256
0.2	-0.002	0.381	0.00002	-16.51	2.00	-3098.79	-0.67	-37.07	0.05	-37.74	0.256

Figura 5. 36: Resultados obtenidos a partir del análisis de un pilote.

Fuente: Output Listing File – SACS 5.3 V.

Estos resultados también se pueden apreciar gráficamente en el visor de gráficos y tablas del programa SACS. En las figuras que se pueden observar a continuación se encuentran los resultados del pilote 0007 para el caso de carga uno.

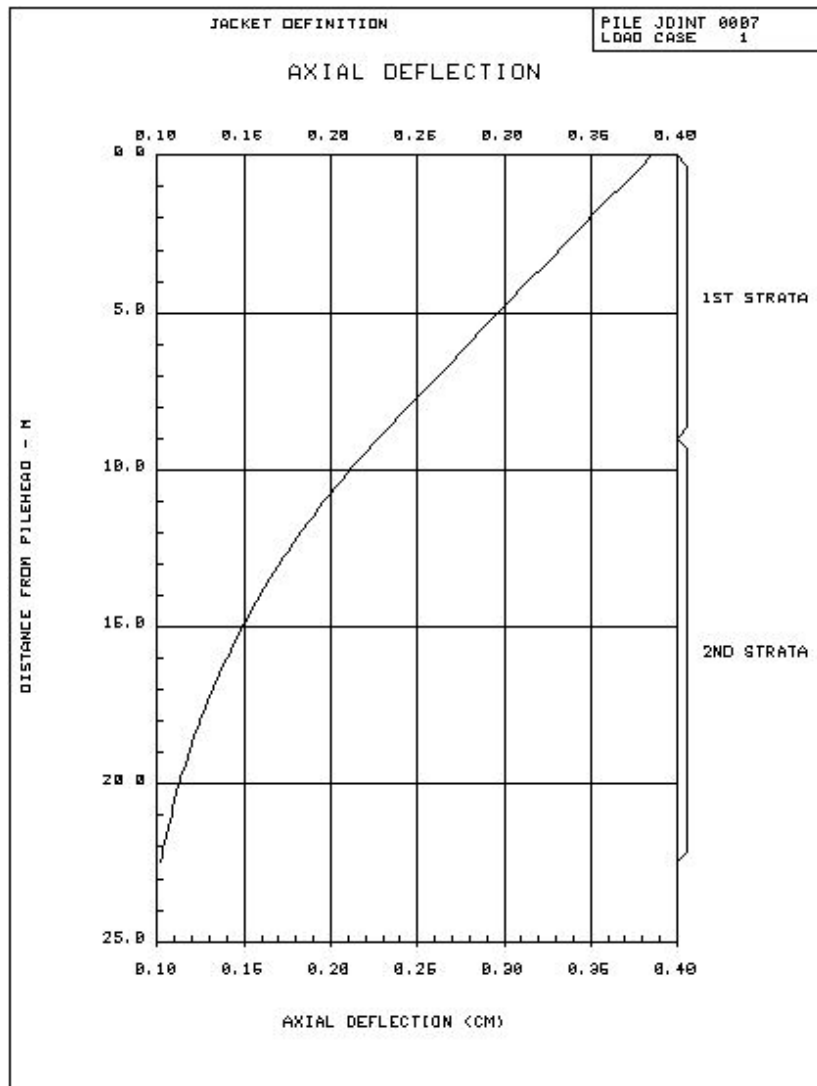


Figura 5. 37: Deflexión Axial del pilote 0007 para caso de carga 1.
Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V

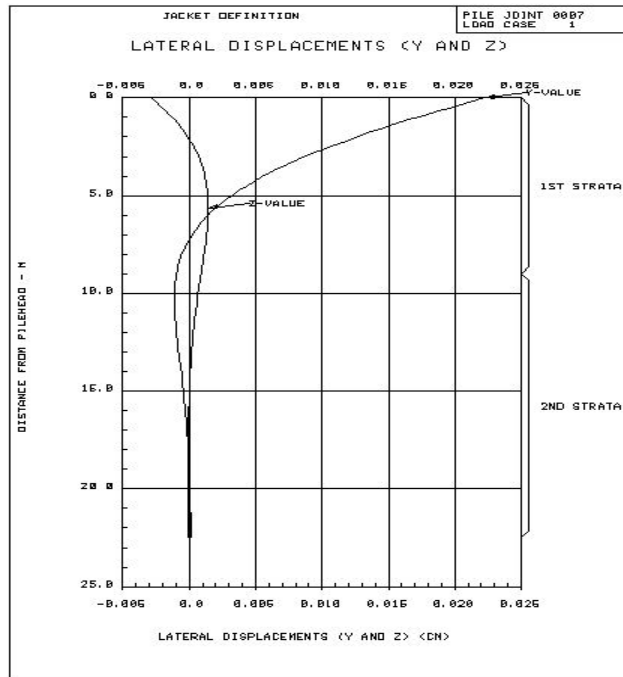


Figura 5. 38: Desplazamientos laterales del pilote 0007 para el caso de carga 1.

Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V

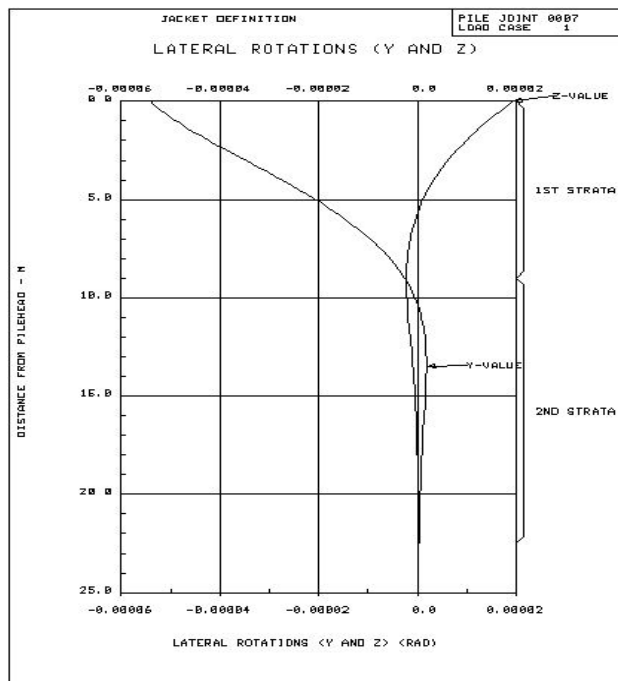


Figura 5. 39: Rotaciones laterales del pilote 0007 para el caso de carga 1.

Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V.

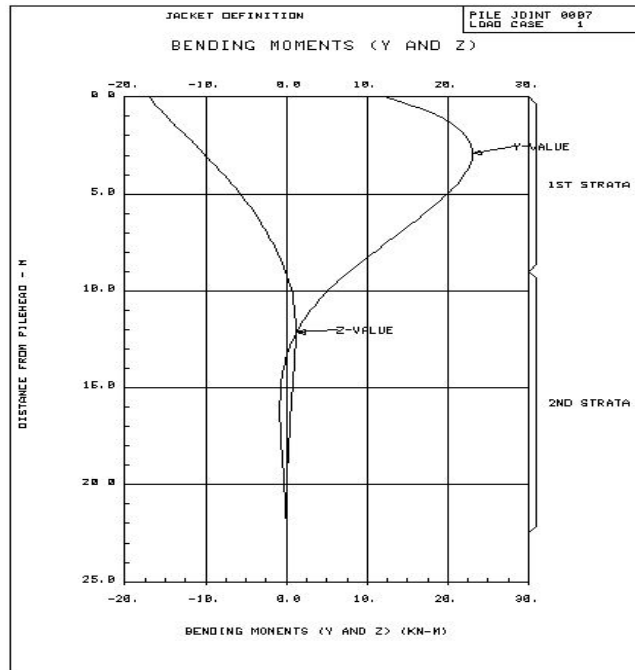


Figura 5. 40: Momentos flexionantes del pilote 0007 para el caso de carga 1.
Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V

