

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTO DE CARGAS ACCIDENTALES DEBIDO
A LA COLISIÓN DE BARCOS EN PLATAFORMAS
METÁLICAS COSTA AFUERA FIJAS.**

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 Jiménez Valerio, Maurizio D.
Torres García, Carlos E.

PROFESOR GUÍA Noriega Horrillo, José Antonio

FECHA Caracas, Octubre de 2.013

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

**EFFECTO DE CARGAS ACCIDENTALES DEBIDO
A LA COLISION DE BARCOS EN PLATAFORMAS
METALICAS COSTA AFUERA FIJAS.**

REALIZADO POR Jiménez Valerio, Maurizio D.
Torres García, Carlos E.

PROFESOR GUÍA Noriega Horrillo, José Antonio

FECHA Caracas, Octubre de 2.013

DEDICATORIA

Le dedico primeramente mi trabajo a mi nonna, la que me ha dado fortaleza para continuar cuando he estado a punto de caer.

De igual forma, a mis Padres, a quien le debo la vida, les agradezco su amor y comprensión, quienes han sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me ha ayudado a salir adelante buscando siempre el mejor camino.

A mis maestros, gracias por su tiempo, por su apoyo así como por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional, logrando ser como una guía para el camino de la vida y tomar mis propias decisiones.

Jimenez V. Maurizio D

A mis padres Adriana García y Leonardo Torres, por enseñarme y guiarme a lo largo de mi vida y siempre apoyarme en los momentos difíciles.

Torres G. Carlos E

AGRADECIMIENTOS

A nuestro tutor el Ingeniero José Antonio Noriega, por facilitarnos todas las herramientas necesarias para poder desarrollar este trabajo especial de grado de forma adecuada y por la constante orientación brindada durante la realización del mismo.

A Nouel Ingenieros Consultores S.A, por brindarnos herramientas necesarias para la realización del trabajo y facilitarnos sus instalaciones cuando fue necesario.

Al Ingeniero Maximiliano Barreto, por los aportes realizados e indicaciones dadas durante el desarrollo del trabajo especial de grado.

A nuestros amigos y familiares que nos brindaron apoyo durante la realización del trabajo especial de grado.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS.....	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE GRAFICOS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ABREVIATURAS	X
LISTA DE SIMBOLOS.....	X
SINOPSIS	XII
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Antecedentes	5
1.3 Alcances y limitaciones	6
1.4 Objetivos	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2 Objetivos específicos.....	7
CAPITULO II	8
2.1 Plataforma costa afuera	8
2.1.1 Tipos de plataformas costas afuera	8
2.1.2 Riesgos en plataformas costas afuera	9
2.1.3 Normas de diseño debido a cargas accidentales	9
2.2 Modelo Estructural.....	10
2.3 Embarcación de diseño.....	11
2.3.1 Energía cinética de la embarcación	11
2.4 Mecanismos de absorción de energía	12

2.4.1 Flexión elasto – plástica	13
2.4.1.1 Comportamiento elástico	14
2.4.1.2 Comportamiento plástico	14
2.4.2. Abolladura local	19
2.4.3 Deformaciones plásticas por tracción	23
2.4.4 Deflexión global de la estructura	24
2.4.5 Deformación local en la embarcación	25
2.5 Influencia de la interacción suelo – estructura	27
2.6 SAP2000	28
CAPITULO III	29
3.1 Tipo de investigación	29
CAPITULO IV	32
4.1 Det norske Veritas Recommended Practice for Design Against Accidental Loads (DNV- RP – C204)	32
4.1.1 Energía de impacto	32
4.1.2 Disipación de energía	33
4.1.2.1 Deformación local de la embarcación	34
4.1.2.2 Deformación en el miembro impactado	35
4.1.2.3 Abolladura local	38
4.2 American Petroleum Institute Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform- Working Stress Design (API-RP2A-WSD). 38	
4.2.1 Energía de impacto	38

4.2.2 Disipación de energía	39
4.3 Health & Safety Executive (HSE), Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms.	41
4.3.1 Energía de impacto	41
4.3.2 Disipación de energía	41
4.3.2.1 Deformación local de la embarcación.....	42
4.3.2.2 Flexión elasto – plástica en los miembros impactados	42
4.3.2.3 Abolladura local.....	43
4.3.2.4 Deformaciones plásticas por tracción en los miembros impactados.....	43
4.3.2.5 Deformación global de la estructura	44
CAPITULO V	45
5.1 Descripción del proyecto	45
5.2. Cálculos aplicados.....	45
5.2.1 Embarcación de diseño.....	45
5.2.2 Modelo estructural.....	47
5.2.2.1 Geometría de la estructura de protección.....	47
5.2.2.2 Características de los materiales estructurales	48
5.2.2.3 Características de vigas y pilotes	49
5.2.3 Mecanismos de absorción de energía.....	49
5.2.3.1 Abolladura local.....	49

5.2.3.2 Flexión elasto-plástica.....	50
5.2.3.2.1 Interacción suelo estructura	50
5.2.3.2.2 Análisis inelástico o Push over	56
5.2.3.3 Deformaciones plásticas por tracción en los miembros impactados.....	69
5.2.3.4 Deflexión global de la estructura	74
5.2.3.5 Deformación local en la embarcación	74
CAPITULO VI	76
6.1 Flexión elasto – plástica en los miembros impactados	76
6.2 Deformaciones plásticas por tracción en los miembros impactados.....	77
CAPITULO VII	78
7.1 Conclusiones	78
7.2 Recomendaciones.....	80
BIBLIOGRAFIA	81
ANEXOS	82
ANEXO A.....	83
ANEXO B	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Espesor requerido para resistir impactos de buques (API)	40
Tabla 2. Casos de Carga.....	61
Tabla 3. Resumen de resultados de análisis Push over	69

ÍNDICE DE GRAFICOS

Graf.2.1 Comportamiento de los materiales.....	15
Graf. 2.2 Reducción del momento resistente debido a la abolladura.....	20
Graf. 2.3 Relación entre módulo plástico de la sección y profundidad de abolladura.	22
Graf. 2.4 Curva de indentación del buque.....	26
Graf. 4.1 Energía disipada.....	33
Graf. 4.2 Curva Fuerza vs. Indentación (DNV).....	34
Graf. 4.3 Relación fuerza de formación para miembros tubulares (DNV).....	36
Graf. 4.4 Intersección gráfico fuerza- de formación y energía.....	38
Graf. 4.5 Curva de deformación plástica para secciones tubulares atracción y flexión..	45
Graf. 5.1 Gráfico de deflexión, momento y fuerza vs. profundidad (ALLPILE).....	69
Graf. 5.2 Curva carga vs. profundidad del suelo (P vs. Y).....	70
Graf. 5.3 Curva de comportamiento de rótulas plásticas definidos por FEMA 356.....	75
Graf. 5.4 Curva desplazamiento vs. reacción, caso de carga 1.....	80
Graf. 5.5 Curva desplazamiento vs. reacción, caso de carga 2.....	82
Graf. 5.6 Curva desplazamiento vs. reacción, caso de carga 3.....	83
Graf. 5.7 Curva desplazamiento vs. reacción, caso de carga 4.....	85
Graf. 5.8 Curva desplazamiento vs. reacción, caso de carga 5.....	86
Graf. 5.9 T/Tp y M/Mp como función del ángulo θ	91
Graf. 5.10 Ejemplo de curva de deformación plástica para secciones tubulares atracción y flexión.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 Yacimientos de Hidrocarburos.....	3
Fig. 2.1 Mecanismos de disipación de energía.....	13
Fig. 2.2 Viga Biempotrada.....	15
Fig. 2.3 Evolución de diagrama de esfuerzos, flexión pura.....	16
Fig. 2.4 Momentos y rótulas plásticas en vigas biempotradas.....	17
Fig. 2.5 Mecanismos de colapso o fallas.....	18
Fig. 2.6 Distribución de fuerzas en sección abollada.....	19
Fig. 2.7 Representación de términos de ecuaciones para sección abollada.....	22
Fig. 2.8 Viga atracción y flexión.....	23
Fig. 2.9 Sumatoria de esfuerzos combinados.....	23
Fig. 2.10 Posición de eje neutro, considerando tracción y flexión.....	24
Fig. 4.1 Plataforma costa afuera fijas tipo jacket.....	35
Fig. 4.2 Viga Biempotrada con carga aplicada en el centro.....	44
Fig. 4.3 Viga Biempotrada con carga aplicada fuera del centro.....	44
Fig. 5.1 Vista de planta de estructura de protección.....	47
Fig. 5.2 Vista, sección 1-1.....	48
Fig. 5.3 Vista, sección 2-2.....	48
Fig. 5.4 N-Link.....	53
Fig. 5.5 Propiedades de N-Link.....	54
Fig. 5.6 Comportamiento de N-Link.....	55
Fig. 5.7 Comparación curva momento-profundidad de ALLPILE y SAP 2000.....	56
Fig. 5.8 Estructura de protección en 3-D SAP 2000.....	57
Fig. 5.9 Numeración de elementos estructurales.....	58
Fig. 5.10 Vista de planta para caso de carga 1.....	59
Fig. 5.11 Vista de planta para caso de carga 2.....	59

Fig. 5.12 Vista de planta para caso de carga 3.....	60
Fig. 5.13 Vista de planta para caso de carga 4.....	60
Fig. 5.14 Vista de planta para caso de carga 5.....	61
Fig. 5.15 Vista en 3-D para caso de carga 1.....	62
Fig. 5.16 Vista en 3-D para caso de carga 2.....	63
Fig. 5.17 Vista en 3-D para caso de carga 3.....	65
Fig. 5.18 Vista en 3-D para caso de carga 4.....	66
Fig. 5.19 Vista en 3-D para caso de carga 5.....	68

ABREVIATURAS

API: American Petroleum Institute

DNV: Det Norske Veritas

FEMA: Federal Emergency Management Agency

HSE: Health & Safety Executive

LISTA DE SIMBOLOS

C: Rigidez axial adimensional

D: Diámetro

E: Energía

E_C : Energía cinética

E_d, E_δ : Energía de abolladura

ϵ : Deformación unitaria

k_m : Coeficiente de masa añadida

M: Masa

M_p : Momento plástico

M_y : Momento de fluencia o elástico

P_d, P_δ : Fuerza de abolladura

P_u, R_0 : Fuerza última

ψ_{max} : Rotación máxima de la sección

ψ_u : Rotación de la sección

σ : Esfuerzo

σ_y : Esfuerzo de fluencia

θ : Rotación de la cuerda de la viga

θ_c : Rotación crítica de la cuerda de la viga

θ_{max} : Rotación máxima de la cuerda de la viga

t : Espesor

V : Velocidad

\bar{w} : Parámetro de deformación adimensional

w_d, δ_d, X : Profundidad de abolladura

Z : Módulo de sección plástica

Z_δ : Módulo de sección plástica de miembro tubular abollado

SINOPSIS

Efecto de cargas accidentales debido a la colisión de barcos en plataformas metálicas costa afuera fijas.

Cuando se diseñan plataformas fijas costas afuera, no se puede permitir que esta sufra daños en su estructura que la inhabilite o produzca el colapso de la misma, por ende cuando se desea construir una, se deben tomar en cuenta todos los escenarios accidentales que puedan afectarla.

Uno de los riesgos a los cuales están expuestas las plataformas fijas costa afuera es la colisión de un buque contra ellas, debido al tamaño de las embarcaciones que operan para estas estructuras, el impacto puede generar grandes esfuerzos en los miembros que la componen, con probabilidades de ocasionar el colapso de la estructura cuando no se encuentra adecuadamente diseñada para este evento.

La finalidad de este trabajo especial de grado es analizar los efectos que genera la colisión de un buque en la estructura de una plataforma costa afuera, así como estudiar los diferentes métodos de cálculo existentes en las normas que tratan este tema, desarrollar un método alternativo aplicando la degradación progresiva estructural sometida a cargas incrementales (Push over) para luego tratar de aplicarlo con el programa SAP2000 a un caso real, en el cual se desea diseñar la estructura de protección para una plataforma de exportación de gas.

Las normas analizadas en este trabajo serán la DNV-RP-C204, API-RP2A-WSD y el manual de diseño publicado por la Health & Safety Executive titulado “Ship collision and capacity of brace members of fixed steel offshore platforms”.

El trabajo especial de grado tiene como base 3 puntos clave: interpretar las normas y manuales de diseño que abarcan este tema, realizar el análisis inelástico o Push over en un ejemplo con la utilización del programa SAP2000 R14, por último, como se dijo anteriormente, aplicar en conjunto el programa SAP2000 y las diferentes metodologías estudiadas a una estructura de protección de una plataforma Riser para exportación de gas ubicada en Colombia.

PALABRAS CLAVE: Plataformas costa afuera, Colisión de buque, Push over, Momentos plásticos, Rótulas plásticas.

REALIZADO POR: Jiménez Valerio, Maurizio Daniele

Torres García, Carlos Eduardo

TUTOR: ING. Noriega Horrillo, José Antonio

INTRODUCCIÓN

En Venezuela la economía siempre ha sido dependiente del petróleo, desde que este fue descubierto en el país, siendo uno de los países con las mayores reservas de petróleo a nivel mundial. Gran cantidad de los yacimientos de hidrocarburos explotados en el país se encuentran en tierra, pero otra cantidad considerable están localizados en territorio marino, los cuales no están siendo aprovechados en su totalidad.

La forma más común de explotar los yacimientos de hidrocarburos ubicados por debajo del lecho marino, es mediante la utilización de plataformas costas afuera, de estas estructuras se tienen diferentes tipos, una de las utilizadas a nivel mundial para estas actividades son las plataformas costas afuera fijas.

La construcción y operación de plataformas costas afuera fijas implica grandes inversiones monetarias, pero también genera muchas ganancias, por ende estas estructuras deben estar diseñadas adecuadamente para poder soportar diferentes eventos accidentales que las puedan afectar y producir si colapso.

Uno de los eventos accidentales más comunes en este tipo de estructuras es la colisión de un buque contra la plataforma. Este incidente ha sido ampliamente estudiado, desde varios enfoques, creándose así diferentes normativas para tratar este tema, proporcionando metodologías de cálculo para el diseño adecuado de las estructuras afectadas por esta situación.

En el presente trabajo especial de grado se analizará como afecta la colisión de un buque a la estructura de la plataforma costa afuera, así como se proporcionará diferentes metodologías de cálculo, presentadas en diferentes normas y documentación técnica, para diseñar tomando en consideración este evento imprevisto.

Así mismo, la investigación se estructuró en siete capítulos. En el primer capítulo se plantea el problema existente, además se presentan los objetivos generales y específicos, los alcances y limitaciones que posee el trabajo y su respectiva justificación.

El capítulo dos está comprendido en su totalidad por el marco teórico, en el cual se explican detalladamente los diferentes conceptos e investigaciones realizadas, durante la realización del proyecto. A través de esta actividad se construyó una base teórica importante para sustentar el desarrollo del trabajo especial de grado.

Posteriormente, en el capítulo tres se presenta la metodología utilizada en el trabajo especial de grado para poder desarrollarlo de la forma más adecuada.

En el capítulo cuatro se exponen y analizan las diferentes metodologías de cálculo planteadas en las normas existentes a nivel mundial, así como las expuestas en manuales de diseño, que abarcan el tema tratado en esta investigación.

El capítulo cinco presenta los cálculos y resultados obtenidos, está compuesto por el análisis inelástico a un elemento estructural aislado mediante el uso del programa SAP2000 y luego se explica de forma detallada la aplicación de las diferentes metodologías de cálculo a un caso real. En el capítulo seis se hace un análisis de los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron después de la realización de este trabajo de investigación.

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Es bien conocido, debido a la gran cantidad de estudios realizados, que Venezuela posee una reserva de hidrocarburos, considerada como la más grande del mundo, la cual tiene aproximadamente unos 297.000 millones de barriles. En el mapa mostrado a continuación se muestran las diferentes cuencas petrolíferas que posee el país.

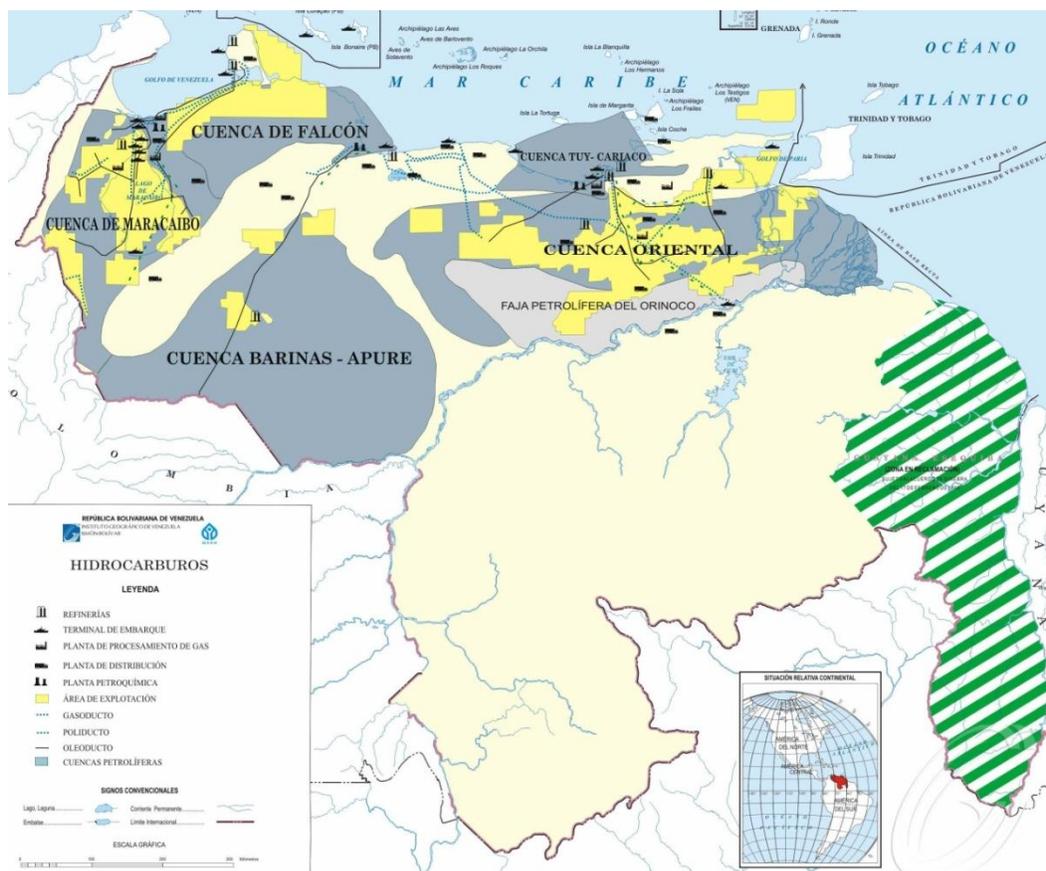


Fig. 1 Yacimientos de Hidrocarburos

Las zonas que se encuentran en color amarillo son aquellas en las cuales existe explotación de los hidrocarburos, mientras que las partes que se encuentran en azul, son aquellos sectores donde existe petróleo y gas natural, pero no son aprovechados o extraídos.

Se puede observar que tanto en la cuenca de Falcón y la cuenca Tuy – Cariaco, ubicada en los estados Anzoátegui y Sucre, así como una pequeña parte de la cuenca oriental, existen zonas costa afuera de Venezuela en las cuales no se explotan los hidrocarburos existentes.

Debido a lo mencionado anteriormente, PDVSA ha realizado un nuevo plan para explotar estas zonas costa afuera del país que no están siendo aprovechadas, según Aquino, C .(2009) “Los desarrollos de gas y petróleo costa afuera que se adelantan en Venezuela, abarcan cerca de 500 mil kilómetros cuadrados”.

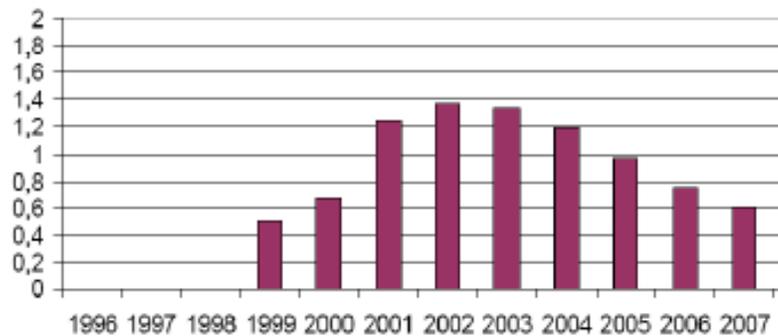
Debido a lo expuesto anteriormente, es de suma importancia, debido al costo económico que estas representan, que las plataformas costas afuera estén bien diseñadas, considerando todas las variables que pueden afectar su integridad estructural.

Las plataformas costa afuera son objeto de diferentes situaciones accidentales, a las cuales una edificación en tierra es muy difícil que esté sometida.

La colisión entre un buque y la plataforma costa afuera representa un riesgo importante para la estructura, Furnes, O (1980) señala que

En efecto, estudios realizados demuestran que la mayor cantidad de accidentes en plataformas costa afuera ocurrieron en el período de 1970 – 1979 indicando que estas colisiones representan una de las situaciones de riesgo más importante. A pesar que las consecuencias de las colisiones costa afuera son menores en la actualidad, la colisión de un buque es un accidente potencial que conlleva a daños graves a la estructura.

En el gráfico que se presenta a continuación, extraído de la tesis doctoral titulada Ship Collision Risk, realizada por Geijerstam, K y Svensson, H (2008). Se representa el número de barcos en curso de colisión en relación al número de plataformas costa afuera construidas en Noruega.



Graf. 1 Número de barcos en curso de colisión en relación al número de plataformas costa afuera construidas en Noruega.

Se puede observar que en el período de tiempo comprendido desde 2001 hasta 2004 hubo más de un barco en curso de colisión en relación al número de plataformas costa afuera construidas, alcanzando su máximo valor en el año 2002. Aunque ya para el año 2007 disminuyeron considerablemente la probabilidad de ocurrencia de accidentes de este tipo, sigue siendo un riesgo que debe ser considerado para estas estructuras, debido a que se pueden exponer vidas humanas y grandes pérdidas monetarias.

1.2 Antecedentes

Existe una gran cantidad de bibliografía asociada a los accidentes de impacto de buques sobre las pilas de puentes, usualmente las medidas tomadas son las de evitar el impacto protegiendo la estructura, esto no presenta complicaciones sobre todo en aguas someras, en el caso de plataformas costa afuera, se evalúa más bien el efecto que produce el impacto sobre la estructura, debiéndose diseñar esta, en forma tal que resista el impacto.

Para el diseño resistente al impacto se ha conseguido, en general, poca y dispersa información. Entre las normas y documentación técnica que abarcan este tema se puede nombrar las siguientes:

- Det norske Veritas Recommended Practice for Design Against Accidental Loads
- Health & Safety Executive, Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms
- American Petroleum Institute Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform- Working Stress Design.

Según, Visser (2004):

La embarcación cuando colisiona transforma la energía de impacto en un conjunto a las deformaciones elásticas y plásticas de los miembros de la plataforma y del buque.

Usualmente cada vez que ocurre uno de estos accidentes, la estructura es inspeccionada para asegurar que las fuerzas soportadas por el miembro durante el impacto no afectaron su integridad y por consiguiente la estructura.

1.3 Alcances y limitaciones

Los alcances de este trabajo especial de grado son los siguientes:

- Se pretende establecer criterios de diseño para las plataformas costa afuera, las cuales están expuestas a colisiones de buques, según la Norma Noruega, Det Norske Veritas RP – C204.
- Se realizará el análisis de un miembro aislado de la plataforma costa afuera mediante el uso del programa estructural SAP, para determinar sus momentos plásticos hasta la ruptura del mismo.

La investigación que se pretende desarrollar tiene las siguientes limitaciones:

- Es escasa la información referente a los accidentes por colisiones de buques en plataformas costa afuera.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Realizar el análisis de las normas y procedimientos para el cálculo de plataformas costa afuera fijas, construidas en acero, sometidas a cargas accidentales debido a la colisión de barcos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar el estado de arte del diseño por impacto.
- Interpretar normas y métodos para el cálculo de estructuras sometidas a impactos.
- Aplicar normas y métodos a una plataforma costa afuera ubicada en el Golfo de Morrosquillo, Colombia.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

En este capítulo se sustentan teóricamente los tópicos tratados en el Trabajo Especial de Grado.

2.1 Plataforma costa afuera

Una plataforma costa afuera se puede definir como aquellas estructuras fijas o flotantes ubicadas en cuerpos marinos, retiradas de la costa, en la actualidad se utilizan principalmente para la explotación de yacimientos de hidrocarburos que se encuentran en el lecho marino.

2.1.1 Tipos de plataformas costas afuera

Las plataformas costa afuera se pueden clasificar básicamente en tres tipos, según su sistema de soporte:

- 1) Fijas: Son aquellas plataformas costa afuera las cuales poseen columnas fundadas en el lecho marino, este tipo de diseño permite su utilización a largo plazo. Este tipo de plataformas costa afuera son económicamente viables hasta profundidades de 520 metros.
- 2) Semisumergibles: Son plataformas costa afuera utilizadas para realizar perforaciones a profundidades mayores de cien metros, son estructuras flotantes que se encuentran fijadas en su emplazamiento mediante anclas, además permiten ser desplazadas hacia otra ubicación de ser necesario.
- 3) Autoelevables: estas plataformas se utilizan normalmente en aguas de profundidades no mayores a los 100 metros, pueden ser de columnas independientes o no. Estas columnas son retráctiles y se apoyan sobre el lecho marino mediante gatos hidráulicos, normalmente no se emplean en instalaciones

permanentes, son utilizadas para la exploración y mantenimiento de pozos de hidrocarburos.

