



Casa abierta al tiempo

Universidad Autónoma Metropolitana  
Unidad Azcapotzalco

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERIA

POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

# **Optimización de un Sistema Flotante de Producción tipo Semisumergible en el Golfo de México**

**TESIS**

**P R E S E N T A**

Alumno: **María Reyes Casimiro**

Asesores:

**Dr. Tiziano Perea Olvera**

**Dr. Iván Félix González**

MÉXICO, D.F.

Mayo 2021

## Resumen

En este trabajo se proponen metodologías y herramientas computacionales para la optimización de la respuesta de movimientos y en la optimización del diseño estructural de plataformas tipo semisumergibles localizadas hipotéticamente en aguas nacionales en el Golfo de México en un tirante de agua de 2000 m. Una de las metodologías se aplica en tres diferentes volúmenes de producción (100, 150 y 200 MBD), en la cual se implementa la herramienta de algoritmos genéticos que se encuentra en el software de Matlab (2020a) y las variables de diseño que se consideran son: separación entre columnas, ancho y altura entre columnas, el calado, el ancho y altura de pontones. Por otro lado, para la optimización del diseño estructural se aplica la segunda metodología en la plataforma tipo semisumergible con dimensiones óptimas del volumen de producción de 100 MBD. Esta metodología se aplica en los paneles que se encuentran en la parte central inferior de los pontones y las variables que se consideran son: el espesor del panel, el tipo de atiesadores (placa, ángulo y tipo T), dimensiones de los atiesadores, número de atiesadores y ancho del panel. Finalmente, se lleva a cabo una comparación de las curvas de capacidad de los paneles atiesados óptimos utilizando las ecuaciones que se encuentran en las recomendaciones prácticas DNV-RP-C201 y las curvas de capacidad obtenidas de los elementos finitos utilizando el software Abaqus 6.13.

## Abstract

In this work methodologies and computational tools are proposed for optimization for response of movements and optimization of structural design of semisubmersible type platforms hypothetically located in national waters in the Gulf of Mexico in a water depth of 2000 m. One of the methodologies is applied in three different production volumes (100, 150 and 200 MBD), in which genetic algorithm tool found in Matlab software (2020a) and the design variables that are considered are implemented: separation between columns, columns width and height, draft, pontoon width and height. On the other hand, for optimization of structural design, the second methodology is applied in the semisubmersible type of platform with optimal dimensions of the production volume of 100 MBD. This methodology is applied to the panels that are in the lower central part of the pontoon and the variables considered are: the thickness of the panel, the type of stiffeners (plate, angle, and tee), dimensions of the stiffeners, number of stiffeners and panel width. Finally, a comparison of the capacity curves of the optimal stiffened panels is carried out using the equations found in the practical recommended DNV – RP -C201 and the capacity curves obtained from finite elements using Abaqus software 6.13.

## *Dedicatoria*

A mí por jamás rendirme a pesar de las adversidades.

A mi familia por siempre confiar en mí.

A todas aquellas que me alentaron y apoyaron para mejorar y seguir adelante.

## *Agradecimientos*

Primero que nada, quiero agradecer a Dios por haberme dado la fuerza para concluir con esta etapa.

A mis asesores Dr. Iván Félix Gonzales y el Dr. Tiziano Perea Olvera por su tiempo, apoyo y conocimientos compartidos para llevar a cabo este proyecto de investigación.

También quiero agradecer a la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco por haberme abierto las puertas. Así, como al coordinador de esa época Dr. Gelacio Juárez Luna, al coordinador actual Dr. Dante Tolentino López y a los profesores del Posgrado por su tiempo y enseñanzas.

A CONACyT y CONACyT – SENER – Hidrocarburos por el apoyo económico.

Finalmente, a esa persona tan importante y especial que siempre me ha apoyado a pesar de las circunstancias.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| Índice de figuras.....  | I  |
| Índice de tablas .....  | V  |
| 1 Introducción.....   | 1  |
| 1.1 Descripción del problema.....   | 1  |
| 1.2 Aspectos generales del sistema semisumergible.....                                  | 1  |
| 1.3 Proceso de construcción de plataformas semisumergibles .....                        | 5  |
| 1.4 Objetivos .....   | 10 |
| 1.4.1 Objetivo general.....   | 10 |
| 1.4.2 Objetivos específicos .....   | 11 |
| 1.5 Metodología y alcances.....   | 11 |
| 1.6 Organización de la tesis.....   | 12 |
| 2 Antecedentes.....   | 13 |
| 2.1 Evolución histórica.....  | 13 |
| 2.2 Trabajos previos .....  | 21 |
| 3 Normatividad aplicable.....   | 45 |
| 3.1 Requisitos de estabilidad intacta .....   | 46 |
| 3.2 Requisitos de estabilidad dañada.....   | 48 |
| 3.3 Placas con carga lateral .....  | 56 |
| 3.4 Pandeo de placas no atiesadas bajo compresión uniforme longitudinalmente.....       | 57 |
| 3.5 Pandeo de placas no atiesadas en compresión transversal .....                       | 58 |
| 3.6 Fuerzas en la placa idealizada atiesada .....                                       | 59 |
| 3.7 Ancho efectivo de la placa .....  | 60 |
| 3.8 Resistencia de pandeo característica de atiesadores.....                            | 61 |
| 3.9 Pandeo torsional de atiesadores.....  | 62 |
| 3.10 Ecuaciones de interacción para compresión axial y presión lateral .....            | 63 |
| 3.10.1 Resistencia. ....  | 65 |
| 4 Respuesta hidrodinámica .....   | 67 |
| 4.1 Teoría de oleaje lineal .....   | 67 |
| 4.2 Ecuación de movimiento.....   | 72 |
| 4.3 Identificación de parámetros de diseño.....   | 73 |
| 4.4 Definición de variables de estudio .....  | 75 |
| 4.5 Estabilidad de un sistema flotante.....   | 76 |
| 4.6 Cálculo de los periodos .....   | 78 |
| 4.7 Condiciones ambientales.....  | 79 |
| 4.7.1 Parámetros de oleaje regular.....   | 79 |
| 4.8 Contorno ambiental .....  | 80 |
| 4.9 Respuesta global.....   | 82 |
| 4.10 Air gap.....   | 84 |
| 4.11 Operadores de amplitud de respuesta y respuestas máximas.....                      | 85 |
| 5 Optimización hidrodinámica del casco de un sistema flotante tipo semisumergible ..... | 92 |
| 5.1 Algoritmos genéticos.....   | 92 |
| 5.2 Metodología de optimización.....  | 98 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.3   | Resultados de la implementación de los AGs de los tres casos de estudio.....  | 101 |
| 6     | Optimización del diseño estructural del casco.....                            | 108 |
| 6.1   | Metodología .....   | 114 |
| 6.2   | Discusión de resultados.....  | 116 |
| 7     | Obtención de la resistencia última usando el Método de Elementos Finitos..... | 121 |
| 7.1   | Descripción del modelo con elementos finitos .....                            | 121 |
| 7.1.1 | Curva esfuerzo-deformación del acero .....                                    | 121 |
| 7.1.2 | Apoyos .....  | 122 |
| 7.1.3 | Tipo de elemento finito y mallado .....                                       | 123 |
| 7.1.4 | Secuencia para la aplicación de la carga.....                                 | 125 |
| 7.2   | Resistencia última .....  | 130 |
| 8     | Conclusiones.....   | 141 |
| 8.1   | Trabajos futuros.....   | 142 |
| 9     | Referencias.....  | 143 |
| 10    | Anexos .....  | 152 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Sistemas flotantes de producción (Tomado de <a href="https://oilandgastechologies.files.wordpress.com">https://oilandgastechologies.files.wordpress.com</a> y modificada por el autor).....   | 2  |
| Figura 1.2 Localización de la semisumergible en estudio con coordenadas 95°30'W y 26°0'N a 2,000 m tirante de agua (fuente <a href="http://rondasmexico.gob.mx/wp-content/uploads/2015/12/Bloque-1-CPP.pdf">http://rondasmexico.gob.mx/wp-content/uploads/2015/12/Bloque-1-CPP.pdf</a> ).....                | 2  |
| Figura 1.3 Plataforma tipo semisumergible (fuente: <a href="http://www.odebrechtlatininvest.com/organizacion-odebrecht/historia.html">http://www.odebrechtlatininvest.com/organizacion-odebrecht/historia.html</a> ). ....   | 3  |
| Figura 1.4 Principales componentes de una plataforma Semisumergible (Tomado de <a href="http://minykdangasmalaysia.blogspot.mx/2010/10/part-ii-types-of-offshore-platforms.html">http://minykdangasmalaysia.blogspot.mx/2010/10/part-ii-types-of-offshore-platforms.html</a> y modificada por el autor)..... | 4  |
| Figura 1.5 Construcción de módulos principales (fuente: <a href="http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/">http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/</a> ).....   | 6  |
| Figura 1.6 Ensamble del casco mediante módulos (fuente: <a href="http://www.inpex.co.jp">http://www.inpex.co.jp</a> ). ....  | 7  |
| Figura 1.7 Transportación de la superestructura de una Semisumergible (fuente: <a href="http://web.cimc.com">http://web.cimc.com</a> ). ....   | 7  |
| Figura 1.8 Elevación y acoplamiento de la cubierta sobre el casco (fuente: <a href="http://web.cimc.com">http://web.cimc.com</a> ). ....   | 8  |
| Figura 1.9 Acoplamiento de la cubierta y el casco (fuente: <a href="http://www.kiewit.com">http://www.kiewit.com</a> ). ....   | 8  |
| Figura 1.10 Instalación y equipamiento de propulsores (fuente: <a href="http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/">http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/</a> ).....  | 9  |
| Figura 1.11 Terminación mecánica y puesta en marcha (fuente: <a href="http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/">http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/</a> ).....  | 10 |
| Figura 2.1 Primera Plataforma Semisumergible <i>Blue Water 1 (Shell Oil Company)</i> (Fuente: <a href="https://www.ihrdc.com/els/ipims-demo/t36797/offline_IPIMS_s36804/resources/data/PE09.htm">https://www.ihrdc.com/els/ipims-demo/t36797/offline_IPIMS_s36804/resources/data/PE09.htm</a> ). ....        | 15 |
| Figura 2.2 Semisumergible multi columna de la clase <i>Ocean Victory</i> de segunda generación (fuente: <a href="https://petrowiki.org/File:Devol2_1102final_Page_602_Image_0001.png">https://petrowiki.org/File:Devol2_1102final_Page_602_Image_0001.png</a> ).....   | 16 |
| Figura 2.3 West alpha plataforma tipo semisumergible de cuarta generación (fuente: <a href="https://www.marinetraffic.com/en/photos/picture/ships_id/1707869/351651000">https://www.marinetraffic.com/en/photos/picture/ships_id/1707869/351651000</a> ).....  | 17 |
| Figura 2.4 <i>Deepwater Nautilus</i> plataforma tipo semisumergible de quinta generación (fuente: <a href="https://petrowiki.org/File:Devol2_1102final_Page_603_Image_0001.png">https://petrowiki.org/File:Devol2_1102final_Page_603_Image_0001.png</a> ). ....  | 18 |
| Figura 2.5 Transocean Barents semisumergible de sexta generación (fuente: <a href="https://gcaptain.com/drilling-mud-spills-from-transocean-barents-off-newfoundland-and-labrador/">https://gcaptain.com/drilling-mud-spills-from-transocean-barents-off-newfoundland-and-labrador/</a> ).....               | 20 |
| Figura 2.6 Diagrama de flujo para obtener la optimización mediante algoritmos genéticos .....  | 27 |
| Figura 3.1 Curva de momento de restauración y ángulo de inclinación (fuente: tomada de DNV-OS-C301 y modificada por el autor).....   | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.2 Curvas de momento de restauración e inclinación del viento (Tomada de DNV-OS-C301 y modificada por el autor). .....                              | 52 |
| Figura 3.3 Panel de placa rigidizada (fuente: DNV-OS-C101). .....   | 53 |
| Figura 3.4 Modelo puntual (fuente: DNV-OS-C101, 2008).....  | 59 |
| Figura 4.1 Ola lineal o de Airy (adaptada de Brebbia y Walker, 1979). .....   | 69 |
| Figura 4.2 Grados de libertad (adaptada de DNV-RP-C103, 2005). .....  | 73 |
| Figura 4.3 Volumen de producción vs Peso de cubierta ( $W_{topside}$ ) para 100, 150 y 200 MBD .....  | 74 |
| Figura 4.4 Volumen de producción vs Masa del volumen desplazado para 100, 150 y 200 MBD .....   | 74 |
| Figura 4.5 Masa del volumen desplazado vs Peso del casco ( $W_{hull}$ ) para 100, 150 y 200 MBD. ....   | 75 |
| Figura 4.6 Fuerza y centro de flotación .....   | 77 |
| Figura 4.7 Metacentro “ $M$ ” y altura metacéntrica “ $G_m$ ”. .....  | 77 |
| Figura 4.8 Contorno ambiental para diferentes periodos de retorno .....   | 82 |
| Figura 4.9 Respuesta hidrodinámica característica (fuente: DNV- RP - C103). .....   | 83 |
| Figura 4.10 Planos para la obtención de elementos mecánicos y aceleraciones. ....   | 83 |
| Figura 4.11 Esquemmatización de la ubicación de los puntos para la obtención del <i>air gap</i> . .....   | 84 |
| Figura 4.12 Esquemmatización de la obtención del <i>air gap</i> . .....   | 84 |
| Figura 4.13 Resultados del <i>air gap</i> para los diferentes anchos de columna y los diferentes calados.....   | 85 |
| Figura 4.14 Operador de amplitud de respuesta del movimiento de arfada variando ancho de columna y calado. ....   | 86 |
| Figura 4.15 Operadores de amplitud de respuesta de arfada con 4 diferentes anchos de columna. ....  | 87 |
| Figura 4.16 Operadores de amplitud de respuesta del movimiento de arfada con 3 diferentes calados.....  | 88 |
| Figura 4.17 Respuesta máxima del movimiento de arfada en la dirección de oleaje de $0^\circ$ con la variación del ancho de columna y calado. ....           | 88 |
| Figura 4.18 Operador de amplitud de respuesta del cabeceo variando el ancho de columna y calado. ....   | 90 |
| Figura 4.19 Operadores de amplitud de respuesta del movimiento de cabeceo, considerando diferentes anchos de columna. ....                                  | 90 |
| Figura 4.20 Operadores de amplitud de respuesta del cabeceo, considerando diferentes calados. ....  | 91 |
| Figura 4.21 Respuesta máxima del movimiento de cabeceo en la dirección de oleaje de $0^\circ$ considerando la variación del ancho de columna y calado. .... | 91 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.1 Modelo individual de las características y genes y la relación entre el fenotipo y el genotipo.....                          | 93  |
| Figura 5.2 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 100 MBD. ....   | 96  |
| Figura 5.3 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 150 MBD. ....   | 97  |
| Figura 5.4 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 200 MBD. ....   | 97  |
| Figura 5.5 Diagrama de flujo de la optimización de la configuración del casco de SFP tipo semisumergibles.....                          | 100 |
| Figura 5.6 Variables de diseño.....   | 107 |
| Figura 6.1 Ubicación de la sección transversal en el pontón.....  | 108 |
| Figura 6.2 Esquematación de la condición de carga estática ( <i>calm water</i> ) .....  | 109 |
| Figura 6.3 Fuerzas transversales sobre el pontón .....  | 109 |
| Figura 6.4 Localización de las secciones de carga .....   | 110 |
| Figura 6.5 Sección transversal del pontón y definición de paneles de estudio.....   | 112 |
| Figura 6.6 Definición de áreas para el cálculo de los momentos de inercia.....  | 113 |
| Figura 6.7 Esfuerzos biaxiales y presión hidrostática (fuente: adaptada de DNV-OS-C102)....   | 113 |
| Figura 6.8 Diagrama de flujo de la optimización del panel óptimo.....   | 115 |
| Figura 6.9 Número de generaciones (100) vs mejor valor con 200 individuos.....  | 117 |
| Figura 6.10 Número de generaciones (200) vs mejor valor con 200 individuos.....   | 117 |
| Figura 6.11 Número de generaciones (100) vs mejor valor con 500 individuos.....   | 118 |
| Figura 6.12 Número de generaciones (200) vs mejor valor con 500 individuos.....   | 118 |
| Figura 7.1 Curva esfuerzo – deformación del acero.....  | 121 |
| Figura 7.2 Bordes simplemente apoyados para atiesadores tipo placa.....   | 122 |
| Figura 7.3 Bordes simplemente apoyados para atiesadores tipo ángulo.....  | 122 |
| Figura 7.4 Bordes simplemente apoyados tipo T.....  | 123 |
| Figura 7.5 Mallado del panel con atiesador tipo placa.....  | 124 |
| Figura 7.6 Mallado del panel con atiesador tipo ángulo.....   | 124 |
| Figura 7.7 Mallado del panel con atiesador tipo T.....  | 124 |
| Figura 7.8 Imperfecciones iniciales en el panel rigidizado con atiesadores tipo placa con un factor de amplificación de 100 veces.....  | 126 |
| Figura 7.9 Imperfecciones iniciales en el panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo con un factor de amplificación de 100 veces..... | 126 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 7.10 Imperfecciones iniciales en el panel rigidizado con atiesadores tipo T con un factor de amplificación de 100 veces .....  | 126 |
| Figura 7.11 Aplicación de la presión hidrostática con atiesador tipo ángulo. ....   | 127 |
| Figura 7.12 Aplicación de la presión hidrostática con atiesador tipo placa.....   | 127 |
| Figura 7.13 Aplicación de la presión hidrostática con atiesador tipo T.....   | 128 |
| Figura 7.14 Aplicación del desplazamiento proporcional (atiesador tipo ángulo). ....  | 128 |
| Figura 7.15 Aplicación del desplazamiento proporcional (atiesador tipo placa).....  | 129 |
| Figura 7.16 Aplicación del desplazamiento proporcional (atiesador tipo T).....  | 129 |
| Figura 7.17 Sección transversal y características geométricas del atiesador.....  | 130 |
| Figura 7.18 Relaciones de proporcionalidad de desplazamientos en panel con atiesadores tipo ángulo.....   | 131 |
| Figura 7.19 Relaciones de proporcionalidad de desplazamientos en panel rigidizado con atiesadores tipo T. ....  | 132 |
| Figura 7.20 Relaciones de proporcionalidad de desplazamientos en panel rigidizado con atiesadores tipo placa .....  | 132 |
| Figura 7.21 Envoltente de resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo.134   |     |
| Figura 7.22 Envoltente de resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo T. ....  | 134 |
| Figura 7.23 Envoltente de resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo placa. .   | 135 |
| Figura 7.24 Resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo con elementos finitos y con las ecuaciones de DNV. ....   | 136 |
| Figura 7.25 Resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo T con elementos finitos y con las ecuaciones de DNV. ....  | 137 |
| Figura 7.26 Resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo placa con elementos finitos y con las ecuaciones de DNV. ....  | 137 |
| Figura 7.27 Esfuerzos de la relación de proporcionalidad a) 1:1, b) 1:1.25, c) 1:1.5, d) 1:2, e) 1:3, f) 1:4, g) 1:10, h) 1:30 del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo. .... | 138 |
| Figura 7.28 Esfuerzos de la relación de proporcionalidad a) 1:1, b) 1:1.25, c) 1:1.5, d) 1:2, e) 1:3, f) 1:4, g) 1:10, h) 1:30 del panel rigidizado con atiesadores tipo T.....       | 139 |
| Figura 7.29 Esfuerzos de la relación de proporcionalidad a) 1:1, b) 1:1.25, c) 1:1.5, d) 1:2, e) 1:3, f) 1:4, g) 1:10, h) 1:30 del panel rigidizado con atiesadores tipo placa.....   | 140 |
| Figura 10.1 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 100 MBD .....  | 152 |
| Figura 10.2 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 150 MBD .....  | 153 |
| Figura 10.3 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 200 MBD .....  | 154 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1.1 Dimensiones de las columnas y pontones.....  | 5   |
| Tabla 1.2 Diferentes clases de acero (fuente: DNVGL-OS-B101).....                                    | 5   |
| Tabla 2.1 Comparación entre las diferentes generaciones de plataformas semisumergibles .....         | 14  |
| Tabla 3.1 Valores de coeficientes de $C_s$ (fuente: DNV-OS-C301).....                                | 49  |
| Tabla 3.2 Valores del coeficiente $C_h$ (fuente: DNV-OS-C301).....                                   | 49  |
| Tabla 3.3 Tipos de secciones transversales (fuente: DNV-OS-C101).....                                | 55  |
| Tabla 3.4 Referencias para la revisión de pandeo de placas (fuente: DNV-OS-C101).....                | 55  |
| Tabla 4.1 Variables y número de casos de estudio. ....   | 76  |
| Tabla 5.1 Distribución de los factores de peso para cada variable .....                              | 101 |
| Tabla 5.2 Comparación de resultados entre los AGs y Excel del volumen de producción de 100 MBD ..... | 104 |
| Tabla 5.3 Comparación de resultados entre los AGs y Excel del volumen de producción de 150 MBD ..... | 105 |
| Tabla 5.4 Comparación de resultados entre los AGs y Excel del volumen de producción de 200MBD .....  | 106 |
| Tabla 5.5 Valores finales de las variables de diseño de cada volumen de producción.....              | 107 |
| Tabla 6.1 Resumen de resultados de las cargas ambientales parte central del pontón .....             | 111 |
| Tabla 6.2 Resumen de resultados de las cargas ambientales lado izquierdo del pontón .....            | 111 |
| Tabla 6.3 Resumen de resultados de las cargas ambientales lado derecho del pontón .....              | 111 |
| Tabla 6.4 Características geométricas de los modelos óptimos.....                                    | 119 |