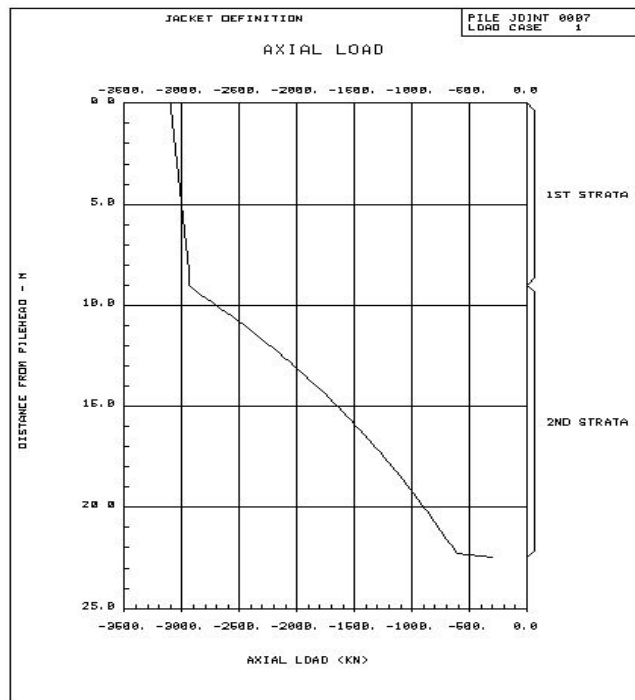


Figura 5. 41: Carga axial del pilote 0007 para el caso de carga 1.
Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V.

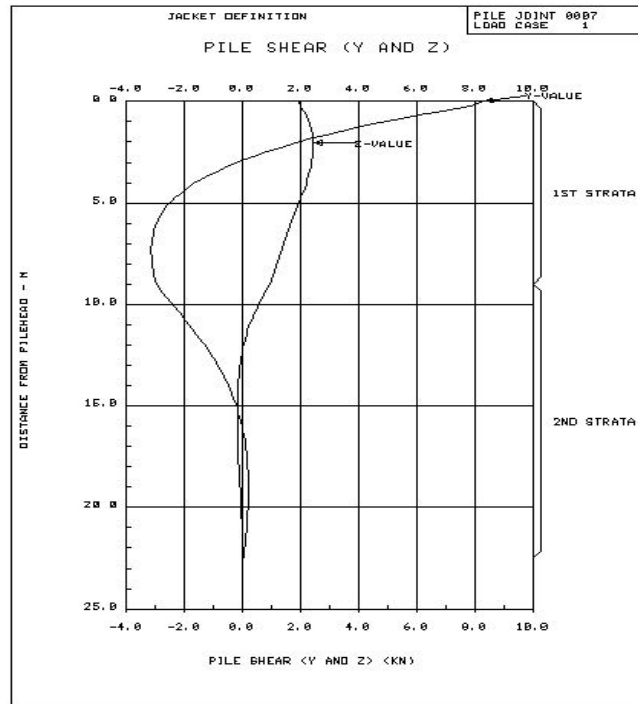


Figura 5. 42: Fuerzas cortantes en el pilote 0007 para el caso de carga 1.
Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V.

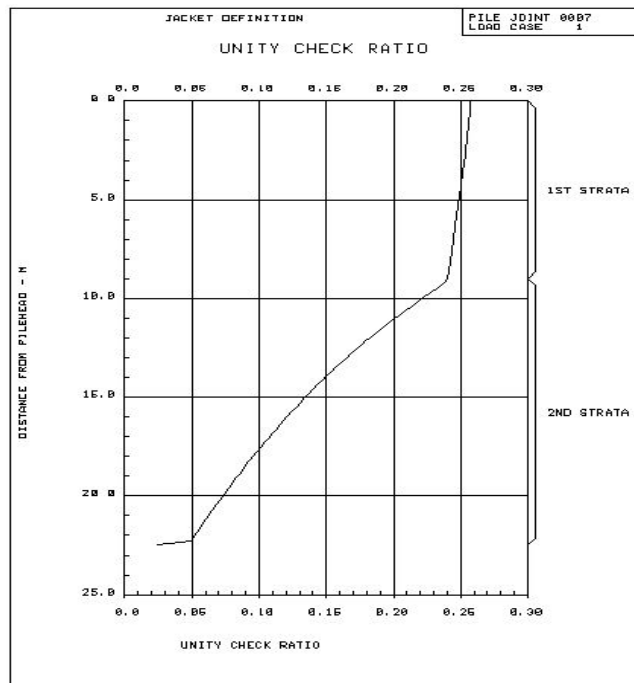


Figura 5. 43: Relación capacidad-demanda del pilote 0007 para el caso de carga 1.
Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V.

También se puede ver gráficamente la reacción axial y lateral del suelo que influencia el comportamiento del pilote.