2.1.2 Riesgos en plataformas costas afuera

Las plataformas costas afuera conviven con varios tipos de riesgo, según Geijerstam, K y Svensson, H (2008) “Las plataformas costa afuera están expuesta a severos tipos de riesgos y peligros tales como explosiones, fugas de hidrocarburos, incendios, objetos de gran tamaño cayendo y las colisiones”. Estos eventos pueden causar daños severos a la estructura así como perjudicar a las personas que trabajan en estas.

Por lo dicho anteriormente, las plataformas costas afuera deben estar preparadas para minimizar al máximo los daños que pueden causar estas situaciones accidentales, para prevenir el colapso de la estructura y evitar pérdidas de vidas humanas que se pueden generar debido a estos eventos indeseados.

En base a lo expuesto, es de suma importancia que las plataformas costa afuera sean capaces de resistir el impacto de un buque, para ello estas disponen de estructuras de protección diseñadas para disipar la energía que se produce durante el impacto y proteger la integridad de la estructura.

2.1.3 Normas de diseño debido a cargas accidentales

Para el diseño de las estructuras de protección existen diferentes normas y manuales, en los cuales se presentan diferentes metodologías para su cálculo. Entre estas normas y manuales se pueden nombrar la Norma Noruega Det norske Veritas Recommended Practice for Design Against Accidental Loads(DNV- RP – C204), publicada en octubre de 2010, el manual de la Health & Safety Executive (HSE), titulado “Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms”, publicado en 2004 y la norma del American Petroleum Institute Recommended Practice for Planning, Designing and

Constructing Fixed Offshore Plataform- Working Stress Design (API-RP2A-WSD). Las cuales se describen a continuación:

- 1) Det norske Veritas Recommended Practice for Design Against Accidental Loads(DNV- RP – C204): Esta norma fue desarrollada en el 2010, por Det norske Veritas, la cual es una asociación de clase mundial ubicada en Dinamarca. Este documento tiene como finalidad abarcar los temas relacionados con las situaciones accidentales que pueden ocurrir en una plataforma costa afuera.
- 2) Health & Safety Executive (HSE), Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms: Es un documento técnico o manual de diseño, realizado por Visser Consultancy y publicado por la Health & Safety Executive en el año 2004, el cual trata el tema de la colisión de buques contra plataformas metálicas fijas costa afuera.
- 3) American Petroleum Institute Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform- Working Stress Design (API-RP2A-WSD): Norma realizada por la American Petroleum Institute, destinada a atender diferentes situaciones accidentales que pueden ocurrir en una plataforma costa afuera

2.2 Modelo Estructural

Se puede definir el modelo estructural como la geometría que va a poseer la plataforma costa afuera, o estructura de protección, las dimensiones y secciones de sus elementos y las características de los materiales, que se desean utilizar.

Evaluar el modelo estructural es de suma importancia para el caso accidental de la colisión de un buque contra la plataforma costa afuera, ya que dependiendo de la configuración geométrica que va a tener la estructura, esta puede ser más vulnerable. Con esta información se puede conocer cuál es el caso más desfavorable y poder establecer si los

materiales de nuestra elección son adecuados para resistir las fuerzas generadas debidos al impacto de la embarcación.

2.3 Embarcación de diseño

Para determinar la fuerza y energía que se genera debido a la colisión de un buque contra una plataforma costa afuera, se deben conocer las características de la embarcación, tales como masa, dimensiones y la velocidad del impacto.

Para el estudio del impacto, se debe especificar una embarcación de diseño para el cálculo de las fuerzas que se generan en la colisión. La Norma Noruega Det norske Veritas (DNV) recomienda el uso de una embarcación de suministro de 5000 toneladas con velocidades de 2m/s (3.8 nudos), en el caso de plataformas costa afuera en el mar del Norte, así mismo recomienda fijar una energía mínima de impacto de 4MJ, aunque estos límites recomendados pueden variar dependiendo de las características específicas de cada proyecto.

2.3.1 Energía cinética de la embarcación

La energía cinética de un cuerpo, en términos físicos, es aquella que posee debido a su movimiento, esta depende directamente de la masa del objeto y de la velocidad que este posee.

Ya conocidas las características de la embarcación, se puede calcular la energía cinética que este genera a una velocidad de impacto determinada, mediante la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2} * M * V^2 \quad (\text{Ec.1})$$

Donde “M” representa la masa del barco, “V” la velocidad de impacto fijada. La masa debe ser multiplicada por un factor denominado coeficiente de incremento de masa “ K_m ”, el cual dependiendo de cómo impacte el buque va a variar, si colisiona con la proa o la popa este toma un valor de 1,05 y si lo hace de costado es igual a 1,5.

La energía cinética de la embarcación, se considerará como la energía de impacto en una colisión contra la estructura de la plataforma costa afuera.

2.4 Mecanismos de absorción de energía

En la práctica de la ingeniería, la determinación de la resistencia de las estructuras de las plataformas costa afuera de acero fijas, cuando estas son colisionadas por una embarcación, considerará los siguientes mecanismos que permiten disipar la energía producida por el impacto del buque:

- Flexión elasto – plástica en los miembros impactados
- Abolladura local
- Deformaciones plásticas por tracción en los miembros impactados
- Deflexión global de la estructura
- Deformación local de la embarcación

En la figura 2.1, se puede ilustrar algunos de estos mecanismos de disipación de energía

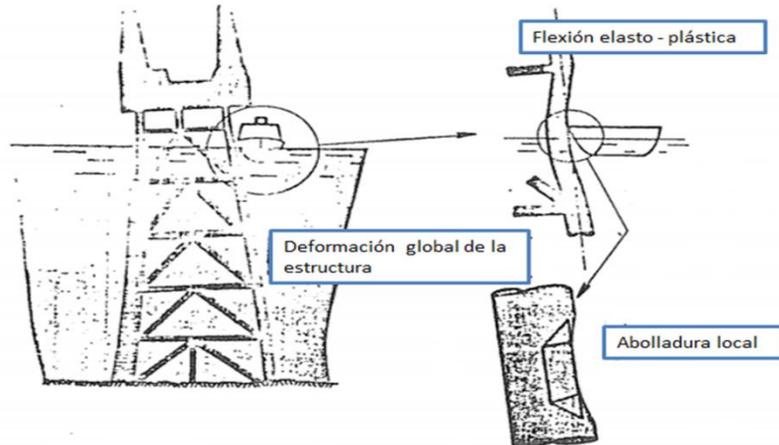


Fig.2.1 Mecanismos de disipación de energía

En el momento que ocurre el impacto, deben ocurrir estos mecanismos para disipar energía, produciéndose deformaciones en la estructura, pero no su colapso.

A continuación se describen detalladamente cada uno de estos mecanismos de absorción de energía

2.4.1 Flexión elasto – plástica

Es quizás el mecanismo más importante de absorción de energía que tiene una plataforma fija costa afuera de acero, con este se disipa la mayor cantidad de las fuerzas generadas cuando colisiona un barco contra esta.

Para poder entender esta forma de disipar energía hay que definir ciertos conceptos claves, referentes a la mecánica de los sólidos. Cuando un material es afectado por cierta carga, dependiendo de la magnitud, el material se puede comportar básicamente de dos formas, elásticamente o plásticamente, hasta que alcanza el colapso.

2.4.1.1 Comportamiento elástico

Cuando el material se comporta de forma elástica, la relación entre los esfuerzos y las deformaciones es lineal, esta relación viene dada por la ley de Hooke, la cual establece que:

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (\text{Ec.2})$$

Donde σ representa el esfuerzo actuante, ε la deformación unitaria y E el módulo de elasticidad del material.

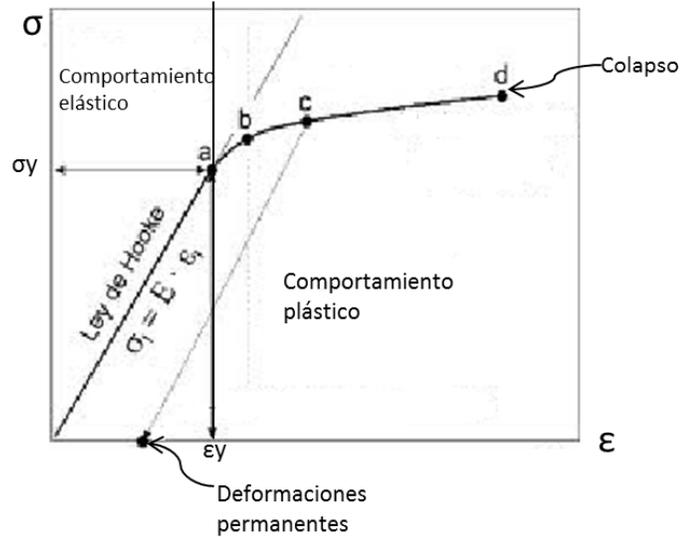
Cabe destacar que, cuando el material se comporta de forma elástica, al eliminar o disminuir la fuerza que actúa sobre este, el vuelve a su condición inicial sin deformaciones remanentes.

El material se comporta de esta forma hasta que en las fibras más alejadas al eje neutro de la sección se alcanza el esfuerzo de fluencia “ σ_y ”.

2.4.1.2 Comportamiento plástico

Cuando el material ha alcanzado el esfuerzo de fluencia, en la fibra más alejada al eje neutro de la sección, si se sigue aumentando la carga, este empieza a tener un comportamiento plástico, en el cual con poco incremento del esfuerzo actuante, se adquiere grandes deformaciones, hasta llegar al colapso.

Cuando el material se encuentra en el rango plástico, presenta su mayor resistencia antes del colapso, pues absorbe más energía, sin que exista ninguna relación entre los esfuerzos y las deformaciones que este sufre. Al disminuir o eliminar los esfuerzos este queda con una deformación permanente.



Graf. 2.1 Comportamientos de los materiales

A continuación se presenta un caso para visualizar los conceptos anteriormente descritos:

Se plantea una viga empotrada en sus dos extremos, de longitud “L”, en la cual actúa una carga uniformemente distribuida, denominada “w”. Como se muestra en la figura 2.2.

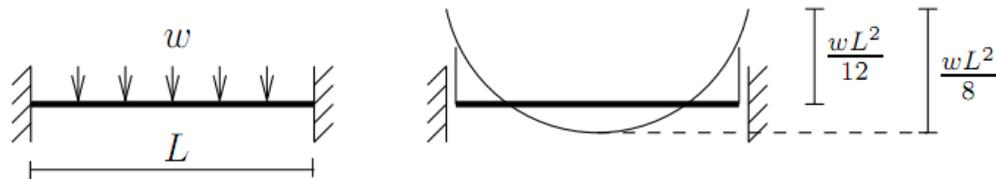


Fig. 2.2 Viga biempotrada

En la figura 2.2 se puede observar el diagrama de momentos asociado al caso de carga que se desea ejemplificar, mientras que la carga genere momentos en la viga que produzcan

esfuerzos menores o iguales al de fluencia ($\sigma \leq \sigma_y$), en la fibra más alejada al eje neutro de la sección, esta se va a comportar de forma elástica.

A medida que se aumenta la carga, se van a generar mayores momentos en la viga estudiada, mas fibras de la sección van alcanzando el esfuerzo de fluencia, hasta que todas llegan a su resistencia máxima. En la figura 2.3 se muestra como es la distribución de los esfuerzos a medida que estos aumentan.

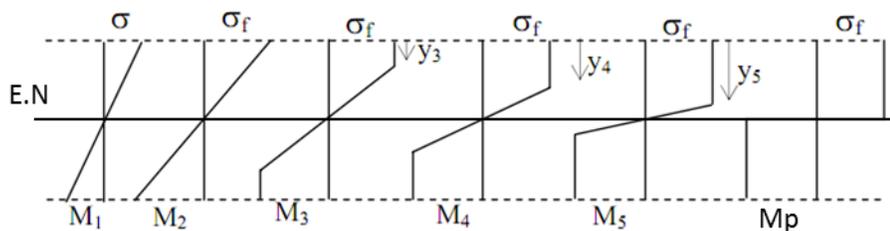


Fig. 2.3 Evolución de diagrama de esfuerzos, flexión pura

Como se visualiza en la figura, al principio la distribución de esfuerzos en la sección tiene forma triangular, hasta que en la fibra más alejada al eje neutro se alcanza el esfuerzo de fluencia, después de este punto se sigue aumentando la carga, el diagrama pasa a tener una forma trapezoidal, hasta que llega a ser rectangular, lo cual significa que todas las fibras han llegado a la resistencia máxima que pueden tener.

El momento asociado cuando se presenta el caso en que toda la sección ha alcanzado su esfuerzo de fluencia, es denominado momento plástico (M_p), y teóricamente es el máximo que puede resistir el material.

En el mismo orden de ideas, es importante resaltar que el momento plástico de un elemento depende directamente de las características geométricas que posea la sección de la viga. Este se puede calcular con la siguiente expresión:

$$M_p = Z * \sigma_y \quad (\text{Ec.3})$$

Donde σ_y , antes definido, es el esfuerzo de fluencia del material y Z es el módulo de sección plástica del material, el cual dependiendo de la sección transversal del elemento va a variar. El módulo de sección plástica normalmente es suministrado en los catálogos de los fabricantes de perfiles de acero y tubulares.

También es de mucha utilidad conocer el momento de fluencia “ M_y ” del material, el cual viene dado por la siguiente ecuación:

$$M_y = S * \sigma_y \quad (\text{Ec.4})$$

Donde “ S ” es el módulo de sección elástica del material

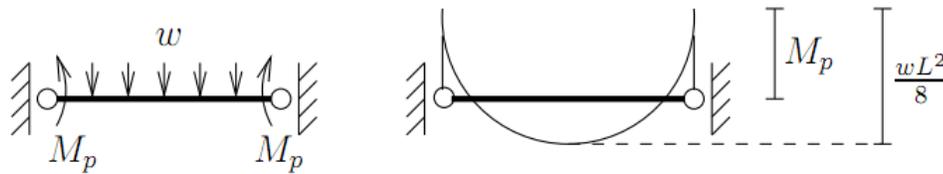


Fig.2.4 Momentos y rotulas plásticas en viga biempotrada

Para el caso ejemplificado, como se muestra en la figura 2.4, si se incrementa la carga progresivamente, la viga va alcanzando los momentos plásticos primero en donde se encuentran los empotramientos, en estos puntos la sección se va a encontrar totalmente plastificada, y se genera una rótula plástica, lo cual indica que el material pierde la capacidad de resistir más momentos y se asemeja al caso de una viga simplemente apoyada con los momentos plásticos aplicados en sus extremos.

Para generar el colapso de la viga, en la situación analizada, se debe seguir aumentando la carga hasta que se forme una tercera rótula plástica, en este caso, en el centro de la viga, haciendo que el sistema se vuelva inestable, creándose así un mecanismo de falla o colapso. Como se muestra en la figura 2.5, presentada a continuación:



Fig. 2.5 Mecanismo de colapso o falla

En base a lo explicado anteriormente, se puede realizar un análisis de una estructura o un solo elemento desde que se encuentra en el rango elástico hasta su colapso, esto se denomina análisis inelástico o Push Over.

El análisis inelástico o Push Over, se realiza variando la carga que actúa sobre un miembro hasta que llegue al colapso, obteniendo así las deformaciones que se generan para diferentes casos, lo cual permite realizar el gráfico Fuerza vs Deformación de la estructura. Actualmente, este tipo de análisis se realiza mediante diferentes programas orientados a la ingeniería civil, tales como SAP2000 y ETABS.

Al deformarse la estructura esta absorbe cierta cantidad de energía, hasta que llega al colapso. La cantidad de energía que puede disipar una estructura se determina calculando el área bajo la curva de Fuerza vs Deformación (obtenida del Push Over) hasta el colapso o hasta un punto de interés.

Mediante esta forma se pueden disipar grandes cantidades de energía al momento que ocurra la colisión de un buque contra la plataforma costa afuera, sin provocar daños considerables a la estructura en general. Las normas anteriormente mencionadas establecen

ciertos parámetros para determinar si la estructura es apta para resistir las fuerzas que genera el choque del buque de diseño contra la plataforma.

Es importante destacar que este análisis se debe realizar para diferentes casos de impacto que pueden ocurrir en la estructura, para así poder conocer el comportamiento de la plataforma costa afuera para distintos escenarios de colisión.

2.4.2. Abolladura local

La abolladura local en un miembro de la plataforma se genera cuando el buque colisiona con la proa o la popa, lo cual ocasiona en el miembro afectado una falla solo en el punto donde la embarcación impactó, creándose deformaciones locales en la zona, que absorben energía, pero también afectan la capacidad de resistencia de la rótula plástica, la cual se ve disminuida en la zona afectada.

A continuación en la figura 2.6 se muestra gráficamente la sección transversal de un miembro tubular abollado.

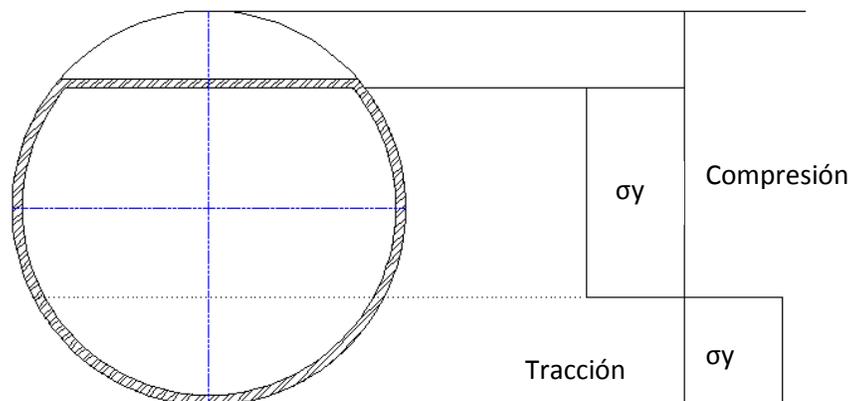
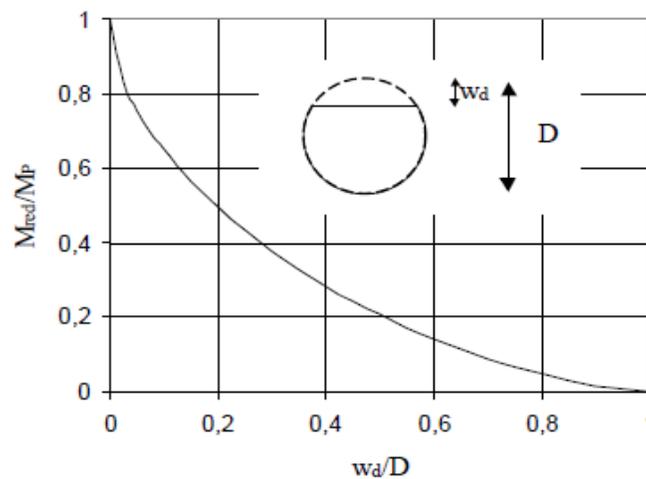


Fig. 2.6 Distribución de esfuerzos en sección abollada

Como se puede observar en la figura, cuando existe una abolladura en el miembro, conservadoramente, se deprecia el área afectada, lo cual trae como consecuencia que, las rótulas plásticas que se generan en esta zona tienen menos capacidad de resistencia.

Este mecanismo de absorción de energía, ha sido ampliamente estudiado, creándose diferentes métodos para poder calcularlo. La norma DNV, en la sección 3.7.4, establece que para miembros tubulares, el siguiente gráfico:



Graf. 2.2 Reducción del momento resistente debido a la abolladura local

Dónde:

$$\frac{M_{red}}{M_p} = \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \quad (\text{Ec.5})$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2w_d}{D} \right) \quad (\text{Ec.6})$$

Se entiende por “ w_d ” la profundidad de la abolladura, “ M_p ” es el momento plástico de la sección el cual se puede calcular de la forma antes explicada. Mediante

un proceso iterativo se puede determinar o la profundidad de la abolladura o la reducción del momento resistente que sufre la sección “ M_{red} ”.

El manual de diseño de la Health & Safety Executive también establece una metodología de cálculo para este caso, el cual presenta dos formas de calcular la fuerza de impacto (P_δ) y la energía de impacto (E_δ), mediante las ecuaciones de Amdahl y las ecuaciones realizadas por Ellinas y Walker, las cuales se presentan a continuación:

- Ecuaciones de Ellinas y Walker

$$P_\delta = 150 * Mp * \sqrt{\frac{\delta_d}{D}} \quad (\text{Ec.7})$$

$$E_\delta = 100 * Mp * \frac{\delta_d^{1.5}}{\sqrt{D}} \quad (\text{Ec.8})$$

- Ecuaciones de Amdahl

$$P_\delta = 21 * Mp * \sqrt{\frac{\delta_d}{t}} \quad (\text{Ec.9})$$

$$E_\delta = 14 * Mp * \frac{\delta_d^{1.5}}{\sqrt{t}} \quad (\text{Ec.10})$$

En todas las ecuaciones el término δ_d representa la profundidad de la abolladura, t es el espesor de la sección tubular, D es el diámetro de la sección y Mp es el momento plástico del miembro. Luego de conocer la fuerza de impacto y la energía de impacto, se debe determinar el nuevo módulo plástico de la sección deformada. Mediante las siguientes expresiones:

$$Z_\delta = D^2 * t * \left[\cos \frac{\varphi}{2} - \frac{\sin \varphi}{2} \right] \quad (\text{Ec.11})$$

$$\delta_d = D * \frac{1 - \cos \varphi}{2} \tag{Ec.12}$$

Donde φ es el ángulo representado en la figura 2.7, presentada a continuación:

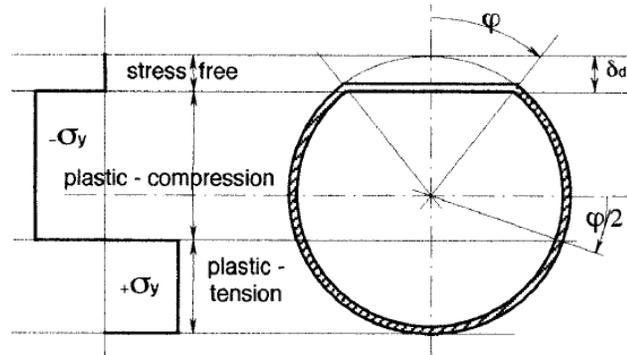
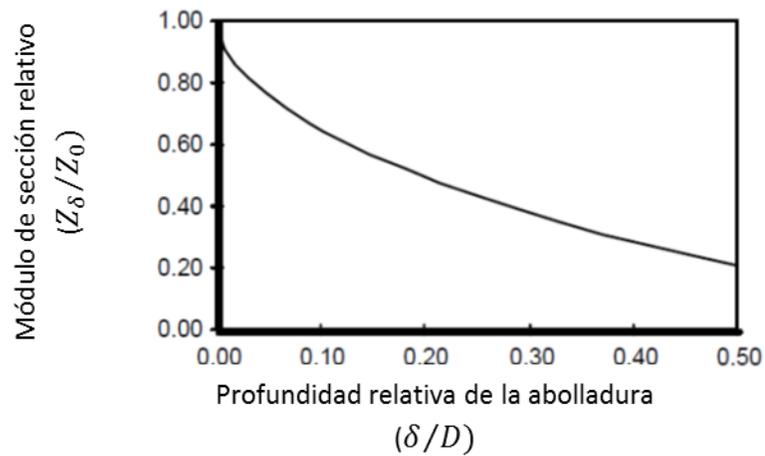


Fig. 2.7 Representación de términos de ecuaciones para sección abollada

El módulo plástico de la sección deformada también se puede determinar utilizando el siguiente gráfico que relación Z_δ/Z_0 y δ/D .



Graf. 2.3 Relación entre módulo plástico de la sección y profundidad de abolladura

En este método de cálculo también se debe realizar un proceso iterativo para poder determinar la profundidad de la abolladura y la energía que se logra disipar cuando se forma la abolladura.

2.4.3 Deformaciones plásticas por tracción

Cuando un buque colisiona contra la plataforma costa afuera, debido a que el miembro afectado se encuentra unido a otros elementos estructurales, estos tienden a traccionar al miembro donde ocurre el impacto. Como se muestra en la figura 2.8.

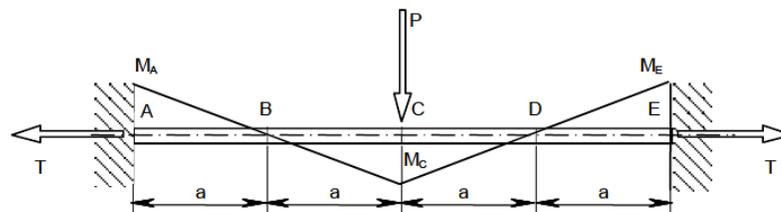


Fig. 2.8 Viga a tracción y flexión

Estas fuerzas de tracción generadas en el miembro, aunque no crean momentos, si producen esfuerzos en el elemento donde ocurre el impacto del buque, los cuales se suman a los esfuerzos que se originan debido a la flexión.