## Simbología y acrónimos

|            |  |
|------------|--|
| $A$        | Área proyectada de todas las superficies expuestas tanto en la condición vertical como la inclinada. |
| $A_e$      | Área efectiva.   |
| $A_f$      | Área transversal del patín.  |
| $A_s$      | Área de la sección transversal del atiesador.  |
| $A_w$      | Área transversal del alma.   |
| $a_0$      | Amplitud de ola.   |
| $B$        | Matriz de amortiguamiento.   |
| $b_f$      | Ancho del patín.   |
| $c$        | Celeridad de la ola.   |
| $C$        | Factor.  |
| $C_0$      | Factor.  |
| $C_h$      | Coficiente de altura.  |
| $c_i$      | Factor.  |
| $C_s$      | Coficiente de forma.   |
| $C_{xs}$   | Factor de reducción debido al esfuerzo en dirección longitudinal.                                    |
| $C_{ys}$   | Factor de reducción debido al esfuerzo en dirección transversal.                                     |
| $d$        | Profundidad.   |
| $E$        | Modulo de elasticidad del acero.   |
| $F$        | Fuerza del viento.   |
| $f_E$      | Esfuerzo de pandeo de Euler.   |
| $f_{Epx}$  | Esfuerzo de pandeo de Euler debido al esfuerzo longitudinal.   |
| $f_{Epy}$  | Esfuerzo de pandeo de Euler debido al esfuerzo transversal.  |
| $f_{Epr}$  | Esfuerzo de pandeo al corte de Euler de la placa.  |
| $f_{ET}$   | Esfuerzo de pandeo Elástico torsional.   |
| $f_k$      | Esfuerzo de pandeo característico.   |
| $f_r$      | Esfuerzo característico.   |
| $f_T$      | Esfuerzo de pandeo torsional característico.   |
| $f(t)$     | Vector de fuerzas debido al oleaje, viento y corriente oceánica.                                     |
| $f_y$      | Esfuerzos de fluencia del acero.   |
| $f(x_i)$   | Valor objetivo.  |
| $H$        | Altura de ola.   |
| $h_\alpha$ | Factor de reducción.   |
| $H_s$      | Altura de ola significativa.   |
| $h_w$      | Altura del alma.   |
| $i_e$      | Radio de giro efectivo.  |
| $I_z$      | Momento de inercia con ancho de la placa completa.   |
| $K$        | Matriz de rigidez debida a la rigidez hidrostática y al sistema de amarre.                           |
| $\kappa$   | Factor.  |
| $k_c$      | Factor.  |
| $k_{nots}$ | Nudos náuticos.  |
| $k_p$      | Factor de reducción de la carga lateral.   |
| $l$        | Longitud del panel.  |
| $l_k$      | Longitud de pandeo.  |

|             |  |
|-------------|--|
| $l_T$       | Distancia entre apoyos del atiesador.  |
| $M$         | Matriz de masas.   |
| $M_a$       | Matriz de masa adherida.   |
| $m_c$       | Factor para atiesadores continuos y atiesadores simplemente apoyados.  |
| $M_{1,Rd}$  | Momento de diseño(centro).   |
| $M_{2,Rd}$  | Momento de diseño(extremo).  |
| $M_{s1,Rd}$ | Momento resistente en el lado del atiesador (centro).  |
| $M_{s2,Rd}$ | Momento resistente en el lado del atiesador (extremo).   |
| $M_{st,Rd}$ | Momento resistente en el lado del atiesador en tensión.  |
| $N_E$       | Esfuerzo de pandeo de Euler.   |
| $N_{kp,Rd}$ | Fuerza axial resistente inducida por la placa.   |
| $N_{ks,Rd}$ | Fuerza axial resistente inducida por el atiesador de diseño.   |
| $N_{Rd}$    | Fuerza axial resistente.   |
| $N_{Sd}$    | Fuerza axial de diseño.  |
| $N_u$       | Número de individuos.  |
| $s$         | Distancia entre atiesadores.   |
| $S_e$       | Ancho efectivo.  |
| $T$         | Periodo de la ola.   |
| TdA         | Tirante de agua.   |
| $t_f$       | Espesor del patín.   |
| $T_{Heave}$ | Periodo natural en arfada.   |
| $T_p$       | Periodo pico de la ola.  |
| $t_p$       | Espesor de la placa del panel.   |
| $T_{Pitch}$ | Periodo natural en cabeceo.  |
| $T_{Roll}$  | Periodo natural en balanceo.   |
| $t_w$       | Espesor del alma.  |
| $T_z$       | Periodo promedio de cruces por cero de la ola.   |
| $P_0$       | Presión lateral equivalente.   |
| $P_f$       | Presión lateral que hace fluir a la fibra más alejada de un atiesador continuo usando módulos de sección elástica. |
| $p_i$       | Probabilidad acumulada.  |
| $p_k$       | Probabilidad de selección para cada cromosoma.   |
| $P_{Sd}$    | Presión hidrostática de diseño.  |
| $V$         | Velocidad del viento.  |
| $W$         | Módulo de elasticidad elástico.  |
| $W_{ep}$    | Módulo de sección para el atiesador del lado de la placa.  |
| $W_{es}$    | Módulo de sección para el atiesador con placa efectiva.  |
| $\gamma_M$  | Factor del material.   |
| $\eta$      | Superficie libre.  |
| $\theta_1$  | Ángulo de inclinación estático debido al viento.   |
| $\theta_2$  | Segunda intercepción de inclinación del viento y las curvas de momento restauración.                               |
| $\theta_D$  | Ángulo de la primera inundación.   |
| $\theta_R$  | Ángulo para el cual las áreas A, B y C son evaluadas.  |
| $\kappa$    | Número de ola.   |

|                        |  |
|------------------------|--|
| $\lambda$              | Longitud de ola.   |
| $\bar{\lambda}_p$      | Esbeltez de la placa.  |
| $\sigma_{j,Sd}$        | Esfuerzos de Von Mises.  |
| $\sigma_{y,Sd}$        | Esfuerzo de diseño en la dirección longitudinal.   |
| $\sigma_{x,Sd}$        | Esfuerzo de diseño en la dirección transversal.  |
| $\sigma_{y1,Sd}$       | Esfuerzo de diseño más grande en la dirección transversal.   |
| $\sigma_{y2,Sd}$       | Esfuerzo de diseño más pequeño en la dirección transversal.  |
| $\sigma_{y,Rd}$        | Esfuerzo resistente en la dirección longitudinalmente.   |
| $\sigma_{x,Rd}$        | Esfuerzo resistente en la dirección transversal.   |
| $\rho$                 | Densidad del aire (1.222 kg/cm <sup>3</sup> ).   |
| $\rho_w$               | Densidad del agua.   |
| $\Phi$                 | Velocidad de potencial.  |
| $\omega$               | Frecuencia senoidal.   |
| $x, y, z$              | Ejes en la dirección $x, y, z$ .   |
| $\ddot{X}, \dot{X}, X$ | Vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento en los tres grados de libertad del sistema, respectivamente. |
| $x_i$                  | Cromosoma $i$ -ésimo.  |
| $\nabla$               | Laplaciano.  |

|       |   |
|-------|---|
| ABS   | <i>American Bureau of Shipping.</i>   |
| AGs   | Algoritmos genéticos  |
| ALS   | Estado Límite Accidental ( <i>Accidental Limit State</i> ).   |
| API   | Instituto Americano del Petróleo ( <i>American Petroleum Institute</i> ).   |
| CFD   | Dinámica de Fluidos Computacional ( <i>Computational Fluid Dynamics</i> ).  |
| DNV   | <i>Det Norske Veritas</i> . Organismo Internacional con sede en Noruega.  |
| DTS   | Árboles secos ( <i>Dry Trees</i> ).   |
| EF    | Elementos Finitos.  |
| FEA   | Análisis de Elemento Finito ( <i>Finite Element Analysis</i> ).   |
| FLS   | Estado Límite de Fatiga ( <i>Fatigue Limit State</i> ).   |
| FPSO  | Sistemas Flotantes de Producción, Almacenamiento y Descarga ( <i>Floating Production, Storage and Offloading</i> ).       |
| FPU   | Unidad de Producción Flotante ( <i>Floating Production Unit</i> ).  |
| IACS  | Asociación Internacional de Sociedades de Clasificación ( <i>International Association of Classification Societies</i> ). |
| IFORM | Método de Confiabilidad Inverso de Primer Orden ( <i>Inverse First Order Reliability Method</i> ).                        |
| ISO   | Organización Internacional de Normalización ( <i>International Organization for Standardization</i> ).                    |
| KC    | Números de Keolegan – Carpenter.  |
| LRFD  | Diseño por Factores de Carga y Resistencia ( <i>Load and Resistance Factor Design</i> ).                                  |
| MBD   | Miles de barriles diarios.  |
| MODU  | Unidades de Perforación Móviles Costa afuera ( <i>Mobile Offshore Drilling Unit</i> ).                                    |
| RAO   | Operador de Amplitud de Respuesta ( <i>Response Amplitud Operator</i> ).  |
| RP    | Recomendaciones practicas ( <i>Recommended practice</i> ).  |
| SA    | Simulación de templado ( <i>Simulated Annealing</i> ).  |

|      |  |
|------|--|
| SFP  | Sistema Flotante de Producción.                                    |
| SCRs | Ductos de acero en catenaria ( <i>Steel Catenary Risers</i> ).     |
| TLP  | Plataforma de Piernas Tensionadas ( <i>Tension Leg Platform</i> ). |
| ULS  | Estado Límite Último ( <i>Ultimate Limit State</i> ).              |
| VCG  | Centro de Gravedad Vertical ( <i>Vertical Center of Gravity</i> ). |
| VDL  | Carga de diseño variable ( <i>Variable Design load</i> )           |
| VIM  | Movimiento Inducido por Vórtices ( <i>Vortex Induced Motion</i> ). |

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Descripción del problema

La creciente demanda de producción de hidrocarburos en México requiere la exploración y explotación de nuevas reservas localizadas en aguas profundas y ultra-profundas en el Golfo de México. Debido a dicha demanda y a la continua expansión de la producción de crudo, se requiere hacer uso de tecnología costa afuera capaz de soportar condiciones ambientales extremas.

Las estructuras marinas se encuentran sometidas a diferentes condiciones ambientales tales como; oleaje, corriente y viento. Por tal motivo, es necesario implementar métodos de análisis y diseños óptimos en términos de respuesta de movimientos y peso del acero requerido, con el objetivo de reducir el costo de producción de hidrocarburos, pero respetando las normas de diseño y estabilidad de la embarcación para garantizar la seguridad del personal y equipo.

## 1.2 Aspectos generales del sistema semisumergible

En la actualidad existen diferentes conceptos de sistemas flotantes. En la figura 1.1 se muestran los diferentes conceptos de sistemas flotantes: FPSOs (por sus siglas en inglés *Floating Production, Storage and Offloading*, Sistemas Flotantes de Producción, Almacenamiento y Descarga), TLP (por sus siglas en inglés *Tension Leg Platform*, Plataforma de Piernas Tensionadas), Plataformas tipo SPAR y Plataformas tipo semisumergibles.

En el presente trabajo se ha seleccionado la plataforma de producción tipo semisumergible con arreglos de válvulas (conocidos como árboles de navidad) en el lecho marino. Este tipo de plataforma fue seleccionada debido a que es uno de los sistemas flotantes con mayores expectativas de ser empleado en aguas nacionales en el Golfo de México. Además, se asume que las plataformas tipo semisumergibles se instalaran hipotéticamente frente a las costas de Tamaulipas, como se muestra en la figura 1.2, con un tirante de agua (TdA) de 2000 m y se analizan tres casos de estudio que consiste en tres diferentes volúmenes de producción: 100, 150 y 200 MBD (Miles de Barriles Diarios). Cabe señalar que este trabajo se enfoca únicamente en el estudio de la respuesta hidrodinámica del casco y por ende el sistema de amarre no se toma en cuenta. De tal manera que para los análisis de las respuestas hidrodinámicas solo se consideran las fuerzas del oleaje dado que la corriente marina tiene mayor impacto en el sistema de amarre y por tal motivo se desprecia

para este trabajo. Por otro lado, el efecto del viento se toma en cuenta en el cálculo del momento de escora para los análisis de estabilidad de las embarcaciones.

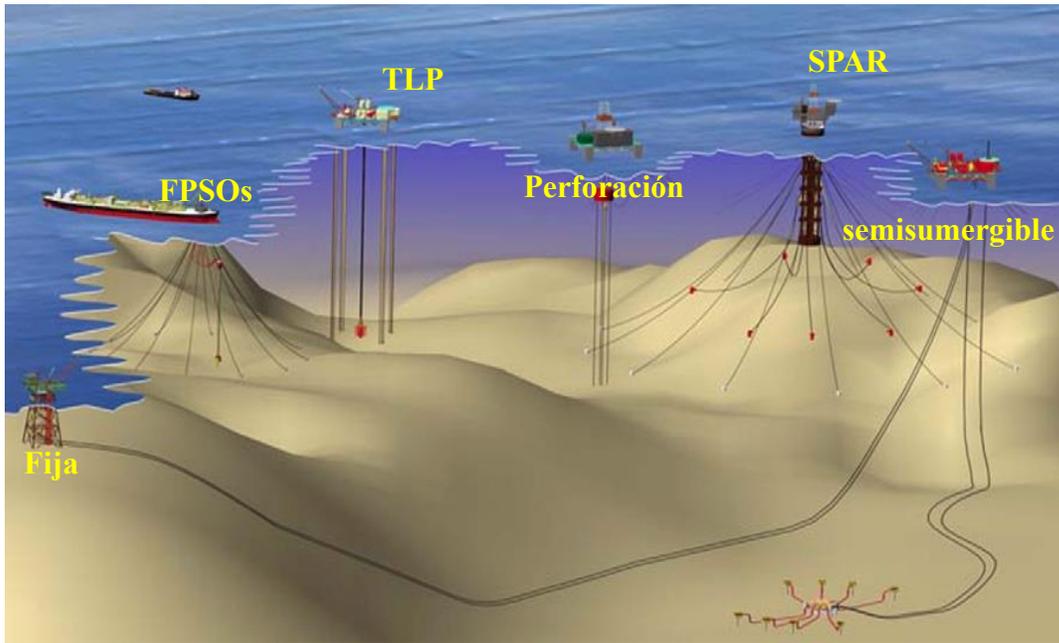


Figura 1.1 Sistemas flotantes de producción (Tomado de <https://oilandgastechologies.files.wordpress.com> y modificada por el autor).

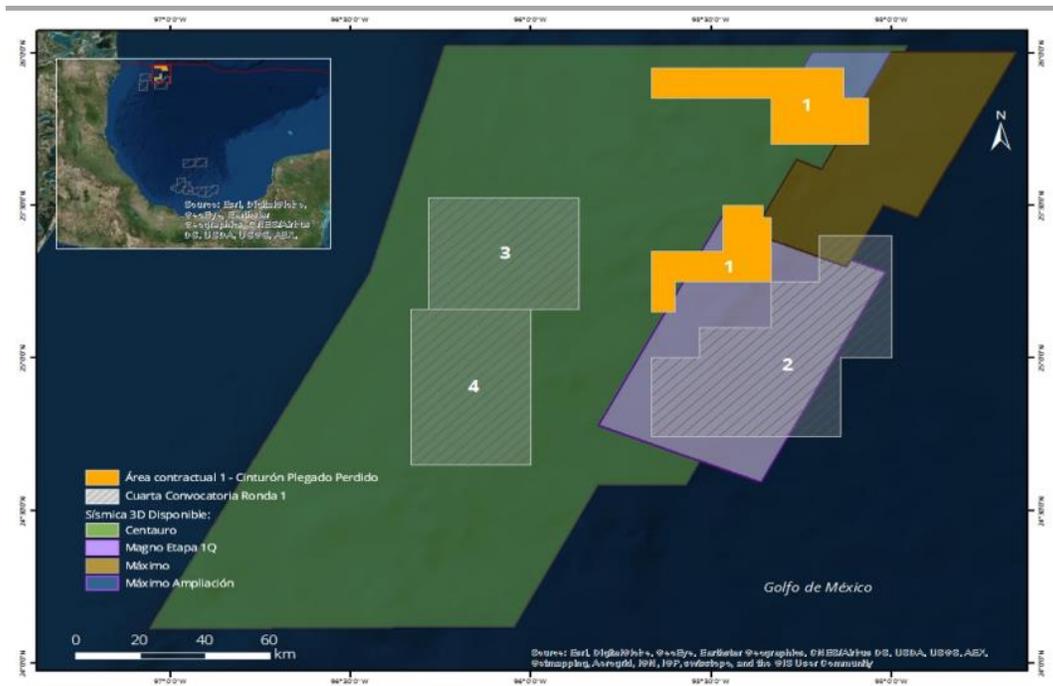


Figura 1.2 Localización de la semisumergible en estudio con coordenadas  $95^{\circ}30'W$  y  $26^{\circ}0'N$  a 2,000 m tirante de agua (fuente <http://rondasmexico.gob.mx/wp-content/uploads/2015/12/Bloque-1-CPP.pdf> ).

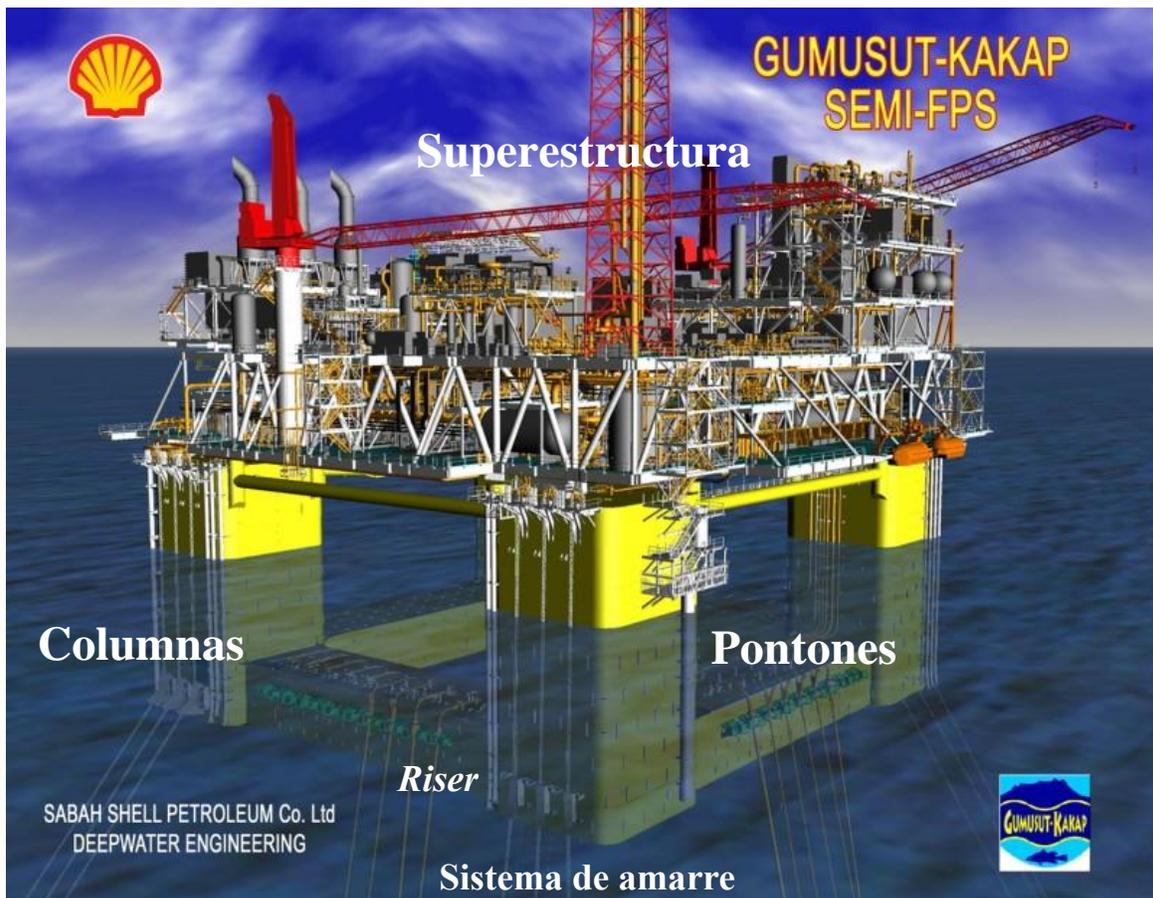
En la Figura 1.3 se muestra una plataforma tipo semisumergible, la cual se utiliza para diversas funciones en la industria costa afuera, que incluyen actividades como: exploración, perforación y producción de hidrocarburos, grúas de gran capacidad (hasta 14,000 t), así como plataformas de exploración. Las plataformas tipo semisumergibles están constituidas básicamente de una cubierta metálica soportada por un casco, el cual están conformado por un conjunto de columnas y pontones; las columnas generalmente son de sección circular o rectangular hueca; la forma de los pontones y el número de columnas depende de la configuración estructural y el servicio requerido. Una plataforma tipo semisumergible es una estructura que se posiciona en un sitio por medio de sistemas de amarre anclados en el lecho marino o bien por sistemas de posicionamiento dinámico dependiendo de las funciones de la plataforma.



**Figura 1.3 Plataforma tipo semisumergible**

(fuente: <http://www.odebrechtlatinvest.com/organizacion-odebrecht/historia.html>).

En la figura 1.4 se resaltan los principales componentes de una plataforma tipo semisumergible, en la que se incluyen: superestructura, columnas, pontones, *risers* (*i.e.* ductos ascendentes por donde viajan diversos fluidos como crudo, gas, etc.) y el sistema de amarre.



**Figura 1.4 Principales componentes de una plataforma Semisumergible**

(Tomado de <http://minvagdangasmalaysia.blogspot.mx/2010/10/part-ii-types-of-offshore-platforms.html> y modificada por el autor).

En la tabla 1.1 se presentan algunas dimensiones de columnas y pontones para los volúmenes de producción de estudio de 100, 150 y 200 MBD ubicadas en costas de otros países. Los datos de la tabla se obtienen de la información que publica la revista Offshore Magazine (Offshore magazine, 2011).

**Tabla 1.1 Dimensiones de las columnas y pontones**

| Pontones     |           |            | Columnas                     |           |            |
|--------------|-----------|------------|------------------------------|-----------|------------|
| Longitud (m) | Ancho (m) | Altura (m) | Distancia entre columnas (m) | Ancho (m) | Altura (m) |
| 40           | 10        | 8          | 80                           | 20        | 33         |
| 43           | 12        | 9          | 85                           | 14        | 41         |
| 50           | 14        | 10         | 90                           | 18        | 40         |
| 55           | 18        | 15         | 95                           | 14        | 44         |

Debido a que este tipo de sistemas se construyen a partir de placa de acero estructural, es importante mencionar las diferentes clases de acero que son típicamente utilizadas para estos sistemas. Así, en la tabla 1.2 se muestran las clases de acero para diferentes espesores de placa, y que también se producen en resistencia normal o de alta resistencia.

**Tabla 1.2 Diferentes clases de acero (fuente: DNVGL-OS-B101)**

| Espesor (mm)     | Clases |        |        |        |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
|                  | I      | II     | III    | IV     |
| $t \leq 15$      | A / AH | A / AH | A / AH | A / AH |
| $15 < t \leq 20$ | A / AH | A / AH | A / AH | B / AH |
| $20 < t \leq 25$ | A / AH | A / AH | B / AH | D / DH |
| $25 < t \leq 30$ | A / AH | A / AH | D / DH | D / DH |
| $30 < t \leq 35$ | A / AH | B / AH | D / DH | E / EH |
| $35 < t \leq 40$ | A / AH | B / AH | D / DH | E / EH |
| $40 < t \leq 50$ | B / AH | D / DH | E / EH | E / EH |

A, B, D y E representan grados de acero de resistencia normal y esfuerzo de fluencia nominal de 235 MPa. AH, DH y EH representan grados de acero de alta resistencia, donde H es la resistencia del acero, que puede ser 27, 32, 36 o 40, y que representa casi un décimo del esfuerzo nominal de fluencia (e.g. 27 = 265 MPa, 32 = 315 MPa, 36 = 355 MPa, y 40 = 390 MPa).

### 1.3 Proceso de construcción de plataformas semisumergibles

Dada la naturaleza del problema a estudiar, es importante mencionar de manera general el proceso constructivo de este tipo de sistemas, para el cual se tienen las siguientes etapas:

1. Construcción paralela de módulos principales en tierra. La construcción paralela del casco superior e inferior en tierra reduce el período de construcción, aumenta la eficiencia y asegura la calidad del producto. Fotografías del proceso de fabricación de los módulos o

paneles principales y del ensamble modular del casco se muestra en las figuras 1.5 y 1.6, respectivamente. En ambas figuras uno se tiene idea del tamaño de la estructura al observar la escala humana de referencia en las fotografías.



**Figura 1.5 Construcción de módulos principales**  
(fuente: <http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/>).



**Figura 1.6** Ensamble del casco mediante módulos (fuente: <http://www.inpex.co.jp>).

2. La transportación de la superestructura de una plataforma tipo semisumergible, esta se presenta como se muestra en la figura 1.7.



**Figura 1.7** Transportación de la superestructura de una Semisumergible (fuente: <http://web.cimc.com>).

3. Elevación y acoplamiento del casco. En la figura 1.8 se observa cómo se lleva a cabo la elevación de la cubierta de un sistema flotante por medio de una grúa tipo pórtico, y posteriormente ésta es colocada sobre el casco. Este proceso también se puede llevar a cabo mediante grúas como se muestran en la figura 1.9.



Figura 1.8 Elevación y acoplamiento de la cubierta sobre el casco (fuente: <http://web.cimc.com>).



Figura 1.9 Acoplamiento de la cubierta y el casco (fuente: <http://www.kiewit.com>).

4. Instalación y equipamiento de propulsores, solo en caso de ser un sistema flotante de perforación o que cuenten con un sistema de posicionamiento dinámico. En la figura 1.10 se observa una serie de sistemas flotantes tipo semisumergible de perforación, las cuales requieren el equipo de propulsión para moverse a través del océano en diferentes ubicaciones, ya que este tipo de sistemas cambia de localización una vez concluida su actividad.



**Figura 1.10 Instalación y equipamiento de propulsores**  
(fuente: <http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/>).

5. Terminación mecánica, puesta en marcha y pruebas marítimas. Una vez obtenido el ensamble de todos los componentes se realizan una serie de pruebas marítimas como se muestra en la figura 1.11 utilizando barcos remolcadores, los cuales jalan o empujan las unidades.



**Figura 1.11 Terminación mecánica y puesta en marcha**  
(fuente: <http://web.cimc.com/en/enterprise/raffles/ability/construction/>).