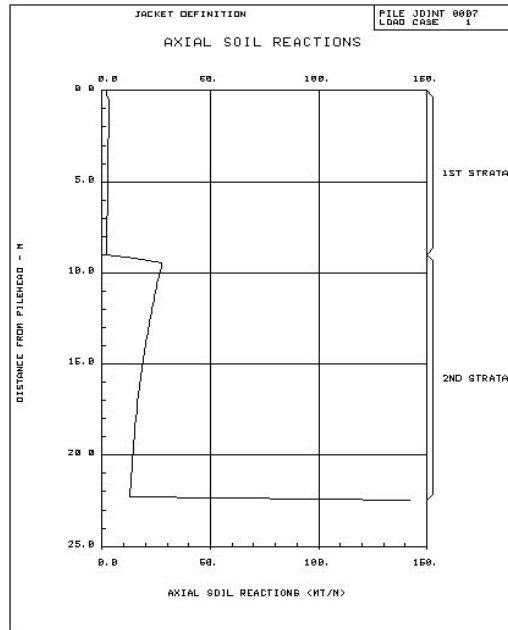


Figura 5. 44: Reacción axial del suelo en el pilote 0007 para el caso de carga 1.
Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V.

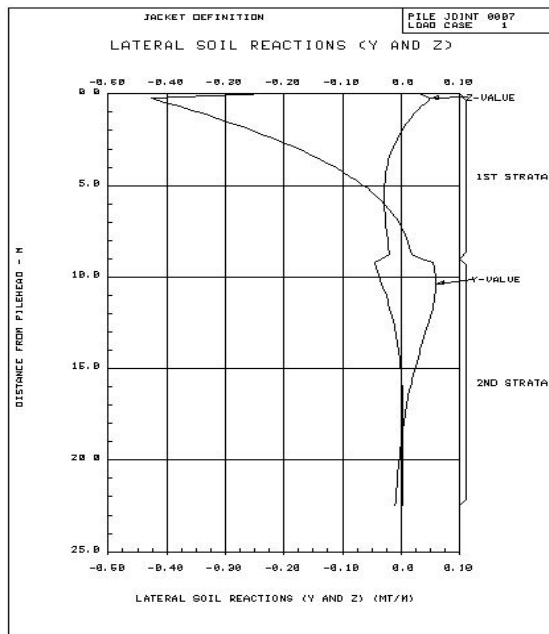


Figura 5. 45: Reacción lateral del suelo en el pilote 0007 para el caso de carga 1
Fuente: Neutral Chart File – SACS 5.3 V.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones finales a las cuales se llegaron después de realizar los análisis.

6.1 Conclusiones

Después de haber realizado la investigación teórica, el modelado de la estructura en el programa SACS, la ejecución de los análisis estructurales y haber evaluado sus resultados se concluyó lo siguiente:

1. El programa SACS permite modelar estructuras con montante de tuberías ascendentes, así como desarrollar los análisis estáticos, dinámicos, sísmicos y de interacción suelo-estructura de la estructura. El modelaje de la estructura con el montante y las tuberías simula de una forma más real el comportamiento estructural del conjunto.
2. El modelo se analizó con fuerzas de oleaje, cargas verticales, viento, flotación, peso propio y sismo. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó que en este caso en particular el sismo es la condición que más afecta a esta estructura ya que genera las mayores fuerzas y desplazamientos.
3. Se proporciona una breve guía con instrucciones que permitirá al lector ejecutar estos análisis en estructuras similares utilizando el programa SACS 5.3, este trabajo especial de grado complementa los trabajos de investigaciones anteriores en que no se consideran las fuerzas sísmicas y las fundaciones.
4. El análisis dinámico permite conocer los modos de vibración de la estructura, el período, los porcentajes de participación de masas, al ser compararlos con los valores de proyecto original se observó que la estructura modelada en SACS es mucho más rígida que la

diseñada originalmente poseyendo un período menor, este comportamiento se atribuye a que como no se utilizó la misma composición del suelo que en el proyecto original este pudo haber aportado más rigidez a toda la estructura.

5. La interacción suelo-estructura también forma parte del comportamiento dinámico de la estructura, pues esta influye positivamente en la respuesta sísmica de la estructura y por eso siempre debe ser tomada en cuenta.

6.2 Recomendaciones

6.2.1 Relacionadas con el diseño de montantes

1. Debe prestarse particular atención a todos los detalles, a la geometría, a sus características físicas como el material de construcción, las tuberías ascendentes (*riser*), dado que son parte colaborantes en el comportamiento estructural de la plataforma.
2. Los montantes siempre deben estar para proteger a las tuberías ascendentes (*risers*) contra posibles impactos de embarcaciones o equipos que caigan de la plataforma. En este trabajo especial de grado no se tomó en cuenta esta consideración, se recomienda que en investigaciones posteriores se consideren estos efectos.