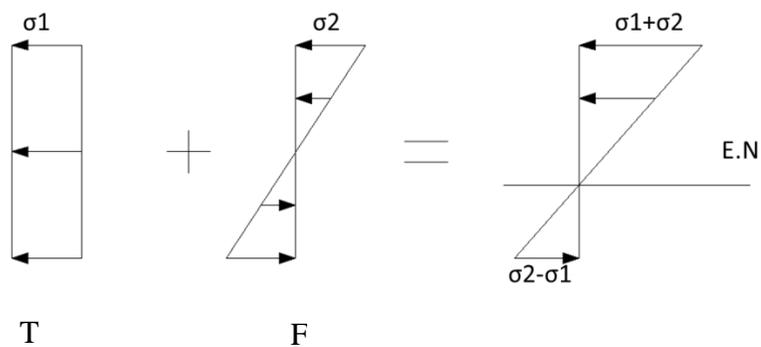


Fig. 2.9 Sumatoria de esfuerzos combinados

En la figura 2.9, se encuentra ejemplificado en la sumatoria de los esfuerzos debido a tracción y a flexión, en la sección del miembro. Se puede observar que la flexión genera tracción y compresión en el elemento, lo cual al combinarse con la tracción generada por la carga axial, crea una zona en la cual se suman los esfuerzos y otra donde se restan, tal como se muestra en el diagrama resultante.

Cuando se combinan la tracción con la flexión, el eje neutro de los esfuerzos no coincide con el eje de simetría de la figura, como ocurre cuando solo existe flexión en el miembro, como se puede ilustra en la figura 2.10.

La ubicación del eje neutro se obtiene cuando se alcanza el esfuerzo de fluencia en las fibras donde se encuentra la mayor concentración de esfuerzos. La posición de este va a variar dependiendo de la magnitud de los esfuerzos que se generen debido solo a la fuerza de tracción.

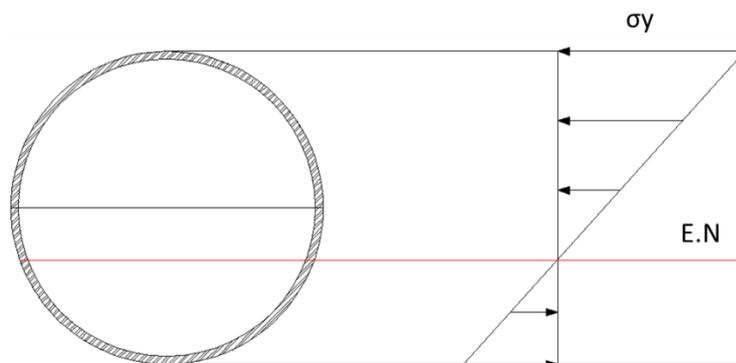


Fig. 2.10 Posición de eje neutro, considerando flexión y tracción

2.4.4 Deflexión global de la estructura

Al ocurrir la colisión de un buque contra una plataforma costa afuera, no solo se ve afectado el miembro donde ocurre el impacto, sino toda la estructura sufre deformaciones y desplazamientos debido a este evento accidental.

Usualmente las fuerzas de impacto no generan un mecanismo de falla global en la estructura, siendo estas, menores que las generadas en el diseño por oleaje.

De todas formas, se puede verificar el comportamiento de la estructura cuando ocurre el peor escenario de colisión planteado, analizando globalmente la estructura.

Por lo antes descrito, en el diseño de plataformas costa afuera, debido a la colisión de un buque contra la estructura de la plataforma, este mecanismo de disipación de energía es despreciado, de forma conservadora.

2.4.5 Deformación local en la embarcación

En el momento en que un buque impacta una plataforma costa afuera, no solo se ve afectada la estructura de la plataforma, sino que también la embarcación sufre daños debido a las fuerzas generadas en el impacto.

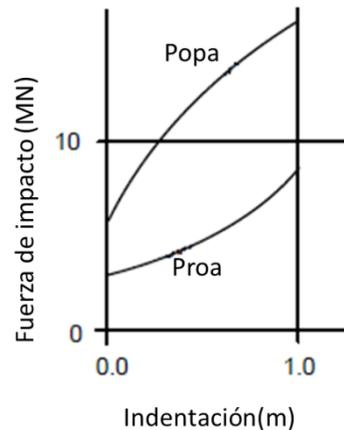
El barco puede colisionar de diferentes formas contra la estructura de la plataforma. Normalmente el buque puede impactar con la proa, con la popa o de costado.

Cuando el barco impacta con la proa o la popa, en la práctica es común usar la curva fuerza de impacto vs indentación, suministrada en la Norma Noruega Det norske Veritas. Cuando colisiona con la proa la curva presenta las siguientes características:

- La fuerza mínima para generar una indentación (deformación) en la proa debe ser de 3 MN
- Para una energía de impacto de 5MJ se considera una fuerza de impacto de 8MN

En el caso de la popa el barco puede ser considerado como un elemento más rígido que la proa, generando fuerzas en el impacto mayores o iguales a 7 MN. En el gráfico 2.4 se muestra

la curva de fuerza de impacto vs indentación, para cuando el buque colisiona con la proa o la popa.



Graf.2.4 Curva de indentación del buque

Para el caso en que el buque colisiona de costado contra la plataforma, se asume que esta fuerza es tomada por las columnas de la plataforma costa afuera y no por los otros miembros de la estructura.

La colisión del buque contra la estructura, genera en éste deformaciones, las cuales como ya hemos explicado, pueden ser grandes o pequeñas dependiendo de cómo este impacte en la plataforma, por lo tanto, gracias a estas deformaciones que sufre la embarcación, se logra disipar parte de la energía producida por el impacto, lo cual indica que no solo el miembro donde ocurre el choque se ve afectado. Este efecto producto de la situación accidental, normalmente, cuando se diseña una plataforma costa afuera es tomado en cuenta, ya que puede lograr disipar una porción considerable de la energía cinética generada en el impacto.

2.5 Influencia de la interacción suelo – estructura

Todas las obras de ingeniería civil son construidas apoyándose en el suelo o en la roca que se encuentra en el lugar donde está ubicada la estructura, por consiguiente hay que conocer el tipo de material que constituye el suelo y las cargas que van a ser transmitidas a éste.

En el caso de las plataformas costa afuera, la solución a este problema tiene una gran importancia práctica, ya que permite conocer con cierta precisión como es el comportamiento del suelo bajo las acciones que se van a producir durante el impacto a la estructura.

La colisión de un buque contra la plataforma costa afuera, genera fuerzas laterales, las cuales van a ser transmitidas al suelo, y si este no está en capacidad de disiparlos adecuadamente, pueden existir desplazamientos permanentes no deseables o la falla del elemento de cimentación.

En plataformas costa afuera fijas, normalmente, los elementos de fundación los pilotes. Para estimar sus dimensiones, se suele considerar que está empotrado a una profundidad, por debajo del lecho marino, despreciando los esfuerzos que puede llegar a absorber el suelo.

Los proyectos de plataformas costa afuera ameritan un cálculo más detallado y preciso del comportamiento del suelo, evaluándose no solo como va a actuar el pilote sometido a cargas axiales sino considerando también su comportamiento a cargas laterales, para ello se realizan estudios del suelo en el sitio que permiten conocer cuáles son sus características, y mediante la utilización de programas especializados o cálculos manuales, se puede determinar la profundidad óptima, bajo el lecho marino, que debe tener el pilote para resistir todas las cargas y evaluar la disipación de energía debido al suelo.

Esto se puede traducir en un ahorro económico importante y en un pilote más óptimo.

2.6 SAP2000

El programa de análisis estructural SAP2000, fue creado por la compañía Computer and Structure, Inc (CSI), destinado a facilitar los cálculos de gran variedad de tipos de estructuras, permitiendo realizar análisis sísmicos, inelásticos, estáticos, entre otros, admitiendo modificar las propiedades de los elementos y materiales, además de permitir el diseño aplicando muchas de las normas que rigen la ingeniería civil a nivel mundial.

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

En esta sección se describe, en forma detallada, todos los procedimientos llevados a cabo durante la elaboración de este trabajo de investigación, para cumplir con los objetivos propuestos.

3.1 Tipo de investigación

La siguiente investigación se corresponde con una investigación de tipo documental la cual según Galán, M. (2011) tiene como objetivo “elaborar un marco teórico conceptual para formar un cuerpo de ideas sobre el objeto de estudio y descubrir respuestas a determinadas interrogantes a través de la aplicación de procedimientos documentales”.

Para realizar este trabajo especial de grado en forma adecuada, se seguirán los siguientes pasos durante el desarrollo del proyecto planteado:

I) Recopilar información relativa a los métodos de cálculo de fuerzas de impacto.

Se realizará la recopilación de información relativa a los diferentes métodos de cálculo presentes en las normas y documentación técnica, referentes a fuerzas de impacto, lo cual es de suma importancia para poder desarrollar adecuadamente los objetivos planteados en el trabajo de investigación.

II) Interpretar la norma noruega, Det norske Veritas Recommended Practice for Design Against Accidental Loads(DNV- RP – C204), del 2010, para el diseño debido a cargas accidentales.

Se interpretarán los métodos de cálculo y las gráficas existentes en la norma noruega DNV-RP-C204, del año 2010, destinada a tratar el tema de cargas accidentales en plataformas costa afuera.

III) Interpretar el manual de diseño publicado por la Health & Safety Executive, titulado Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms.

Se interpretarán los métodos de cálculo y las gráficas existentes en el manual de diseño publicado por la HSE, en el 2004, para tratar específicamente el tema relacionado con las cargas accidentales debido a la colisión de buques contra plataformas costas afuera.

IV) Interpretar la norma norte americana, American Petroleum Institute Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform- Working Stress Design (API-RP2A-WSD), del 2002, para el diseño de plataformas costa afuera.

Se interpretarán los métodos de cálculo y las gráficas existentes en la norma americana API-RP2A-WSD, del año 2002, destinada a tratar el tema del diseño de plataformas costa afuera.

V) Aplicación del análisis inelástico de estructuras (Push Over) para la evaluación de las fuerzas de impacto.

Se analizará la aplicación de cargas progresivas hasta el colapso de una estructura, en el rango elasto-plástico, mediante la utilización del programa de análisis estructural SAP2000

VI) Aplicar métodos de cálculo al sistema de protección de impacto de la plataforma costa afuera del Proyecto “Ingeniería básica y de detalle estructura de amarre para exportación de gas, Golfo de Morrosquillos – Colombia”.

Se aplicarán los métodos de cálculos planteados al caso de una estructura de protección de un muelle destinado a la exportación de gas,

ubicado en la costa atlántica de Colombia, específicamente en el Golfo de Morrosquillos

VII) Emitir conclusiones y recomendaciones, referente a los resultados obtenidos

Se emitirán las conclusiones y recomendaciones referentes a los resultados obtenidos mediante la utilización de los métodos de cálculo planteados en la documentación investigada y el programa de análisis estructural SAP2000.

El marco metodológico del trabajo especial de grado se enmarca en la consideración, análisis y propuestas sobre aspectos incluidos en el conjunto de normas relacionadas con la buena práctica de la ingeniería civil

CAPITULO IV

ANALISIS E INTERPRETACION DE NORMAS

En este capítulo se procederá a realizar un análisis y comparación sobre los métodos de cálculos establecidos en las normas, que abarcan el tema de diseño de plataformas costas afuera debido a colisión de buques.

4.1 Det norske Veritas Recommended Practice for Design Against Accidental Loads (DNV- RP – C204)

La norma noruega DNV-RP-C204 es aplicable a cualquier plataforma costa afuera, bien sea fija o flotante, construida con acero. Los métodos de cálculo descritos pueden ser aplicados tanto para la parte sumergida de la estructura como para la que se encuentra por encima del nivel del agua.

La presente norma, trata solo el tema de eventos accidentales en plataformas costas afuera, a continuación se mostrarán los aspectos relacionados solo a la colisión de buques contra estructuras fijas:

4.1.1 Energía de impacto

La norma establece que la energía que se genera cuando impacta un barco contra la estructura de la plataforma costa afuera es la siguiente.

$$E_C = \frac{1}{2} * (m_s + a_s) * v_s^2 \quad (\text{Ec.13})$$

Dónde:

- E_C = energía de impacto
- m_s = masa del barco

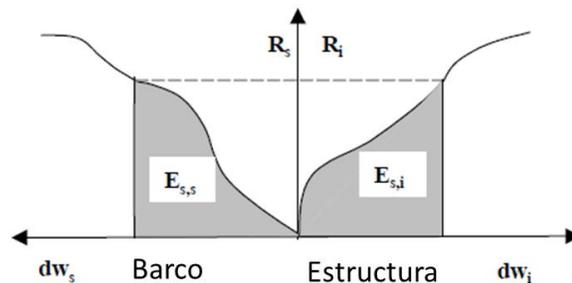
- a_s = masa añadida del barco
- v_s = velocidad de atraque del barco, recomienda utilizar 2 m/s

Esta norma recomienda utilizar una masa total, masa del barco más masa añadida, de al menos 5000 ton.

Al calcular la energía de impacto asociada a las recomendaciones mínimas de la norma, velocidad de 2m/s y peso igual a 5000 ton, se obtiene que esta tiene un valor de 10 MJ

4.1.2 Disipación de energía

Se establece que la energía va a ser disipada tanto por la indentación sufrida por el barco como por el desplazamiento y deformaciones ocasionadas en la estructura, por ende la energía de impacto que puede ser disipada viene dada por la sumatoria de estas, como se muestra en el siguiente gráfico.

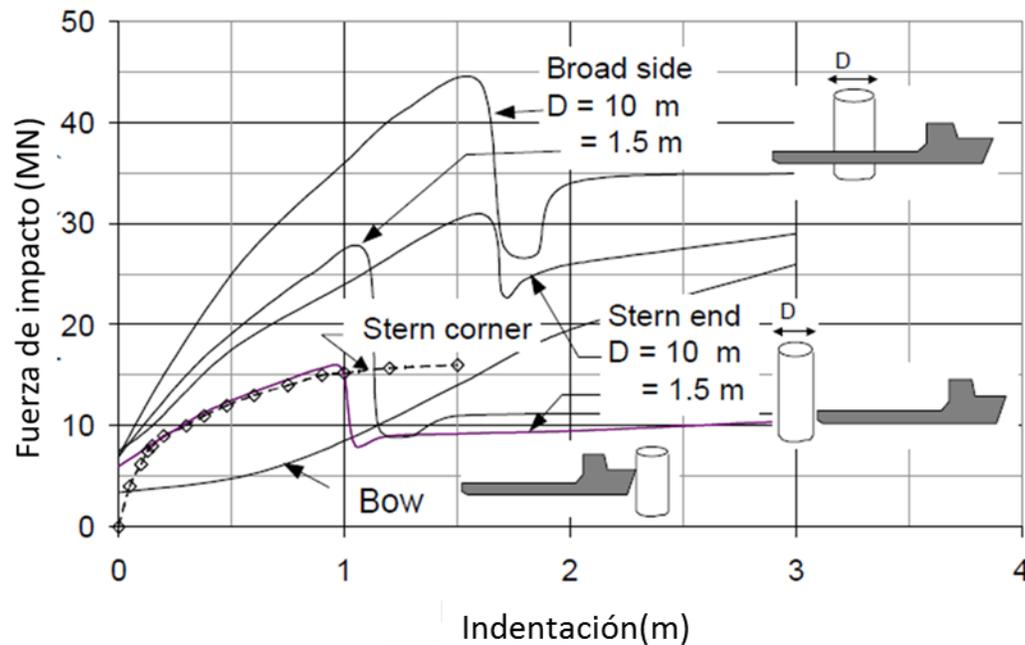


Graf.4.1 Energía disipada

La sumatoria del área bajo estas curvas representa la energía disipada, la cual debe ser igual o mayor que la energía de impacto.

4.1.2.1 Deformación local de la embarcación

La norma DNV-RP-C204 proporciona el siguiente gráfico, el cual se relaciona la fuerza de impacto con la indentación o deformación que sufre el barco, para diferentes escenarios de colisión.



Graf. 4.2 Curva Fuerza vs Indentación (DNV)

En el gráfico se entiende por:

- Bow= Proa
- Stern corner= Esquina de la popa
- Stern end= final de la popa
- Board side= costado del barco

El gráfico 4.2, fue determinado utilizando barcos con un tonelaje mínimo de 5000 ton

4.1.2.2 Deformación en el miembro impactado

La norma especifica que los procedimientos de cálculos referentes a este tema son aplicables solo para plataformas costa afuera fijas del tipo Jackets, las cuales son estructuras que poseen como miembros estructurales: vigas, columnas y arriostramientos en diagonal.

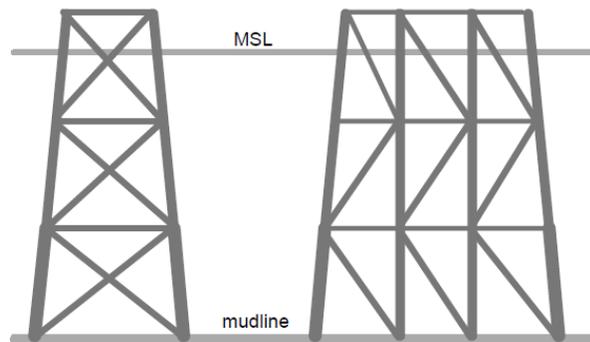
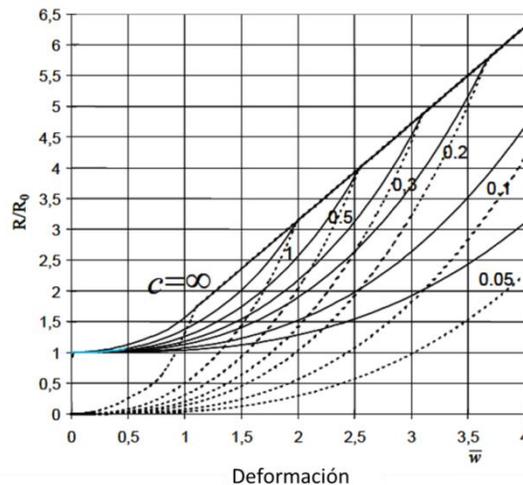


Fig.4.1 Plataformas costa afuera fijas tipo Jacket

Para determinar la deformación que sufre la estructura en el momento del impacto, la norma DNV-RP-C204, proporciona el siguiente gráfico para miembros tubulares.



Graf.4.3 Relación fuerza-deformación para miembros tubulares (DNV)

Para determinar la relación R/R_0 , la norma suministra las siguientes ecuaciones:

$$R_0 = \frac{4 \cdot c_1 \cdot M_p}{L} \quad (\text{Ec.14})$$

Para obtener el valor de \bar{w} , parámetro adimensional de deformación, se tiene la siguiente expresión:

$$\bar{w} = \frac{w}{c_1 w_c} \quad (\text{Ec.15})$$

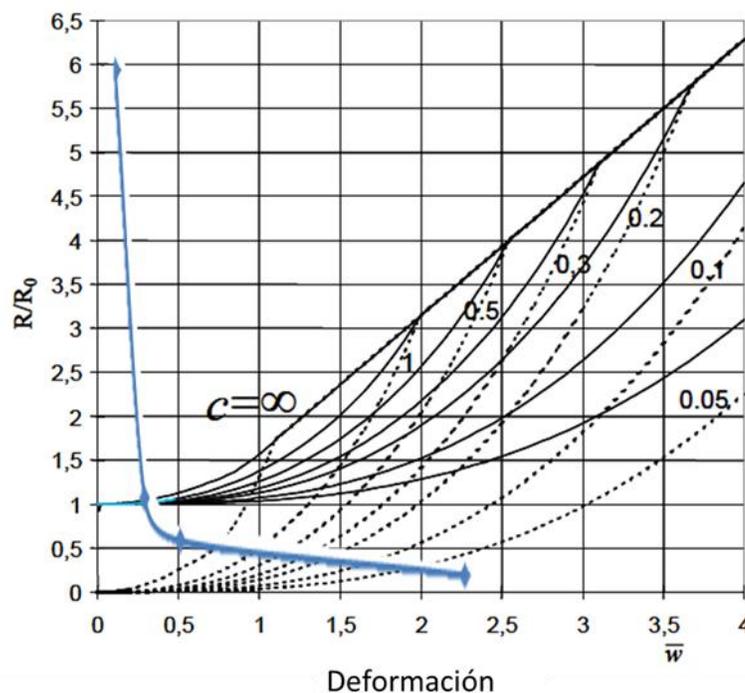
Y el valor de c representa la rigidez adimensional del miembro, esta viene dada por la siguiente ecuación:

$$c = \frac{4c_1 \cdot k \cdot w_c^2}{F_y \cdot A \cdot L} \quad (\text{Ec.16})$$

Dónde:

- R = Fuerza producida en el impacto
- c_1 = coeficiente que varía entre 1 y 2, dependiendo de la condición de apoyo del miembro.
- M_p = momento plástico, los subíndices 1 y 2 representan los extremos del miembro
- L = longitud del miembro
- w = deformación del miembro
- w_c = deformación característica para vigas tubulares, es igual a la mitad del diámetro
- k = rigidez del miembro
- F_y = carga máxima que resiste el miembro en el rango elástico
- A = área
- L = longitud

Una forma de poder utilizar este gráfico de forma sencilla es realizar una curva que represente cierta cantidad de energía que se desea resistir, cuyos ejes estén asociados a la deformación y la fuerza actuante, se convierten estos ejes a las relaciones R/R_0 y \bar{w} , y luego se intercepta con las diferentes curvas de la gráfica 4.3, estos puntos de intersección van a representar la fuerza y la deformación que ocurre en el miembro para disipar la energía determinada, como se muestra en el gráfico a continuación:



Graf.4.4 Intersección gráfico fuerza-deformación y energía

La línea azul representa una energía de 4MJ, para un tubo de diámetro 1,22 m y longitud de 8 m, características de los pilotes que van a ser analizados más adelante, dependiendo de la rigidez axial que esté presente, va a intersectar diferentes curvas, obteniéndose distintas relaciones de fuerza y deformación.

4.1.2.3 Abolladura local

El procedimiento para determinar la abolladura local en el miembro impactado, establecido por la DNV-RP-C204, se encuentra explicado en la sección 2.4.2, del marco teórico.

Además, establece que este efecto puede ser despreciado siempre y cuando se esté analizando un miembro tubular cuyas características sean tales que presente una rigidez muy elevada

4.2 American Petroleum Institute Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform- Working Stress Design (API-RP2A-WSD).

Esta norma norte Americana abarca todo lo referente al diseño de las plataformas costa afuera, a diferencia del contenido de la DNV-RP-C204, que solo está enfocada a los eventos accidentales que pueden ocurrir en estas estructuras.

Referente al evento accidental de la colisión de un buque contra la plataforma, la API-RP2A-WSD establece lo siguiente:

4.2.1 Energía de impacto

Para determinar la energía de impacto que se genera en la colisión se plantea la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{1}{2} * a * m_s * v_s^2 \quad (\text{Ec.17})$$

Donde m_s y v_s , se dijo anteriormente, representan las masa del barco y su velocidad de ataque, a es un coeficiente el cual vale 1,4 cuando el barco impacta de costado y 1,1 cuando impacta con la proa o la popa, este representa la masa añadida del barco.

Recomiendan para calcular la energía de impacto utilizar una masa de 1000 ton y una velocidad de ataque de 0,5 m/s, con estos dos valores establecidos la energía de impacto tendría una magnitud de 0,14 MJ.

Al comparar las energías mínimas establecidas por la DNV-RP-C204 y la API-RP2A-WSD, se puede determinar que la calculada con la norma noruega es 71 veces mayor que la sugerida por la norma americana, esto se debe a la gran diferencia de masa y velocidad existente, en los valores mínimos requeridos para los cálculos.

4.2.2 Disipación de energía

Para determinar la energía que se disipa debido a las deformaciones elasto- plásticas en el miembro impactado y la abolladura que ocurre en la embarcación la norma API-RP2A-WSD no establece ningún procedimiento específico de cálculo. Suministra una tabla en la cual se presentan diferentes espesores recomendados para varios diámetros de tubos, la cual se presenta a continuación:

Tabla 1. Espesor requerido para resistir impactos de buques (API)

Diameter (inch)	$F_y = 345 \text{ MPa (50 ksi)}$			$F_y = 240 \text{ MPa (35 ksi)}$			
	B*=	8.0	6.0	4.0	8.0	6.0	4.0
		Wall Thickness, t (inch)			Wall Thickness, t (inch)		
12.0	2.834	2.125	1.417	3.595	2.696	1.797	
14.0	2.429	1.822	1.215	3.081	2.311	1.541	
16.0	2.125	1.594	1.063	2.696	2.022	1.348	
18.0	1.889	1.417	0.945	2.396	1.797	1.198	
20.0	1.700	1.275	0.850	2.157	1.618	1.078	
22.0	1.546	1.159	0.773	1.961	1.471	0.980	
24.0	1.417	1.063	0.708	1.797	1.348	0.899	
26.0	1.308	0.981	0.654	1.659	1.244	0.830	
28.0	1.215	0.911	0.607	1.541	1.155	0.770	
30.0	1.134	0.850	0.567	1.438	1.078	0.719	
32.0	1.063	0.797	0.531	1.348	1.011	0.674	
34.0	1.000	0.750	0.500	1.269	0.952	0.634	
36.0	0.945	0.708	0.472	1.198	0.899	0.599	
38.0	0.895	0.671	0.447	1.135	0.851	0.568	
40.0	0.850	0.638	0.425	1.078	0.809	0.539	
42.0	0.810	0.607	0.405	1.027	0.770	0.514	
44.0	0.773	0.580	0.386	0.980	0.735	0.490	
46.0	0.739	0.554	0.370	0.938	0.703	0.469	
48.0	0.708	0.531	0.354	0.899	0.674	0.449	
50.0	0.680	0.510	0.340	0.863	0.647	0.431	
52.0	0.654	0.490	0.327	0.830	0.622	0.415	
54.0	0.630	0.472	0.315	0.799	0.599	0.399	
56.0	0.607	0.455	0.304	0.770	0.578	0.385	
58.0	0.586	0.440	0.293	0.744	0.558	0.372	
60.0	0.567	0.425	0.283	0.719	0.539	0.359	
62.0	0.548	0.411	0.274	0.696	0.522	0.348	
64.0	0.531	0.399	0.266	0.674	0.505	0.337	
66.0	0.515	0.386	0.258	0.654	0.490	0.327	
68.0	0.500	0.375	0.250	0.634	0.476	0.317	
70.0	0.486	0.364	0.243	0.616	0.462	0.308	
72.0	0.472	0.354	0.236	0.599	0.449	0.300	

Los valores de esta tabla han sido obtenidos utilizando una energía de impacto correspondiente a una masa del barco de 1000 ton, con una velocidad de traque de 0,5 m/s y con un coeficiente de masa añadida de 1,4, cuando el buque colisiona de costado, condición más desfavorable.