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Desarrollar metodologías y herramientas numéricas necesarias para la optimización de la respuesta de movimientos y peso estructural de sistemas flotantes de producción tipo semisumergibles localizado en aguas nacionales en el Golfo de México, tomando en cuenta su comportamiento hidrodinámico y el diseño estructural del casco.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Optimizar, a través del uso del método de algoritmos genéticos, la configuración del casco de sistemas flotantes de producción tipo semisumergibles para minimizar la respuesta de movimientos ante condiciones extremas de oleaje.
- Optimizar, mediante el uso del método de algoritmos genéticos, la configuración estructural del casco para minimizar el peso del acero requerido.
- Evaluar, a través del método de elementos finitos, el comportamiento estructural de paneles del pontón de plataformas tipo semisumergibles, así como la comparativa entre los resultados de elementos finitos (EF) y los calculados con las ecuaciones de las recomendaciones prácticas DNV-RP-C201.

## **1.5 Metodología y alcances**

Para cumplir los objetivos del presente proyecto, se llevan a cabo las siguientes actividades:

- 1.- Identificar los principales parámetros de diseño de la configuración del casco (*e.g.* dimensiones de pontones, columnas y calado) que impactan en la respuesta hidrodinámica de los sistemas flotantes de producción (SFP) tipo semisumergibles, los cuales se usan en la etapa de optimización.
- 2.- Análisis hidrodinámicos de los SFP tipo semisumergibles en los cuales se aplican las fuerzas debidas al oleaje y se obtienen los coeficientes de masa adherida y amortiguamiento por radiación de ondas.
- 3.- Desarrollar la metodología de optimización de la configuración del casco para minimizar la respuesta de movimientos. Una vez que se realizan los análisis hidrodinámicos y se definen los parámetros de diseño, se aplica la metodología para la optimización de la respuesta de movimientos. La optimización se realiza con la herramienta de algoritmos genéticos (AGs) del programa de cómputo Matlab (2020a).
- 4.- Seleccionar tres casos de estudio con diferentes volúmenes de producción (100, 150 y 200 MBD). Las plataformas son hipotéticamente ubicadas frente a las costas de Tamaulipas, y las condiciones ambientales que se consideran son las que prevalecen en este sitio.
- 5.- Determinar la capacidad última de los paneles de los pontones con el código de diseño por factores de carga y resistencia (*Load and Resistance Factor Design*, LRFD) de una porción crítica

del casco compuesta por placas rigidizadas con atiesadores a base de placa, ángulo y perfiles tipo T. Estos paneles están sujetos a un estado de esfuerzos biaxiales y presión hidrostática.

6.- Realizar una simplificación en la que los elementos estructurales no se modelan si no que se consideran modificando la densidad del material de las placas del casco.

## **1.6 Organización de la tesis**

En el capítulo 1 se describen de manera general los SFP tipo semisumergibles en estudio. Además, se presenta la justificación y los objetivos del presente trabajo.

En el capítulo 2 se presentan las investigaciones que anteceden este documento, los cuales sirven como base para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En el capítulo 3 se resumen la normatividad y recomendaciones practicas aplicables para el análisis hidrodinámico y diseño de las estructuras costa afuera.

En el capítulo 4 se enfoca en la obtención de las respuestas hidrodinámicas, así como la presentación de estos resultados como: los operadores de amplitud de respuesta (RAOs, *Response Amplitude Operator*). Asimismo, se presenta una breve explicación sobre la importancia de la estabilidad en este tipo de sistemas.

En el capítulo 5 se presenta la metodología para la optimización de la respuesta de movimientos del casco, en el cual se implementan los algoritmos genéticos y se obtienen los valores óptimos de cada uno de los volúmenes de producción estudiados.

En el capítulo 6 se muestra la metodología para la optimización del diseño estructural del casco de manera específica en los paneles que se encuentran ubicados en los pontones, así como los resultados que se obtienen a partir de la implementación de los AGs y los paneles óptimos.

En el capítulo 7 se presentan los análisis de resistencia última de paneles rigidizados en el pontón de una plataforma tipo semisumergible, además se muestra una comparativa de los análisis de EF y de los resultados calculados de las ecuaciones de las recomendaciones practicas DNV-RP-C201.

Finalmente, el capítulo 8 se muestran las conclusiones que se obtienen de este trabajo.

## **2 ANTECEDENTES**

En general los sistemas estructurales costa afuera pueden ser clasificados en dos tipos: (1) Fijos y (2) Flotantes. Dentro de los sistemas fijos se encuentran las plataformas tipo Jacket, y en los sistemas tipo flotantes se encuentran las plataformas tipo SPAR, FPSOs, TLP y semisumergibles, estos últimos sistemas son considerados como posibles soluciones para la producción de hidrocarburos en aguas profundas a más de un TdA de 500 m.

Debido a las ventajas que ofrecen los sistemas flotantes tipo semisumergibles (*i.e.* proporcionar espacio en cubierta y capacidad de carga para soportar el equipo y las cargas variables para soportar operaciones de perforación y producción) en este trabajo se lleva a cabo la optimización del casco (*i.e.* minimizar la respuesta de movimientos y el peso de acero requerido del casco) para un sistema flotante tipo semisumergible, sometida a cargas de oleaje para una localización hipotética en aguas nacionales en el Golfo de Mexico en un TdA de 2,000 m.

### **2.1 Evolución histórica**

La forma y el tamaño de las primeras plataformas tipo semisumergibles variaron a medida que los diseñadores buscaban formas para optimizar la respuesta de movimiento de la embarcación, el diseño de la plataforma de carga de cubierta variable (VDL) y otras consideraciones. La designación de “generación” de plataformas tipo semisumergibles suele ser una designación inexacta, debido a que estas pertenecen a una generación, pero con algunas actualizaciones cambian a otra generación.

En la tabla 2.1 se enlistan algunas plataformas tipo semisumergible clasificadas por generaciones, así como los periodos de construcción, tirantes de agua y sus diseñadores/propietarios. Las diferentes generaciones se diferencian de acuerdo con el diseño y la tecnología empleada (Chakrabarti, 2005).

**Tabla 2.1 Comparación entre las diferentes generaciones de plataformas semisumergibles**

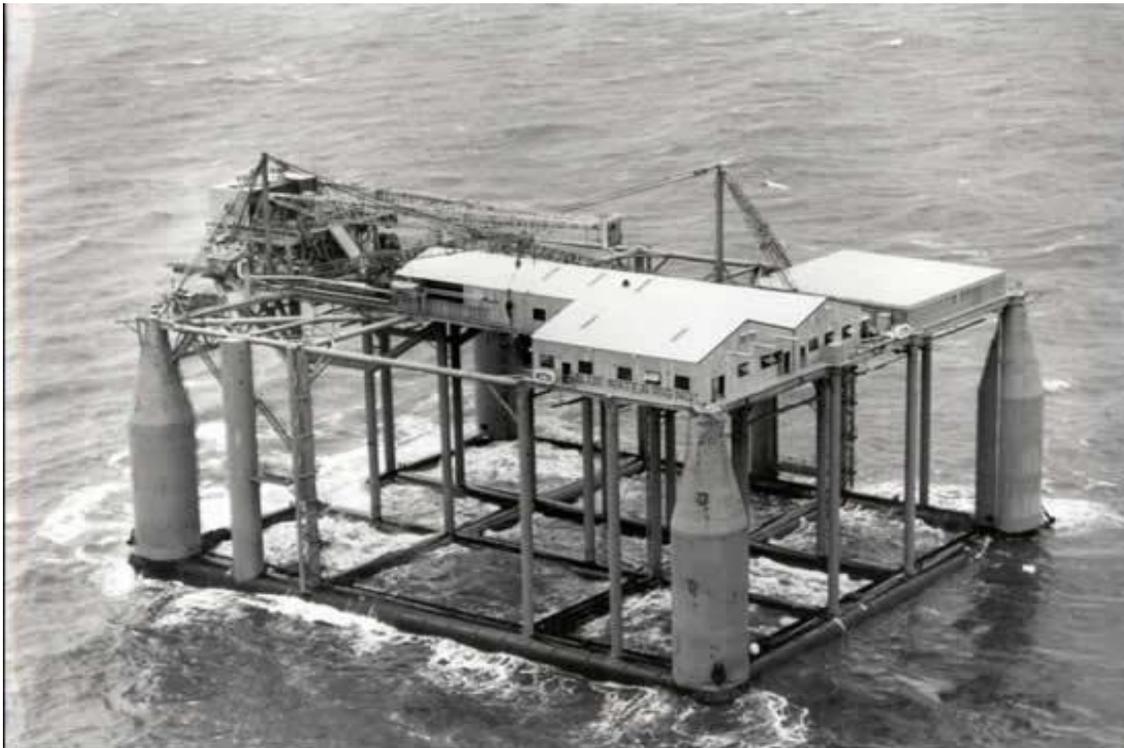
| Generación | Diseñador / Propietario  | Tirante de agua metros | Periodo de construcción                 |
|------------|--|------------------------|---|
| 1          | ODECO<br>SEDCO   | 91.5 – 183             | Finales de los 60's                     |
| 2          | ODECO<br>SEDCO<br>Aker<br>Friede Goldman<br>Korkut Engineers<br>SEDCO            | 183 – 610              | Inicios de los 70's                     |
| 3          | Aker<br>ODECO<br>Friede & Goldman  | 457.5 –1,525           | Mediados de los 80's                    |
| 4          | Atwood Oceanics<br>Noble Drilling  | 1,067.5 –1,525         | Finales de los 90's<br>inicio de 2000's |
| 5          | Noble Drilling<br>Smedvig<br>Diamond<br>Offshore<br>Ocean Rig ASA<br>SEDCO Forex | 1,525 –3,050           | Finales de los 90's<br>inicio de 2000's |
| 6          | Friede & Goldman<br>Daewoo<br>Shipbuilding and Marine<br>Engineering Co.         | 1,525 –3,050           | Posterior al 2005                       |

La compañía *Blue Water Drilling* poseía y operaba la plataforma tipo sumergible de cuatro columnas llamada *Blue Water No.1* ubicada en el Golfo de México para la compañía *Shell Oil*. En esta plataforma los pontones no proporcionaban la suficiente flotabilidad para soportar el peso de la plataforma y sus equipos, por lo que se tuvo que reconfigurar a la mitad de la distancia que hay entre la parte superior de los pontones y la parte inferior de la cubierta. Además, se observó que los movimientos en la nueva configuración eran muy pequeños, así que las compañías *Blue Water Drilling* y *Shell* en conjunto decidieron que la plataforma fuese operada en modo flotante (Today.com, 2017).

Esta plataforma tipo semisumergible no tuvo grandes modificaciones respecto a sus antecesoras (plataformas tipo sumergibles), ya que únicamente fue modificado su sistema de anclaje y se optó por cambiar los preventores (válvulas instaladas en la parte superior de los pozos) de un arreglo a bordo de la plataforma a un arreglo submarino. Su estructura era compleja y muchas veces contaba

con más de 20 columnas como se puede observar en la figura 2.1, las cuales eran de mantenimiento difícil y costoso. Esta generación de plataformas tipo semisumergibles trajo consigo una mejoría sustancial en cuanto a la eliminación virtual de los movimientos de cabeceo (*pitch*) y balanceo (*roll*), comparado con los barcos de perforación, aunque aún se presentaban cuando eran trasladadas a condiciones ambientales severas. Esta generación tenía una capacidad de carga de 500 a 1,000 t, lo cual restringía el reabastecimiento de materiales que debía ser continuo para evitar el paro de actividades.

Es necesario mencionar que la primera generación no logró ser competitiva dentro del mercado de las unidades móviles de perforación costa afuera (*Mobile Offshore Drilling Unit*, o MODU por sus siglas en inglés), debido a su falta de diseño (los pontones no contaban con suficiente flotabilidad para soportar el peso de la plataforma y equipo) y funcionalidad, por mencionar algunas desventajas. Destacando que éstas encontraron un nuevo objetivo al ser convertidas en plataformas de producción (SFP).



**Figura 2.1 Primera Plataforma Semisumergible *Blue Water 1* (Shell Oil Company)**

(Fuente: [https://www.ihrdc.com/els/ipims-demo/t36797/offline\\_IPIMS\\_s36804/resources/data/PE09.htm](https://www.ihrdc.com/els/ipims-demo/t36797/offline_IPIMS_s36804/resources/data/PE09.htm)).

A principios de la década de los 70s, se diseñó y construyó una nueva plataforma tipo semisumergible de segunda generación con sistema de amarre y equipos submarinos más sofisticados. La clase *Ocean Victory* era típica de las unidades de esta era, que se concentraban en gran medida en reducir los movimientos de la plataforma en comparación con el aumento a la contribución de la VDL de la cubierta superior.

En la figura 2.2 se muestra una plataforma tipo semisumergible de segunda generación de la cual se construyeron un mayor número de unidades. Además, del mayor intercambio tecnológico existente, esta generación fue estimulada por la competencia que representaban los buques de perforación. Era evidente que se requería de una mayor y mejor movilidad, así como de la optimización en el arreglo de los pontones. Esto evidenció que dos pontones eran suficientes, el cual requeriría un sistema estructural diferente. Por lo tanto, esto se convirtió en la característica principal de la segunda generación.



Figura 2.2 Semisumergible multi columna de la clase *Ocean Victory* de segunda generación  
(fuente: [https://petrowiki.org/File:Devol2\\_1102final\\_Page\\_602\\_Image\\_0001.png](https://petrowiki.org/File:Devol2_1102final_Page_602_Image_0001.png)).

A mediados de la década de los 80s, se diseñaron y construyeron varias plataformas tipo semisumergibles de tercera generación que podían anclarse y operar a más de 914 m de tirante de agua y en condiciones ambientales más severos. Muchas de las unidades de tercera generación se actualizaron en la década de los 90s a tirantes de agua aún mayores, con una mayor capacidad y por la tanto, se convirtieron en unidades de cuarta generación.

Sin embargo, pese a todo, la tercera generación mantuvo como características principales los pontones gemelos, la cual conserva los requerimientos de diseño de un sistema flotante tipo semisumergible, así como un aumento en su tamaño y en la capacidad de carga abordo. Con algunas excepciones, la masa de volumen desplazado de estas unidades pasó de 18,000 t en la década de los 70s a más de 40,000 t en la década de los 80s.

La cuarta generación cuenta en su diseño con una superestructura de casco que omite los soportes (a excepción de los soportes horizontales entre columnas), lo que mejora su estabilidad en condiciones ambientales más hostiles. Además, tiene una capacidad de carga que varía de las 4,500 – 7,000 t, y operan en tirantes de agua que varían de los 1,524 hasta los 3,050 m. Algunas plataformas tipo semisumergibles de la segunda y tercera generación se han mejorado, extendiendo la vida útil de sus cascos y actualizado sus equipos de perforación para ser clasificados como unidades de cuarta generación; un ejemplo de esta modificación se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3 West alpha plataforma tipo semisumergible de cuarta generación**

(fuente: [https://www.marinetraffic.com/en/photos/picture/ships\\_id/1707869/351651000](https://www.marinetraffic.com/en/photos/picture/ships_id/1707869/351651000)).

A finales de 1990, las unidades de quinta generación, como el *Deepwater Nautilus*, el cual se muestra en la figura 2.4 se hicieron aún más grandes (>50, 000 t de masa de volumen desplazado) y para condiciones ambientales más severos.

En la figura 2.4 se presenta una plataforma tipo semisumergible de quinta generación capaz de operar y ser anclada en tirantes de agua de 2133 m. En la cual, se incorporaron apéndices en las columnas para una mayor VDL, con un aumento del 50% aproximadamente en el espacio de la plataforma y la adición de almacenamiento y manejo de *risers*.



**Figura 2.4 *Deepwater Nautilus* plataforma tipo semisumergible de quinta generación (fuente: [https://petrowiki.org/File:Devol2\\_1102final\\_Page\\_603\\_Image\\_0001.png](https://petrowiki.org/File:Devol2_1102final_Page_603_Image_0001.png)).**

Un número limitado de plataformas tipo semisumergibles de tercera, cuarta y quinta generación tienen asistencia de posicionamiento dinámico o mantenimiento de posición completo en comparación con un sistema de amarre.

La sexta generación está dominada por plataformas diseñadas para aguas profundas y condiciones ambientales severos. Esto se debe al creciente interés en explorar nuevas áreas como las partes árticas de Canadá, Groenlandia, Rusia, margen Atlántico, Noruega, Brasil, África occidental, Australia y el Golfo de México. La sexta generación está claramente dominada por plataformas en aguas profundas y para condiciones ambientales extremos. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de plataforma de la sexta generación. Sus características son: gran masa de volumen desplazado y VDL. Esta unidad está diseñada para condiciones ambientales más severos y también puede perforar en TdA de hasta 3048 m. Muchos equipos de la quinta y sexta generación están equipados con el sistema *Dual RamRig* con el cual se ahorra tiempo en la perforación de pozos. El sistema *Dual RamRing* no tiene tracción y los *tops drives* se manejan hidráulicamente. También permite que el equipo auxiliar prepare secciones largas de equipo listas para su despliegue en el equipo principal. Sin embargo, se construyeron algunas plataformas de tamaño moderado y perfectamente adecuadas para el Mar del Norte y el mar de Noruega.

Por otro lado, entre la quinta y sexta generación no existen diferencias notables, dado que las características de cada una de ellas son similares con respecto a los tirantes de agua que logran alcanzar. Las diferencias tangibles se reflejan en las dimensiones de las cubiertas y las capacidades de carga que cada una logra soportar. Por ejemplo, la sexta generación tiene una capacidad de carga alrededor de las 10,000 t, a diferencia de la quinta generación que varían entre 5,000 y 8,000 t.

Para el año 2010 ya existían en el mundo más de 620 plataformas móviles de perforación en alta mar (*e.g.* Jackups, plataformas tipo semisumergibles y buques de perforación), disponibles para el servicio en la flota competitiva de perforación (Today.com, 2017). Desde entonces y hasta la fecha se han utilizado este tipo de sistemas flotantes en diferentes puntos del mundo. De acuerdo con información del *Offshore magazine*, los países que tienen sistemas flotantes tipo semisumergibles en operación, construcción e inclusive sin operar son: Reino Unido, Estados Unidos, Brasil, Noruega, China, Congo, India, Malasia, por mencionar algunos.



**Figura 2.5** Transocean Barents semisumergible de sexta generación (fuente: <https://gcaptain.com/drilling-mud-spills-from-transocean-barents-off-newfoundland-and-labrador/>).

Aunque la mayoría de las estructuras costa afuera construidas hasta la fecha han resistido la prueba del tiempo, también han existido varias fallas catastróficas en este tipo de estructuras. Por ejemplo, las explosiones catastróficas, zozobra, y errores humanos han provocado la pérdida de un número sustancial de estructuras fijas y flotantes. Solo dentro del periodo de dos años entre 1957 y 1959, los huracanes Hilda y Betsy causaron pérdidas de cientos de millones de dólares a las instalaciones de perforación, producción y oleoductos. Dos plataformas tipo semisumergibles zozobraron y se hundieron en la década de los 80s: *Alexander Kielland*, una plataforma tipo semisumergible en el Mar del Norte de Noruega (1980), y *Ocean Ranger* en el campo petrolífero de Hibernia en Canadá (1982), ambos accidentes resultaron en la pérdida de cientos de vidas.

El peor desastre en alta mar ocurrió cuando la plataforma fija de hidrocarburos y gas *Piper Alpha* se incendió en 1988 en el cual se perdieron cientos sesenta y siete vidas. Por otro lado, Petrobras P-36 se hundió en marzo de 2001 en el campo de Roncador dentro de la cuenca de Campos, en las costas de Brasil. Era el sistema de producción flotante más grande del mundo hasta esa fecha. Años

más tarde en abril del 2010 la plataforma tipo semisumergible *Deepwater Horizon* se hundió como resultado de una explosión que había tenido lugar dos días antes, provocando el más importante vertido de petróleo de la historia.

## 2.2 Trabajos previos

Uno de los pioneros en el cálculo de la respuesta hidrodinámica es la propuesta por Morison y colaboradores (1950), en la cual se emplea una fórmula semi – empírica para estimar la fuerza sobre una columna vertical fija. La fórmula tiene dos términos, uno de ellos toma en cuenta los efectos inerciales y el otro los efectos de arrastre viscosos (Morison, *et al.*, 1950).

Años más tarde, Wang (1968) estudió para números de Reynolds bajos un cilindro circular oscilante a través del método de expansión y contracción de funciones, obteniendo coeficientes de arrastre y las funciones de corriente de las expresiones analíticas.

Hasta el año de 1972, las ventajas de las plataformas tipo semisumergibles estrictamente hablando no habían sido probadas, ya que no existía un método de diseño disponible en el que las dimensiones de una plataforma derivarán de una técnica de optimización. Por lo tanto, los diseños se basaban en suposiciones razonadas y aleatorias, complementadas con modelos experimentales del diseño original y con un modelo de diseño adoptado cuando los primeros resultados no eran satisfactorios. La carencia de métodos de diseño sistemáticos para plataformas tipo semisumergibles partía de la necesidad de grandes plataformas con grandes demandas. El método de optimización utilizado por Hooft (1972) tenía demasiada flexibilidad y no tomaba en cuenta más requerimientos, los cuales solo eran cumplidos desde un punto de vista operacional de la plataforma.

En ese mismo año, Minkenberg y Van Sluijs (1972) desarrollan una investigación sobre optimización de plataformas tipo semisumergibles. Se ha visto que estas plataformas son superiores con respecto a las barcas convencionales en vista de los requerimientos mínimos de tiempo de inactividad. Para satisfacer estos requerimientos es necesario reducir los movimientos, los cuales son alcanzados por la optimización en las dimensiones o la forma del casco bajo el agua. Para fines de la optimización existe la necesidad de métodos teóricos para reducir el costo y el tiempo que consumen los modelos experimentales. El método de N.S.M.B., el cual es un sistema

informático para la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, usado para el cálculo de las fuerzas del oleaje, momentos y movimientos resultantes de una plataforma tipo semisumergible con forma arbitraria.

Por otro lado, Pinkster (1979) desarrolla un método que se basa en la teoría de potencial 3D para calcular las fuerzas de deriva media en una estructura tipo flotante en oleaje regular que se extiende para incluir los componentes oscilatorios de baja frecuencia, las cuales incrementan cuando la estructura está flotando en grupos de oleaje regular que consisten en dos olas regulares con una pequeña diferencia en su frecuencia. Los resultados de las fuerzas de deriva de baja frecuencia en una barcaza rectangular y una plataforma tipo semisumergible los comparo con resultados experimentales, obteniendo una buena correlación.

La teoría de potencial es ampliamente usada para el análisis hidrodinámico de estructuras costa afuera. Existen diferentes métodos que son usados para aplicar el enfoque de esta teoría para determinar las fuerzas de deriva. Esos métodos son clasificados por Pinkster (1980). En el primero método calcula la media de las fuerzas de segundo orden basada en momentos y consideraciones de energía, en el segundo método deduce las fuerzas de segundo orden de media y baja frecuencia y momentos a través de la integración directa de las presiones del fluido que actúan en la superficie mojada, y en el tercero método deduce el amortiguamiento de las fuerzas de segundo orden donde se iguala la energía radiada por una embarcación oscilante llevado a cabo por las olas incidentes (Pinkster, 1980).

Akagi *et al.*, (1984) formulan un método de diseño óptimo como un problema de optimización multiobjetivo no lineal mediante la adopción de tres objetivos de diseño mutuamente contradictorios. Un conjunto de soluciones numericas óptimas de Pareto se derivan adoptando el algoritmo de gradiente reducido generalizado con la cual el diseñador puede determinar la forma óptima de manera más racional investigando la relación de compensación entre los objetivos de diseño.

Akagi e Ito (1984) proponen el método de diseño óptimo en el que se elige el objetivo de diseño para minimizar la varianza de la amplitud del movimiento en arfada de una plataforma tipo semisumergible al oscilar por el oleaje en un ambiente de operación. Al dar el desplazamiento y la longitud del casco de la plataforma tipo semisumergible como condiciones de diseño a priori, los diámetros de ambos cascos y de cada columna se determinan de manera óptima utilizando la

técnica de programación cuadrática. A través de un estudio numérico sobre un problema de diseño de plataformas tipo semisumergibles, determinan que mediante el método de diseño óptimo se logra una mejora considerable de la respuesta de movimientos en comparación con los resultados dados por el método de diseño convencional.