6.2.2 Relacionadas con el modelado de la estructura en el programa SACS

1. Al momento de realizar el modelaje se debe cuidar de no dejar elementos sueltos en la estructura, ya que estos generan inestabilidades y pueden alterar los resultados obtenidos en los análisis realizados.
2. Se recomienda utilizar la opción de agregar los conductos (*risers*) en el modelado ya que el programa los toma en cuenta al momento de realizar los análisis y estos puede aportar más rigidez a la estructura proporcionando comportamientos más cercanos a la realidad.

3. Al momento de realizar el análisis espectral se deben incluir todas las masas de la estructura, incluyendo las masas hidrodinámicas, ya que ellos influyen en el comportamiento dinámico de la estructura.
4. Las características usuales de los lechos marinos hacen necesario realizar los análisis de interacción suelo-estructura, especialmente en aquellas plataformas que estén ubicadas en lugares que sean sísmicamente activos, ya que esto hace que las estructuras sean más flexibles permitiendo disminuir los efectos de un sismo sobre estas estructuras
5. Es importante disponer de todos los datos necesarios del suelo para poder ejecutar el análisis de interacción suelo-estructura, ya que si no se disponen de los datos correctos se corre el riesgo de introducir un valor que no sea adecuado y el resultado que se obtenga puede ser errado o muy poco confiable.
6. En esta investigación en particular se escogieron métodos muy específicos para los análisis realizados, sin embargo SACS ofrece muchas otras opciones y procedimientos para realizar los análisis, no solo para los análisis sísmicos y de interacción sino para cualquier otro estudio de otra área en particular. Estos métodos pueden ser estudiados en otros trabajos de investigación.
7. El software SACS puede ser usado para el análisis de estructuras marítimas, a pesar de que no es un programa muy accesible y fácil de manejar proporciona buenos resultados. Es una herramienta poderosa que merece dedicación para poder entender su metodología de trabajo y así poder desarrollar sus capacidades al máximo.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, I., (2005), *Cómo hacer una tesis en Bachillerato.*, CEC. Caracas. 124 pp.
- American Petroleum Institute, (1999). *Design, Construction, Operation, and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design). (API RP 1111)* 3ra edición. Estados Unidos.
- American Petroleum Institute, (2007). *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design. (API RP2A-WSD)*. 21va edición. Estados Unidos.
- American Petroleum Institute, (1998). *Design of Risers for Floating Production Systems (FPSs) and Tension-Leg Platforms (TLPs). (API RP 2RD)*, 1ra edición. Estados Unidos.
- Arias, F., (2006), *El Proyecto de Investigación, Introducción a la metodología científica*, 5ta edición, Texto. Caracas. 143 pp.
- Bai, Y. (2003), *Marine Structural Design*. Elsevier. Oxford. 607 pp.
- Bozzo, L., Barbat, A, (2004), *Diseño sismorresistente de edificios, Técnicas convencionales y avanzadas*, Reverté. Caracas. 378 pp.
- Clough, R., Penzien, J, (2003), *Dynamics of Structures*, 3ra edición, Computers & Structures. Estados Unidos. 730 pp.
- Det Norske Veritas, (2003), *Offshore Riser Systems. (DNV-OSS-302)*. 2da edición. Hovik.
- Det Norske Veritas. (2010), *Submarine Pipeline Systems. (DNV-OS-F101)*. 3ra edición. Hovik.
- Dikdogmus, H. (2012). *Risers Concepts for Deep Waters*. Tesis de Master. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Crisafulli, F., Villafañe, E, (2002). *Espectro de Respuesta y De Diseño*. Argentina. 22pp

EDI, 2010, *Manual SACS 5.3. V*.

Haritos, N. (2007). *Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures – An Overview*. Melbourne. EJSE Special Issue: Loading on Structures.

Nallayarasu, S.(s.f) *Offshore Structures, Analysis and Design*, Chennai. 115pp.

Palmer, A., King, R., (2004). *Subsea Pipeline Engineering*,. Penwell. Tulsa. 570 pp.

Paz, M. (1992). *Dinámica Estructural*, Reverté. Barcelona. 648 pp

Referencias Electrónicas

ESTRUCTURAS. *Acelerogramas (1). Definición y Características*. Obtenido el 05 de mayo de 2015 en <https://seismic06g.wordpress.com/2012/11/03/acelerogramas1/>

RIGZONE. *How Do Risers Work?*. Obtenido el 03 de Mayo de 2015 en http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=308&c_id=17.