El valor de B* viene dado por la relación entre el diámetro del tubo y la abolladura del miembro. Esta tabla solo puede ser aplicada para plataformas fijas costas afuera del tipo jacket.

Para determinar la energía disipada por media de la abolladura local del miembro impactado, y la fuerza requerida para causar esta deformación establece las siguientes ecuaciones:

$$P_d = 15M_p \left(\frac{D}{t}\right)^{1/2} \left(\frac{X}{R}\right)^{1/2} \quad (\text{Ec.17})$$

$$E_d = 3,54F_y(t * X)^{1/2} \quad (\text{Ec.18})$$

Donde X representa la profundidad de la abolladura, t es el espesor de la sección, M_p corresponde al momento plástico, D es el diámetro de la sección y R el radio de la misma, F_y es el máximo esfuerzo que resiste el material en rango elástico, P_d y E_d son la fuerza de abolladura y la energía que se disipa con la abolladura del miembro respectivamente.

4.3 Health & Safety Executive (HSE), Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms.

Este manual de diseño trata solamente los casos cuando el buque impacta con la proa o la popa a la plataforma costa afuera. Esta publicación de la HSE surge de la necesidad de presentar de forma simple una metodología de cálculo para este evento accidental, debido a que las presentadas en las normas no es fácil aplicar la información de forma consistente.

4.3.1 Energía de impacto

Este manual de diseño establece que los miembros deben resistir como mínimo una energía de impacto de 4MJ.

4.3.2 Disipación de energía

Al igual que las normas estudiadas anteriormente, la energía es disipada mediante diferentes mecanismos.

4.3.2.1 Deformación local de la embarcación

Para determinar cuanta energía se disipa mediante este efecto se presenta el gráfico 2.4, antes expuesto en la sección 2.4.5 del marco teórico.

4.3.2.2 Flexión elasto – plástica en los miembros impactados

Al igual que las normas anteriores, esta metodología de cálculo solo se aplica a plataformas fijas costas afuera de tipo Jacket.

En este manual de diseño se obtienen las fórmulas para determinar la energía mediante la utilización del principio del trabajo virtual.

Para cuando el impacto ocurre en el centro del miembro la fuerza y la energía disipada vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$P_u = 8 \frac{M_p}{L} \quad (\text{Ec.19})$$

$$E = 4M_p * \theta_{max} \quad (\text{Ec.20})$$

Donde θ_{max} es la rotación máxima que sufre la viga, los demás parámetros están en concordancia con lo expuesto anteriormente

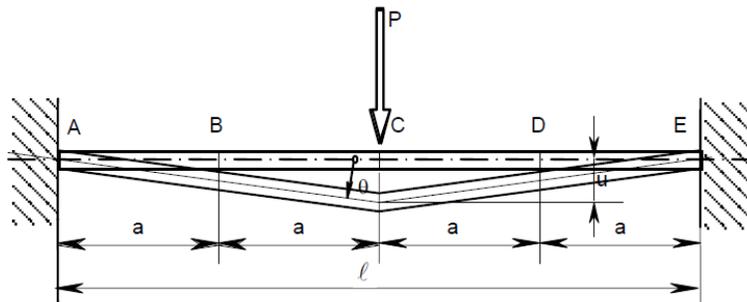


Fig.4.2 Viga biempotrada con carga aplicada en el centro

Para cuando el impacto ocurre en un lugar diferente al centro de la viga, las fórmulas son las siguientes:

$$P_u = 10,7 \frac{M_p}{L} \quad (\text{Ec.21})$$

$$E = 2,7 M_p * \theta_{max} \quad (\text{Ec.22})$$

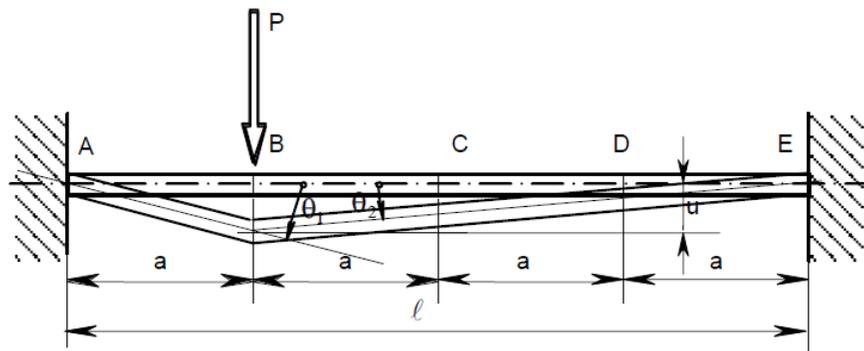


Fig.4.3 Viga biempotrada con carga aplicada fuera del centro

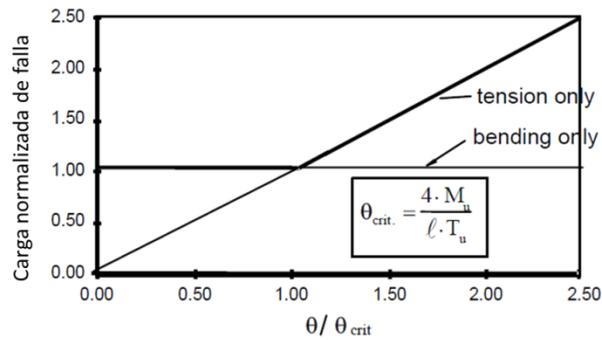
4.3.2.3 Abolladura local

El procedimiento establecido por la HSE para determinar cuanta energía se disipa por este mecanismo fue explicado anteriormente en la sección 2.4.2 del marco teórico.

4.3.2.4 Deformaciones plásticas por tracción en los miembros impactados

Para determinar la energía disipada por estas deformaciones el manual de diseño establece, un gráfico el cual relaciona el ángulo de rotación (θ) con la fuerza necesaria para generarlo, tomando en cuenta la tracción que ocurre en el miembro.

En el cual si $\theta \leq \theta_c$ se puede despreciar la energía disipada por la tracción, de lo contrario esta energía adicional debe ser tomada en cuenta.



Graf.4.5 Curva de deformación plástica para secciones tubulares a tracción y flexión

4.3.2.5 Deformación global de la estructura

Este manual de diseño no hace referencia alguna acerca de este mecanismo de disipación de energía.

CAPITULO V

APLICACIÓN AL CASO REAL

En el presente capítulo se explicará de manera detallada como se utiliza el programa SAP2000 para realizar los cálculos de una estructura en rango no lineal o elasto- plástico.

5.1 Descripción del proyecto

Se aplicará, como se ha mencionado anteriormente, el análisis Push over y lo establecido en normas y manuales de diseño a una estructura de protección de un muelle de exportación de gas, perteneciente a Pacific Gas Energy (PGE), ubicado en la costa atlántica de Colombia, específicamente en el Golfo de Morrosquillos, municipio Tolú, Departamento de Sucre.

En esta sección se realizarán los cálculos necesarios para el análisis de los pilotes de protección de la plataforma Riser del terminal para exportación de gas. Se tratarán, principalmente, los siguientes aspectos:

- Dimensionamiento y geometría de los pilotes de protección
- Definición de escenarios de colisión
- Definición de rótulas plásticas en pilotes y vigas
- Determinación de la profundidad de hinca y análisis de la interacción suelo pilote
- Determinación de fuerzas y energías de deformación

5.2. Cálculos aplicados

5.2.1 Embarcación de diseño

La embarcación de uso frecuente que será utilizada para el abastecimiento de la plataforma Riser destinada a la exportación de gas, y que será considerada como el buque que posiblemente pueda impactar la estructura, posee las siguientes características:

- Tonelaje de peso muerto (DWT): 860
- Manga: 13,2 m
- Eslora: 48 m
- Calado máximo: 4,5 m
- Puntual: 5,2 m

Se establece un coeficiente de incremento de masa “ K_m ”, de 1,05, el cual es el perteneciente para cuando el barco atraca de forma frontal

Con la siguiente ecuación se calcula la masa de la embarcación:

$$M = L_{pp} * B * D * \gamma_w * K_m \quad (\text{Ec.23})$$

$$M = 48 * 13,2 * 5,2 * 1,03 * 1,05$$

$$M = 3563 \text{ ton}$$

La Norma noruega Det norske Veritas establece una velocidad de diseño para el impacto accidental de 2m/s(3,8 nudos) para buques que posean una masa de 5000 ton de desplazamiento en sus consideraciones para el diseño de las plataformas costa afuera ubicadas en el mar del norte, con una energía mínima de impacto de 10MJ.

Para el caso analizado lo establecido en la Det norske Veritas aparentan ser excesivas, ya que en esta bahía se posee poco oleaje y condiciones favorables de viento, por esta razón se utiliza una velocidad del buque en 1,5 m/s, equivalente a 3 nudos. Que proporcionará la energía mínima de impacto, tal como se muestra a continuación:

$$E_c = \frac{1}{2} * 3563 \times 10^3 \text{ kg} * (1,5 \text{ m/s})^2$$

$$E_c = 4008,38 \text{ KN} - \text{m} \approx 4 \text{ MJ}$$

5.2.2 Modelo estructural

El modelo estructural de la protección de la plataforma de llegada de tuberías (Riser) va a estar conformada por pilotes verticales empotrados en el lecho marino con vigas en su tope que servirán de arriostramiento.

5.2.2.1 Geometría de la estructura de protección

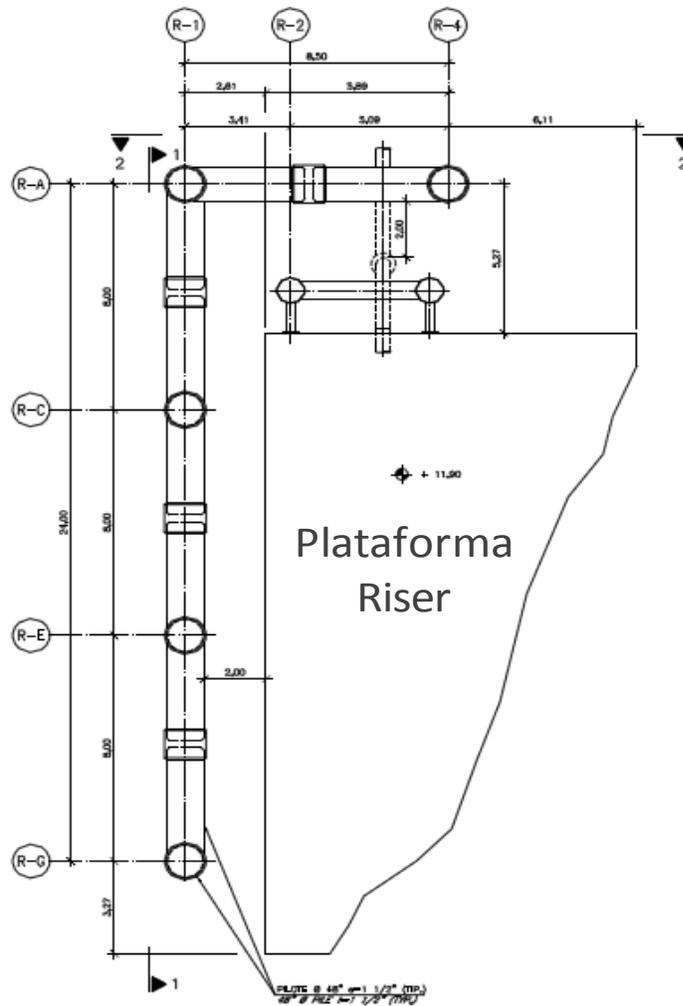


Fig.5.1 Vista de planta de estructura de protección

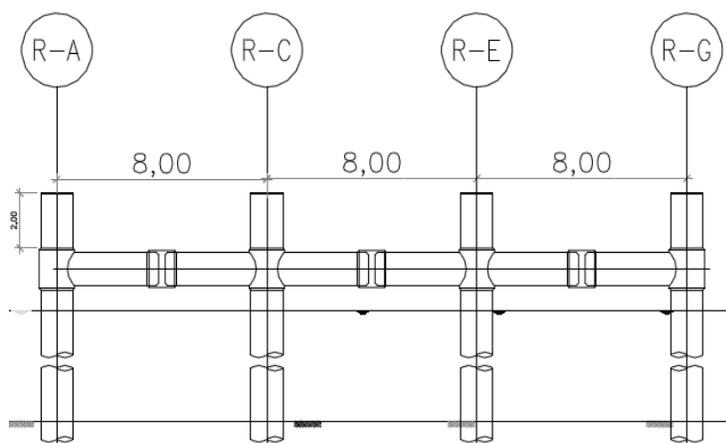


Fig.5.2 Vista, sección 1-1

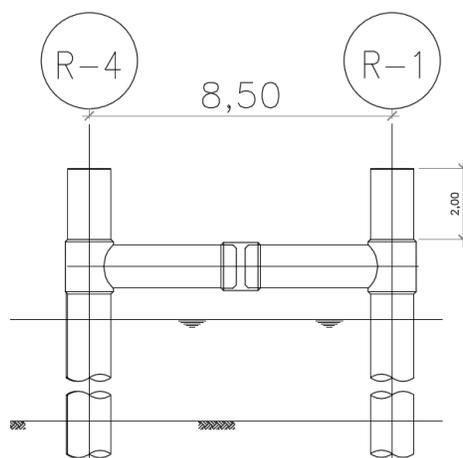


Fig.5.3 Vista, sección 2-2

5.2.2.2 Características de los materiales estructurales

El acero a utilizar para los elementos estructurales va a ser un ASTM A36 el cual presenta las siguientes propiedades:

- Esfuerzo cedente (σ_y) = 2530 kgf/cm²
- Esfuerzo ultimo (σ_u) = 2850 kgf/cm²

- Módulo de elasticidad (E) = $2,1 \times 10^6$ kgf/ cm²
- Relación de Poisson = 0,3
- Coeficiente de dilatación térmica (α) = 12×10^{-6} °C⁻¹

5.2.2.3 Características de vigas y pilotes

Los pilotes y vigas a utilizar van a presentar las siguientes características:

- Diámetro (D) = 1,22 m (48")
- Espesor (t) = 38,1 mm (1 1/2")
- Área (A) = 0.14 m²
- Inercia (I) = 0,39 m⁴
- Momento máximo elástico (M_y) = 10,92 MJ
- Momento plástico (M_p) = 14,16 MJ
- Tracción plástica = 35,34 MN

5.2.3 Mecanismos de absorción de energía

Para evaluar la estructura de protección de la plataforma cuando es colisionada por un buque de diseño definido anteriormente, se procede a determinar la capacidad que tiene esta, de disipar energía mediante los mecanismos explicados en el CAPITULO II.

5.2.3.1 Abolladura local

Para el proyecto analizado no se toma en cuenta cómo afecta la abolladura local al miembro, su pérdida de capacidad de resistencia y tampoco se considera la energía disipada por este mecanismo.

En el Anexo B se presenta un ejemplo, en el cual se estima la reducción de la capacidad de resistencia del miembro afectado, utilizando la metodología explicada en el manual de diseño publicado por la HSE.

5.2.3.2 Flexión elasto-plástica

Para determinar la energía disipada por la estructura de protección mediante este mecanismo de absorción de energía se utilizará un análisis inelástico o Push Over, empleando el programa SAP2000.

Se estimulará lateralmente la estructura con diferentes casos de carga, no simultáneos, ubicando fuerzas en diferentes sitios de esta, para conocer su comportamiento en distintas situaciones de colisión y así conocer cuál es la más desfavorable.

A los miembros que componen la estructura se les otorgará o permitirá, en sus secciones más críticas, la capacidad de deformarse plásticamente (rótulas plásticas) hasta llegar a su colapso.

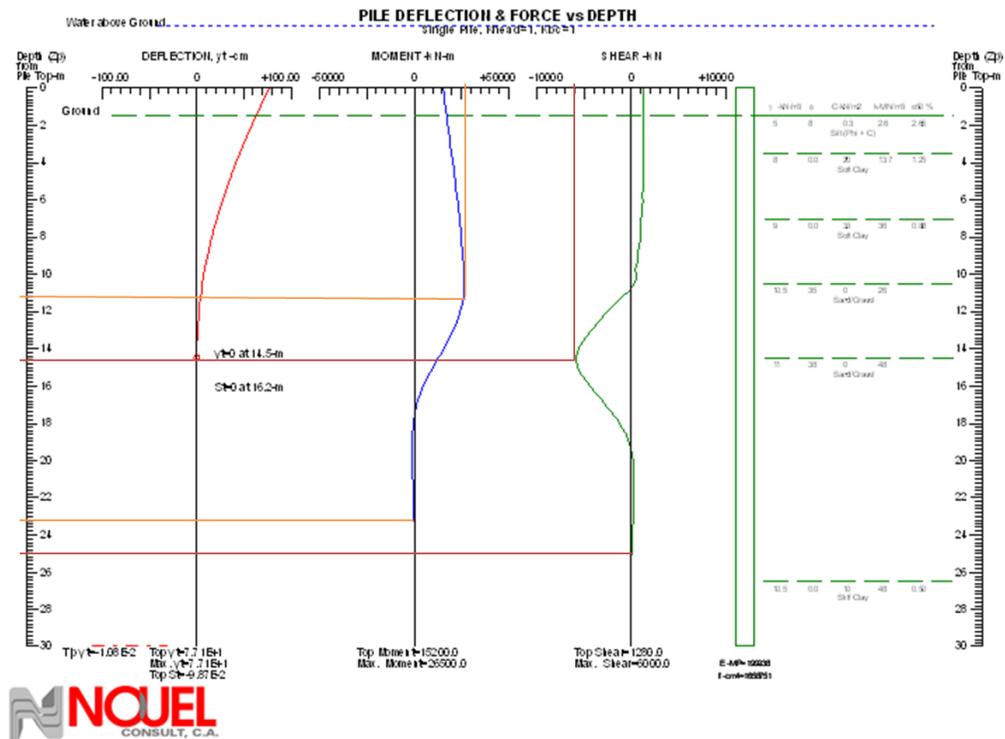
Es importante resaltar que este análisis se realizará tomando en cuenta la relación que existe entre el suelo de fundación y la estructura de protección. Para ello se utilizará un programa especializado en ingeniería de fundaciones llamado Allpile, en el cual determinadas las características del suelo en el sitio, proporciona el comportamiento de este y la profundidad a que deben enterrarse los pilotes de la estructura.

Al analizar los métodos de cálculo establecidos en las normas para hallar la energía disipada por este mecanismo, estas delimitan la aplicación de los procesos a una plataforma fija costa afuera del tipo Jacket, sistemas aporticados con diagonales, y en este caso se estudia una estructura de protección, compuesta por pilotes arriostrados, lo que sugiere que estos métodos de cálculo no pueden ser aplicados al caso que se desea examinar.

5.2.3.2.1 Interacción suelo estructura

En esta sección se explicará la determinación de la profundidad de hincado que deben poseer los pilotes de acuerdo a las características del suelo de fundación.

Como se mencionó anteriormente, para determinar de forma precisa la profundidad de hincado de los pilotes se utilizó el programa Allpile, en el cual se modelo un pilote y las características del suelo en el sitio, al aplicar una fuerza cortante de 545 KN y un momento de 2320 KN*m a nivel del suelo, estas fuerzas son las estimadas que pueden actuar en los pilotes. Los resultados obtenidos se muestran en la gráfica a continuación:



Graf. 5.1 Gráficos de deflexión, momento y fuerza vs profundidad (Allpile)

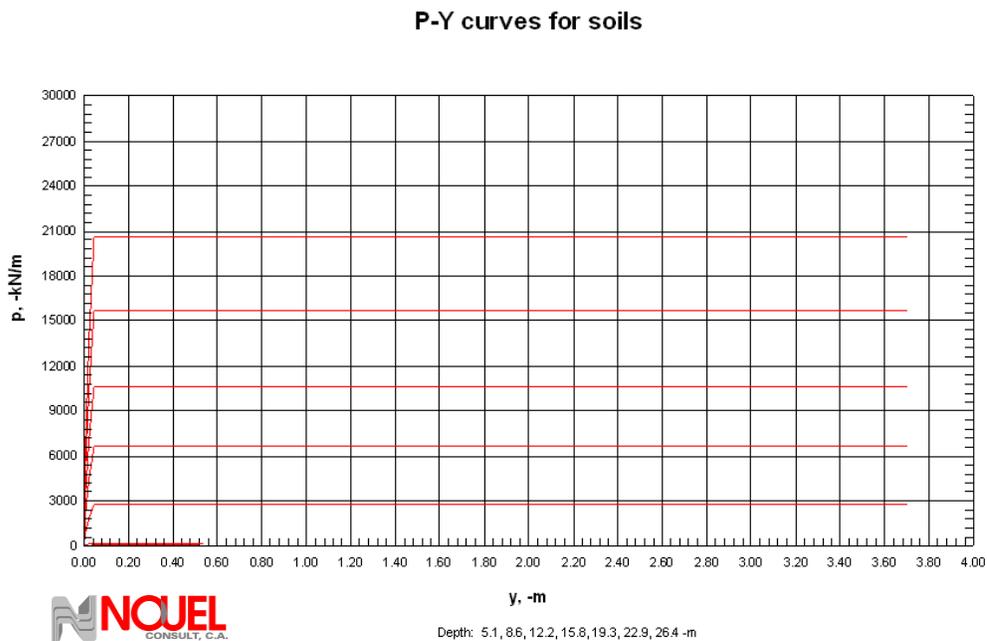
Como se puede observar en la primera gráfica de deflexión vs profundidad, el pilote a una profundidad de aproximadamente 14,5 m experimenta deformaciones insignificantes.

Por otra parte, en el gráfico de momento vs profundidad, se puede determinar que el pilote esta solicitado a un valor máximo de momento a 12m de profundidad, decreciendo a cero a una profundidad aproximada de 23,5 m.

En el gráfico de fuerza cortante vs profundidad se observa que la fuerza cortante se hace nula a una profundidad de 25 m, tomando su máximo valor a una profundidad de aproximadamente 14,5 m.

La longitud mínima de hincas del pilote establecida es de 26 m, y la profundidad del lecho marino referida al nivel promedio del mar es de 14,5 m, además los pilotes tendrán una altura por encima del nivel medio del mar de 3,5 m. Al sumar estas distancias se obtiene que el pilote debe tener una altura total de 44 m.

Del análisis del programa Allpile también se obtienen las curvas de comportamiento P-y (fuerza vs desplazamiento) del suelo, a diferentes profundidades, como se muestra en la siguiente gráfica:



Graf. 5.2 Curva carga vs profundidad del suelo (P vs Y)

La gráfica anterior es de suma importancia, ya que va a ser utilizada para simular el comportamiento del suelo en el análisis de la estructura que será realizado con el programa SAP2000.

El comportamiento del suelo en el programa SAP2000, es simulado mediante unos elementos denominados “Links”, los cuales son calibrados de forma tal, que su comportamiento sea el más parecido al del suelo de fundación.

Para colocar los “Links” en el pilote se debe seleccionar Draw, la opción Quick Draw Link, y elegir el tramo en el cual se desea colocar, como se muestra a continuación:

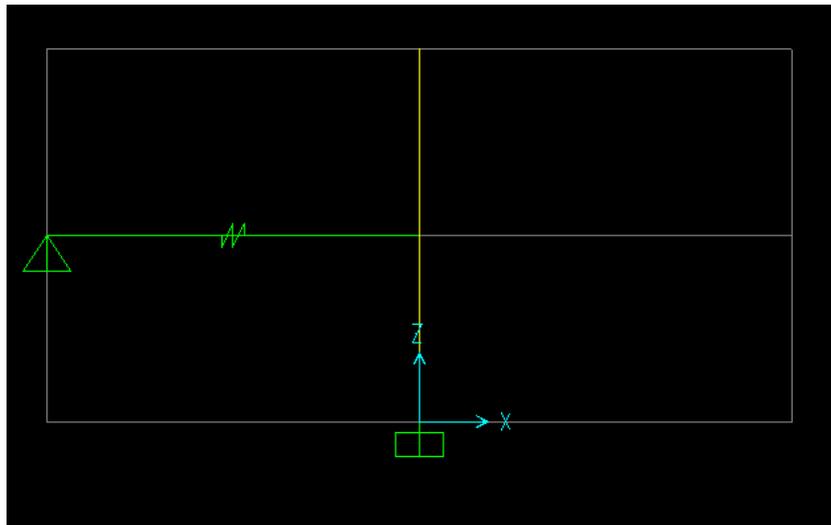


Fig.5.4 Link

Como se puede observar en la figura 5.4, se coloca una articulación al final del “Link” para restringir los desplazamientos que este puede sufrir en la dirección del eje “x” y “z”.

Luego se deben definir las propiedades del Link, se sigue la ruta de “Difene”, “Section Properties”, “Link/Support Properties”, y a continuación aparecerá una venta en la cual hay que seleccionar la opción “Add New Property”.