En ese mismo año, Bearman *et al.*, (1985) llevan a cabo un análisis teórico para investigar los coeficientes de inercia y arrastre en cilindros en flujo oscilatorio viscoso para números pequeños de KC. Compararon los resultados con mediciones experimentales y mostraron que el análisis es válido para números de KC menores a 2. Además, encontraron que, para números de KC mayores, el coeficiente de arrastre es directamente proporcional al número de KC. Si la contribución viscosa se resta, el coeficiente de inercia disminuye rápidamente con el incremento del número de KC.

Años más tarde, Babu y Raja (1987) llevan a cabo un estudio de la variación de algunos parámetros de diseño en el comportamiento de una plataforma tipo semisumergible. Los parámetros considerados son: calado, relación entre la columna y el desplazamiento total, número de columnas por pontones, distancia longitudinal entre columnas y distancia transversal entre pontones. Aplicando la teoría de potencial para estimar los movimientos en arfada, avance y deriva de una plataforma tipo semisumergible, encontraron que los resultados numéricos en comparación con la información experimental son favorables.

Cuando se investiga este tipo de temas se requiere hacer uso de pruebas a escala real, pruebas de modelos a escala y simulaciones numéricas. Sin embargo, las pruebas a escala real son demasiado costosas y consumen demasiado tiempo para llevarse a cabo con frecuencia, y no proporcionan mayor cantidad de datos de los que se obtienen a partir de modelos a escala y / o simulaciones numéricas.

Otros aspectos que deben considerarse son: las condiciones ambientales no pueden ser controladas en pruebas a escala real. Además, las pruebas de modelos a escala (para escalar este tipo de estructuras se considera el Número de Froude) en la práctica debe emplearse la mayor escala posible, y compatible con las instalaciones de pruebas disponibles, así como la posibilidad de ofrecer de manera más confiable y precisa el estudio de la carga y la respuesta de una estructura marina ante diferentes estados de mar, incluidas las características de oleaje particular para un nuevo diseño propuesto.

Por otro lado, Standing (1988) lleva a cabo ensayos con modelos donde se considera uno de los métodos más confiables en el estudio del comportamiento hidrodinámico de las estructuras. Sin embargo, este enfoque tiene algunos inconvenientes. Por ejemplo, cuando las olas son creadas mecánicamente, estas superan el límite del tanque generando olas adicionales, las cuales aumentan o disminuyen las fuerzas de baja frecuencia.

Otro problema que tiene el enfoque de pruebas experimentales es al llevar a cabo el modelado a escala del sistema de amarre en aguas profundas y ultra-profundas, el cual debe considerar una escala razonable para el modelo, que toma en cuenta las limitaciones en los tanques oceánicos disponibles con respecto a la profundidad del agua.

La estimación de las respuestas de movimiento de una estructura tipo flotante, tal como la plataforma tipo semisumergible, requiere conocimiento de las características de la estructura y los factores que controlan las respuestas, tales como la rigidez y amortiguamiento del sistema (Clough y Penzien, 1993).

Años más tarde Dev y Pinkster (1997) muestran en su estudio las contribuciones del efecto viscoso en las fuerzas de deriva de baja frecuencia en plataformas tipo semisumergibles, las cuales poseen fuerzas de restauración bajas en los modos de movimiento horizontal. Empleando técnicas computacionales de teoría de potencial 3D encuentran que las fuerzas de deriva media son diferentes a las que se obtienen en pruebas experimentales. Tal discrepancia es dominante en el rango de baja frecuencia, donde los efectos de difracción son menores para estructuras delgadas. Por lo tanto, creen que es inducido por efectos viscosos. Mientras que el término de arrastre viscoso de la ecuación de Morison muestra una fuerza media cero sobre alguna parte de la estructura constantemente sumergida, zona de un cilindro vertical que perfora la superficie puede conducir a una solución simple de forma cerrada para la estimación de las contribuciones viscosas en las fuerzas de deriva. Los resultados de las pruebas validaron la teoría, la cual revela el hecho de que los cuerpos constantemente sumergidos no contribuyen solamente a los efectos viscosos en un campo de flujo de olas.

Söylemez y Atlar (1999) presentan una comparación entre la ecuación de Morison y el método de panel 2D que aplican a una plataforma tipo semisumergible. El método del panel se basa en la técnica ajustada de Frank (Frank, 1967). Los autores comentan que el enfoque de Morison incluye el efecto de las fuerzas viscosas y el efecto de las fuerzas de excitación de avance/retroceso que

no considera el método de panel. Por otro lado, el método de panel 2D toma en cuenta el efecto de la interacción columna – casco y el amortiguamiento de radiación, el cual no es considerado por el enfoque de Morison.

Sweetman *et al.*, (2002) consideran para el diseño el *air gap* dinámico entre la superficie de la ola efectiva y la parte inferior de la cubierta de la plataforma tipo semisumergible. Además, evalúan el impacto numérico de los efectos de difracción de segundo orden y comparan el comportamiento estadístico de la superficie libre estimada por los métodos numéricos con resultados experimentales. Los resultados de difracción son calculados con un programa, el cual aplica la teoría de difracción de segundo orden.

En ese mismo año Clauss *et al.*, (2002) argumentan que la arfada, el cabeceo, el balanceo y el *air gap* son características clave para considerarse en el diseño de plataformas tipo semisumergibles ante estados de mar extremos, las cuales están definidas por las condiciones de diseño de estado límite último con una altura de ola de diseño  $H_s$  para un periodo de retorno de 100 años y un periodo pico  $T_p$  especificados, pero además sugieren la implementación de un estado límite accidental relativo para las llamadas olas extremas, las cuales se observan que efectivamente ocurren. Además, aplican un método de panel numérico para este último problema, usando el enfoque de teoría de flujo potencial en el dominio del tiempo, en comparación con el enfoque en el dominio de la frecuencia y además compararon con resultados experimentales.

La reducción en el movimiento de arfada, el cual es un objetivo principal que se requiere mejorar. Bindingsbø y Bjørset (2002) proponen un método, que es incrementar el calado. Al aumentar el calado de 20 – 25 m a 40 m, el operador de amplitud de respuesta (RAO) en arfada y cabeceo se reducen un 50% aproximadamente.

Houston (2002) lleva a cabo un estudio sobre las configuraciones de cascos para plataformas tipo semisumergibles de árboles secos que han sido desarrollados y empleados para condiciones meteorológicas del centro en el Golfo de México a un Tda de 2,400 m. La configuración del casco utilizado en la plataforma tipo semisumergible es mediante parejas de columnas en lugar de una en cada esquina. La configuración del casco consiste en estructuras de placas rígidas convencionales sin algún componente móvil o conexiones estructurales novedosas. De forma similar, el sistema de amarre es convencional y utiliza tamaños de cadena y cuerdas de poliéster dentro del rango que se ha utilizado previamente en las plataformas existentes. El desempeño

global y el análisis de *risers* confirmó que la configuración tiene movimientos adecuados para soportar los árboles secos y las operaciones de perforación. La nueva configuración del casco provee excelente soporte para *risers* de acero en catenaria debido al bajo movimiento de avance (*surge*), bajos movimientos de balanceo/cabeceo (*roll/pitch*). El arreglo de las columnas en pares permite un diseño estructural eficiente de la cubierta debido al soporte estructural de las columnas interiores. La superestructura es integrada mediante varios métodos, incluyendo la integración en muelle con el dispositivo de elevación especial *Kiewit*.

Sunahara (2004) investiga las fuerzas que actúan en una plataforma con 16 columnas y mide las fuerzas hidrodinámicas simultáneamente en cada columna. Además, verifica si las grandes fuerzas medidas eran fuerzas viscosas. Esto confirma que las fuerzas de deriva viscosas significantes actúan en un cilindro para periodos de olas largas. Finalmente, se presenta una investigación para una región aplicable de las componentes viscosas y de potencial de las fuerzas de deriva de ola que actúan en cilindros verticales.

Una nueva técnica es presentada por Baarholm *et al.*, (2006), la cual se desarrolla para mejorar la eficiencia en el modelado de los sistemas de amarre utilizando un sistema de amarre truncado, tomando en cuenta la fuerza de deriva de la ola, y revisando que los resultados de los movimientos del modelo sean lo más parecidos a la configuración real.

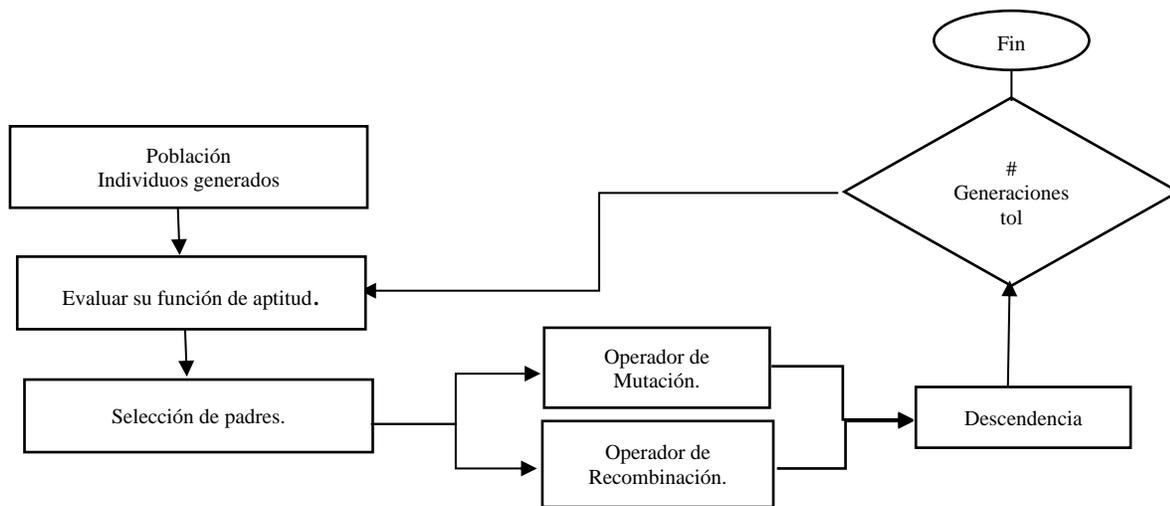
Por otro lado, las simulaciones numéricas deben basarse en las mejores teorías analíticas disponibles. Existen varias teorías que pueden ser usadas para el estudio de los movimientos y la respuesta de estructuras marinas. Cada teoría tiene ventajas y desventajas que dependen de la naturaleza de la geometría de la estructura y las condiciones ambientales. La elección apropiada de la aplicabilidad de cada método depende de los criterios tanto de la estructura (forma y dimensiones) y condiciones ambientales (tirante de agua, longitud de la ola, la naturaleza del estado de mar y oleaje regular e irregular).

Otro de los trabajos enfocados a la optimización es el que presentan Aubault *et al.*, (2007), su estudio se centra en la optimización de los parámetros de una plataforma tipo semisumergible de tres columnas con placas de sustentación, debido a su complejidad para la obtención de la optimización se utiliza el método de algoritmos genéticos, en la figura 2.6 se muestra un diagrama en donde se presenta de forma general dicho método. Como primer paso se requiere una población de individuos generados de manera aleatoria, posteriormente se evalúa su función de aptitud y se

realiza una selección de padres, empleando operadores de mutación y de recombinación entre ellos conciben una nueva descendencia, la cual se compara con el número de generación o tolerancia establecida, si se cumple se termina el programa y si no regresa a la evaluación de la función de aptitud, hasta que se cumpla el número de generaciones o tolerancia establecida se termina el ciclo. Tales autores llegan a resultados de un problema simple, en donde no se toman en cuenta los *risers* ni el sistema de amarre debido a la complejidad; además realizan una serie de simplificaciones hidrodinámicas. Encontrando una relación lineal entre las cargas de la estructura y su respuesta, siendo en este caso el proceso de optimización poco preciso, debido a las simplificaciones y restricciones no consideradas (Aubault *et al.*, 2007).

Chakrabarti *et al.*, (2007) analizan una plataforma tipo semisumergible con pontón tipo armadura (TPS) con respecto a los movimientos de arfada y cabeceo, al comparar los resultados que se obtienen de la teoría de difracción lineal y la ecuación de Morison simplificada.

De Conti *et al.*, (2008) adoptan un enfoque simplificado permitiendo una visión sobre el comportamiento de una plataforma tipo semisumergible con respecto a la geometría. Los resultados numéricos que obtienen a través de este método y los comparan con resultados experimentales y obtienen razonables similitudes.



**Figura 2.6 Diagrama de flujo para obtener la optimización mediante algoritmos genéticos**

Xiao *et al.*, (2009) investigan de forma numérica y experimental los movimientos de arfada, balanceo y cabeceo de baja frecuencia de una plataforma tipo semisumergible. En la cual,

encuentran que las fuerzas viscosas son importantes para movimientos de balanceo y cabeceo, pero despreciables para el movimiento de arfada. Además, observan que la resonancia inducida en balanceo y cabeceo debida a las fuerzas de deriva del viento varían lentamente y son mucho mayores que las inducidas por las fuerzas de deriva del oleaje.

Yue *et al.*, (2009) presentan un algoritmo compuesto/integrado basado en un proceso por etapas con el objetivo de mejorar la eficiencia y prestar atención a la estabilidad y seguridad de una plataforma tipo semisumergible de perforación. Además, aplicaron diferentes algoritmos de diseño para marcar la parte de la cubierta inferior y superior. Es decir, la parte de la cubierta superior se diseña de acuerdo con el costo de transportación más bajo, mientras que los cálculos de la parte de la cubierta inferior están basados con el alcance de mejor ajuste. La metodología de diseño general proporciona una referencia para la implementación de diseños internos de plataformas tipo semisumergibles.

Li *et al.*, (2011) estudian y comparan el comportamiento hidrodinámico y de movimientos globales de plataformas típicas en aguas profundas en condiciones ambientales en el mar del sur de China. Sus resultados indican que los movimientos en arfada y especialmente en cabeceo en la TLP son favorables. Además, encontraron que la respuesta en arfada de la plataforma tipo Spar es perfectamente comparable con la de la TLP cuando el periodo pico del estado de mar es bajo. Mientras, que el cabeceo de la Spar es mucho más grande que el de la plataforma tipo semisumergible y la TLP.

Matos *et al.*, (2011) prueban y evalúan diferentes aproximaciones hidrodinámicas, de los resultados obtenidos de sus comparaciones proponen una metodología basada en el enfoque de ruido blanco para el espectro de fuerzas. La validez de tales aproximaciones las atribuye a los niveles típicamente bajos de amortiguamiento en los movimientos de arfada, cabeceo y balanceo.

Por otro lado, Mohamed (2011) evalúa en estados de mar moderado, la predicción de las fuerzas de deriva, la cual está basada en la teoría de potencial, que tiene una excelente correlación con las mediciones; sin embargo, en condiciones de mar extremos los modelos de prueba muestran un incremento en las fuerzas de deriva al incrementar los estados de mar. Tales diferencias son explicadas por las fuerzas de deriva viscosas actuando en la zona de la línea de agua de una estructura. Motivo por el cual realizan un estudio experimental de la carga de movimiento de baja frecuencia y la respuesta de un modelo de una plataforma tipo semisumergible ante diferentes

estados de mar que varían entre moderado y extremo. Además del estudio experimental, incluyen dos simulaciones numéricas: en la primera utilizan el enfoque de Morison y en la segunda consideran el efecto de difracción de oleaje.

Xu (2011) establece que las plataformas tipo semisumergibles han llegado a ser una elección favorable como plataformas tipo flotantes con árboles húmedos soportando *risers* de acero en catenaria (SCRs o *steel catenary risers* por sus siglas en inglés), esto debido principalmente a la capacidad de integración en muelle de la superestructura. Sin embargo, todavía es un desafío para una plataforma tipo semisumergible convencional emplear SCR, en condiciones ambientales severas y en aguas relativamente superficiales debido a su gran movimiento de arfada (*heave*). La respuesta a este cambio es un nuevo diseño de una plataforma tipo semisumergible desarrollado por *Technip* como un sistema tipo flotante de árboles húmedos, que logra mejorar significativamente el movimiento de arfada y el movimiento inducido por vórtices (VIM o *Vortex Induced Motion* por sus siglas en inglés) a través de la optimización de la forma del casco, manteniendo un diseño simple como el de una plataforma tipo semisumergible convencional. La diferencia entre un diseño de una plataforma tipo semisumergible *NexGen* y una plataforma tipo semisumergible convencional son los apéndices adheridos a las columnas, la distribución del volumen y la forma de la sección transversal de los pontones. En el diseño de una plataforma tipo semisumergible *NexGen*, el volumen de los pontones se distribuye para minimizar la carga, manteniendo así la suficiente rigidez estructural, un periodo natural de arfada largo y suficiente flotabilidad en una configuración para la integración del muelle y el remolque mojado. Los apéndices adheridos a las columnas efectivamente rompen la continuidad del desprendimiento del vórtice a lo largo de la longitud de la columna y por lo tanto suprimen el VIM. Además, estos apéndices mejoran la respuesta del movimiento vertical haciendo del diseño del casco menos sensible al incremento del peso de la superestructura.

Chen y Mezbah (2013) presentan la optimización del diseño de una plataforma tipo semisumergible con determinadas características localizada en el Golfo de México, en la que usan una herramienta computacional llamada HYDA desarrollada en lenguaje FORTRAN, y concluyen lo siguiente: después de la optimización obtienen una reducción significativa en el ancho de la plataforma mientras que en los eigen-periodos obtienen un incremento, por lo que las instalaciones no convencionales después de la optimización arrojan buenos resultados en el movimiento de arfada, el cual se ve reducido considerablemente.

Gallala (2013) realiza un trabajo donde establece que las plataformas tipo semisumergibles son utilizadas para llevar a cabo la perforación, producción y operaciones de intervención en la industria de hidrocarburos y gas. El diseño de una plataforma es una tarea compleja, la cual es altamente dependiente de iteraciones manuales y experiencia. Por lo que utilizan métodos de optimización para establecer las dimensiones principales del casco que investigan. Un modelo de optimización no lineal, el cual minimiza el peso del casco tomando en cuenta las propiedades más importantes de la plataforma tipo semisumergible tales como la estabilidad, respuesta de movimientos y la distancia entre la cresta de la ola y la parte inferior de la cubierta (*air gap*). El modelo se resuelve en Microsoft Excel para una mayor facilidad en su implementación para ingenieros con sólida experiencia en el uso del software. Además, el algoritmo resuelve el modelo en minutos y los resultados son comparados con una plataforma operando en el Mar del Norte. Los resultados los verifican por ingenieros de la compañía *Aker*, los cuales son experimentados y tales soluciones son encontradas factibles e interesantes. Basándose en los resultados del estudio computacional y el análisis de sensibilidad alcanzado, concluyen que el modelo puede ser usado como una herramienta de soporte de toma de decisiones para establecer las principales dimensiones de la estructura del casco.

Más tarde, Ogeman (2014) presenta una rutina de optimización desarrollada para obtener las dimensiones óptimas de una plataforma tipo semisumergible respecto a siete variables geométricas, radio de la columna, calado de la columna, ancho del pontón, longitud del pontón, altura del pontón, distancia horizontal entre columnas y distancia entre pontones. Dependiendo de la entrada del usuario, la función objetivo consiste tanto del movimiento de arfada (*heave*), cabeceo (*pitch*) y balanceo (*roll*) para distintas direcciones de oleaje. Su objetivo es minimizar los movimientos de la plataforma tipo semisumergible e incrementar su operatividad en un estado de mar específico. Por lo que el diseño óptimo de una plataforma tipo semisumergible depende de la función objetivo.

Park *et al.*, (2014) llevan a cabo un trabajo donde establecen que minimizar el movimiento de la respuesta de una estructura tipo flotante costa afuera es un problema crítico, ya que está directamente relacionado con el tiempo de operación. En su investigación, presentan un procedimiento totalmente automatizado para la optimización de la forma del casco para una unidad de producción flotante tipo semisumergible (FPU). En la cual desarrollan tres módulos, en el paso preliminar para la optimización: llevan a cabo la generación del modelo de panel, estimación de la

masa y la configuración de las condiciones. En el primer módulo, definen 10 parámetros geométricos para representar la forma del casco. Una vez que generan los valores de esos parámetros, obtienen automáticamente el modelo del panel para el análisis del movimiento. En el segundo módulo realizan la estimación de la masa, así como la determinación del peso y el centro de gravedad. La masa es dividida entre varios componentes, los cuales son estimados basándose en el área y el volumen de la superficie del casco. Aplican el método de optimización de simulación de templado (SA, por sus siglas en inglés *Simulated Annealing*), y llevan a cabo una optimización multi - objetivo. Los objetivos para minimizar son el movimiento de arfada (*heave*), el valor extremo más probable de la respuesta (MPEV) y el peso estructural, cada objetivo es ponderado después, de acuerdo con los diferentes valores de los dos factores ponderados, obtienen cuatro soluciones óptimas. Basándose en esas soluciones, encuentran que la altura total del casco es proporcional al peso estructural e inversamente proporcional al movimiento de arfada (*heave*).

Lee *et al.*, (2014) establecen que, en aguas ultra-profundas, el mercado está actualmente limitado por un solo concepto, el uso de árboles secos estos por ejemplo se utilizan en plataformas tipo *Spar*, las cuales deben ser severamente modificadas cuando se requiere una gran capacidad de carga. Una alternativa competitiva estimula la mejora y la reducción de costos en los actuales *hosts* de árboles secos para el desarrollo de campos en aguas ultra-profundas. Además, presentan los esfuerzos de varios años en el desarrollo de conceptos de plataformas tipo sumergibles que soportan *risers* de árboles secos y que tienen grandes capacidades de perforación y producción. Mientras la industria ha progresado en madurar el concepto de DTS en los últimos años. Existen desafíos técnicos pendientes que deben ser superados para avanzar en el concepto de DTS de "aceptación de tecnología" a "disposición de proyecto".

Domala *et al.*, (2014) llevan a cabo un estudio sobre el efecto de la geometría de las columnas y los pontones, así como de su arreglo para obtener una respuesta mínima en los movimientos de arfada, cabeceo, avance y deriva. Sus resultados muestran que el efecto de la geometría y arreglo de las columnas y pontones sobre las respuestas de arfada y cabeceo de plataformas tipo semisumergibles son usados para llegar a la forma, dimensiones y arreglos adecuados para columnas y pontones de tal manera para obtener una respuesta mínima.

Kyoung *et al.*, (2014) diseñan tres cascos para tres diferentes pesos de cubierta y evalúan las respuestas de movimiento globales para un tirante de agua de 1828 m. Para lo cual utilizan un

programa de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) para diseñar y evaluar los cascos. Sus resultados muestran que los nuevos diseños de los cascos propuestos disminuyen el desplazamiento vertical e incrementan su periodo natural a través de la masa adherida reflejado en el movimiento vertical reducido en estados de mar con periodos pico altos.

Wang *et al.*, (2015) llevan a cabo una comparativa de dos plataformas tipo semisumergibles con pontones gemelos no simétricos con y sin arrostamiento horizontal. Sus resultados numéricos muestran que existen efectos de acoplamiento significativo de arfada-balanceo/arfada-cabeceo en la nueva plataforma tipo semisumergible debido a la forma no simétrica de los pontones. Encontraron que las respuestas de los movimientos de la nueva plataforma tipo semisumergible son generalmente satisfactorios para estados de mar típicos.

Xiong *et al.*, (2016) estudian el desempeño global de una plataforma tipo semisumergible basado en simulaciones numéricas y experimentales, además investigan el efecto de los factores ambientales y el sistema de anclaje sobre las respuestas de movimiento.

Kim (2016) desarrolla un sistema de optimización multiobjetivo tanto para la forma del casco como para los tendones. La respuesta máxima en arfada, el peso total del casco y los tendones se formulan como funciones de aptitud. Además, desarrollan cinco módulos para automatizar el modelo de la TLP y la evaluación de desempeño como pasos preliminares para la optimización, en el primer módulo, generan automáticamente los modelos de panel y Morison para modelar la forma del casco y los tendones en función de parámetro de diseño predefinidos. En el módulo de estimación proponen peso y el desplazamiento en varias etapas y estiman la masa en función del área de superficie y el volumen del casco. Después de la generación del modelo hidrodinámico, calculan la respuesta al movimiento de una TLP mediante el programa comercial DNV WADAM. Las cargas de tensión dinámica de los tendones se incorporan a la matriz de fuerza de restauración de la ecuación de movimiento bajo la suposición de que los tendones son resortes lineales. En el módulo de postproceso, se llevan a cabo los procedimientos de evaluación del estado límite último (ULS) y del estado límite de fatiga (FLS). En el módulo de optimización, realizan la optimización multiobjetivo mediante un método SA. De este modo, obtienen ocho soluciones óptimas diferentes que forman un conjunto de Pareto y que comparan entre sí para determinar su validez. Con base en esas soluciones, determinan el volumen del pontón y el área de la sección de los tendones.

Zhang *et al.*, (2017) estudian el desempeño hidrodinámico global de una plataforma flotante tipo semisumergible para optimizar la forma del casco en trabajos futuros. Los resultados computacionales mostraron que las respuestas de movimiento en olas de cresta corta son mucho más pequeñas que las de cresta larga.

Gao *et al.*, (2018) proponen e investigan un concepto nuevo e innovador de una plataforma tipo semisumergible, denotado como plataforma de columna múltiple. El concepto de columna central y pontón ofrece una mejora favorable en los movimientos de arfada, avance, deriva y cabeceo comparado con los de una plataforma tipo semisumergible convencional.

Por otra parte, las placas rigidizadas son componentes estructurales básicos de muchas estructuras, por ejemplo, en puentes, edificios y en estructuras costa afuera. Estos elementos están compuestos por un alma y un patín. El lugar rigidizado de uno o ambos lados de la placa aporta resistencia y dificultan el colapso general del panel de placas. Dada la complejidad estructural de las placas rigidizadas se requiere un especial cuidado debido a su inestabilidad elástica. Wilmer (2003) lleva a cabo una investigación de placas rigidizadas en la que analiza las tres formas: teórica, numérica usando métodos de elemento finito y experimental usando parrillas reales obteniendo buenos resultados.

Por otro lado, en la optimización del peso del acero requerido en el casco, se destacan las siguientes investigaciones iniciando con la llevada a cabo por Hatzidakis y Bernitsas (1994), en la cual presentan cinco alternativas de configuración de placas rigidizadas ortogonalmente, que comparan para identificar el costo total del diseño óptimo incluyendo el material y costo de fabricación. La optimización del tamaño la alcanzan sin la limitación de la estandarización de los elementos estructurales para cada una de las cinco alternativas. Posteriormente comparan las cinco estructuras óptimas en términos de peso, costo de fabricación y costo total. La optimización la obtienen con dos variables de diseño, por ejemplo, el espesor y la sección transversal de la viga son estándar. Las restricciones son impuestas en esfuerzos secundarios y terciarios calculados mediante el análisis de elementos finitos; y los esfuerzos primarios para prevenir el pandeo de la placa, descarga del atiesador y el pandeo general. Para validar sus resultados llevaron a cabo comparaciones de los resultados de FEA usando el método del ancho efectivo y la teoría de placas ortotrópicas.

Posteriormente, Soares y Gordo (1997) obtienen el desempeño de tres métodos de diseño de paneles rigidizados bajo cargas a compresión axial predominantemente en el plano, además llevan a cabo una comparación entre los resultados numéricos y experimentales. La predicción de la descarga de los atiesadores es incluido para complementar su objetivo de aplicación. Los experimentos en placas atiesadas bajo compresión y presión lateral los comparan mediante el método de predicción de resistencia. Finalmente, proponen un método para disminuir el sesgo y la incertidumbre como resultados del conjunto de datos considerados.

Años después, Paik *et al.*, (2001) plantean un estudio para el diseño del estado límite último de paneles rigidizados y parrillas que forman parte de las estructuras tipo buque o barco. En contraste, con los documentos previos que sólo tratan con el pandeo y el diseño de resistencia última de elementos placa dentro de dichos paneles rigidizados. Un logro más del diseño del estado límite último de paneles rigidizados y parrillas, es enfrentar un gran número de problemas en las áreas correspondientes, en las cuales no se han resuelto completamente. Tal artículo propone un diseño avanzado orientado a una metodología de diseño del estado límite último para paneles rigidizados y de parrillas. Para los cuales los posibles modos de falla involucrados en el colapso de este tipo de paneles son clasificados por primera vez. Calculan la resistencia última de paneles rigidizados bajo combinaciones de carga tomando en cuenta todos los modos de falla posibles y la interacción de varios factores tales como: la geometría y las propiedades del material, cargas e imperfecciones iniciales de post – soldadura. Como es usual, consideran que el colapso de los paneles rigidizados ocurra en el valor más bajo entre varias cargas últimas calculadas para cada patrón de colapso. El diseño orientado a la formulación de resistencia se desarrolla para acomodar todo el potencial aplicado por los componentes de la carga incluyendo compresión biaxial y tensión, la flexión biaxial en el plano, cortante y la carga de presión lateral. Además, incluyen en el desarrollo de la metodología como parámetros de influencia las imperfecciones iniciales relacionadas con la fabricación (deflexiones iniciales y esfuerzos residuales). Para validar la formulación de la resistencia última propuesta llevaron a cabo la comparación de los resultados de elemento finito no lineal y los resultados experimentales del colapso mecánico.

Das *et al.*, (2003) se centran en la evaluación de la resistencia última al pandeo de placas reforzadas que consideran varios modos de pandeo y sometidas a diversas cargas como: compresión axial, presión radial y carga combinada. Las comparaciones las realizan con datos de pruebas, que tienen imperfecciones reales y varios valores de la relación de espesor en el rango generalmente utilizado

en estructuras marinas. Los datos estadísticos de los factores de incertidumbre del modelo en términos de sesgo y coeficientes de variación (cov) las calculan y utilizan en un estudio de confiabilidad adicional.

Paik *et al.*, (2003) investigan las características de resistencia última de placas bajo cargas de compresión axial mediante análisis por el método de elemento finito empleando el software Ansys. Además, estudian los efectos de la forma, el tamaño (profundidad, diámetro) y la ubicación.

Las placas rigidizadas son ampliamente usadas en estructuras como: barcos, puentes, estructuras costa afuera entre otras, las cuales se encuentran sujetas a una serie de cargas como, por ejemplo, compresión uniaxial, flexión, cortante o cargas combinadas. Las formas de las placas pueden ser: cuadradas, rectangulares, circulares, trapezoidales, etc., además están rigidizadas en una o dos direcciones. Virag (2004) lleva a cabo un estudio tomando en cuenta dos tipos de cargas: compresión axial y presión lateral.

Fujikubo *et al.*, (2005) desarrollan un método simplificado para estimar la resistencia última de una placa continua, típica en la parte inferior de barcos, sometida a un empuje transversal y presión lateral combinados. Además, realizan una serie de análisis de elementos finitos de gran deflexión elástica/elastoplástica de una placa continua soportada a lo largo de las líneas de refuerzos longitudinales y transversales. Su atención la centran en el efecto de la continuidad de las placas en sus resistencias al pandeo y resistencia última, mientras que los estudios anteriores se refieren principalmente a paneles aislados. Con base en los resultados de FEA, se ha derivado un conjunto de fórmulas para la estimación de la resistencia última de una placa continua bajo una combinación de empuje transversal y presión lateral. Un aumento de la resistencia al pandeo elástico y un cambio en el modo de colapso de un panel simplemente apoyado la comparan con FEA y con las fórmulas propuestas y dan predicciones muy precisas al de la resistencia última.

Qi *et al.*, (2005) llevan a cabo un estudio sistemático de los métodos teóricos para predecir la resistencia última de las vigas del casco de barcos basándose en trabajos teóricos y experimentales de un grupo de investigadores. Un marco integrado del análisis por el método de elementos finitos no lineales, el método de unidad estructural idealizada, el método simplificado, en el que la relación esfuerzo – deformación promedio se deriva utilizando la teoría viga – columna, junto con el método analítico avanzado, el cual se combina con un método elastoplástico, el cual es una combinación de análisis elástico de grandes deformaciones y análisis de rigidez plástica de la

resistencia última al pandeo de paneles rigidizados y adecuado para la flexión biaxial y estructuras no simétricas de cascos de barcos dañados, las utilizan para llevar a cabo un estudio comparativo de la resistencia última de las vigas del casco de un buque de doble casco de 300,000 TPM.

Qi y Cui (2006) proponen un método analítico avanzado (MA) de resistencia última de cascos de barcos intactos y dañados, que está orientado al diseño y se combina con un método elástico – plástico (EPM; la cual es una combinación de análisis elásticos de grandes deformaciones y análisis de rigidez plástico). Como ejemplo del método analítico avanzado, se deriva la formulación analítica de la resistencia última de cascos de barcos intactos bajo flexión vertical. El método elastoplástico se mejora incorporando el trabajo realizado por presión lateral en la función energética y modificando el comportamiento de las imperfecciones iniciales. Posteriormente, el método analítico avanzado lo verifican mediante pruebas de modelos y análisis de elementos finitos no lineales y lo utilizan para analizar la resistencia última de los cascos de barcos dañados.

Dung *et al.*, (2008) establecen que el estado límite o resistencia últimos evalúa mejor que el de los esfuerzos permisibles. En nuestros días la evaluación del diseño y la resistencia de las diferentes estructuras tales como: estructuras aéreo-espaciales, estructuras costa afuera, barcos y estructuras desplantadas en tierra han seguido las normas ISO. Han llevado a cabo cálculos para validar las fórmulas de la norma ISO como es el caso del software Maestro, en el cual calculan la resistencia última de placas, con seis casos de carga, las cuales son: compresión longitudinal, compresión transversal, compresión biaxial con y sin presión lateral. La tendencia de los resultados obtenidos de la norma ISO en algunos casos se parece a los obtenidos del software Maestro. Mientras, que en otros casos los resultados no lo son. En algunos otros son menores a los obtenido con el software, por lo que establecen que los resultados de las normas ISO no son conservadores con respecto a los del software Maestro.

Paik *et al.*, (2008) realizan estudios de referencia de métodos de evaluación del estado límite último de placas (no rigidizadas), paneles rigidizados y vigas del casco de barcos y estructuras marinas, utilizando el método de elementos finitos (FEM), DNV PULS, ALPS/ULSAP, ALPS/HULL y los estándares (CSR) de IACS. Como ejemplo ilustrativo, estudian una estructura hipotética de doble casco clase AFRAMAX que diseñan con el método CSR.

Paik *et al.*, (2008) se centran en métodos para la evaluación del estado límite último de estructuras de placas rigidizadas bajo acciones combinadas de compresión biaxial y presión lateral. Además,

estudian métodos para el análisis de colapso progresivo de la estructura del casco utilizando el método de ANSYS, ALPS/HULL y IACS CSR.

Li *et al.*, (2009) calculan las cargas de una plataforma tipo semisumergible a través del método de oleaje de diseño determinista y estocástico con base en los estándares establecidos por la sociedad de clasificación ABS y DNV, respectivamente. Posteriormente, evalúan la resistencia de fluencia, la resistencia al pandeo y la resistencia a la fatiga de acuerdo con los diferentes estándares.

Zhang y Khan (2009) presentan un extenso trabajo de desarrollo de formulación y análisis de elementos finitos no lineales llevado a cabo sobre la resistencia última a la compresión de las placas y los paneles rigidizados de las estructuras de los barcos. Las fórmulas existentes para la resistencia última a compresión de la placa revisan y comparan con los resultados del análisis de FE no lineal. Además, proponen y describen una fórmula semi analítica de las evaluaciones de la resistencia a la compresión final de los paneles rigidizados. La fórmula que desarrollan la verifican con los resultados obtenidos del software de EF no lineal Abaqus para un conjunto de 61 paneles rigidizados y logran una buena concordancia entre la fórmula propuesta y los resultados de EF. El método lo verifican con un gran número de resultados de EF publicados y, también, lo comparan con 58 resultados experimentales.

Amante y Estefen (2011) llevan a cabo mediciones a escala real de la distribución de las imperfecciones geométricas en paneles atiesados durante la construcción del barco y luego se incorporan a un modelo numérico para simular una mejor forma el mecanismo de falla por pandeo. Además, modelan los paneles atiesados longitudinalmente entre cuadernas y, posteriormente, los someten a compresión axial en el plano para describir el comportamiento post pandeo de la resistencia última. Las imperfecciones iniciales geométricas a escala real las obtienen utilizando un equipo de seguimiento laser, el cual es un sistema de medición de contacto portátil que emplea tecnología láser con precisión submilimétrica. En los modelos numéricos usan elementos tipo *shell* que asumen deformaciones finitas de la membrana y grandes rotaciones, considerando las no linealidades geométricas y del material. Finalmente, llevan a cabo estudios comparativos para evaluar la influencia de dos contribuciones de imperfecciones diferentes en el comportamiento de pandeo: imperfección máxima aceptable por los códigos y la distribución de la imperfección real medida en el astillero para placas del fondo del barco.

Ringsberg *et al.*, (2011) desarrollan una metodología para estructuras marinas con placas corrugadas. Este tipo de placas las comparan con paneles atiesados convencionales con respecto a la resistencia, el peso y el costo. Los análisis de las características de resistencia estructural mostraron que, cuando se diseñan adecuadamente, se cumplen las normas de clasificación sin comprometer los márgenes de seguridad.

Estefen y Estefen (2012) estudian el comportamiento de paneles rigidizados de un segmento de columna de una nueva generación de plataforma tipo semisumergible hasta la carga máxima de compresión y en la condición de post pandeo. En estudios previos se ha demostrado una fuerte influencia del modo y la magnitud de las imperfecciones geométricas iniciales, así como de las condiciones de frontera, en la capacidad de carga axial de la estructura. Evalúan los paneles rigidizados para identificar el inicio del pandeo en una placa específica y su interacción con los elementos rigidizadores longitudinales y transversales durante la falla progresiva de la columna. Las mediciones de la distribución de imperfecciones geométricas iniciales se midieron por medio de equipos basados en laser.

Derbanne *et al.*, (2013) analizan cuatro diferentes estructuras marinas: un buque convencional, un FSRU, una plataforma tipo semisumergible y un FPSO no convencional. Las respuestas de los esfuerzos bajo el oleaje de diseño seleccionado comparan con la respuesta de esfuerzos a largo plazo basadas en los RAOs, y muestran la precisión del método de oleaje de diseño para cargas extremas para esas cuatro unidades.

Xu *et al.*, (2013) llevan a cabo una serie de análisis en elemento finito para investigar la influencia de las condiciones de frontera y la geometría del modelo en predecir el comportamiento del colapso de los paneles atiesados. Las condiciones de frontera periódicas en la dirección longitudinal para dos tramos proporcionan un modelado apropiado para un panel atiesado continuo y toman en cuenta tanto el número impar como el par de ondas medias y, por lo tanto, consideran que se introduce la incertidumbre más pequeña en el modelo para el análisis de un panel atiesado continuo.

Reducir el peso del casco de estructuras diseñadas para una gran carga juega un papel muy importante ya que la eficiencia económica es el aspecto más significativo. Se sabe que el enfoque de esfuerzos permisibles se acerca con alta seguridad y confiabilidad, lo que significa que el peso estructural del casco es mayor que el requerido en operación. Recientemente, el enfoque de estado

límite se ha aplicado ampliamente para el análisis y evaluación de estructuras marinas, la resistencia límite de las estructuras se determina mediante el método de análisis de elementos finitos no lineales (FEA). Un buque de mineral de grandes dimensiones se diseña utilizando el método de reglas estructurales comunes (CSR) del IACS y se adopta el método de pre-CSR para mejorar la sección transversal de la parte inferior y de la cubierta. Dado que el panel rigidizado bajo la combinación de compresión axial o biaxial y cargas de presión lateral para el cálculo, la resistencia última de las estructuras del buque diseñadas mediante el método mencionado anteriormente se analiza con el FEM no lineales. Los resultados muestran que la diferencia en la resistencia última de las estructuras de los barcos diseñadas mediante el método pre-CSR y el método CSR se pueden ignorar. Observaron que el peso de la estructura del casco se reduce en un 0.56 % (640 t) sin reducir la resistencia última cuando se aplica el método pre-CSR (Do *et al.*, 2013).

En la construcción naval, las horas hombre es una unidad ampliamente utilizada para la planificación de la producción, y la predicción sistemática de horas hombre adquiere mayor importancia en la reducción de costos. Sin embargo, como los expertos de los astilleros predicen las horas hombre, los métodos existentes a menudo han dado lugar a predicciones incorrectas y cuestan una cantidad significativa de tiempo. Muchos investigadores han hecho varios intentos para superar estos problemas resultantes de la predicción de los expertos. Sin embargo, sus enfoques consideran solo un número limitado de factores, como las especificaciones de los barcos, y no son altamente aplicables en los astilleros. Hur *et al.*, (2013) propusieron un sistema que predice las horas hombre con datos desplegados en diferentes momentos del proceso de fabricación y que se puede aplicar en la práctica de la construcción naval. Sus resultados demostraron la posibilidad de que el sistema de predicción puede ser una buena alternativa a los métodos de predicción existentes.

Doshi y Vhanmane (2014) presentan un análisis de elementos finitos no lineal (FEA) y desarrollan una fórmula para la post resistencia última máxima de los elementos rigidizados de las estructuras tipo barco. Además, llevan a cabo una revisión bibliográfica sobre la resistencia última de los paneles de los buques sometidos a presión lateral. También toman en cuenta la influencia de la presión lateral sobre la resistencia última de placas rigidizadas con imperfecciones iniciales sujetas a cargas de compresión longitudinal para ello usan el software Ansys no lineal para el análisis de elementos finitos no lineales de paneles rigidizados considerando el caso de un VLCC. Con base

en el análisis de regresión, proponen y describen un conjunto de fórmulas semi analíticas. Y observan que, dependiendo del modo de falla, las dimensiones de los elementos estructurales del panel rigidizado y la magnitud de la presión lateral, afecta la resistencia última en compresión de los paneles rigidizados.

Tanaka *et al.*, (2014) realizan una serie de análisis de colapso aplicando el método de elementos finitos no lineal en paneles atiesados sujetos a empuje longitudinal usando el MSC. Marc, en el cual varían el número, tipo y dimensiones de los atiesadores, así como la relación de esbeltez y la relación de aspecto de los paneles locales divididos por los refuerzos manteniendo el espacio entre los refuerzos longitudinales adyacentes iguales. La deflexión inicial la imponen en los paneles locales, el pandeo a flexión y el modo *tripping* en los atiesadores para representar la deflexión inicial real en los paneles atiesados en estructuras tipo barco. Sobre la base de los resultados calculados, investigaron el comportamiento del colapso pandeo/plástico de los paneles atiesados bajo empuje longitudinal. La resistencia última calculada la compararon con la obtenida al aplicar varios métodos existentes tales como el CSR para tanques de barcos y PULS. Las fórmulas simples para paneles atiesados, para las cuales el colapso es fundamentalmente dominado por el colapso de los paneles locales ente los atiesadores longitudinales. También examinaron la precisión de la estimación de la resistencia última. A través de los resultados estimados con FEM, concluyeron que PULS y las fórmulas FYH modificadas tienen fundamentalmente una buena estimación de la resistencia última de paneles atiesados bajo empuje longitudinal.

Mohammed *et al.*, (2016) presentan una metodología de cálculo directo para evaluar la resistencia última de un buque de carga de 10000 TEU al considerar los efectos combinados de las no linealidades estructurales y las cargas dinámicas inducidas por olas en estado estacionario en la sección intermedia del buque. Evalúan la resistencia de forma determinista utilizando análisis de elementos finitos no lineales. Los valores extremos de diseño de los principales componentes globales de carga inducida por olas y sus combinaciones en olas irregulares utilizan un método espectral cruzado junto con formulaciones estadísticas a corto y largo plazo. En consecuencia, establecen el margen de seguridad entre la capacidad última y el momento máximo esperado.

Hong *et al.*, (2016) investigan el efecto de la carga combinada sobre la resistencia última de las placas rigidizadas mediante el cálculo de la resistencia última de las placas rigidizadas bajo compresión biaxial y cargas de presión lateral combinada, en el software Ansys. Además, analizan

la diferente influencia en la resistencia última de placas rigidizadas. El método de elementos finitos no lineales se introdujo en base a los requisitos de la evaluación de pandeo y resistencia última de los paneles rigidizados con las reglas comunes estructurales de la IACS para buques de doble casco. Además, estudian algunos factores de influencia importante como las dimensiones estructurales, el tamaño del elemento, condiciones de frontera, las imperfecciones iniciales y los tipos de carga. Para comprobar la precisión del análisis llevado a cabo con este método, comparan los resultados numéricos con los datos del documento de antecedentes de la evaluación de la resistencia al pandeo en CSR y los resultados que obtienen de fórmulas empíricas de otros investigadores.

Leal y Gordo (2017) analizan la estructura de costos de varios procesos asociados a la industria de la construcción naval. Los procesos productivos analizados son: procedimientos de preparación de cortes, procesos de corte de chapas de acero, procesos de conformado de chapas y refuerzos, transporte asociado y ensamblado de chapas y perfiles, y finalmente los procesos de soldadura. La metodología permite a un astillero identificar los principales costos relacionados con la fabricación del casco y los aspectos que deben mejorarse para incrementar la productividad. La metodología adoptada es fácilmente adaptada por cada astillero creando una base de datos de obra con el fin de mejorar y actualizar sus fórmulas agregando nuevos coeficientes correctivos en función del tipo de navío construido o complejidad constructiva de determinados bloques del navío. Además, analizan 2 casos de estudio independientes que llevan a cabo en diferentes astilleros portugueses y que cubren diferentes aspectos de los procesos de construcción naval de casco de acero. El primer caso de estudio considera el análisis de tiempo y costo de los procesos de preparación de corte realizados por la oficina de diseño, corte/marcado de placas de acero y procesos de conformado de refuerzos y placas de casco, requeridos para la construcción de una barcaza tolva de 83 m, construida por MPG, en Lisnave astillero Mitrena, Portugal, 2010. El segundo caso considera el análisis de tiempo y costo del corte de refuerzos, ensamblaje y soldadura de placas de acero y refuerzo, asociado con la construcción de varios bloques de un buque de apoyo pesquero de 80 m por el Astillero Joperinox en Alverca Portugal, 2008.

Yu *et al.*, (2017) desarrollan un modelo tridimensional de elementos finitos no lineales para investigar la resistencia última de una nueva generación de plataforma bajo diferentes condiciones de carga y su comportamiento después del colapso utilizando solucionadores dinámicos explícitos. Sus resultados muestran que el método explícito dinámico dependiente del tiempo es confiable y

aceptable para el cálculo de la resistencia última de una estructura compleja. Para la plataforma objetivo, el refuerzo y la estructura superior del casco son el componente principal de apoyo y son críticos para la resistencia última en las áreas de conexión y en las que se debe prestar especial atención.

Xu *et al.*, (2017) estudian el comportamiento del colapso de paneles atiesados bajo compresión uniaxial y presión lateral a través del análisis de elementos finitos, en el cual adoptan modelos de dos claros con condiciones de frontera periódica. Además, incluyen componentes de Fourier y usan formas simétricas y asimétricas para estimar el número de onda media de colapso para la placa local, pero usando análisis de elemento finito no lineal. Finalmente, llevan a cabo la comparación de los resultados entre los análisis de elemento finito y el método analítico. La resistencia última y la deformación del colapso no son afectados por la magnitud de las imperfecciones iniciales sino por el número de onda media.

Kim *et al.*, (2017) proponen una forma avanzada de fórmula empírica, la cual está en función de la relación de esbeltez de la placa y la relación de esbeltez de la columna con dos coeficientes de corrección usados para predecir la resistencia última de estructuras con paneles atiesados en barcos. Además, los dos coeficientes de corrección antes mencionados se eligieron y verificaron por la obtención de resultados de los análisis de elemento finito no lineales en Ansys. Se seleccionaron un total de 124 paneles atiesados con cuatro diferentes relaciones de esbeltez de la placa y cambiando las relaciones de esbeltez de la columna para los escenarios simulados. Para confirmar la precisión de la fórmula obtenida, llevaron a cabo un análisis estadístico con los resultados de Ansys y otras fórmulas existentes.