Después de seguir lo dicho anteriormente surgirá una ventana en la cual en el recuadro de “Link/Support Type” hay que elegir la opción “Multilinear Elastic” y en el recuadro de “Directional Properties”, se selecciona la opción “U1” y “Non Linear”, luego se hace click en “Modify/Show for U1”, como se muestra a continuación:

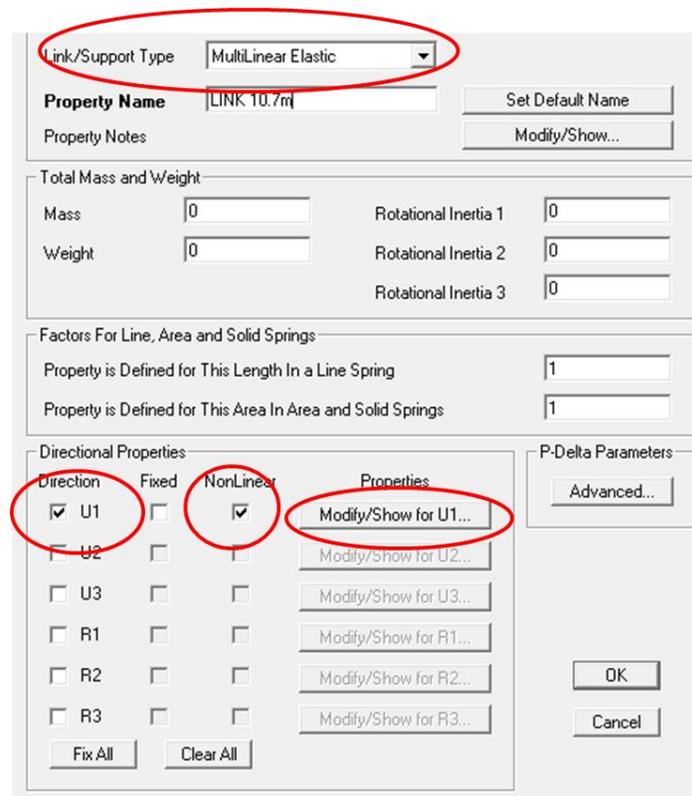


Fig. 5.5 Propiedades de N-Link

Luego de hacer lo explicado anteriormente aparecerá una ventana en la cual se presenta en la parte inferior una tabla que está compuesta por dos columnas, una de “Displ”

(desplazamiento) y “Force” (fuerza), en cada columna se deben introducir los valores de desplazamiento con su fuerza asociada, obtenidos de las curvas fuerza vs desplazamiento proporcionadas por el programa Allpile, este recuadro se muestra a continuación:

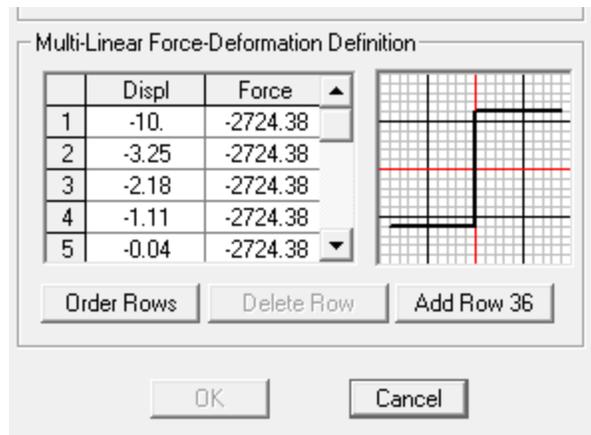


Fig.5.6 Comportamiento de N-Link

Este procedimiento se debe realizar para varios Links a diferentes profundidades y características de suelo, hasta lograr simular la interacción suelo estructura, en la imagen a la izquierda presentada a continuación se muestran los resultados del programa Allpile para cargas laterales, del lado derecho se muestra el modelo realizado en SAP, ambos deben poseer resultados semejantes.

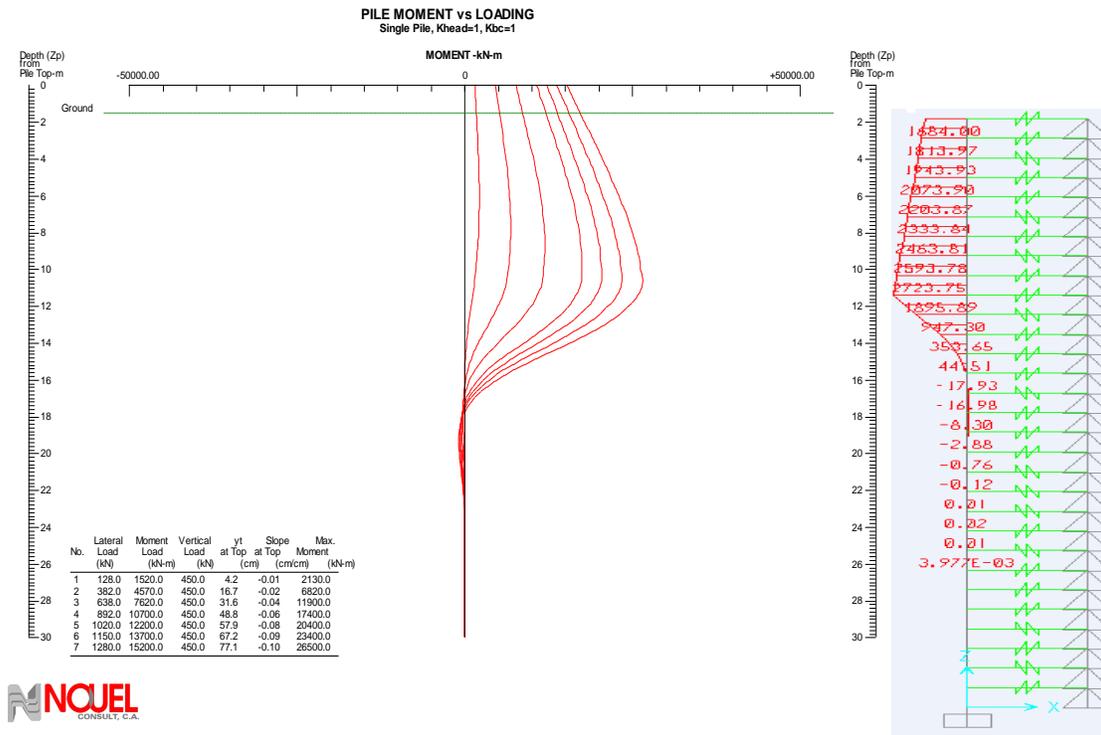


Fig.5.7 Comparación curva momento-profundidad de Allpile y SAP2000

5.2.3.2.2 Análisis inelástico o Push over

Para realizar el análisis de Push over, primero se debe crear la estructura en el programa, con las características geométricas conocidas y las características de los materiales definidas anteriormente. Adicionalmente se introducirán los elementos “N-Link” que simulan el comportamiento del suelo para cargas horizontales.

Los elementos “N-Link” han sido calibrados anteriormente con el programa Allpile.

Ya con los elementos que simulan la conducta del suelo que interactúa con los pilotes, y la estructura creada en el programa, se obtiene el siguiente modelo en el software:

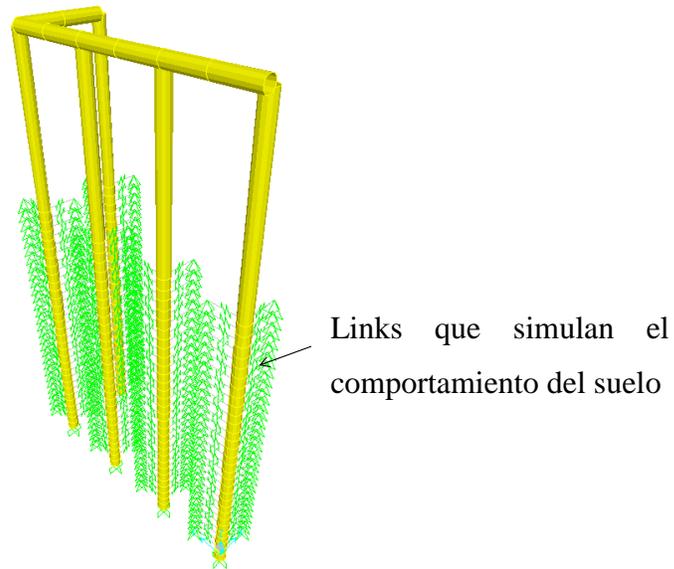
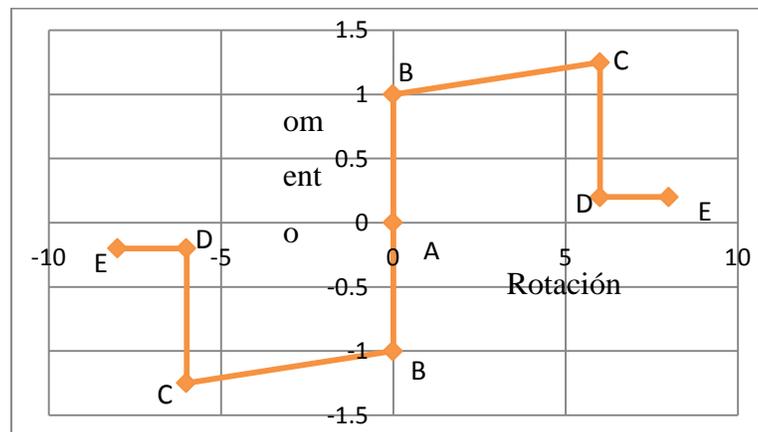


Fig.5.8 Estructura de protección en 3-D en SAP2000

A continuación, se define el comportamiento de las rótulas plásticas que van a ser localizadas en las secciones críticas de los miembros que conforman la estructura de protección. Para ello se decide que las rótulas plásticas van a tener el comportamiento definido por la norma FEMA 356, el cual se muestra a continuación:



Graf.5.3 Curva de comportamiento de rótulas plásticas definido por FEMA 356

En la gráfico 5.3 se establecen los siguientes puntos notables:

- A: Origen de la gráfica.
- B: Límite de comportamiento elástico.
- C: Límite del rango plástico, representa la capacidad última del material en el análisis Push over.
- D: Representa la fuerza residual del elemento para el análisis Push over.
- E: Representa el colapso de la rótula plástica.

El comportamiento de las rótulas plásticas ha sido previamente calibrado mediante el uso de un modelo, en el cual se utiliza una viga empotrada en sus extremos con una carga aplicada en el centro de su longitud, para obtener resultados lo más cercano posible a la realidad, tal como se muestra en el Anexo A.

Con la estructura a examinar ya generada, con el comportamiento del suelo y las rótulas plásticas colocadas, se deben establecer los diferentes casos de carga que se desean analizar. Para facilitar su explicación se separa la estructura de protección en diferentes tramos, como se muestra a continuación:

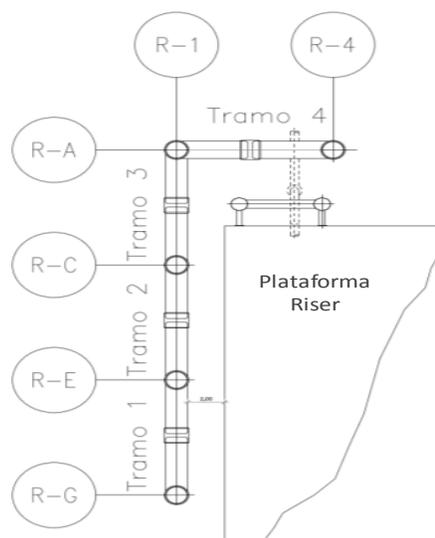


Fig. 5.9 Numeración de elementos estructurales

A) Caso de carga 1: Se aplica una carga inicial en el punto medio del Tramo 1, en el sentido positivo del eje de coordenadas x, como se muestra a continuación:

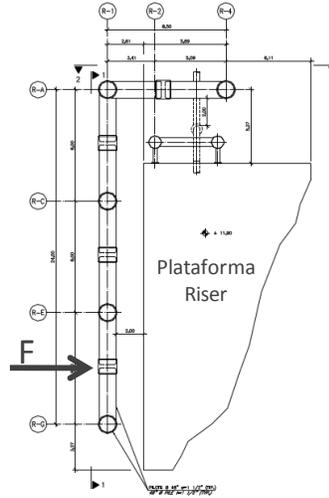


Fig. 5.10 Vista de planta para caso de carga 1

B) Caso de carga 2: Se aplica la fuerza en el pilote ubicado en el eje R-E, en el sentido positivo del eje de coordenadas x, como se muestra a continuación:

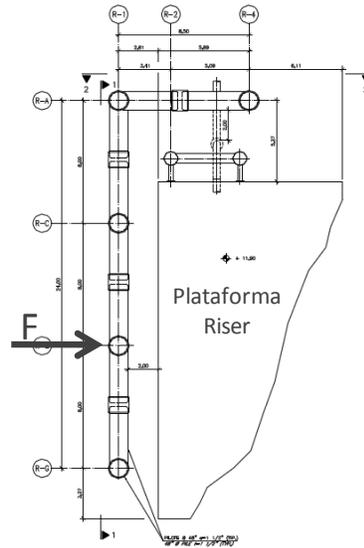


Fig.5.11 Vista de planta para caso de carga 2

C) Caso de carga 3: Se aplica la fuerza en el punto medio del Tramo 3, en el sentido positivo del eje de coordenadas x, como se muestra en la siguiente figura:

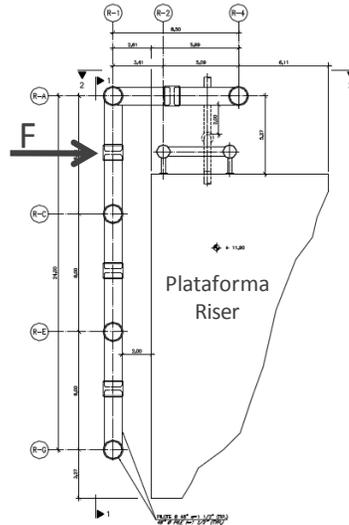


Fig. 5.12 Vista de planta para caso de carga 3

D) Caso de carga 4: Se aplica la fuerza en el pilote ubicado en la esquina, en el sentido positivo del eje de coordenadas x, como se muestra a continuación:

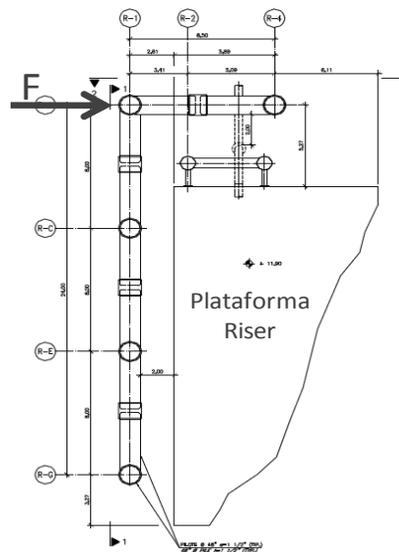


Fig. 5.13 Vista de planta para caso de carga 4

E) Caso de carga 5: Se aplica la fuerza en el pilote ubicado en la esquina, en el sentido negativo del eje de coordenadas y, como se representa en la siguiente imagen:

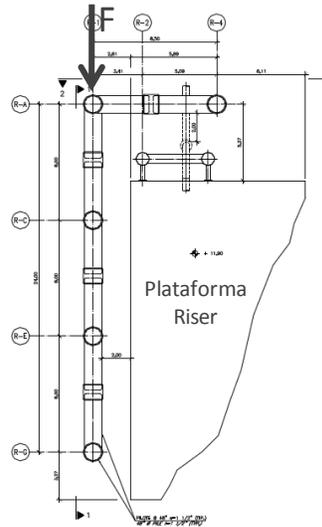


Fig. 5.14 Vista de planta para caso de carga 5

Los casos de carga definidos se muestran en la siguiente tabla resumen:

Tabla 2. Casos de Carga

Case	Type	Initial Condition	Design Type	Auto Type
DEAD	NonLinear Static	Zero	DEAD	None
MODAL	Modal	Zero	OTHER	None
CASO DE CARGA 1	NonLinear Static	Zero	OTHER	None
CASO DE CARGA 2	NonLinear Static	Zero	OTHER	None
CASO DE CARGA 3	NonLinear Static	Zero	OTHER	None
CASO DE CARGA 4	NonLinear Static	Zero	OTHER	None
CASO DE CARGA 5	NonLinear Static	Zero	OTHER	None

Con todos los casos de carga generados en el software, se procede a realizar el análisis Push over con el programa, obteniendo los siguientes resultados:

A) Caso de Carga 1

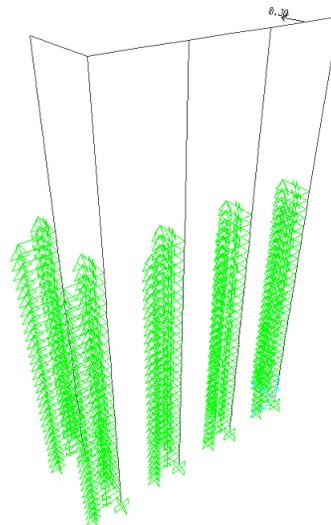


Fig.5.15 Vista en 3-D para caso de carga 1



Graf. 5.4 Curva desplazamiento vs reacción, caso de carga 1

Del gráfico 5.4 se concluye que:

- La fuerza para generar un metro de deformación en la estructura es de aproximadamente 320 ton.
- La energía que se disipa para un metro de deformación es de 159,5 ton*m.
- La deformación que se genera para disipar 400 ton*m es de 1,70 m.
- La fuerza que se necesita para deformar la viga 1,70 m es de 407 ton.

B) Caso de carga 2

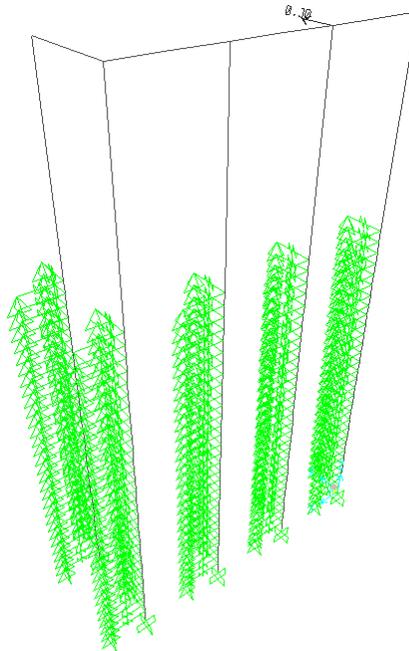
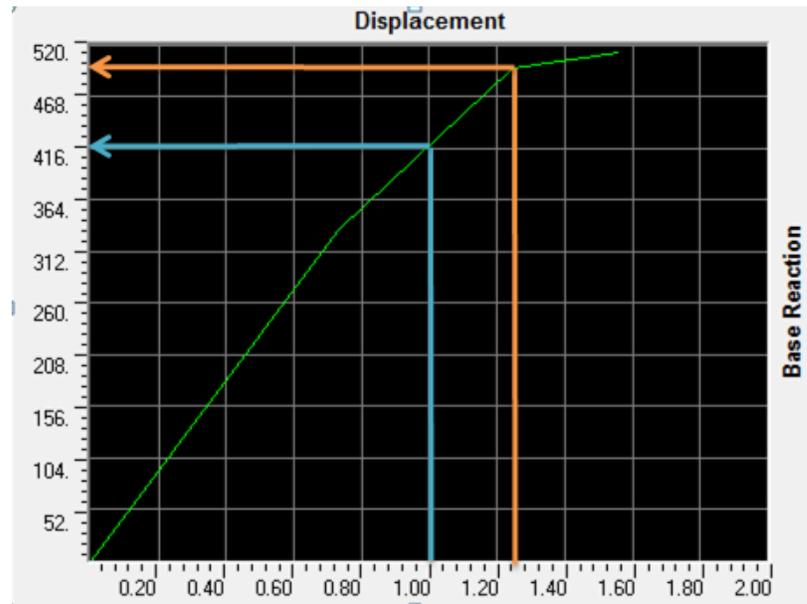


Fig.5.16 Vista en 3-D para caso de carga 2



Graf. 5.5 Curva desplazamiento vs reacción, caso de carga 2

Del gráfico 5.5 se obtiene:

- La fuerza que se necesita para generar un metro de deformación es de 416 ton.
- La energía disipada cuando ocurre un metro de deformación es de 222 t*m.
- La deformación que se genera para disipar una energía de 400 t*m es de 1,25 m.
- La fuerza que se necesita para generar una deformación de 1,25 m es de 495 ton.

C) Caso de carga 3

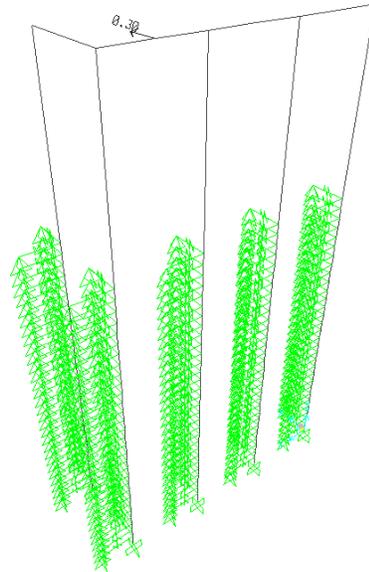
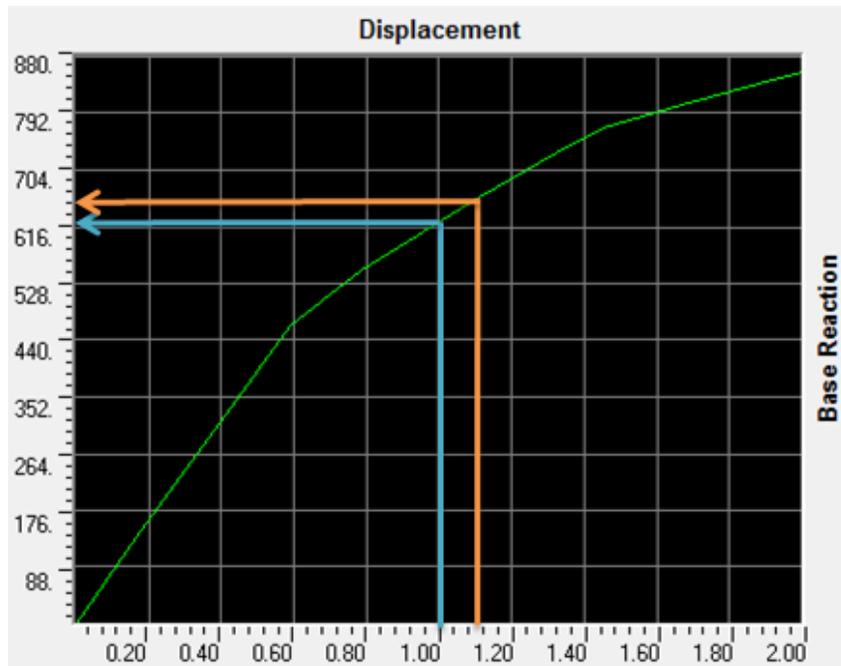


Fig.5.17 Vista en 3-D para caso de carga 3



Graf. 5.6 Curva desplazamiento vs reacción, caso de carga 3

Del gráfico 5.6 de puede determinar:

- La fuerza necesaria para generar un metro de desplazamiento es de 616 ton.
- La energía disipada cuando ocurre un desplazamiento de un metro es de 361 t*m.
- La deformación que sufre la estructura para disipar una energía de 400 t*m es de 1,1 m.
- La fuerza necesaria para generar un desplazamiento de 1,1 m es de 659 ton.

D) Caso de carga 4

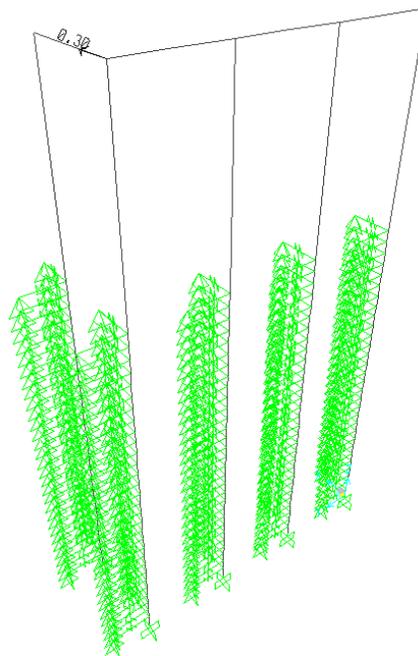
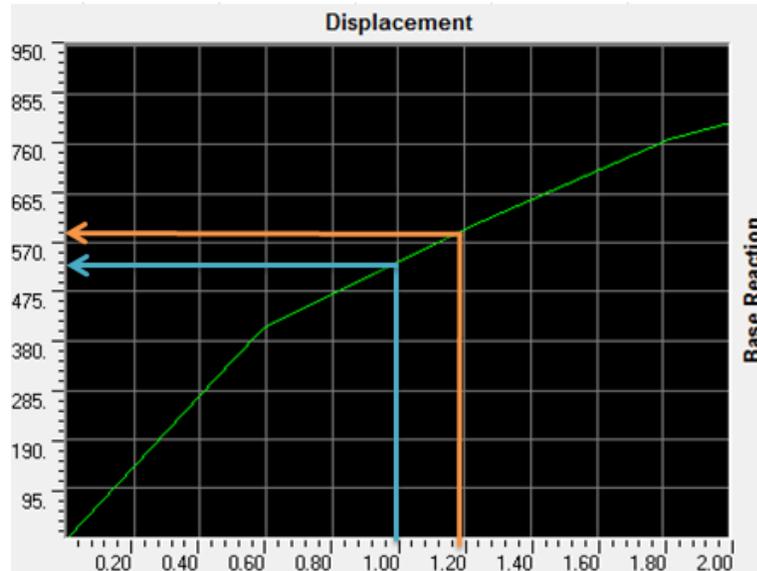


Fig.5.18 Vista en 3-D para caso de carga 4



Graf.5.7 Curva desplazamiento vs reacción, caso de carga 4

Del gráfico 5.7 se puede determinar:

- La fuerza necesaria para generar un desplazamiento de un metro es de 535 ton.
- La energía disipada cuando se genera un desplazamiento de 1 m es de 314 t*m.
- El desplazamiento necesario para absorber una energía de 400 t*m es de 1,18 m.
- La fuerza necesaria para generar un desplazamiento de 1,18 m es de 586 ton.