Yang *et al.*, (2018) presentan un extenso análisis de elemento finito no lineal de la resistencia última dinámica de estructuras tipo barco bajo carga a compresión uniaxial. Utilizan una fórmula empírica para predecir la resistencia a compresión dinámica última de placas, expresada en términos de las dimensiones geométricas de placas y velocidad de impacto. Llevan a cabo 561 resultados de elemento finito de placas tipo barco. Además, calculan la resistencia última dinámica de un espécimen basado en el método de elemento finito no lineal y lo comparan con los resultados de las pruebas mostrando la aplicabilidad de su método numérico. La comparación entre la formulación empírica propuesta y los resultados de FEM de 561 placas muestran la precisión en el ajuste de la curva.

Ringsberg *et al.*, (2018) comparan suposiciones entre, modelos de elemento finito, técnicas de modelado y experiencias de los investigadores en el campo. Tal documento muestra los resultados obtenidos de quince simulaciones de FE y experimentos. Además, presenta una comparación, entre otros factores: la fuerza de reacción contra el desplazamiento de penetración, la energía interna absorbida por la estructura contra el desplazamiento de penetración y los análisis de la habilidad de los participantes para predecir los modos de falla y los eventos que se observan en el experimento. Los resultados del estudio son discutidos y presentan una serie de recomendaciones con respecto al tamaño de la malla, al criterio de falla, los modelos de daño, la interpretación de los datos del material y de cómo estos son usados en un modelo constitutivo del material y finalmente las incertidumbres en general.

Las resistencias estructurales de los grandes buques portacontenedores son las principales preocupaciones de los propietarios y diseñadores, y los paneles rigidizados a la mitad del buque son similares debido a las disposiciones típicas adoptadas en este tipo de buques. Cui y Wang (2018) realizan investigaciones sobre la resistencia última longitudinal para este tipo paneles rigidizados donde se incluyen consideraciones de extensión del modelo, condiciones ambientales y deflexiones iniciales. Además, las curvas de fuerza – carga y los modos de colapso resultantes se comparan con el análisis de flexión de la viga del casco, por lo que la validación se realiza en el contexto más práctico, su estudio proporciona valores de referencia para buques similares.

Jang *et al.*, (2019) llevan a cabo la optimización del casco basándose en la fluencia y resistencia al pandeo de acuerdo con las normas de clasificación. En el cual desarrollan un sistema de evaluación de resistencia interno para automatizar el procedimiento, como la generación de paneles de pandeo, una recopilación de la información requerida del panel, verificación automática de pandeo y fluencia, etc. El sistema que desarrollan permite una fluencia automática y la revisión de la resistencia de pandeo de todos los paneles que componen el casco para cada iteración de la optimización. Las variables de diseño son: el espesor de la placa y las dimensiones de los atiesadores. Para superar las dificultades de un gran número de variables y un gran esfuerzo computacional de los análisis de FE, proponen varios métodos. Para una reducción del número de variables de diseño y una aplicación directa al diseño práctico, la variable de la sección del refuerzo se selecciona de una librería. El espesor de la placa también se discretiza en un intervalo de 0.5 del espesor de la placa. El número de análisis de EF lo reducen mediante el uso de ecuaciones para estimar analíticamente los cambios de esfuerzo en el cálculo de gradiente y las líneas de búsqueda.

Como ejemplo de verificación, una columna de una plataforma tipo semisumergible la optimizan y comparan con una optimización convencional utilizando todas las variables de diseño a la vez.

Debido a la complejidad que tiene el diseño de este tipo de estructuras es necesario proponer metodologías que sean más rápidas y fáciles de emplear en una etapa inicial de diseño. Además, dichas metodologías son aplicadas en plataformas tipo semisumergibles con tres diferentes volúmenes de producción (100, 150 y 200 MBD), localizada en aguas territoriales en el Golfo de Mexico.

### 3 NORMATIVIDAD APLICABLE

En el mundo existen diferentes normas y recomendaciones prácticas para el diseño y análisis de los sistemas costa afuera. Las más conocidas son: *Det Norske Veritas (DNV) - Offshore Standards* en Noruega, *American Petroleum Institute (API) - Offshore Standards* en Estados Unidos, *Norwegian (NORSOK) - Offshore Standards* en Noruega, y la *International Standard Organization (ISO)*. En este capítulo se presenta un resumen de estas normas y recomendaciones prácticas para analizar, diseñar o revisar plataformas tipo semisumergibles:

La norma (DNV-OS-C103, 2004) se enfoca en el diseño estructural de plataformas tipo semisumergibles por el método de resistencia última o por factores de carga y resistencia (LRFD). Esta norma proporciona un estándar aceptable internacionalmente de seguridad para definir los requisitos mínimos para el diseño de plataformas tipo semisumergibles. Además, sirve como un documento de referencia contractual entre los proveedores y los compradores, así como una directriz para los diseñadores, proveedores, compradores y reguladores. En esta se especifican procedimientos y especificaciones de plataformas tipo semisumergibles.

La norma (DNV-OS-C301., 2015) se enfoca en la estabilidad e integridad de estanqueidad, provee requisitos, principios y directrices relacionados a la estabilidad, integridad de estanqueidad, francobordo y dispositivos de cierre hermético para unidades costa afuera móviles e instalaciones flotantes costa afuera.

(DNV-RP-C103, 2005) se centra en las recomendaciones prácticas para el análisis de resistencia, principalmente de plataformas tipo semisumergibles. Los métodos de análisis estocástico son utilizados cuando se requiere una representación de la naturaleza irregular del oleaje, por lo que es seleccionado un estado de mar específico siendo este un espectro de energía de oleaje, el cual se caracteriza por los siguientes parámetros:  $H_s$  (altura de ola significativa) y  $T_z$  (periodo promedio de cruces por cero).

Algunos de los espectros de oleaje que se pueden usar son: el espectro de *Pierson Moskowitz*, que representa un espectro de mar completamente desarrollado, y es aplicable cuando el crecimiento de las olas no está limitado por el tamaño de área de generación; a menos que el periodo pico del espectro este cerca del pico mayor en la función de transferencia de la respuesta, este tipo de espectro genera resultados aceptables. Otro de los espectros es el espectro de oleaje de *JONSWAP*, el cual tiene un pico mejorado con respecto al espectro de *Pierson Moskowitz*; además, toma en

cuenta el desequilibrio del flujo de energía en el estado de mar, cuando las olas están en el proceso de crecimiento bajo fuertes vientos, es decir cuando los mares no se encuentran completamente desarrollados. El cual se presenta en condiciones de oleaje extremo en el Mar del Norte, este espectro se aplica usualmente en análisis de resistencia última en estructuras operando en condiciones ambientales severas.

### **3.1 Requisitos de estabilidad intacta**

De acuerdo con la norma (DNV-OS-C301., 2015) cada unidad debe ser capaz de alcanzar una condición de tormenta extrema, en un periodo de tiempo consistente con las condiciones meteorológicas. Los procedimientos recomendados y la longitud de tiempo requerido, considerando ambas condiciones de operación y transitorias, deben estar contenidas en el manual de estabilidad. Debe ser posible lograr la condición de tormenta extrema sin remover o reubicar los consumibles u otra variable de carga. Sin embargo, podría ser aceptable cargar una unidad pasando al punto para el cual los consumibles tendrían que estar removidos o reubicados para ir a una condición de tormenta extrema bajo las siguientes condiciones, previendo permitir que el requerimiento VCG no se exceda:

- (a) En una ubicación geográfica donde las condiciones ambientales anualmente o de tormenta no llegan hacer suficientemente severos para requerir una unidad para ir a las condiciones de tormenta extrema, o
- (b) Donde una unidad es requerida para soportar carga de cubierta extra por un periodo de tiempo corto que caiga en el periodo para el cual el pronóstico climático es favorable.

La ubicación geográfica, las condiciones ambientales y las condiciones de carga, para las cuales estos son permitidos deben estar identificadas en el manual de estabilidad.

Los criterios de estabilidad alternativos son aceptables, siempre y cuando se mantenga un nivel equivalente de seguridad y se demuestre que proporciona una estabilidad adecuada. Al determinar la aceptabilidad de dichos criterios, se considerará y tendrá en cuenta lo siguiente según corresponda:

- (1) Condiciones ambientales que representan vientos reales (incluyendo ráfagas) y olas apropiadas para el servicio en todo el mundo en distintos modos de operación;

- (2) Respuesta dinámica de la unidad. El análisis debe incluir los resultados de las pruebas del túnel de viento, las pruebas del modelo en tanque de olas y la simulación no lineal, cuando corresponda. Cualquier espectro de viento y oleaje que se utilice deberá cubrir rangos de frecuencias suficientes para garantizar que se obtengan respuestas críticas de movimiento;
- (3) Potencial de inundación teniendo en cuenta las respuestas dinámicas en una vía marítima;
- (4) Susceptibilidad para zozobrar considerando la energía de restauración de la unidad y la inclinación estática, debido a la velocidad media del viento y la respuesta dinámica máxima;
- (5) Un margen de seguridad adecuado para tener en cuenta las incertidumbres.

En la figura 3.1 se muestra la curva de momento de restauración y ángulos de inclinación, la cual es necesaria para calcular la estabilidad del sistema flotante. Donde:  $\theta_1$ , es el ángulo de inclinación estático debido al viento,  $\theta_2$ , es el ángulo de la segunda intercepción de inclinación del viento y las curvas de momento de restauración,  $\theta_D$ , es el ángulo de la primera inundación,  $\theta_R$ , es el ángulo para el cual las áreas A, B y C son evaluadas y  $\theta_M$ , es el ángulo máximo del momento de restauración. Para satisfacer la estabilidad del sistema flotante, se debe cumplir:

$$\theta_R \leq \theta_D$$

$$\theta_R \leq \theta_2$$

Y además los siguientes criterios:

- 1)  $A + B \geq k(B + C)$

donde:

$$k = 1.4 \text{ para unidades estabilizadas con columnas}$$

$$k = 1.3 \text{ para unidades elevadas automáticamente}$$

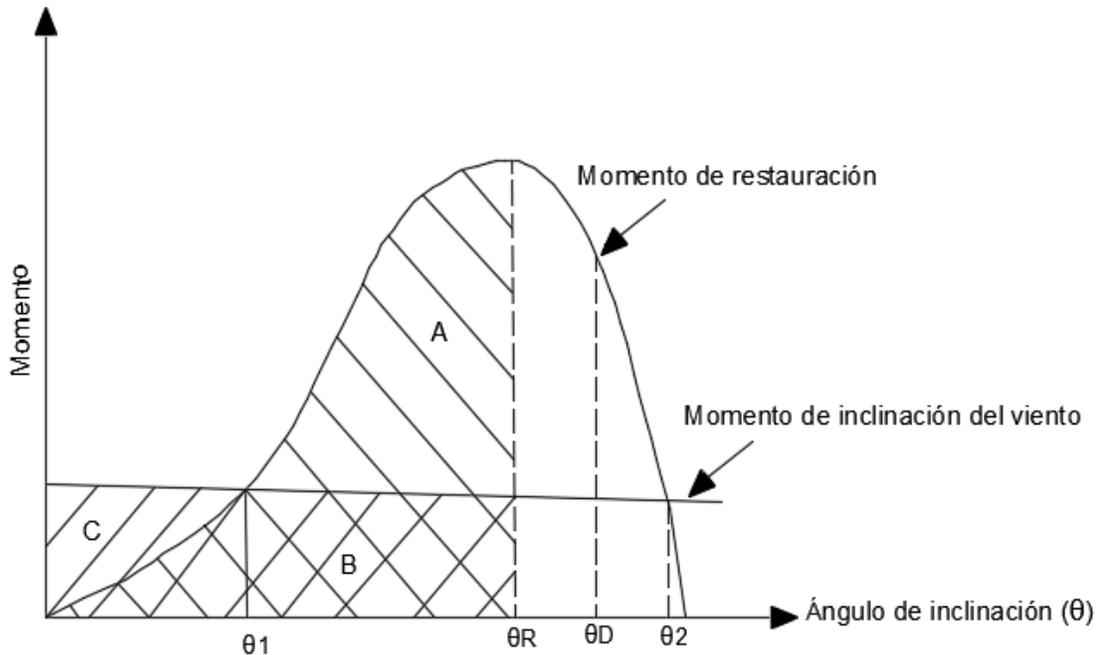
- 2)  $\theta_2 \geq 30^\circ$

- 3)  $\theta_1 \leq 15^\circ$

- 4)  $GM \geq 0.5GM_0 \sin \theta$

donde:  $GM_0 = GM$  mínimo permisible

$$0 \leq \theta \leq \text{mín}(\theta_D, \theta_M, 15^\circ)$$



**Figura 3.1** Curva de momento de restauración y ángulo de inclinación  
(fuente: tomada de DNV-OS-C301 y modificada por el autor).

### 3.2 Requisitos de estabilidad dañada

De acuerdo con la norma DNV-OS-C301 debe ser demostrado que las unidades o instalaciones cumplen con los siguientes requerimientos para los cálculos, los cuales toman en cuenta la proporción y características de diseño de la unidad o instalaciones y los arreglos y configuraciones de los compartimientos dañados.

Las fuerzas de viento se obtienen a través de las curvas de momento de escora (*Heeling moment curves*) que se calculan a partir de la ecuación 3.1.

$$F = 0.5C_s C_h \rho V^2 A \quad 3.1$$

donde:  $F$  y  $V$ , son la fuerza (N) y la velocidad del viento (m/s),  $C_s$  y  $C_h$ , son los coeficientes de forma y de altura, el primero depende de la forma del elemento estructural expuesto al viento (ver tabla 3.1), y el segundo a la altura sobre el nivel del mar del miembro estructural expuesto al viento (ver tabla 3.2),  $\rho$ , es la densidad del aire ( $1.222 \text{ kg/m}^3$ ) y  $A$ , es área proyectada de todas las superficies expuestas tanto en la condición vertical como escorada ( $\text{m}^2$ ).

**Tabla 3.1 Valores de coeficientes de  $C_s$  (fuente: DNV-OS-C301)**

| Forma  | $C_s$ |
|--|-------|
| Esférica   | 0.4   |
| Cilíndrica   | 0.5   |
| Superficies grandes planas<br>(casco, casa de cubierta, áreas lisas bajo cubierta) | 1     |
| Torre de perforación   | 1.25  |
| Cables   | 1.2   |
| Vigas expuestas bajo cubierta  | 1.3   |
| Partes pequeñas  | 1.4   |
| Formas aisladas (grúas, vigas, etc.)   | 1.5   |
| Casetas agrupadas o similares  | 1.1   |

**Tabla 3.2 Valores del coeficiente  $C_h$  (fuente: DNV-OS-C301)**

| Alturas sobre el nivel del mar (metros) | $C_h$ | Alturas sobre el nivel del mar (metros) | $C_h$ |
|---|-------|---|-------|
| 0-15.3                                  | 1     | 137.0-152.5                             | 1.6   |
| 15.3-30.5                               | 1.1   | 152.5-167.5                             | 1.63  |
| 30.5-46.0                               | 1.2   | 167.5-183.0                             | 1.67  |
| 46.0-61.0                               | 1.3   | 183.0-198.0                             | 1.7   |
| 61.0-76.0                               | 1.37  | 198.0-213.5                             | 1.72  |
| 76.0-91.5                               | 1.43  | 213.5-228.5                             | 1.75  |
| 91.5-106.5                              | 1.48  | 228.5-244.0                             | 1.77  |
| 106.5-122.0                             | 1.52  | 244.0-256.0                             | 1.79  |
| 122.0-137.0                             | 1.56  | arriba de 256                           | 1.8   |

Las fuerzas del viento deben ser consideradas para alguna dirección relativa de la unidad y los valores de la velocidad del viento deben ser los siguientes:

En general una velocidad de viento mínima de 36 m/s (70 nudos), para servicio costa afuera debe ser usada para condiciones de operación normal y transitoria y en condiciones de tormenta extrema debe ser usada una velocidad de viento mínima de 51.5 m/s (100 nudos).

En el cálculo de las áreas proyectadas en el plano vertical, el área de la superficie expuesta al viento debida a la inclinación y orientación, tales como las superficies bajo la cubierta, etc., deben ser incluidas usando el factor de forma apropiado. Las fuerzas en elementos de armadura podrían ser determinadas tomando 30% del bloque del área proyectada de la sección frontal y trasera, por ejemplo 60 % del área proyectada de un lado.

Se debe demostrar que la unidad cumple con lo que se establece en los siguientes apartados, los cuales toman en cuenta las proporciones y características de la unidad, así como los arreglos y configuraciones de los compartimientos dañados. Al llevarse a cabo estos cálculos debe asumirse que la unidad o instalación está en la peor de las condiciones de servicio, refiriéndose a la estabilidad y que está flotando libre de restricciones de amarre.

La habilidad para reducir los ángulos de inclinación por bombeo, compartimientos de lastre o aplicación de fuerzas de amarre, etc., no se deben considerar como justificación alguna para la relajación de los requisitos normativos.

Los siguientes factores de permeabilidad deben ser asumidos en los cálculos: para los cuartos de almacenaje 0.60, para los cuartos de máquinas 0.85 y tanques, espacios vacíos, etc. 0.95.

La unidad debe tener suficiente distancia entre la altura de la ola y la parte inferior de la cubierta (*freeboard*) y estar subdividida por cubiertas impermeables principales y/ o barreras entre los compartimientos, para proveer suficiente flotación y estabilidad, para resistir momentos de escora debidos a vientos inducidos por una velocidad de 25.8 m/s (50 nudos), superpuesto en alguna dirección y condición de operación o transitoria, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1) El ángulo de inclinación después del daño presentado en el inciso A) no debe ser mayor a 17°.
- 2) Cualquier entrada (mediante la cual la inundación progresiva puede ocurrir) bajo la línea de agua debe ser hermética, y las entradas a 4 m sobre la línea de agua final deben ser estancas.
- 3) La curva del momento de restauración, después del daño establecido en la figura 3.1, debe tener, desde la primera intercepción hasta el menor grado de integridad a prueba de intemperie requerido por el inciso 2 y la segunda intersección, un rango de al menos 7°. En este rango, la curva de momento de restauración debe alcanzar un valor de por lo menos dos veces la curva de momento de escora debido a viento, ambos medidos en el mismo ángulo de escora.
- 4) Extensión del daño de las plataformas tipo semisumergibles y profundidad de calado de las instalaciones flotantes.

En la evaluación de estabilidad dañada de dichas unidades deben ser asumidas las siguientes extensiones de daño:

- i) Solo aquellas columnas, casco y soportes sumergidos en la periferia de la unidad se encuentran dañados, por lo que tal daño será sumido en las partes expuestas de las columnas, casco y soportes sumergidos.
- ii) Las columnas y pontones deben asumirse inundados por el daño teniendo una extensión vertical de 3 m ocurriendo entre 5 m por encima y 3 m por debajo del calado especificado en el manual de estabilidad. Donde un plano hermético está localizado en esta región, el daño debe considerarse que ha ocurrido en ambos compartimientos, tanto en la parte superior como en la parte inferior del plano hermético en cuestión. Las distancias menores por encima o por debajo del calado pueden aplicarse, pero con previa consideración, teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento real. Sin embargo, la región dañada requerida debe ser al menos 1.5 m por encima o por debajo del calado especificado en las normas.
- iii) Ninguna barrera vertical debe asumirse dañada, excepto donde las barreras están espaciadas a un octavo del perímetro de la columna para el calado en consideración, medido de la periferia, caso en el cual una o más barreras deben ser ignoradas.
- iv) La penetración del daño debe asumirse de 1.5 m.
- v) El casco o base bajo el agua debe asumirse dañado cuando se opera en una condición transitoria, de la misma manera como se indica en los incisos i), ii) y iv) y cualquiera de iii) y vi) teniendo en cuenta su forma.
- vi) Toda tubería, sistema de ventilación, etc. Dentro de la extensión del daño debe asumirse dañado.



El porcentaje del exceso del área del momento de restauración: el área bajo la curva del momento de restauración en la segunda intersección o alternativamente el ángulo más pequeño, no debe ser menor al 30% del área bajo la curva del momento de inclinación del viento para el mismo ángulo límite.

(DNV-RP-C201, 2002), dan recomendaciones prácticas de diseño para estructuras de acero reforzadas, en la cual se compara la estabilidad estructural en su conjunto y por cada elemento, por lo que el análisis de resistencia de pandeo debe estar basado en las características de resistencia para el modo de pandeo más desfavorable. La característica de resistencia de pandeo debe estar basada en el 5° percentil más bajo de los resultados de las pruebas. De esta manera en lugar de información más relevante o análisis más refinados, se puede obtener la característica de resistencia de pandeo.

En la figura 3.3 se muestran los principales componentes de un panel rigidizado los cuales son: atiesador (*stiffener*), placa (*plate*), viga (*girder*), separación entre atiesadores (*s*), separación entre vigas (*l*), ancho del panel ( $L_G$ ).

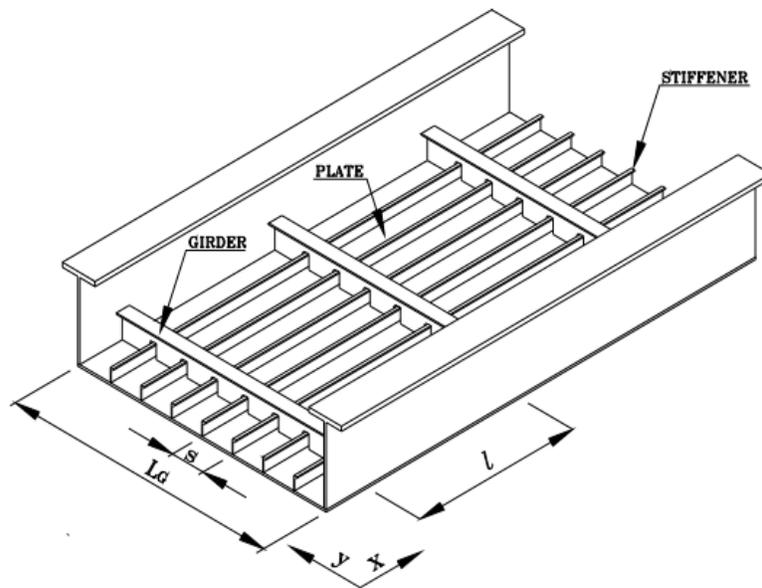


Figura 3.3 Panel de placa rigidizada (fuente: DNV-OS-C101).

Esta norma está dirigida a los modos de falla de placas rigidizadas y no rigidizadas, la cual no considera las secciones transversales por lo que se deben revisar los miembros ((DNV-OS-C101, 2015).

El análisis estructural se lleva a cabo con análisis lineales elásticos, análisis plástico – rígido simplificado o análisis elástico – plásticos. Además, se pueden aplicar análisis de primer o segundo orden. En todos los casos, los detalles estructurales con respecto a los requisitos de resistencia y ductilidad deben cumplir con las suposiciones consideradas en el análisis.

Cuando se utilizan análisis plásticos o análisis elasto-plásticos para estructuras sometidas a cargas cíclicas (*i.e.* oleaje). Se llevan a cabo revisiones para verificar que las estructuras vibran sin deformaciones plásticas excesivas o fracturas debidas a cargas repetidas. Una historia de carga cíclica de diseño debe definirse de tal manera que la confiabilidad estructural en el caso de carga cíclica (*i.e.* condición de tormenta), no sea menor que la confiabilidad estructural para cargas no cíclicas del estado límite último (ULS).

En el caso de un análisis lineal, combinado con las formulaciones de resistencia establecida (*set down*), se supone un comportamiento elástico lineal hasta que la fluencia del material ocurre (*shake down*) sin más revisiones.

Si se utilizan análisis plásticos o elastoplásticos para determinar las resultantes de los esfuerzos seccionales, se deben aplicar limitaciones a las relaciones ancho/espesor, las cuales se encuentran en los códigos correspondientes utilizados para la comprobación de las capacidades. Cuando se utilizan este tipo de análisis o verificaciones, con secciones transversales compactas tipo 1 y 2, los miembros deben ser capaces de formar rotulas plásticas con capacidad de rotación suficiente para permitir la redistribución de momentos requerida. Además, se debe revisar que los patrones de carga no cambiarán debido a las deformaciones.

Las secciones transversales de las vigas se dividen en diferentes tipos dependiendo de su habilidad a desarrollar rotulas plásticas. Un método para la determinación de los tipos de secciones transversales se muestra en la tabla 3.3.

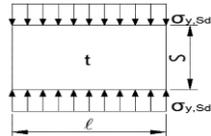
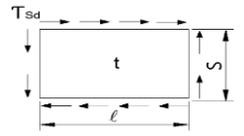
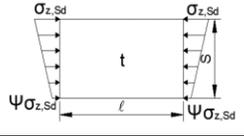
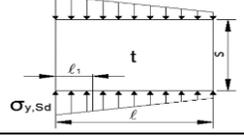
Por otro lado, los modos de falla que se presentan son: Fluencia de placas en flexión debido a la carga lateral, pandeo de placas delgadas debido al esfuerzo a compresión en el plano o esfuerzos cortantes.

**Tabla 3.3 Tipos de secciones transversales (fuente: DNV-OS-C101)**

| Tipos | Descripción   |
|-------|---|
| I     | Sección transversal que puede formar una rotula plástica con la capacidad de rotación requerida para el análisis plástico.  |
| II    | Sección transversal que puede desarrollar su momento resistente plástico, pero ha limitado su capacidad de rotación.  |
| III   | Sección transversal donde el esfuerzo calculado en la fibra más alejada a compresión del miembro de acero puede permitir su resistencia de fluencia, pero el pandeo local es responsable de prevenir el desarrollo del momento resistente plástico. |
| IV    | Sección transversal donde es necesario permitir explícitamente los efectos de pandeo local cuando se determina su resistencia en compresión y flexión.  |

Las guías para determinar la resistencia están dadas para ambas placas individuales (placas no rigidizadas), placas rigidizadas y para vigas soportando paneles de placas rigidizadas. Para paneles rigidizados las recomendaciones cubren el pandeo del panel y del atiesador, así como el pandeo local del atiesador, los patines, alma de la viga y los *brackets*, ver tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Referencias para la revisión de pandeo de placas (fuente: DNV-OS-C101)**

| Descripción          | Cargas                                      | Diagrama  | Cláusula referencia | Valor límite   |
|----------------------|---|---|---------------------|--|
| Placa no arriostrada | Compresión longitudinal                     |  | 6.2                 | $S < l$<br>No es necesario revisar el pandeo si $\frac{s}{t} \leq 42\epsilon$  |
| Placa no arriostrada | Compresión transversal                      |  | 6.3                 | $S < l$<br>No es necesario revisar el pandeo si $\frac{s}{t} \leq 5.4\epsilon$ |
| Placa no arriostrada | Esfuerzo cortante                           |  | 6.4                 | $S < l$<br>No es necesario revisar el pandeo si $\frac{s}{t} \leq 70\epsilon$  |
| Placa no arriostrada | Variación lineal de Compresión longitudinal |  | 6.6                 | $S < l$<br>No es necesario revisar el pandeo si $\frac{s}{t} \leq 42\epsilon$  |
| Placa no arriostrada | Variación lineal de Compresión transversal  |  | 6.8                 | $S < l$<br>No es necesario revisar el pandeo si $\frac{s}{t} \leq 5.4\epsilon$ |

|   |   |  |         |  |
|---|---|--|---------|--|
| Placa no arriostrada                    | Combinación de compresión longitudinal, transversal y esfuerzo cortante       |  | 6.5     | $S < l$<br>No es necesario revisar el pandeo si $\frac{S}{t} \leq 5.4\epsilon$ |
| Placa no arriostrada                    | Carga lateral uniforme y en el plano normal y esfuerzo cortante               |  | 5 y 6.5 | $S < l$<br>No es necesario revisar el pandeo si $\frac{S}{t} \leq 5.4\epsilon$ |
| Arrostramiento longitudinal placa panel | Combinación de compresión longitudinal, transversal, carga lateral y cortante |  | 5 y 7   |  |
| Soporte viga panel arriostrado          | Combinación de compresión longitudinal, transversal, carga lateral y cortante |  | 5 y 8   |  |
|   | Combinación de compresión longitudinal, transversal, carga lateral y cortante |  | 9.1     |  |
| Brackets                                |   |  | 9.2     |  |

### 3.3 Placas con carga lateral

Para placas sujetas a presión lateral, sola o en combinación con esfuerzos en el plano, los esfuerzos serán revisados con la ecuación (3.2):

$$P_{sd} \leq 4.0 \frac{f_y}{\gamma_M} \left(\frac{t_p}{s}\right)^2 \left[ \Psi_y + \left(\frac{s}{l}\right)^2 \Psi_x \right] \quad 3.2$$

donde:  $P_{sd}$ , es la presión lateral de diseño

$$\Psi_y = \frac{1 - \left(\frac{\sigma_{j,SD}}{f_y}\right)^2}{\sqrt{1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\sigma_{x,SD}}{f_y}\right)^2 - 3 \left(\frac{\tau_{SD}}{f_y}\right)^2}} \quad 3.3$$

$$\Psi_x = \frac{1 - \left(\frac{\sigma_{j,S_d}}{f_y}\right)^2}{\sqrt{1 - \frac{3}{4}\left(\frac{\sigma_{y,S_d}}{f_y}\right)^2 - 3\left(\frac{\tau_{S_d}}{f_y}\right)^2}} \quad 3.4$$

$$\sigma_{j,S_d} = \sqrt{\sigma_{x,S_d}^2 + \sigma_{y,S_d}^2 - \sigma_{x,S_d} * \sigma_{y,S_d} + 3\tau_{S_d}^2} \quad 3.5$$

La ecuación 3.2 se utiliza para el diseño de una placa sometida a presión lateral, la cual se basa en la teoría de ruptura, que toma en cuenta la reducción del momento resistente a lo largo de la línea de falla debida a los esfuerzos aplicados en el plano. La resistencia reducida se calcula basándose en el esfuerzo equivalente de Von Mises, se enfatiza que la formulación se basa en un patrón de fluencia asumiendo líneas de ruptura a lo largo de los cuatro bordes, dando resultados inciertos para los casos en que las líneas de falla no se pueden desarrollar a lo largo de todos los bordes.

Además, de que la formula no toma en cuenta los efectos de segundo orden. Las placas sujetas a esfuerzos a compresión deben cumplir con los requerimientos de pandeo de placas rigidizadas y no rigidizadas cualquiera que sea el caso.

### 3.4 Pandeo de placas no atiesadas bajo compresión uniforme longitudinalmente

La resistencia al pandeo de una placa no atiesada bajo fuerzas de compresión longitudinales puede ser calculada de acuerdo con la ecuación (3.6).

$$\sigma_{x,R_d} = C_x \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \quad 3.6$$

donde:

$$C_x = 1 \quad \text{cuando } \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad 3.7$$

$$C_x = \frac{(\bar{\lambda}_p - 0.22)}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{cuando } \bar{\lambda}_p > 0.673 \quad 3.8$$

donde:  $\bar{\lambda}_p$ , es la esbeltez de la placa dada por la ecuación (3.9)

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr}}} = 0.525 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad 3.9$$

La resistencia de la placa es satisfactoria cuando:  $\sigma_{x,Sd} \leq \sigma_{x,Rd}$

### 3.5 Pandeo de placas no atiesadas en compresión transversal

La resistencia al pandeo de una placa bajo fuerzas de compresión transversales es calculada de acuerdo con la ecuación (3.10).

$$\sigma_{y,Rd} = \frac{\sigma_{y,R}}{\gamma_M} \quad 3.10$$

$$\sigma_{y,R} = \left[ \frac{1.3 \cdot t_p}{l} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} + \kappa \cdot \left( 1 - \frac{1.3 \cdot t_p}{l} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \right) \right] f_y \cdot k_p \quad 3.11$$

donde:

$$\kappa = 1 \quad \text{para } \bar{\lambda}_c \leq 0.2 \quad 3.12$$

$$\kappa = \frac{1}{2 \cdot \bar{\lambda}_c^2} \cdot \left( 1 + \mu + \bar{\lambda}_c^2 - \sqrt{(1 + \mu + \bar{\lambda}_c^2)^2 - 4 \cdot \bar{\lambda}_c^2} \right) \quad \text{para } 0.2 < \bar{\lambda}_c < 2.0 \quad 3.13$$

$$\kappa = \frac{1}{2 \cdot \bar{\lambda}_c^2} + 0.07 \quad \text{para } \bar{\lambda}_c \geq 2.0 \quad 3.14$$

donde:

$$\bar{\lambda}_c = 1.1 \cdot \frac{s}{t_p} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad 3.15$$

$$\mu = 0.21 \cdot (\bar{\lambda}_c - 0.2) \quad 3.16$$

El factor de reducción debido a la carga lateral  $k_p$ , se calcula con la ecuación (3.17 o 3.18) según sea el caso.

$$k_p = 1.0 \quad \text{para } P_{Sd} \leq 2 \cdot \left( \frac{t_p}{s} \right)^2 \cdot f_y \quad 3.17$$

$$k_p = 1.0 - h_\alpha \cdot \left( \frac{P_{Sd}}{f_y} - 2 \cdot \left( \frac{t_p}{s} \right)^2 \right) \quad \text{pero } k_p \geq 0 \quad 3.18$$

donde:

$$h_\alpha = 0.05 \cdot \frac{s}{t_p} - 0.75 \quad \text{pero } h_\alpha \geq 0 \quad 3.19$$

La resistencia de la placa es satisfactoria cuando:  $\sigma_{y,Sd} \leq \sigma_{y,Rd}$

### 3.6 Fuerzas en la placa idealizada atiesada

Las placas atiesadas sujetas a fuerzas combinadas ver figura 3.4, deben ser diseñadas para resistir una fuerza axial equivalente de acuerdo con la ecuación (3.20) y una carga lateral equivalente conforme a la ecuación (3.21).

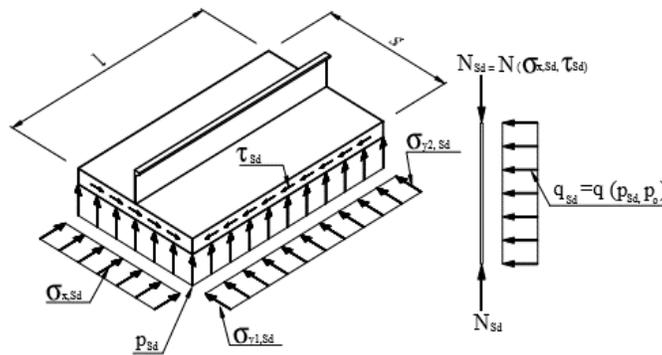


Figura 3.4 Modelo puntual (fuente: DNV-OS-C101, 2008)

$$N_{Sd} = \sigma_{x,Sd}(A_s + st_p) + \tau_{tf}st_p \quad 3.20$$

donde:  $N_{Sd}$ , es la fuerza axial de diseño,  $A_s$ , es el área de la sección transversal del atiesador,  $s$ , es la distancia entre atiesadores,  $t_p$ , es el espesor de la placa,  $\sigma_{x,Sd}$ , es el esfuerzo axial en la placa y atiesador con esfuerzo a compresión positivo y  $\tau_{if}$ , es el esfuerzo cortante, el cual no se considera en este estudio y por lo tanto se desprecia.

La línea de carga lateral equivalente debe ser tomada acuerdo a la ecuación (3.21).

$$q_{sd} = (P_{sd} + P_0) \cdot s \quad 3.21$$

$P_0$ , debe ser aplicada en la dirección de la presión externa  $P_{sd}$ . Para el caso en el que  $P_{sd} \leq P_0$ , el atiesador necesita ser revisado para  $P_0$  aplicada en ambas direcciones (por ejemplo, para el lado de la placa y lado del atiesador).

$$P_0 = (0.6 + 0.4\Psi) \cdot C_0 \cdot \sigma_{y1,Sd} \quad \text{Si } \Psi > 1.5 \quad 3.22$$

$$P_0 = 0 \quad \text{Si } \Psi \leq 1.5 \quad 3.23$$

$P_0$ , es igual a cero en el caso de que  $\sigma_{y1,SD}$  está en tensión a lo largo de toda la longitud del panel.

$$C_0 = \frac{W_{es} \cdot f_y \cdot m_c}{k_c \cdot E \cdot t_p^2 \cdot s} \quad 3.24$$

$$\Psi = \frac{\sigma_{y2,SD}}{\sigma_{y1,SD}} \quad 3.25$$

donde:  $\sigma_{y1,SD}$ , es el esfuerzo de diseño más grande en la dirección transversal, con esfuerzo a tensión tomado como negativo,  $\sigma_{y2,SD}$ , es el esfuerzo de diseño más pequeño en la dirección transversal, con esfuerzo a tensión tomado como negativo,  $W_{es}$ , es el módulo de sección efectiva y  $m_c = 13.3$  para atiesadores continuos o 8.9 para atiesadores simplemente apoyados,  $I_s$  momento de inercia del atiesador con ancho de la placa completa y para calcular el factor  $k_c$ , se utiliza la ecuación (3.26).

$$k_c = 2 \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{10.9 I_s}{t_p^3 s}} \right) \quad 3.26$$

### 3.7 Ancho efectivo de la placa

El ancho efectivo de la placa para un atiesador continuo sujeto a esfuerzos longitudinales, transversales y cortantes es calculado como se muestra en la ecuación (3.27).

$$\frac{s_e}{s} = C_{xs} C_{ys} \quad 3.27$$

El factor de reducción debido al esfuerzo en la dirección longitudinal,  $C_{xs}$  se calcula con las ecuaciones (3.28 o 3.29) dependiendo al caso.

$$C_{xs} = 1.0 \text{ si } \bar{\lambda}_p \leq 0.673 \quad 3.28$$

$$C_{xs} = \frac{\bar{\lambda}_p^{-0.22}}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ si } \bar{\lambda}_p > 0.673 \quad 3.29$$

donde:

$$\bar{\lambda}_p = 0.525 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad 3.30$$

Y el factor de reducción para el esfuerzo a compresión en la dirección transversal,  $C_{ys}$  es obtenido con la ecuación (3.31).

$$C_{ys} = \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{y,Sd}}{\sigma_{y,R}}\right)^2 + c_i \left(\frac{\sigma_{x,Sd} \sigma_{y,Sd}}{C_{xs} f_y \sigma_{y,R}}\right)} \quad 3.31$$

donde:

$$c_i = 1 - \frac{s}{120 \cdot t_p} \quad \text{para } \frac{s}{t_p} \leq 120 \quad 3.32$$

$$c_i = 0 \quad \text{para } \frac{s}{t_p} > 120 \quad 3.33$$

### 3.8 Resistencia de pandeo característica de atiesadores

La resistencia de pandeo característica para atiesadores se puede encontrar de la siguiente forma

$$\frac{f_k}{f_r} = 1.0 \quad \text{cuando } \bar{\lambda} \leq 0.2 \quad 3.34$$

$$\frac{f_k}{f_r} = \frac{1 + \mu + \bar{\lambda}^2 - \sqrt{(1 + \mu + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2}}{2\bar{\lambda}^2} \quad \text{cuando } \bar{\lambda} > 0.2 \quad 3.35$$

donde:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_r}{f_E}} \quad 3.36$$

$$f_E = \pi^2 E \left(\frac{i_e}{l_k}\right)^2 \quad 3.37$$

$$i_e = \sqrt{\frac{I_e}{A_e}} \quad 3.38$$

Para revisar el lado de la placa

$$\mu = \left(0.34 + 0.08 \frac{z_p}{i_e}\right) (\bar{\lambda} - 0.2) \quad 3.39$$

Para revisar el lado del atiesador

$$\mu = \left(0.34 + 0.08 \frac{z_t}{i_e}\right) (\bar{\lambda} - 0.2) \quad 3.40$$

donde:

$f_r$  es igual a  $f_y$  para la revisión de la placa

$f_r$  es igual a  $f_y$  para la revisión del lado del atiesador si  $\bar{\lambda}_T \leq 0.6$

$f_r$  es igual a  $f_T$  para la revisión del lado del atiesador si  $\bar{\lambda}_T > 0.6$

$\bar{\lambda}_T$ , es calculada en la sección 3.9

### 3.9 Pandeo torsional de atiesadores

La resistencia al pandeo torsional se calcula de acuerdo con las ecuaciones (3.41 o 3.42) dependiendo sea el caso.

$$\frac{f_T}{f_y} = 1.0 \quad \text{cuando } \bar{\lambda}_T \leq 0.6 \quad 3.41$$

$$\frac{f_T}{f_y} = \frac{1 + \mu + \bar{\lambda}_T^2 - \sqrt{(1 + \mu + \bar{\lambda}_T^2)^2 - 4\bar{\lambda}_T^2}}{2\bar{\lambda}_T^2} \quad \text{cuando } \bar{\lambda}_T > 0.6 \quad 3.42$$

donde:

$$\mu = 0.35(\bar{\lambda}_T - 0.6) \quad 3.43$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{f_y}{f_{ET}}} \quad 3.44$$

Para el cálculo de  $f_{ET}$  de los perfiles tipo ángulo y tipo T se utilizan las ecuaciones (3.45 y 3.46) y para los atiesador tipo placa usar la ecuación (3.47).

$$f_{ET} = \beta \frac{A_w + \left(\frac{t_f}{t_w}\right)^2 A_f}{A_w + 3A_f} G \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 + \frac{\pi^2 E I_z}{\left(\frac{A_w}{3} + A_f\right) l_T^2} \quad 3.45$$

$$I_z = \frac{1}{12} A_f b_f^2 + e_f^2 \frac{A_f}{1 + \frac{A_f}{A_w}} \quad 3.46$$

$$f_{ET} = \left[ \beta + 2 \left(\frac{h_w}{l_T}\right)^2 \right] \cdot G \left(\frac{t_w}{h_w}\right)^2 \quad 3.47$$

donde:

$\beta$ , es igual a 1.0 o para cuando  $s \leq l$  usar la ecuación (3.48)

$$\beta = \frac{3C + 0.2}{C + 0.2} \quad 3.48$$

$$C = \frac{h_w}{s} \left(\frac{t_p}{t_w}\right)^2 \sqrt{(1 - \eta)} \quad 3.49$$

donde:

$$\eta = \frac{\sigma_{j,Sd}}{f_{ep}} \quad \eta \leq 1.0 \quad 3.50$$

$$f_{ep} = \frac{f_y}{\sqrt{1+\bar{\lambda}_c^4}} \quad 3.51$$

$$\bar{\lambda}_c^2 = \frac{f_y}{\sigma_{j,Sd}} \left[ \left( \frac{\sigma_{x,Sd}}{f_{Epx}} \right)^c + \left( \frac{\sigma_{y,Sd}}{f_{Epy}} \right)^c + \left( \frac{\tau_{Sd}}{f_{Ept}} \right)^c \right]^{\frac{1}{c}} \quad 3.52$$

donde:

$$c = 2 - \frac{s}{l} \quad 3.53$$

$$f_{Epx} = 3.62E \left( \frac{t_p}{s} \right)^2 \quad 3.54$$

$$f_{Epy} = 0.9E \left( \frac{t_p}{s} \right)^2 \quad 3.55$$

$$f_{Ept} = 5.0E \left( \frac{t_p}{s} \right)^2 \quad 3.56$$

### 3.10 Ecuaciones de interacción para compresión axial y presión lateral

Para atiesadores continuos con presión lateral del lado de la placa se deben cumplir las siguientes cuatro ecuaciones de interacción:

$$\frac{N_{Sd}}{N_{ks,Rd}} + \frac{M_{1,Sd} - N_{Sd} \cdot z^*}{M_{s1,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{N_E} \right)} + u \leq 1.0 \quad 3.57$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{kp,Rd}} - 2 \cdot \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{1,Sd} - N_{Sd} \cdot z^*}{M_{p,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{N_E} \right)} + u \leq 1.0 \quad 3.58$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{ks,Rd}} - 2 \cdot \frac{N_{Sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{2,Sd} + N_{Sd} \cdot z^*}{M_{st,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{N_E} \right)} + u \leq 1.0 \quad 3.59$$

$$\frac{N_{Sd}}{N_{kp,Rd}} + \frac{M_{2,Sd} + N_{Sd} \cdot z^*}{M_{p,Rd} \left( 1 - \frac{N_{Sd}}{N_E} \right)} + u \leq 1.0 \quad 3.60$$

Para el cálculo de cada uno de los términos asociados a la demanda se utilizan las ecuaciones:

$$M_{1,Sd} = \left| \frac{q_{Sd} l^2}{12} \right| \quad 3.61$$

$$M_{2,Sd} = \left| \frac{q_{Sd} l^2}{24} \right| \quad 3.62$$

Parámetros de resistencia de los atiesadores

$$N_{Rd} = A_e \frac{f_y}{\gamma_M} \quad 3.63$$

$$N_{ks,Rd} = A_e \frac{f_k}{\gamma_M} \quad 3.64$$

$$N_{kp,Rd} = A_e \frac{f_k}{\gamma_M} \quad 3.65$$

$$M_{s1,Rd} = W_{es} \frac{f_r}{\gamma_M} \quad 3.66$$

$$M_{s2,Rd} = W_{es} \frac{f_r}{\gamma_M} \quad 3.67$$

$$M_{st,Rd} = W_{es} \frac{f_y}{\gamma_M} \quad 3.68$$

$$M_{p,Rd} = W_{ep} \frac{f_y}{\gamma_M} \quad 3.69$$

$$W_{ep} = \frac{I_e}{z_p} \quad 3.70$$

$$W_{es} = \frac{I_e}{z_t} \quad 3.71$$

$$N_E = \frac{\pi^2 E A_e}{\left(\frac{l_k}{i_e}\right)^2} \quad 3.72$$

Para atiesadores continuos la longitud de pandeo se calcula con la ecuación (3.73)

$$l_k = l \left( 1 - 0.5 \left| \frac{P_{Sd}}{P_f} \right| \right) \quad 3.73$$

La presión lateral es calculada con la ecuación (3.74)

$$P_f = \frac{12W f_y}{l^2 \cdot s \cdot \gamma_M} \quad 3.74$$

donde:  $W$ , es el valor más pequeño entre  $W_{es}$  y  $W_{ep}$

### **3.10.1 Resistencia.**

El diseño estructural debe ser evaluado de acuerdo con los requerimientos del ULS, de fatiga (FLS) y accidental (ALS) como están señalados en la norma DNV-OS-C101, que consideran los siguientes modos de falla:

Fluencia excesiva (ULS, ALS): los miembros estructurales para los cuales la fluencia excesiva es un posible modo de falla deben ser diseñado por fluencia. El esfuerzo máximo local del análisis elástico lineal con cambios geométricos marcados podrá exceder el esfuerzo de fluencia siempre que los elementos estructurales adyacentes tengan capacidad para la redistribución de esfuerzos.

Pandeo: Las secciones transversales de los elementos que no cumplan con los requisitos de la sección transversal tipo III serán verificados por pandeo local, los cuales están definidos en la tabla 3.1. El análisis de pandeo se basa en la resistencia característica para el modo de pandeo más desfavorable. Por lo que se deben tomar en cuenta las imperfecciones iniciales y los esfuerzos residuales en los miembros estructurales.

Los requerimientos con respecto a los métodos de análisis y revisiones de capacidad son dados en la norma DNV-OS-C101. Consideraciones detalladas con respecto a los métodos y modelos de análisis están dados en las recomendaciones practicas DNV-RP-C103.

Ambas capacidades tanto global y local deben ser revisadas con respecto al Estado Límite Último ULS (*Ultimate Limit State*). Los esfuerzos locales y globales deben ser combinados de manera apropiada.

La revisión de la capacidad de resistencia última se debe llevar a cabo para todos los miembros estructurales que contribuyen a la resistencia global y local de la unidad de columna establecida.

El análisis debe llevarse a cabo para evaluar la capacidad estructural debida a los efectos locales y globales. Considerando los métodos de análisis relevantes y procedimientos dados en las recomendaciones practicas DNV-RP-C103 y en el apéndice B.