E) Caso de carga 5

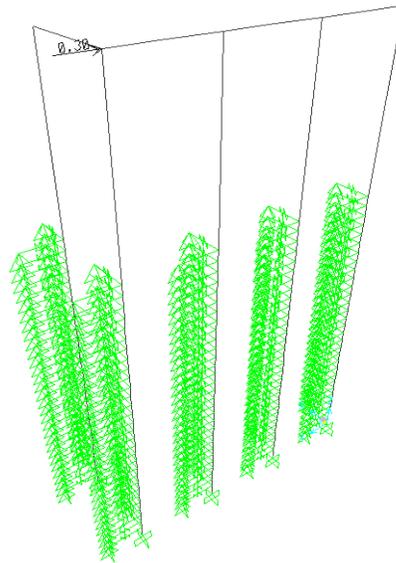
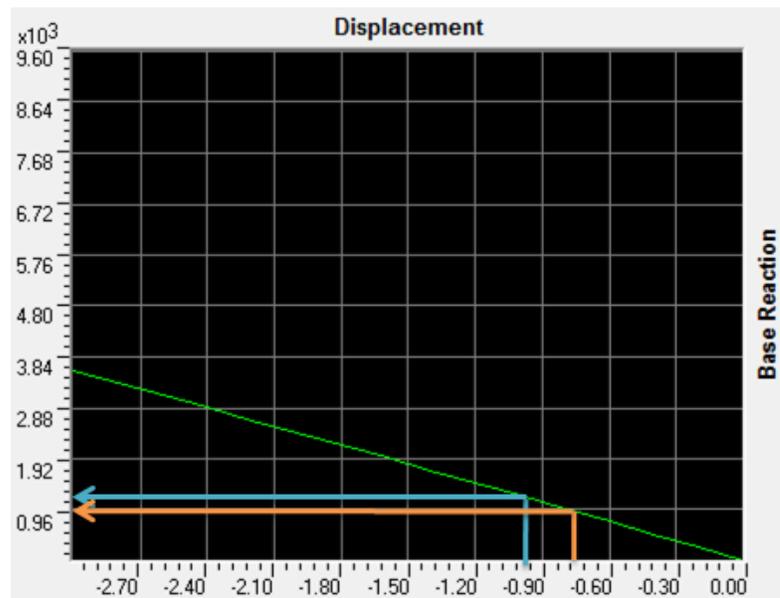


Fig.5.19 Vista en 3-D para caso de carga 5



Graf. 5.8 Curva desplazamiento vs reacción, caso de carga 5

Del gráfico 5.8 se obtiene que:

- Para generar 1 m de desplazamiento se necesita una fuerza de 1230,5 ton
- Cuando se genera un desplazamiento de 1 m se disipa una energía de 615,25 t*m
- Para disipar una energía de 400 t*m la estructura se desplaza 0,8 m
- La fuerza necesaria para desplazar la estructura 0,8 m es de 1006 ton

A continuación se presentan una tabla resumen con los resultados obtenidos del análisis Push over.

Tabla 3. Resumen de resultados de análisis Push over

Caso de carga	Desplazamiento de 1m		Energía de 400 t*m	
	Fuerza (ton)	Energía (ton*m)	Desp. (m)	Fuerza (ton)
1	320	159,5	1,7	407
2	416	222	1,25	495
3	616	361	1,1	659
4	535	314	1,18	586
5	1230,5	615,25	0,8	1006

5.2.3.3 Deformaciones plásticas por tracción en los miembros impactados

En el modelo que se utilizó para realizar el análisis Push over no se considera la energía disipada por las deformaciones axiales, esta suposición es conservadora, en el caso de ser necesario refinar el cálculo, pueden generarse rótulas plásticas considerando deformaciones axiales, alternativamente se puede realizar una verificación rápida para evaluar la importancia de esta energía de deformación.

A continuación se presenta la evaluación de la energía disipada debido a la deformación producida por las fuerzas de tracción, para ello se determinaran las deflexiones promedio que sufre la estructura.

A) Caso 1: Deflexión debido a máxima rotación en la sección

Para determinar esta deflexión, se obtiene la rotación máxima de la sección, con la siguiente expresión:

$$\psi_{max} = 1250 \left(\frac{t}{D} \right)^{2,75} \quad (\text{Ec. 24})$$

Para el proyecto, ψ_{max} tiene un valor de 0,091 radianes y la deflexión asociada a esta rotación se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\delta_1 = \frac{L * \psi_{max}}{2} \quad (\text{Ec.25})$$

Con lo que se determinó que la deflexión debido a la rotación máxima de la sección (δ_1) tiene un valor de 0.363 m.

B) Caso 2: Deflexión debido a ductilidad

Para calcular esta deflexión, se debe conocer la relación de ductilidad del miembro (φ), el cual según el manual de diseño publicado por la Health & Safety Executive, mencionado anteriormente, recomienda un valor de 10.

Luego hay que obtener la flecha máxima que puede alcanzar el miembro en rango elástico (δ_e) la cual viene dada por cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\delta_e = \frac{PL^3}{192EI} \quad (\text{Ec.26})$$

$$\delta_e = \frac{\sigma_y * L^2}{12E * D} \quad (\text{Ec.27})$$

Donde, “P” es la fuerza actuante, “L” es la longitud del miembro, “E” representa el módulo de elasticidad del materia, “I” es la inercia de la sección, “ σ_y ” es el esfuerzo de fluencia y “D” es el diámetro de la sección tubular.

La flecha máxima que puede alcanzar el miembro en rango elástico es de 0,005 m, conocido esto la deflexión debido a ductilidad (δ_2) viene dada por la siguiente expresión:

$$\delta_2 = \delta_e * \varphi \quad (\text{Ec.28})$$

Se determinó que la deflexión debido a ductilidad tiene un valor de 0,05 m

C) Caso 3: Máxima deflexión establecida

La máxima deflexión establecida, la definiremos como el máximo valor que se obtuvo de los diferentes casos de carga analizados en el programa SAP2000. Para determinar la energía que se disipa debido a las deformaciones elasto- plásticas de la estructura.

Esta deflexión (δ_3) posee un valor de 1,70 m.

D) Caso 4: Deflexión debida a máxima deformación unitaria.

Se conoce, de las propiedades del material, que la deformación unitaria máxima que logra resistir (ϵ_u) es de 0,1. Luego se determina la rotación que sufre la sección cuando ocurre esta deformación unitaria máxima (ψ_u), esto se logra mediante la siguiente ecuación:

$$\psi_u = \epsilon_u * L \frac{(\sigma_u - \sigma_y)}{4D * \sigma_y} \quad (\text{Ec.29})$$

Donde σ_u representa el esfuerzo máximo que resiste el material.

De esta expresión se obtiene que esta rotación posea un valor de 0,10 radianes, con lo que al utilizar la ecuación 18 se obtiene una deflexión (δ_4) de 0,39 m.

Obtenidas las diferentes deflexiones se procede a promediarlas.

$$\delta_{prom} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4}{4} \quad (\text{Ec.30})$$

El valor promedio de la deflexión es 0,63 m.

Conocida la deflexión promedio del miembro se procede a determinar el ángulo de rotación de la cuerda de la viga (θ), mediante la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{\delta_{prom}}{(L/2)} \quad (\text{Ec.31})$$

Se obtiene que la rotación de cuerda de la viga es de 0,157 radianes, adicionalmente se debe calcular el ángulo de rotación crítico que puede alcanzar la viga, esto se logra con la siguiente ecuación:

$$\theta_c = \frac{4D}{\pi L} \quad (\text{Ec.32})$$

Se obtiene que la rotación crítica posee un valor de 0,20 radianes.

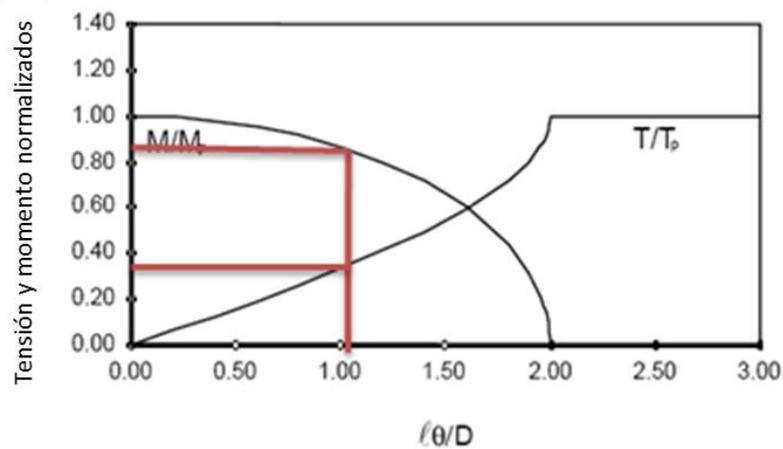
Determinados todos estos valores de deben calcular las siguientes relaciones, las cuales van a ser utilizadas posteriormente.

$$\frac{\theta}{\theta_c} = 0,783$$

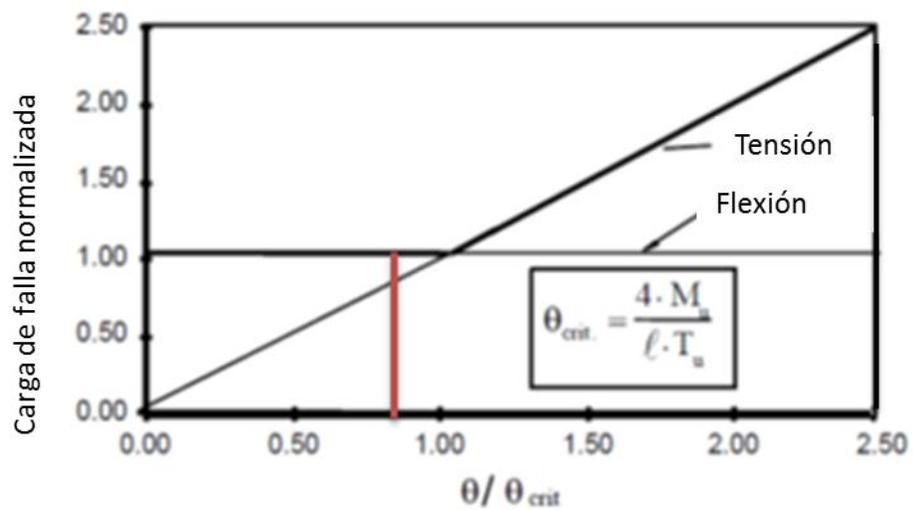
$$\frac{L\theta}{D} = 1,029$$

Estas relaciones son utilizadas en los siguientes gráficos para determinar la energía disipada debido a la fuerza axial que se genera en el miembro cuando ocurre el impacto del buque contra a estructura.

El siguiente gráfico representa las relaciones esperadas de Tensión actuante/ Tensión máxima y Momento actuante/ Momento máximo para una rotación dada



Graf. 5.9 T/Tp y M/Mp como función del ángulo θ



Graf. 5.10 Ejemplo curva de deformación plástica para secciones tubulares a tracción y flexión

Como se puede observar en los gráfico 5.9, con la rotación de cuerda obtenida, el parámetro M/M_p es mucho mayor que T/T_p , lo cual indica que la flexión, para el caso analizado es más importante que la tracción que existe en la estructura.

Adicionalmente, al utilizar el valor de θ/θ_c en el gráfico 5.10 se determina, al igual que se estableció anteriormente, que la flexión predomina sobre la tracción, ya que, como se observa, al trazar la vertical correspondiente a la relación de θ/θ_c , esta intercepta la línea que representa el comportamiento a flexión.

5.2.3.4 Deflexión global de la estructura

El análisis Push over considera las deformaciones globales de la estructura en sus cálculos de energía.

5.2.3.5 Deformación local en la embarcación

En base al gráfico 2.4, presentado en el marco teórico, se establece que para generar deformaciones en la proa y popa de la embarcación que impacta la estructura, se necesita una fuerza mínima de 300 ton (3MN) y 700 ton (7MN) respectivamente.

Como se determinó en el análisis de los diferentes casos de carga, para generar 1 m de desplazamiento en la estructura de protección, siempre se va a necesitar una fuerza mayor a 300 ton, lo cual indica que si el buque impacta con la proa, este se va a deformar, ayudando a disipar parte de la energía generada en la colisión, lo mismo ocurre cuando la estructura disipa una energía de 400 ton*m.

Por otra parte, si el barco impacta con la popa, en el único escenario de colisión en el cual este ayuda a disipar energía, es en el Caso de carga 5, en el cual se generan fuerzas

mayores a 1000 ton, siendo 700 ton la fuerza mínima necesaria para que este se deforme y atenúe los efectos del impacto.

Para el análisis realizado, de forma conservadora, no se tomará en cuenta este mecanismo de disipación de energía, para poseer un margen de seguridad aceptable en el diseño de la estructura de protección

CAPITULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizará de forma detallada los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

6.1 Flexión elasto – plástica en los miembros impactados

Al realizar el análisis inelástico a la estructura de protección del muelle de exportación de gas, en diferentes escenarios de colisión, denominados casos de carga, se presentaron los resultados obtenidos en la tabla 3.

Al realizar el análisis Push over para todos los casos planteados se puede determinar que el escenario más desfavorable de colisión es el presentado en el “Caso de carga 1”, ya que en él se disipa menos energía cuando la estructura se deforma un metro y se requiere mayor desplazamiento para disipar 400 ton*m de energía.

Por otra parte, el desplazamiento aceptable establecido en las normas y manuales, mencionados anteriormente, para plataformas costa afuera, es de un metro, pero en el proyecto se acepta la deflexión de 1,7 m ya que se está analizando una estructura de protección, el impacto no ocurrirá en la estructura principal.

Se pudo determinar que el escenario de colisión más favorable es el planteado en el “Caso de carga 5”, debido a que en este escenario de colisión se disipa gran cantidad de energía cuando la estructura se desplaza un metro y sufre poca deflexión para lograr disipar 400 ton*m de energía.

6.2 Deformaciones plásticas por tracción en los miembros impactados

Al realizar los cálculos asociados para calcular la energía absorbida por tracción, se pudo determinar que la flexión predomina sobre la tracción en el momento del impacto, por ende las deformaciones plásticas por tracción en el miembro pueden ser despreciadas, y se diseñan los miembros solo debido a la flexión.

En el caso de que la tracción en el miembro impactado predominará por sobre la flexión, sería conveniente considerar la energía extra que es disipada mediante este mecanismo.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se emitirán las conclusiones obtenidas de la realización del trabajo especial de grado y se harán recomendaciones pertinentes para trabajos futuros.

7.1 Conclusiones

Luego de realizar las investigaciones y analizar los cálculos para este trabajo especial de grado, se puede concluir lo siguiente:

La capacidad de los miembros afectados por la colisión de un buque ha sido investigada extensivamente debido a las importantes implicaciones de seguridad. Sin embargo, los diferentes enfoques que se han presentado, no son fáciles de aplicar de forma consistente por los diseñadores e ingenieros.

El manual “Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms” presentan los resultados de las investigaciones y metodologías enfocadas a impactos de miembros con la proa o la popa en la zona de salpique mostrando aplicaciones prácticas que pueden ser desarrolladas en hojas de cálculo.

Las instrucciones y procedimientos de la norma de la DNV presentan una serie de gráficos obtenidos en ensayos y formulaciones, así mismo efectúa recomendaciones de carácter general, está más enfocada al comportamiento local de los miembros que al comportamiento global de la estructura.

Las prácticas recomendadas de la API-RP2A-WSD principalmente suministran espesores de tubos para resistir los impactos normalizados por deformación local y pérdida de capacidad axial en soportes tubulares.

Al comparar las normas DNV-RP-C204 y API-RP2A-WSD, que abarcan el tema de diseño de plataformas metálicas costas afuera fijas, se pudo determinar que la DNV-RP-C204 establece criterios de diseño más rigurosos que los establecidos en la norma americana, ya que la energía de impacto sugerida por la Det norske Veritas es 71 veces mayor que la recomendada en la API-RP2A-WD. Esto se puede deber a que las embarcaciones y condiciones del Mar del Norte son más exigentes que las del Golfo de México.

Las normas de la DNV y API están enfocadas a estructuras aporticadas diagonalizadas con un alto nivel de redundantes, usualmente realizan verificaciones locales mediante formulaciones, tablas o gráficos, en el caso de análisis propuesto.

Cuando se realizó la interpretación de las normas se pudo determinar que estas establecen métodos de cálculo para elementos aislados, sin tomar en consideración como puede interactuar toda la estructura al momento de un impacto ni el aporte que puede dar el suelo de fundación para contribuir a disipar energía.

Se demostró que el programa SAP2000 es una herramienta muy útil para realizar análisis de estructuras que van a tener deformaciones en el rango elasto- plástico.

Cuando se analizaron los diferentes escenarios de colisión, se obtiene que en ninguno de los casos se crea un mecanismo inestable de colapso en la estructura de protección, lo cual es indicativo que esta es apta para resistir los esfuerzos generados cuando un buque la impacte.

Del análisis de la energía disipada mediante los diferentes mecanismos, se observa que esta es absorbida principalmente por la flexión elasto- plástica que ocurre en el miembro impactado.

Al fijar una energía de impacto de 4MJ, para el análisis de la estructura de protección, se puede decir que esta es muy conservadora, ya que la velocidad asociada de 1,5 m/s para una embarcación de 3500 ton es elevada en comparación con la velocidad de atraque normal de dicho barco.

7.2 Recomendaciones

Al analizar el proyecto, se obtuvieron miembros estructurales de grandes dimensiones, esto debido a que la energía de impacto seleccionada era alta, se recomienda evaluar la probabilidad de ocurrencia de velocidades de atraque más bajas, para seleccionar una que proporcione energías de impacto más bajas, siempre y cuando se evalúen si los riesgos asociados son aceptables.

Es conveniente desarrollar el tema de energía de deformación por tensiones axiales en futuros trabajos de investigación.

Para próximos trabajos especiales de grado es recomendable realizar el análisis de una plataforma fija costas afuera, estructura aporticada digonalizada con alta redundancia estructural, cuando es colisionada por un buque, mediante la utilización de las normas o manuales de diseño que abarcan este tema y comparando con un análisis Push over aplicado a la misma estructura.

Se recomienda el uso del programa SAP2000 para evaluar el comportamiento no lineal de estructuras marítimas sometidas al impacto de embarcaciones.

BIBLIOGRAFIA

Libros, Artículos, Informes Técnicos

- American Petroleum Institute. (2002). *“Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform- Working Stress Design”* (API-RP2A-WSD). 21era Edición. Estados Unidos. 226pp
- Det Norske Veritas. (2010). *“Recommended Practice for Design Against Accidental Loads”* (DNV- RP – C204). Noruega. 53pp
- Furnes, O y Amdahl, J. (1980). *“Ship collisions with offshore platform”*. Intermaric ‘80. Noruega. 13pp
- Geijerstam, K y Svensson, H. (2008). *“Ship collision risk – An identification and evaluation of important factors in collision in offshore installations”*. Lund, Suecia. 151p
- Visser, Wietske. (2004). *“Ship collision of brace members of fixed Steel offshore platform”*. Health & Safety Executive. Houten, Holanda. 51pp

Sitios Web

- Aquino, C., 2009. Proyectos gasíferos costa afuera. Obtenido el 4 de Mayo de 2013 en <http://www.tecnologiahechapalabra.com/ciencia/tecnologia/articulo.asp?i=4337> (proyectos plataformas costa afuera).
- Galán, M., 2011. Metodología de la investigación. Obtenido el 28 de abril de 2013 en http://manuelgalan.blogspot.com/2011/09/la-investigacion-documental_1557.html

ANEXOS

ANEXO A.

MODELO DE CALIBRACION DE ROTULAS PLASTICA

El análisis inelástico va a ser realizado con la utilización del programa SAP2000 R14. Se realizará un análisis no lineal (Push Over) en una viga biempotra con una carga puntual aplicada en el centro de su longitud.

Para ello se debe crear un nuevo archivo en SAP2000. Utilizando el icono de “New Model”, ubicado en la parte superior derecha de la pantalla. Como se muestra a continuación.

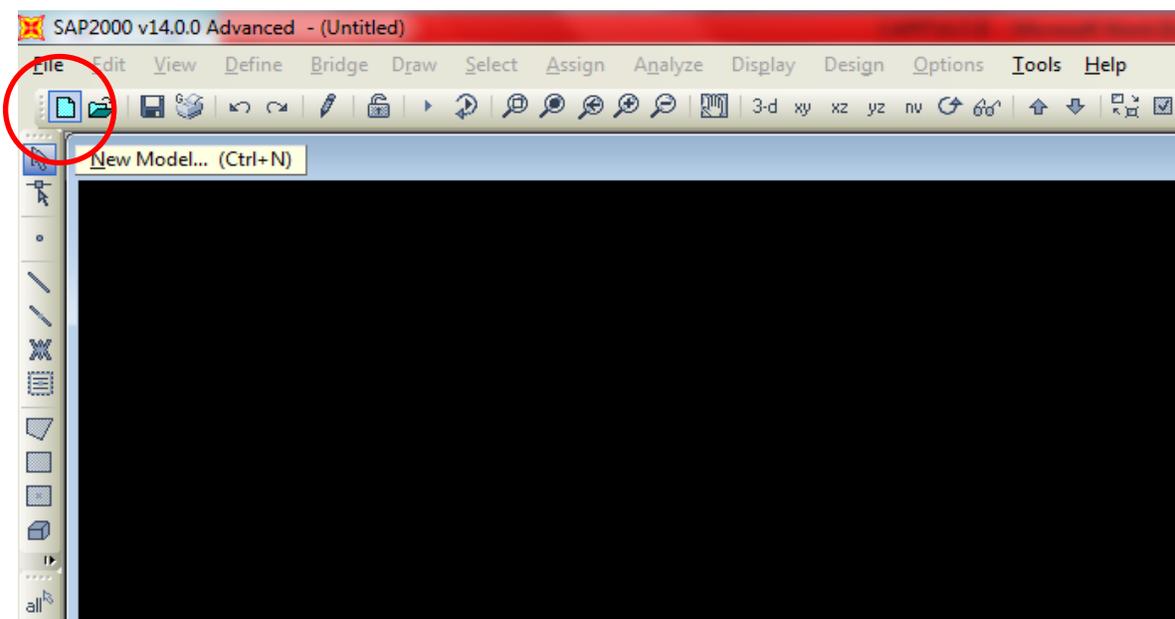


Fig.A.1 Ubicación de icono “New Model”

Luego aparecerá una ventana con 18 opciones de diferentes estructuras, en esta ventana se elegirá la opción “Beam”.

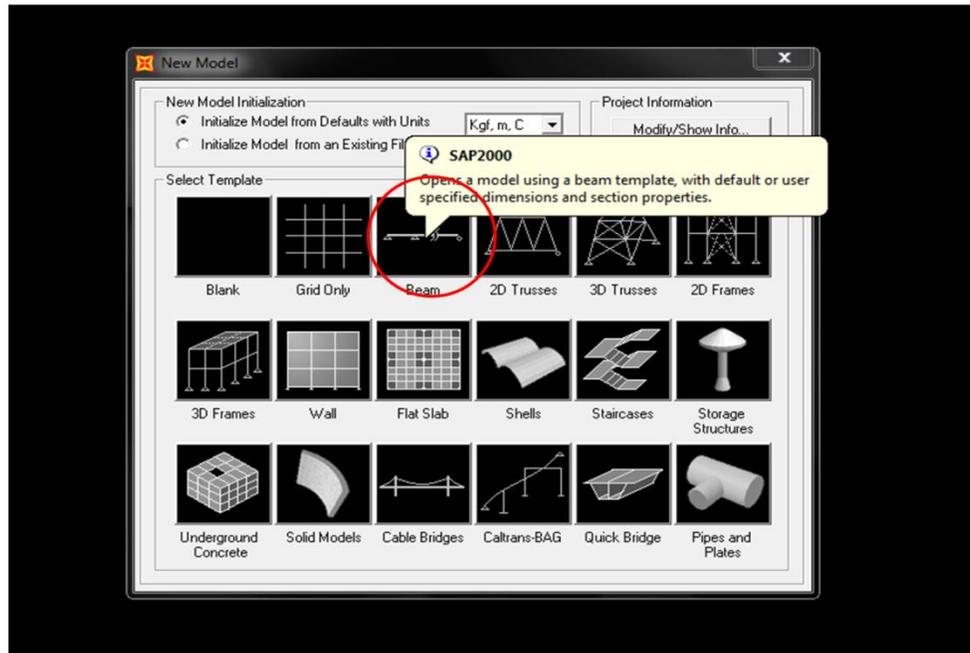


Fig.A.2 Selección de tipo de estructura, viga (Beam)

Luego se deben definir las propiedades de la viga, previamente se debe fijar las unidades en Kilogramos fuerza (Kgf), metros (m) y grados centígrados °C. El miembro va a poseer una longitud de 10 m un nodo intermedio en la viga para poder ubicar allí una rótula plástica posteriormente, por lo que se crea una viga de dos tramos de 5 m cada uno.

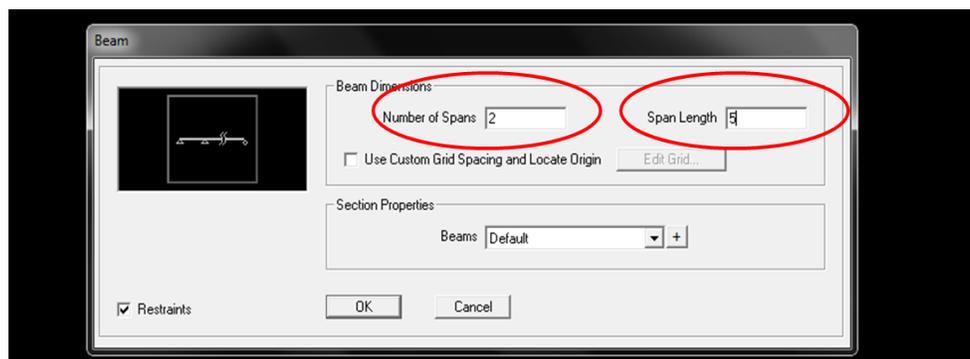


Fig.A.3 Longitud y número de tramos

Definido esto, se deben fijar las propiedades de la sección. Para este ejemplo se va a utilizar una sección tubular de diámetro de 36 pulgadas (91.44 cm) y un espesor de 2 cm, con un acero A36. Las propiedades se crean en el signo “+” ubicado en el recuadro de “Section Properties”. Como se muestra la figura.

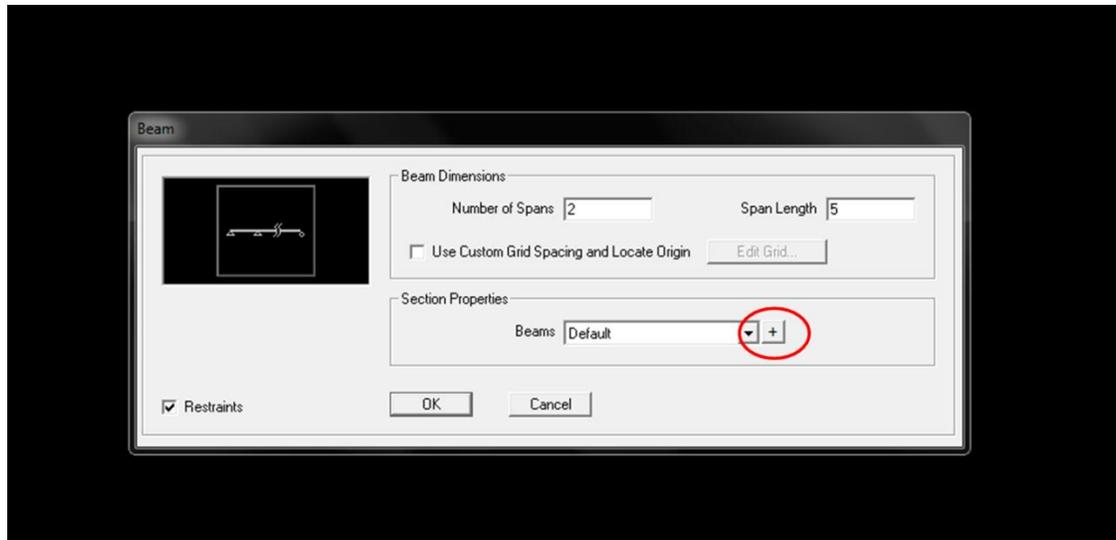


Fig.A.4 Agregar nuevas propiedades de sección

Al hacer clic en el símbolo de “+”, aparecerá una ventana en la cual hay que seleccionar la opción “Add New Property”. Luego se debe seleccionar el tipo de sección que se desea utilizar, en este caso se elige la opción “Pipe”, que representa las secciones tubulares.

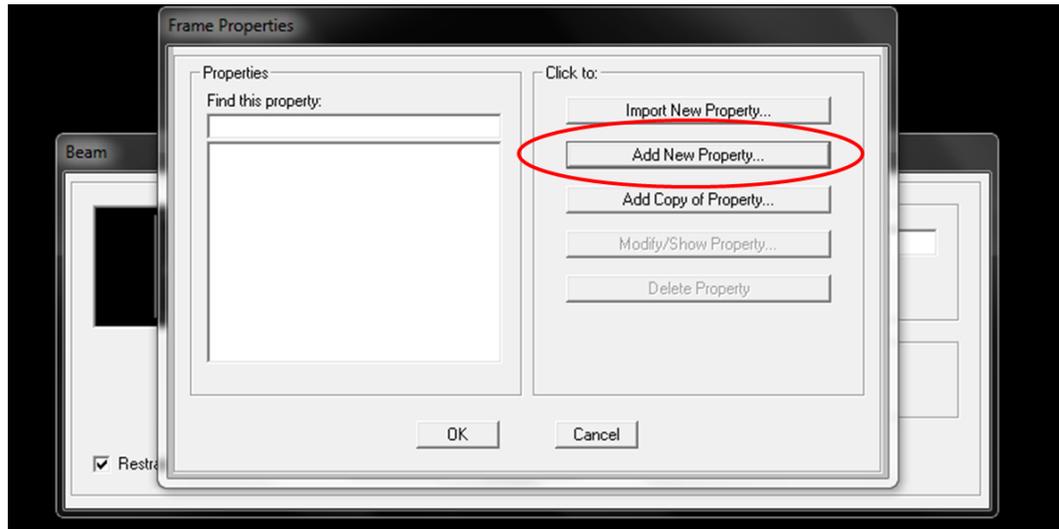


Fig.A.5 Añadir nueva sección (Add New Property)

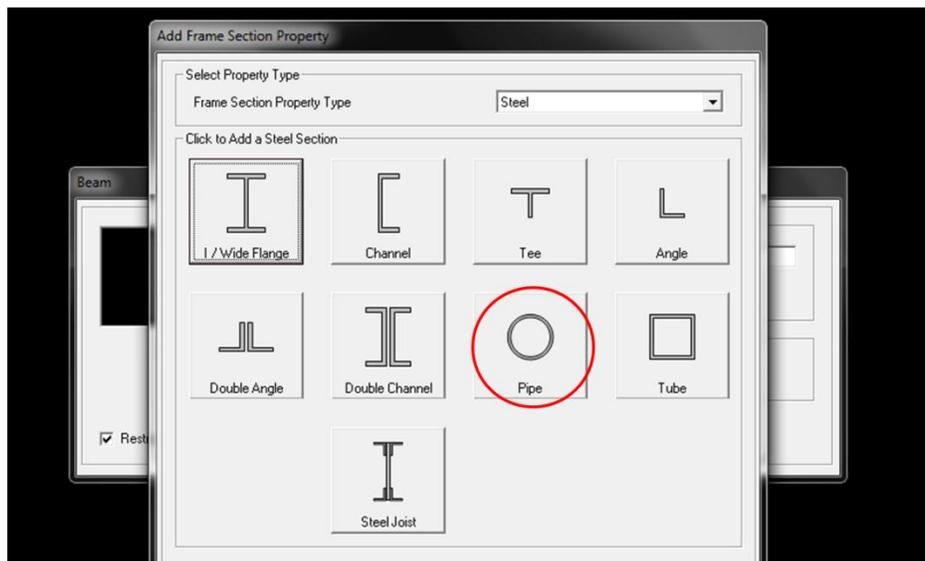


Fig.A.6 Sección Tubular (Pipe)

En la siguiente ventana se deben colocar el diámetro y el espesor de la sección.

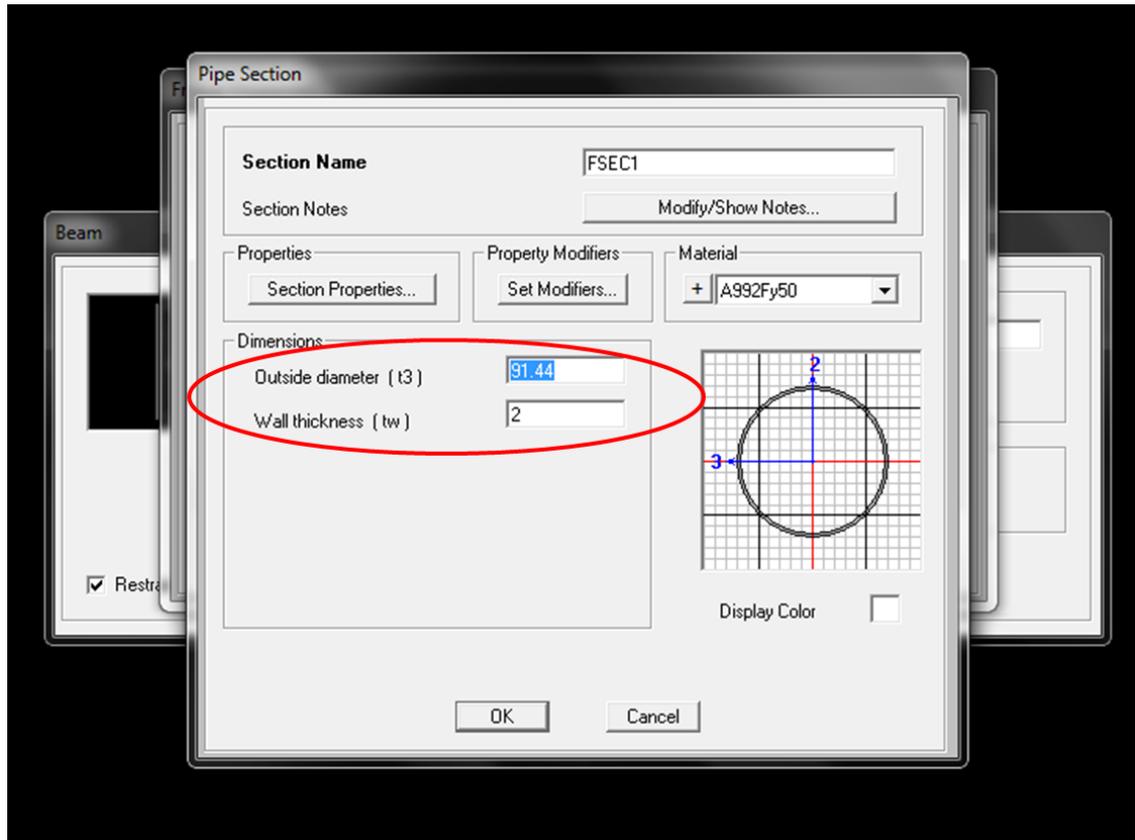


Fig.A.7 Características de sección

Para definir el tipo de acero a utilizar se debe hacer clic en el símbolo de “+” ubicado en el recuadro de materia, va a aparecer una ventana en la cual se va a seleccionar la opción de “Add new material Quick” y en el recuadro de “Specification” se busca y elige el acero ASTM A36. Luego se selecciona esta propiedad, ya agregada, en el recuadro de Material.

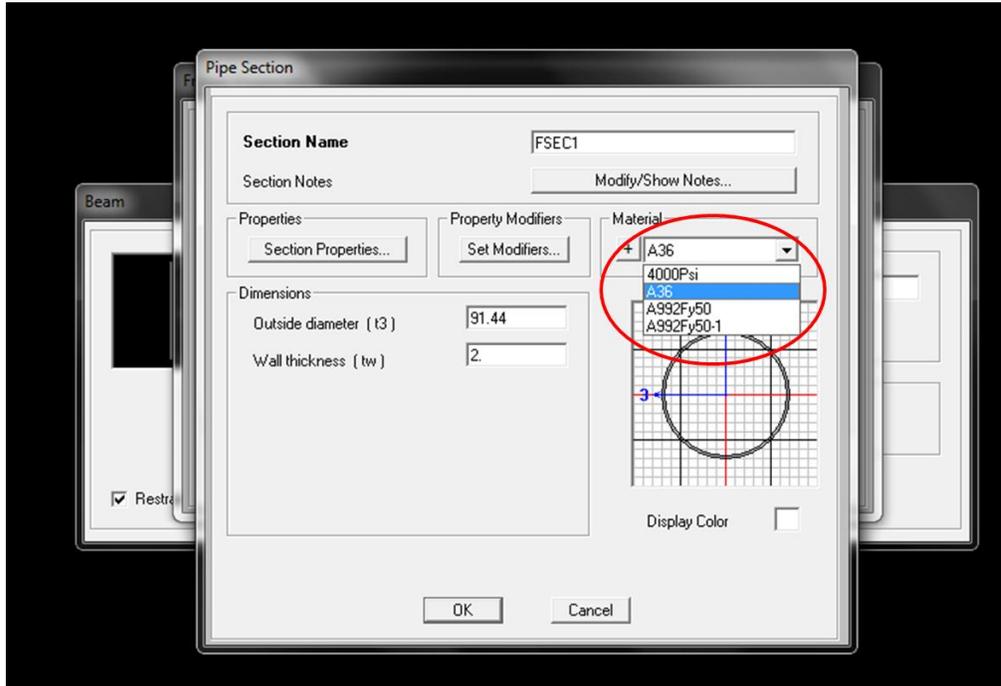


Fig.A.8 Tipo de material a utilizar

Ya definida la sección se hace clic en “OK”, y aparecerá la viga como se muestra a continuación:

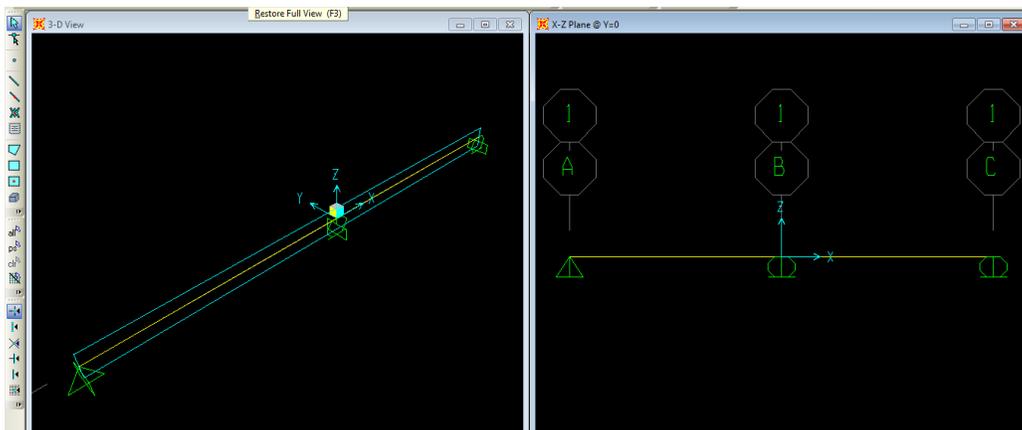


Fig.A.9 Viga definida por defecto

Posteriormente se deben modificar las condiciones de apoyo de la viga, para que esta sea empotrada en sus extremos, para ello se seleccionan estos apoyos de la viga y con la opción de “Assign”, se busca “Joint” y luego “Restrains”, para finalizar con esta parte se selecciona el símbolo de empotramiento. Este procedimiento se muestra a continuación:

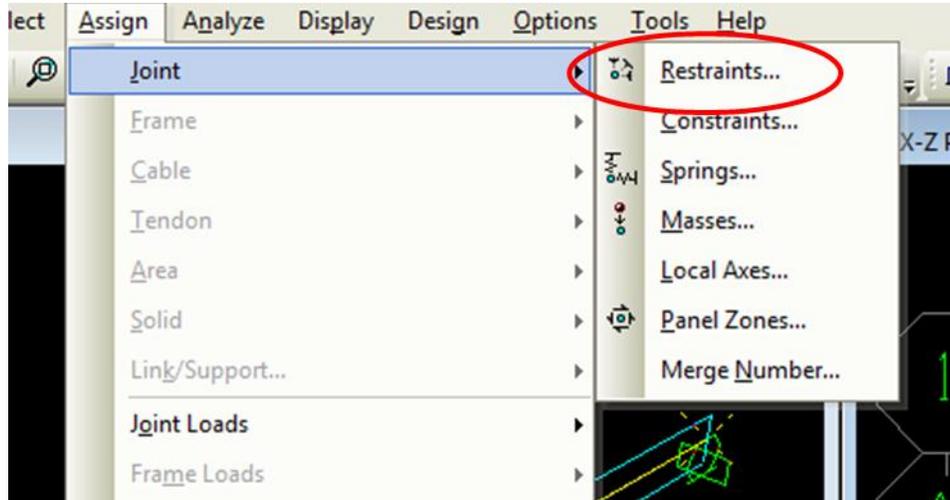


Fig. A.10 Ubicación de “Restrains”

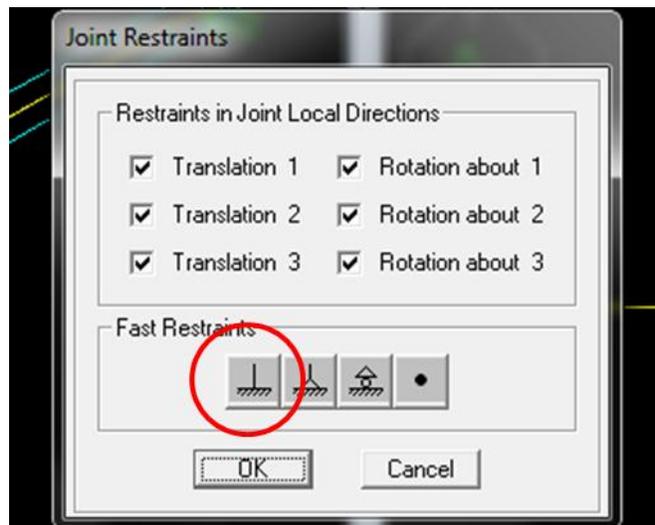


Fig.A.11 Condición de apoyo empotrado

El mismo procedimiento se sigue para eliminar el apoyo del centro, con la diferencia que se eliminan todas las restricciones.

Ya con la condición deseada, se procede a fijar las propiedades de la rótula plástica, esto se realiza seleccionando la opción “Define”, “Section Properties”, “Hinge Properties”.

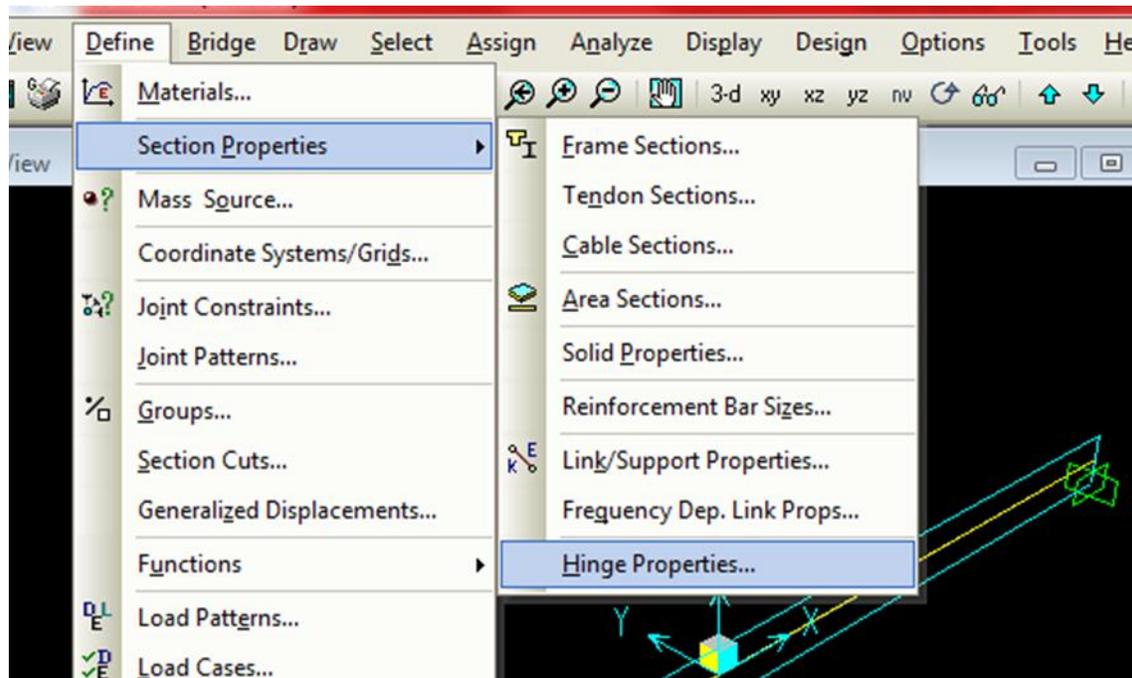


Fig. A.12 Definición de propiedades de rótulas plásticas (Hinge Properties)

En la ventana que va a aparecer a continuación se debe seleccionar la opción de “Add New Property”, se elige el tipo de material, en este caso acero y luego se debe seleccionar para que tipo de fuerza va a generarse la rótula plástica en la viga, se elige la opción de “Moment M3”. Y se hace clic en “OK”. Por defecto el programa fija las propiedades de la rótula plástica en base a lo establecido en la norma FEMA 356.

Definidas las propiedades de la rótula plástica, se colocan en la viga, como se muestra en las figuras a continuación:

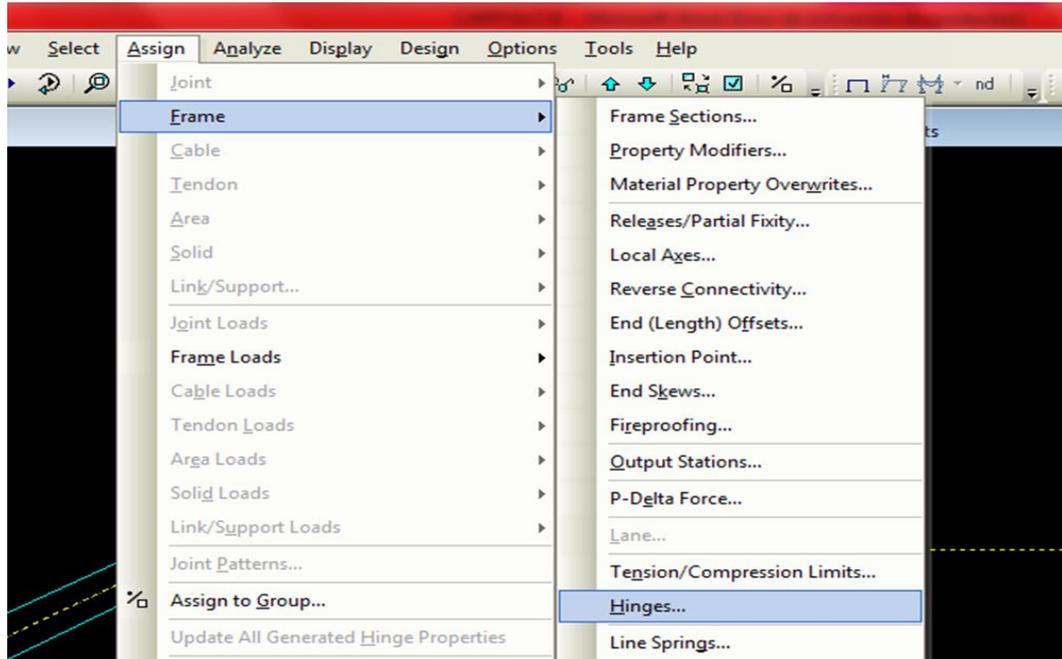


Fig.A.13 Ubicación de comando “Hinge”

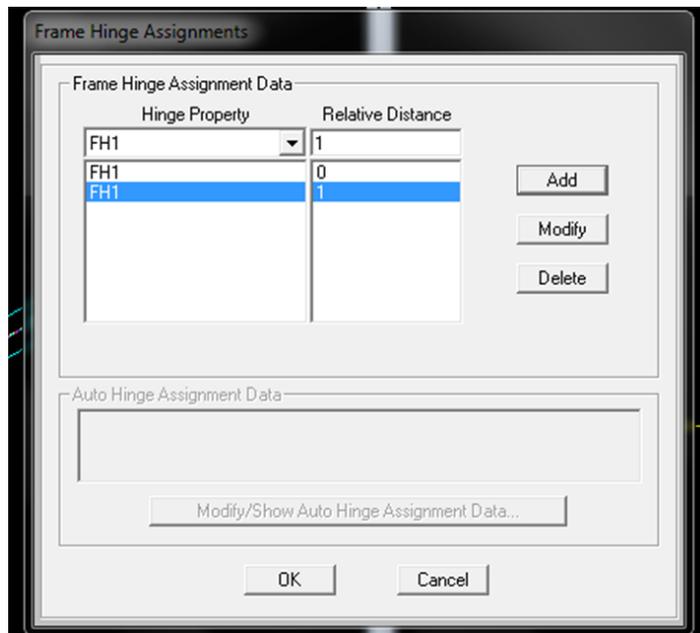


Fig.A.14 Ubicación de rótulas plásticas

Como se puede observar, la distancia a la cual se desea colocar las rótulas plásticas, es relativa, lo cual indica que cero es al inicio del tramo y uno es al final del tramo. Se colocan rótulas plásticas en los lugares donde existen los empotramientos y en el centro del miembro, se elige estos lugares ya que se sabe de antemano que son las secciones donde se van a alcanzar los momentos plásticos. Obteniendo la viga con las condiciones de apoyo y rótulas plásticas tal como se muestra.

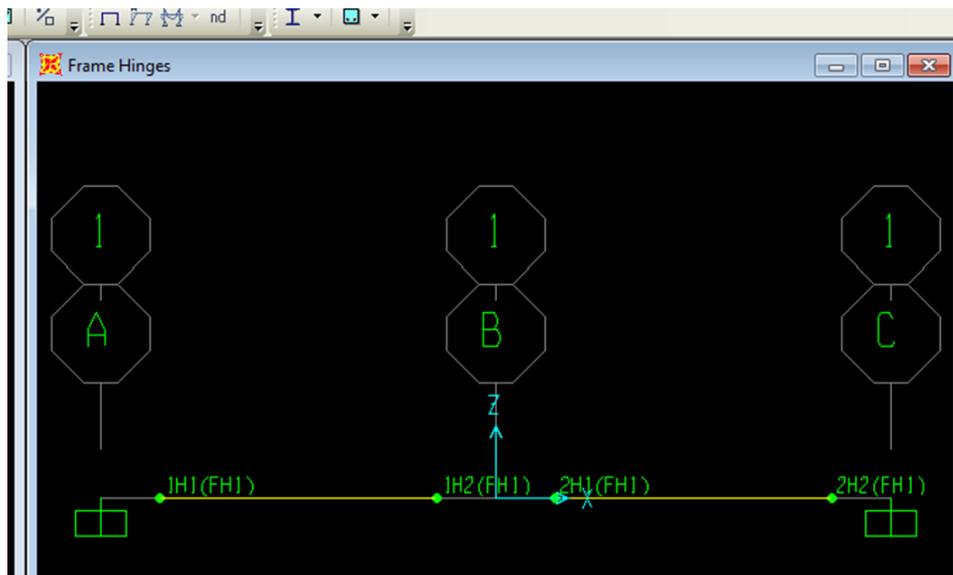


Fig.A.15 Rótulas plásticas en viga a analizar

Ya colocadas las rótulas plásticas, se deben definir las cargas que van a actuar sobre la viga, recordando que este análisis se va a realizar con una carga puntual, que está aplicada en el centro de la longitud, primero se debe definir el patrón de carga (Load Patterns). Como se muestra a continuación.

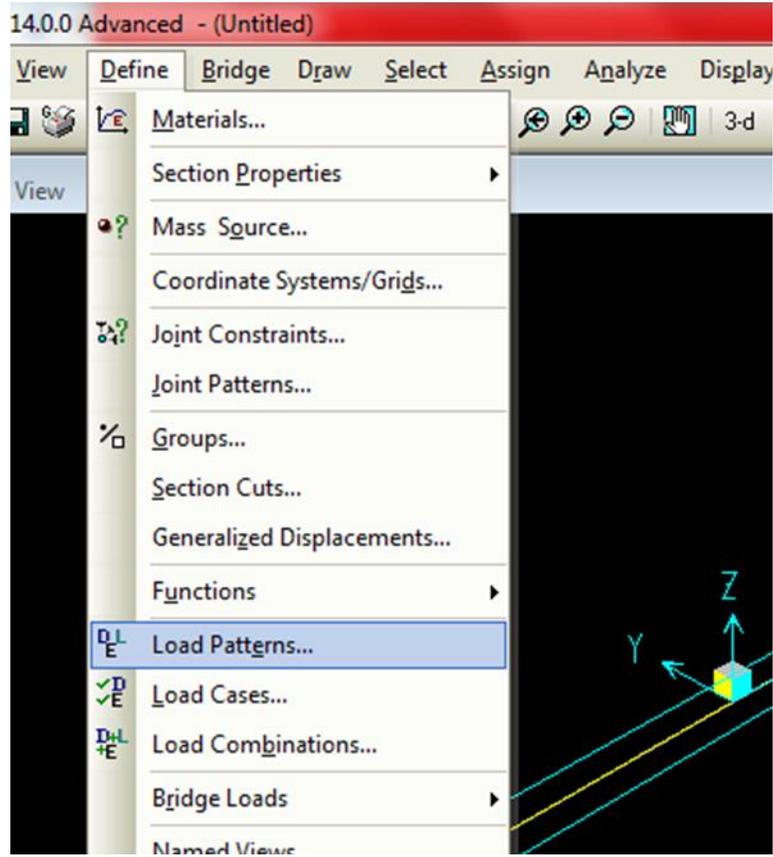


Fig.A.16 Ubicación de “Load Patterns”

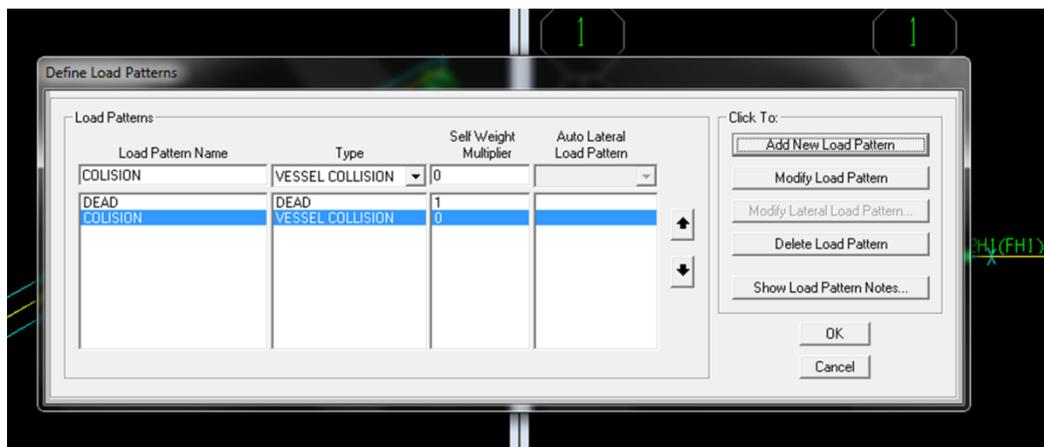


Fig.A.17 Definición de patrón de carga “COLISION”

Para este caso se definió el patrón de carga llamado Colisión, de tipo “Vessel Collision” lo cual significa colisión de buque. Ya definido el patrón de carga se asigna la carga al miembro, seleccionando el tramo se asigna la carga de la siguiente forma:

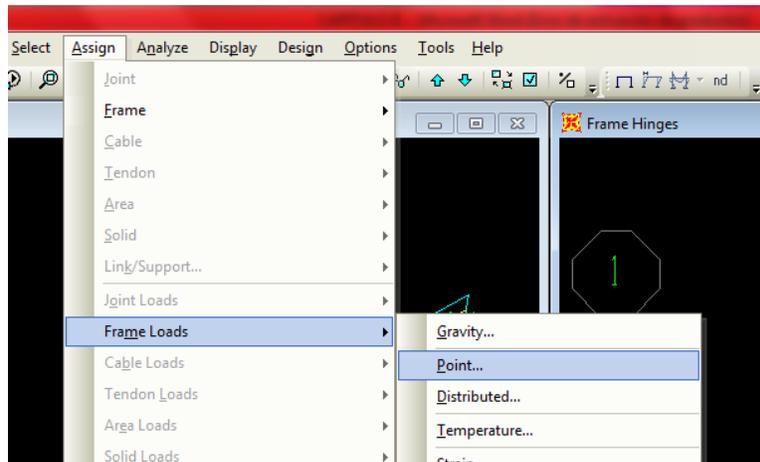


Fig.A.18 Asignar carga puntual

Se asigna una carga arbitraria para realizar este análisis, pero esta tiene que ser tal que el miembro alcance la falla, se decidió colocar una carga de 1400000 kgf (1400 ton). Luego se define el caso de carga con el que se va a realizar el Push Over, seleccionando “Define”, “Load Cases”, aparece una ventana en la cual se debe hacer clic en la opción “Add New Load Case”, y surgirá una ventana como la presentada a continuación.

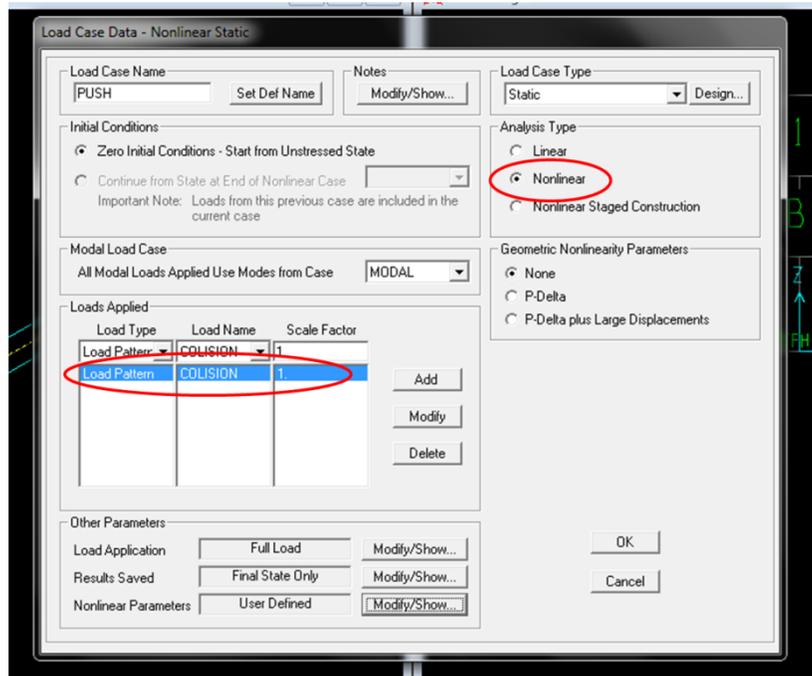


Fig.A.19 Definición de caso de carga “PUSH”

Para el caso de carga, nombrando “PUSH” el tipo de análisis debe ser no lineal, con la carga definida en colisión.

Ya definido todo lo anterior se realiza el análisis en el programa. De este se obtiene lo siguiente:

Para la viga analizada cuando tiene un comportamiento elástico se obtiene que el momento máximo, para este es de 292976.1 kgf*m con una deformación de 0,01397 m. Como se muestra a continuación:

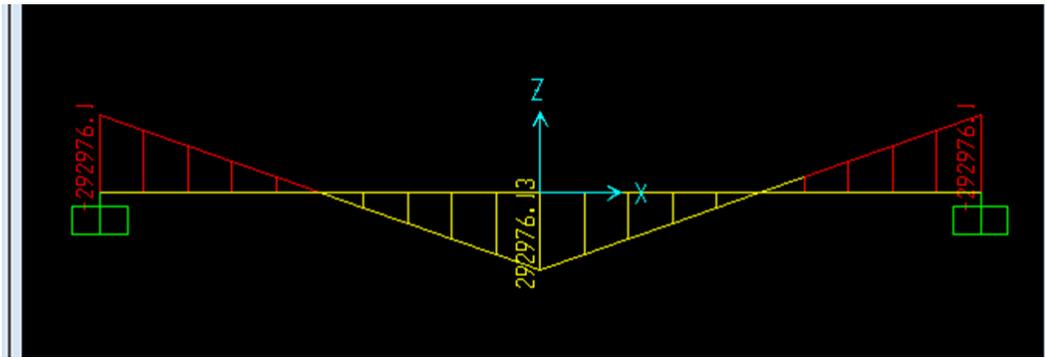


Fig.A.20 Momento elástico máximo

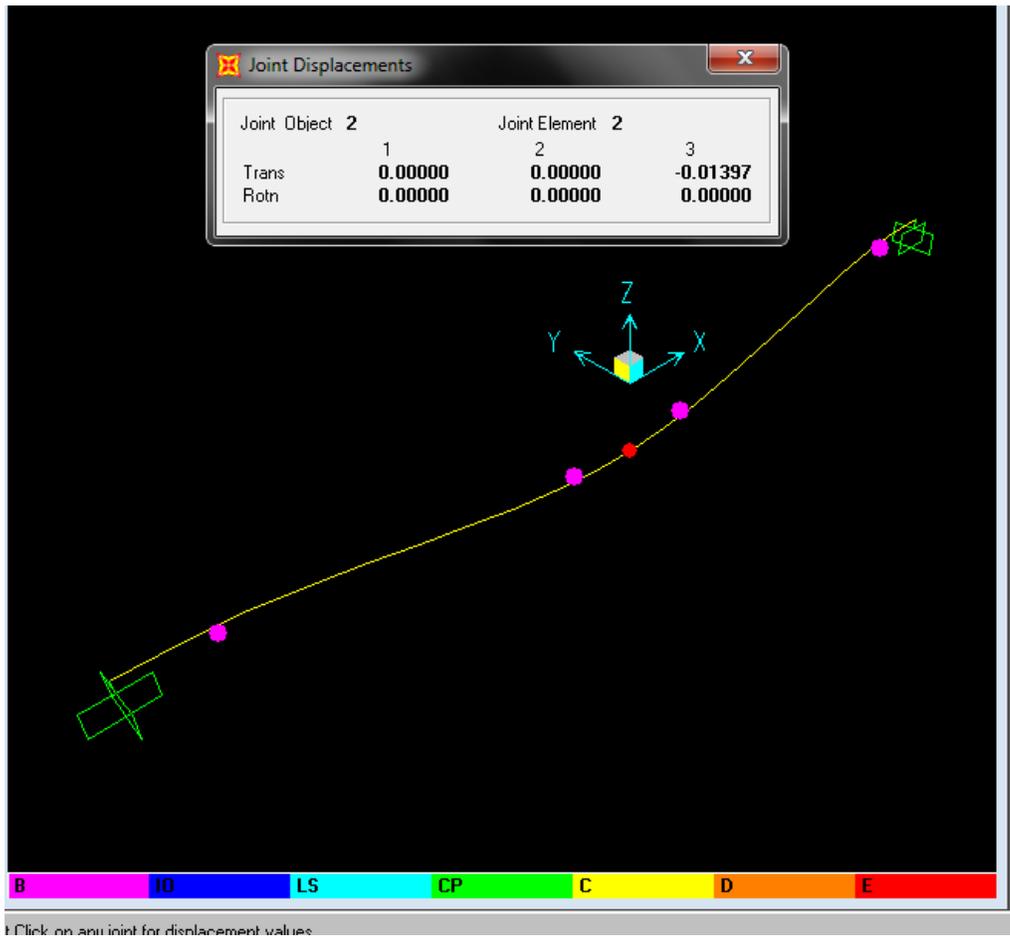


Fig.A.21 Deformada de la viga en límite elástico

Como se puede observar en la figura 5.21 aparecen unos puntos morados en las rótulas plásticas antes definidas, este color indica que se encuentra en el límite elástico del material seleccionado.

Para el caso en el cual la viga alcanza su máximo momento resistente, momento plástico, se obtiene que este tiene un valor de $366220 \text{ kgf}\cdot\text{m}$ y una deformación máxima de 30 m . Como se muestra en las siguientes figuras:

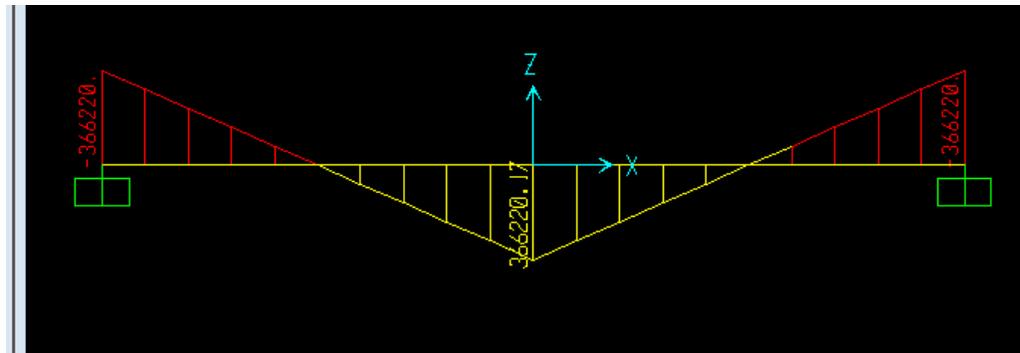


Fig.A.22 Momentos plásticos de la viga

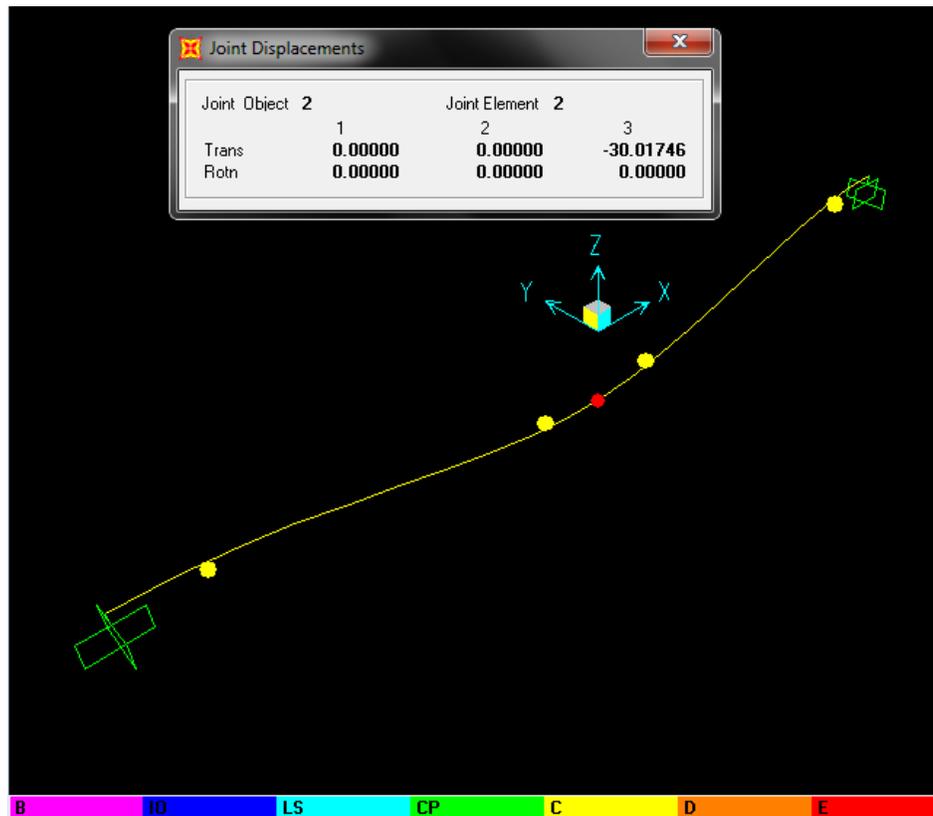


Fig.A.23 Deformada de viga en límite plástico

En la figura 5.23 se observa que las rótulas plásticas antes definidas poseen un color amarillo, esto indica que la viga ha alcanzado su límite de plasticidad en el cual se registra el momento máximo que esta resiste.

Estos resultados se pueden observar de mejor forma en el gráfico de comportamiento de las rótulas plásticas, presentado a continuación:

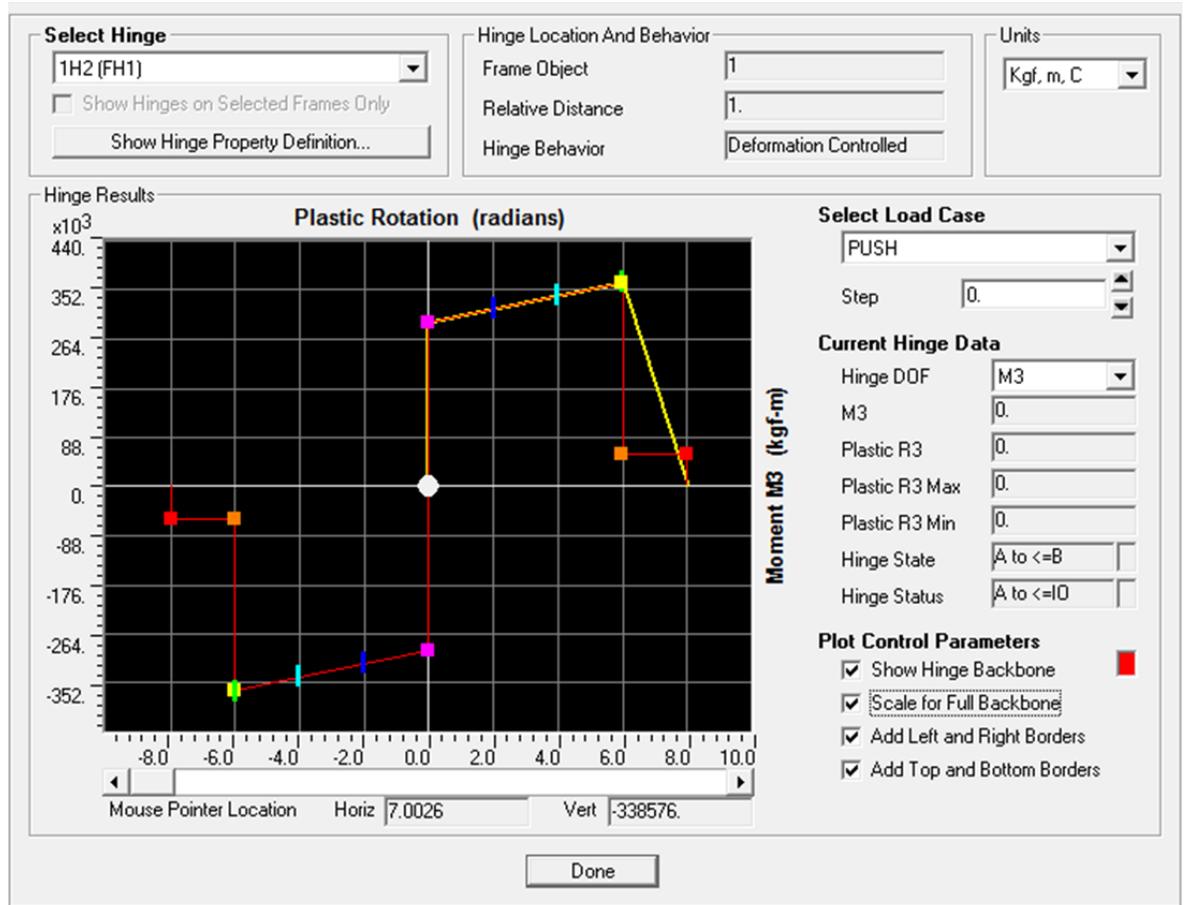


Fig.A.24 Comportamiento de rótulas plásticas hasta el colapso

En el gráfico se puede observar diferentes puntos con colores, lo cual representan el estado en el cual se encuentra la viga, en el eje de las ordenadas se encuentra la rotación de la sección y en el eje de las abscisas los momentos asociados. El comportamiento de la rótula plástica colocada viene definido por la línea roja del gráfico.

Al realizar el análisis del modelo de calibración se obtienen los resultados presentados en la siguiente tabla:

Tabla A.1. Resultados análisis inelástico

	Momento (kgf*m)	Desplazamiento (m)
Rango Elástico	292.976,10	0,01397
Rango Plástico	366.220	30

Se determinó que el momento plástico de la sección es 1,25 veces mayor que el máximo momento elástico que logra alcanzar el material, resultado esperado y lógico, debido a que esta relación en los momentos es la establecida por la norma FEMA 356, comportamiento utilizado por defecto por el programa para las rótulas plásticas.

Por otra parte, se puede notar que el desplazamiento que sufre la viga cuando se alcanza el máximo momento elástico es de 1,397 cm (0,01397 m), a diferencia de la flecha obtenida en el límite plástico que logra un valor de 30 m, deformación imposible de alcanzar en la realidad, lo cual indica que en este rango ya se ha formado el mecanismo de colapso en la viga.

ANEXO B

EJEMPLO DE ESTIMACION DE PERDIDA DE CAPACIDAD RESISTENTE
DEBIDO A ABOLLADURA LOCAL

Para realizar el siguiente ejemplo se utilizó como guía el procedimiento establecido en el manual de diseño de la Heath & Safety Executive, titulado “Ship Collision and Capacity of Brace Members of Fixed Steel Offshore Platforms”. Se considera que el impacto ocurre en la mitad del tramo del arriostamiento de los pilotes y que esta viga se encuentra empotrada sus extremos.

El manual de diseño establece que la fuerza de impacto viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{\delta} = 2 \frac{(M_{pd} + 2M_{pc} + M_{pi})}{L} \quad (\text{Ec.33})$$

Donde P_{δ} es la fuerza de impacto, los términos M_{pd} y M_{pi} representan los momentos plásticos en los extremos de la viga, M_{pc} indica el momento plástico en el centro del arriostamiento y L la longitud del tramo.

Para determinar la profundidad de la abolladura, se despeja de la ecuación 9 (Ec.9) y se obtiene que esta deformación se rige por la siguiente ecuación:

$$\delta_d = \left(\frac{P_{\delta}}{21M_p} \right)^2 t \quad (\text{Ec.34})$$

Por último, el ángulo φ se puede determinar despejándolo de la ecuación 12 (Ec.12), se obtiene la siguiente ecuación

$$\varphi = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2\delta_d}{D} \right) \quad (\text{Ec.35})$$

Conocido esto se puede comenzar a realizar el proceso iterativo del cual se obtiene los siguientes resultados:

Tabla B.1. Iteraciones de abolladuras

Iteración	1	2	3	4	5
Imp. Fuerza, P(Ec.33)	14.16	7.46	10.42	8.96	9.67
Abolladura (Ec.34)	0.95	0.26	0.52	0.38	0.44
Energía (Ec.10)	9.44	1.38	3.77	2.39	3
Rotación, ψ (Ec.35)	2.17	0.97	1.42	1.19	1.3
Módulo Plástico, Zpl (Ec.11)	0.003	0.027	0.015	0.021	0.018
Momento Plástico, Mpc (Ec.3)	0.77	6.69	3.75	5.18	4.48

Se obtiene que la energía necesaria para producir una abolladura (δ_d) de 0,44 m, en el miembro afectado, es de 3MJ.