El modelo estructural debe representar la rigidez global, la cual está representada por un gran volumen y paredes delgadas en un modelo de elemento finito en tres dimensiones. Un modelo de paredes delgadas debe ser modelado con elementos tipo cascaron o membrana algunas veces en combinación con elementos vigas. La conexión estructural en el sistema debe ser modelada con la

rigidez adecuada para representar la rigidez de tal manera que las respuestas resultantes sean apropiadas para el modelo analizado.

## 4 RESPUESTA HIDRODINÁMICA

El análisis hidrodinámico de estructuras tipo flotantes de grandes dimensiones puede se lleva a cabo, al menos en principio usando el método de difracción – radiación. La ventaja que tiene es que considera geometrías arbitrarias y que todos los parámetros hidrodinámicos relevantes son evaluados con la teoría de potencial lineal (y de segundo orden).

La teoría de potencial lineal es empleada en la ingeniería para considerar algunos efectos importantes de las olas en estructuras costa afuera con grandes dimensiones. Los efectos no lineales y viscosos son despreciados, debido a que está basado en la suposición de que la amplitud de las olas incidentes y los movimientos de las estructuras son pequeños en relación con las escalas de longitud, característica relevante de la estructura. Estas suposiciones son aplicables para la mayoría de las configuraciones de los sistemas tipo flotantes con grandes dimensiones (Newman, 2005).

### 4.1 Teoría de oleaje lineal

Se requiere determinar el potencial de velocidad  $\Phi$  perteneciente a la región del fluido. Esto se satisface con la ecuación de Laplace (4.1):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad 4.1$$

La cual estará sujeta a las siguientes condiciones de frontera ecuaciones (4.2 y 4.3):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \text{ para } z = -d \quad 4.2$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \text{ para } z = \eta \quad 4.3$$

Al considerar una ola sinusoidal de frecuencia  $\omega$  ver figura 4.1 y tomar el eje  $x$  en dirección perpendicular para la cresta de la ola y en dirección de la propagación, se tiene además una superficie libre de perturbaciones de la forma ecuación (4.4):

$$\eta(x, t) = \eta(x)e^{i\omega t} \quad 4.4$$

donde:  $\eta$  es la solución unidimensional de la ecuación de Helmholtz (4.5):

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \kappa^2 \eta = 0 \quad 4.5$$

La elevación tiene una solución armónica ecuación (4.6):

$$\eta(x) = a_0 e^{-i\kappa t} \quad 4.6$$

donde:  $\kappa$  es el número de ola,  $\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

$$\eta(x, t) = a_0 e^{-i(\kappa x - \omega t)} \quad 4.7$$

Esto representa la elevación de una ola lineal de Airy de amplitud  $a_0$  viajando en dirección  $x$  e incremento con una velocidad de fase o celeridad  $c$ , dado por la ecuación (4.8):

$$c = \frac{\omega}{\kappa} \quad 4.8$$

Utilizando las condiciones de frontera de la superficie libre linealizada, se puede escribir el potencial de velocidad de movimiento mediante la ecuación (4.9):

$$\Phi(x, z, t) = i \frac{g}{\omega} a_0 e^{-i(\kappa x - \omega t)} \frac{\cosh(z+d)}{\cosh(\kappa d)} \quad 4.9$$

Y la relación de dispersión vincula la frecuencia con el número de ola, como se muestra en la ecuación (4.10):

$$\omega^2 = g\kappa \tanh \kappa d \quad 4.10$$

Sin embargo, dicha relación puede considerarse para olas propagándose en aguas profundas o ultra-profundas como en la ecuación (4.11):

$$\omega^2 = g\kappa \quad 4.11$$

Esto debido a que  $\tanh \kappa d$  tiende a 1 para valores grandes de  $\kappa d$ , lo cual aplica para aguas profundas. Por lo tanto, el nivel de agua puede considerarse profunda, si la profundidad es más de la mitad de la longitud de la ola.

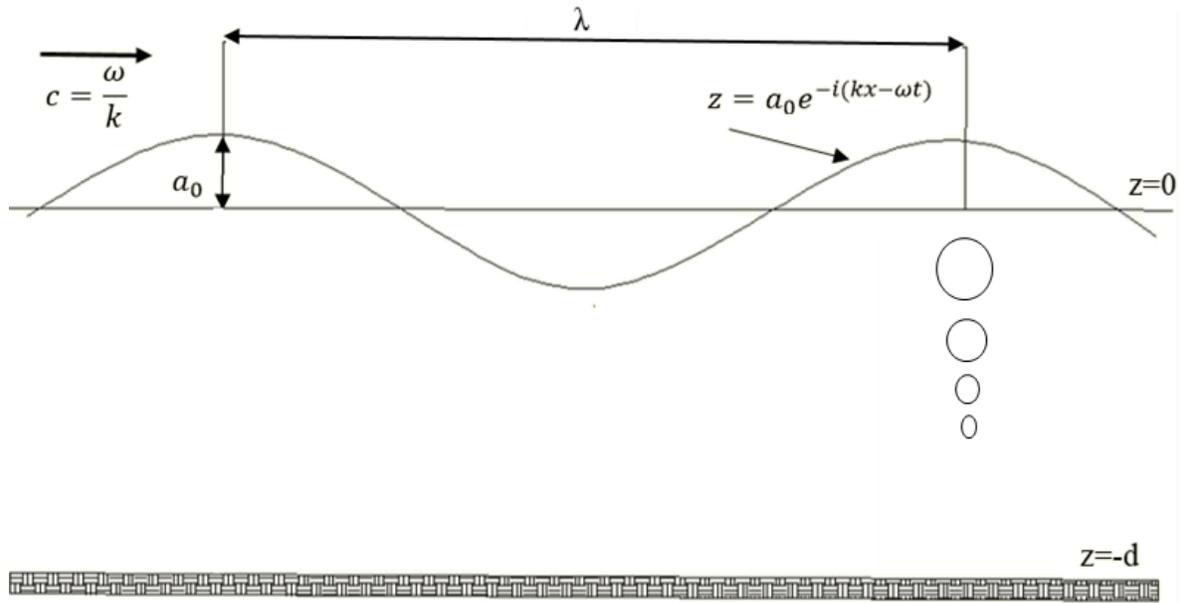


Figura 4.1 Ola lineal o de Airy (adaptada de Brebbia y Walker, 1979).

El ascenso de la ola alrededor del cilindro es el valor máximo de  $\eta$  para  $r = a$ , y la presión “ $p$ ” actuante en la periferia del cilindro es obtenida mediante la ecuación (4.12).

$$p = -\rho g z \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{r=a} \quad 4.12$$

La fuerza transversal que actúa en la dirección  $x$  se presenta en la ecuación (4.13).

$$F_z = - \int_0^{2\pi} p(\theta, a) a \cos \theta d\theta \quad 4.13$$

La fuerza total se muestra en la ecuación (4.14).

$$F = \int_{-d}^0 F_z dz \quad 4.14$$

Para el cálculo del momento es utilizada la ecuación (4.15).

$$M = \int_{-d}^0 F_z (z + d) dz \quad 4.15$$

Para el estudio de las fuerzas de oleaje irregular Hogben sugiere que el problema hidrodinámico de un cilindro puede ser clasificado en tres regiones de acuerdo con el diámetro del cilindro, longitud y altura de la ola. La primera región es  $\frac{H_s}{L} > 1$  donde la ecuación de Morison es más adecuada que el método de difracción. La segunda región es  $\frac{D}{\lambda} > 0.2$  donde el método de

difracción es adecuado. Finalmente, la tercera región es  $\frac{D}{\lambda} < 0.2$  y  $\frac{H_s}{L} < 1$  donde ambos métodos son adecuados donde  $H_s$ ,  $D$  y  $\lambda$  son la altura de la ola, el diámetro de la columna y la longitud de la ola, respectivamente (Hogben, 1976).

Más tarde, Sarpkaya e Isaacson (1981) realizaron algunos estudios para encontrar las fuerzas y la respuesta de diferentes configuraciones de plataformas tipo semisumergibles en mar regular e irregular y para aguas someras y profundas. La profundidad del agua en combinación con la longitud de ola determina si la profundidad del agua se considera como agua profunda, intermedia o superficial desde un punto de vista hidrodinámico. La profundidad del agua se considera profunda si es mayor a la mitad del potencial máximo de la longitud de la ola y se considerada poco profunda si es menor que 0.5 de la longitud de ola.

De acuerdo con Chakrabarti (1985) el uso de la ecuación de Morison es adecuada en estructuras marinas donde sus dimensiones son pequeñas comparadas con la longitud de la ola, pero si las dimensiones son más grandes comparadas con la longitud de la ola es necesario hacer uso del método de difracción, ya que la presencia de la estructura alterara el campo de la ola.

Dicho problema se reduce en la determinación del potencial de velocidad  $\Phi$  que satisface la ecuación de Laplace presentada en la ecuación (4.16).

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad 4.16$$

Dentro de la región del fluido, esto está sujeto a las condiciones de frontera (lineal en este caso) mostradas en las ecuaciones (4.17, 4.18, 4.19 y 4.20).

$$\frac{\partial \Phi^2}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = 0 \quad 4.17$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)_{z=0} \quad 4.18$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{para } z = -d \quad 4.19$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{para la superficie del cuerpo} \quad 4.20$$

donde:  $n$  denota la dirección normal a la superficie del cuerpo. Las ecuaciones (4.17) y (4.18) se derivan de la cinemática lineal.

La condición de radiación puede ser introducida para representar el potencial de velocidad, siendo este la suma de los potenciales de “ola incidente” y de la “ola dispersada” presentada en la ecuación (4.21).

$$\Phi = \Phi_{\omega} + \Phi_s \quad 4.21$$

Después, cuando el diámetro de las columnas de la estructura es considerado suficientemente grande, el potencial de la ola dispersada  $\Phi_s$  corresponde a realizar la radiación de la ola. Finalmente, esta condición está dada en la ecuación (4.22).

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r^{1/2} \left[ \frac{\partial \Phi_s}{\partial r} - i\kappa \Phi_s \right] = 0 \quad 4.22$$

Donde  $r$  es la ordenada radial.

La expresión del potencial de velocidad y variables asociados en la forma de la ecuación (4.22), involucra una separación en la ola incidente sin perturbaciones y en la ola dispersada, componentes que constituyen la base de la teoría de difracción de oleaje. El potencial de la ola incidente satisface las ecuaciones (4.16 a 4.19), y es especificado en forma compleja, la cual se presenta en la ecuación (4.23).

$$\Phi_{\omega} = a \frac{\cosh(\kappa(z+d))}{\cosh(\kappa d)} e^{-i(\kappa x \omega t)} \quad 4.23$$

Dónde  $a = \frac{igH_s}{2w}$

Debido a que todas las ecuaciones del problema son lineales,  $\phi_s$  también satisface las ecuaciones (4.16 a 4.19), así como la condición de radiación presentada en la ecuación (4.22).

La condición de frontera de la superficie del cuerpo se muestra en la ecuación (4.24)

$$\frac{\partial \Phi_s}{\partial n} = - \frac{\partial \Phi_{\omega}}{\partial n} \quad 4.24$$

Generando dependencia de  $\phi_s$  en  $\phi_w$ . Por lo tanto, las ecuaciones (4.16 a 4.19) son aplicadas para  $\phi_s$ , junto con las ecuaciones (4.22 y 4.24) y definen el problema en términos de  $\phi_s$ .

Una vez que  $\phi_s$  y, consecuentemente,  $\phi$  son determinados, la presión de todo el fluido puede ser evaluado por la ecuación de Bernoulli linealizada (4.25).

$$p = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad 4.25$$

La integración apropiada de la presión que actúa en la superficie del cuerpo puede ser llevado a cabo para obtener las fuerza en corte, fuerza total y momentos según se requiera.

## 4.2 Ecuación de movimiento

En la ecuación 4.26 se presenta cada uno de los componentes que conforman la ecuación de movimiento que se usa para la obtención de los operadores de amplitud de respuesta.

$$(M + M_a)\ddot{X} + B\dot{X} + KX = f(t) \quad 4.26$$

donde:  $\ddot{X}$ ,  $\dot{X}$ ,  $X$ , son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento en los tres grados de libertad del sistema, respectivamente,  $M$  y  $M_a$ , son las matrices de masa y masa adherida respectivamente,  $B$ , es la matriz de amortiguamiento,  $K$ , es la matriz de rigidez debida a la rigidez hidrostática y al sistema de amarre y  $f(t)$ , es el vector de fuerzas debido al oleaje, viento y corriente marina.

Los grados de libertad que tiene la semisumergible son seis: avance (*surge*), arfada (*heave*), deriva (*sway*), balanceo (*roll*), cabeceo (*pitch*) y guiñada (*yaw*) como se muestra en la figura 4.2 asociados a los tres ejes, teniendo tres desplazamientos traslacionales y tres rotacionales, en el presente trabajo únicamente son considerados tres grados de libertad (*heave*, *roll* y *pitch*), los cuales están dominados por la geometría del casco por los valores de rigidez hidrostática, masa adherida y amortiguamiento por radiación independientemente del amortiguamiento viscoso. Mientras que los tres restantes (*surge*, *yaw* y *sway*) están dominados por el sistema de amarre en cuando a la respuesta.

A partir de la ecuación de movimiento se obtienen los operadores de amplitud de respuesta conocidos como RAOs, los cuales son funciones de transferencia que describen la respuesta de una estructura en olas regulares de amplitud unitaria sobre un rango de frecuencias. La amplitud de la respuesta es normalizada con respecto a la amplitud de ola, que son calculados de acuerdo con la ecuación (4.27), (Faltinsen, 1990), donde  $F_0$ , es la amplitud del complejo de fuerza de excitación lineal por altura de ola.

$$RAO(\omega) = \frac{F_0}{K - [M + M_a(\omega)] \cdot \omega^2 + iB(\omega) \cdot \omega} \quad (4.27)$$

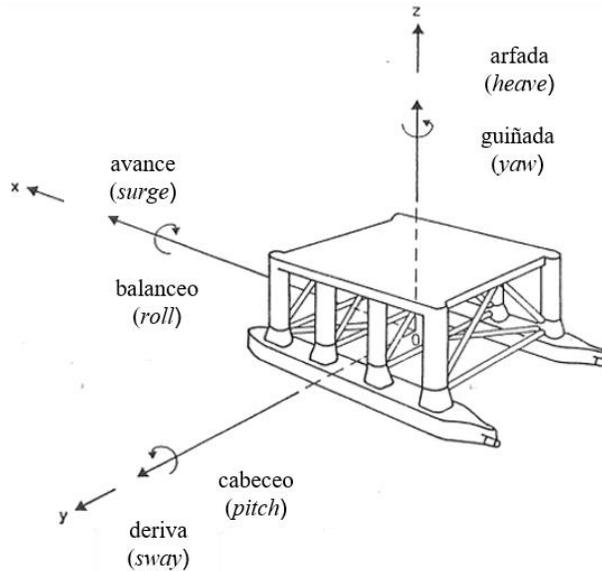


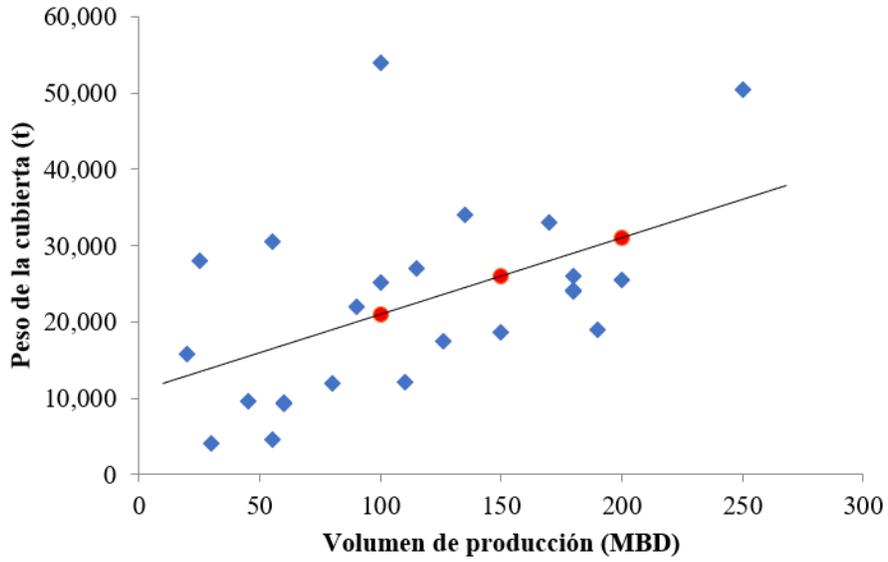
Figura 4.2 Grados de libertad (adaptada de DNV-RP-C103, 2005).

### 4.3 Identificación de parámetros de diseño

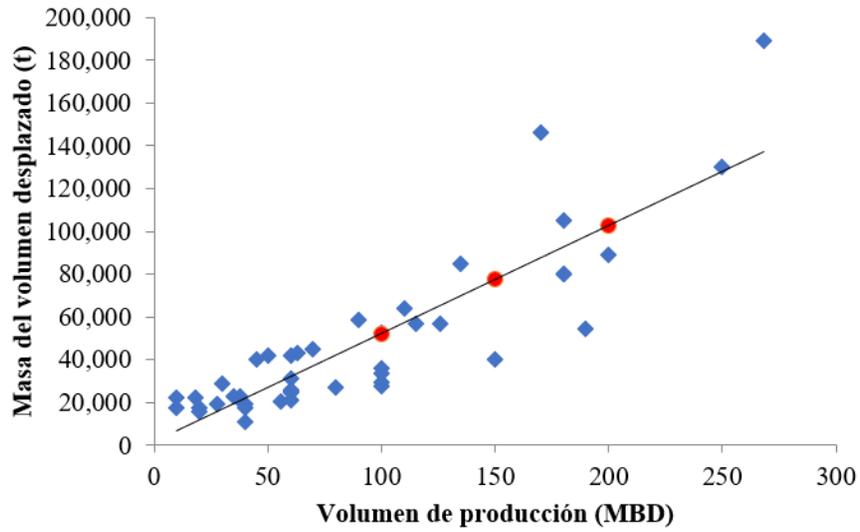
En la figura 4.3 se muestra una regresión lineal de los pesos de cubierta de diferentes plataformas tipo semisumergibles existentes en el mundo, dicha información es recabada de Offshore Magazine (Magazine, 2011), la cual es usada para determinar la tendencia del peso de cubierta en función de los volúmenes de producción de crudo seleccionados en el presente trabajo los cuales son: 100, 150 y 200 MBD.

De acuerdo con la información recabada se obtiene lo siguiente para el desarrollo de los casos de estudio: para un volumen de producción de 100 MBD se tiene un peso de cubierta ( $W_{topside}$ ) de 18,000 t, para el de 150 MBD se tiene un peso de 24,000 t y finalmente para el de 200 MBD se tiene un peso de 29,000 t.

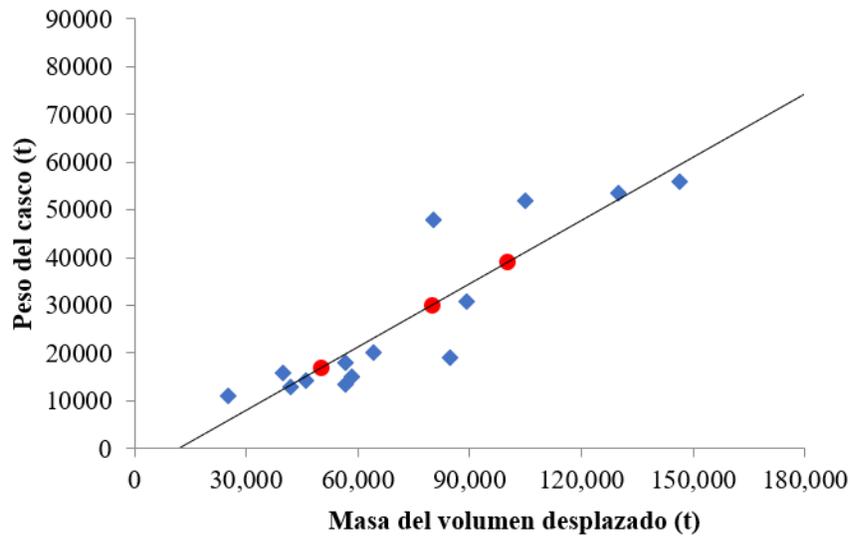
Por otro lado, en la figura 4.4 se presenta la regresión lineal que relaciona el desplazamiento de la plataforma tipo semisumergible y el volumen de producción de crudo, tal información es obtenida de la misma fuente que en la figura anterior, de acuerdo con la regresión de la masa del volumen desplazado que se espera para cada uno de los volúmenes de producción considerados es 50,000, 80,000 y 100,000 t, respectivamente.



**Figura 4.3 Volumen de producción vs Peso de cubierta ( $W_{topside}$ ) para 100, 150 y 200 MBD**



**Figura 4.4 Volumen de producción vs Masa del volumen desplazado para 100, 150 y 200 MBD**



**Figura 4.5 Masa del volumen desplazado vs Peso del casco ( $W_{hull}$ ) para 100, 150 y 200 MBD.**

Finalmente, en la figura 4.5 se observa la regresión lineal que relaciona la masa del volumen desplazado y el peso del casco ( $W_{hull}$ ), una vez obtenida la masa del volumen desplazado es posible encontrar los pesos del casco asociados a dichas masas de volúmenes desplazados, siendo estos: 18,000, 30,000 y 40,000 t, respectivamente; los cuales corresponden a cada una de las producciones mencionadas anteriormente.

#### 4.4 Definición de variables de estudio

Una vez estimados los pesos de cubierta asociados a cada uno de los volúmenes de producción considerados para el presente trabajo se establecen las variables de estudio.

En la tabla 4.1 se muestran las variables y el número de casos de estudio, como se aprecia se presentan las 3 cantidades de producción (100, 150 y 200 MBD) las cuales fueron mencionadas en el capítulo I. Por otro lado, las variables de diseño consideradas son: separación entre columnas (3), ancho (3) y altura (3) de las columnas, calado (3), ancho (3) y altura (3) de los pontones, teniendo un total de 2916 modelos.

**Tabla 4.1 Variables y número de casos de estudio.**

| Producción (MBD) | Columnas           |               |                | Calado $D$ (m) | Pontones       |                 |
|------------------|--------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|                  | Separación $L$ (m) | Ancho $B$ (m) | Altura $H$ (m) |                | Ancho $BP$ (m) | Altura $HP$ (m) |
| 100              |                    | 16            |                |                |                |                 |
|                  |                    | 18            |                |                |                |                 |
|                  |                    | 20            |                |                |                |                 |
|                  |                    | 22            |                |                |                |                 |
| 150              | 85                 | 18            | 40             | 20             |                |                 |
|                  |                    | 20            |                |                |                |                 |
|                  | 90                 | 22            | 43             | 22             |                |                 |
|                  |                    | 24            |                |                |                |                 |
| 200              | 95                 | 20            | 46             | 24             |                |                 |
|                  |                    | 22            |                |                |                |                 |
|                  |                    | 24            |                |                |                |                 |
|                  |                    | 26            |                |                |                |                 |

Además de las variables de diseño, se consideran 7 direcciones de incidencia de oleaje (0, 15 30 45 60 75 y 90°) y un rango en que se encuentra concentrado el contenido de energía del oleaje de 3 a 35 s, el espectro utilizado para linealizar la respuesta hidrodinámica considerando los elementos Morison es el espectro de *Pierson Moskowitz* y sus parámetros son: una altura de ola significativa ( $H_s$ ) de 10 m y un periodo pico ( $T_p$ ) de 12 s, el cual se utiliza para linealizar las contribuciones de las fuerzas viscosas.

#### 4.5 Estabilidad de un sistema flotante

Antes de pasar al cálculo de los periodos es importante hacer un énfasis en la estabilidad de un sistema tipo flotante. Los cuerpos flotantes son un caso especial, ya que solo una porción del cuerpo se encuentra sumergido, y el resto del cuerpo se encuentra en la superficie libre. La flotabilidad,  $F_b$  es el peso del agua desplazada, por lo que la porción del cuerpo sumergido es igual a su peso  $W$ . El centro de gravedad de la masa de agua desplazada es conocido como el centro de flotación,  $C_f$  y el centro de gravedad como el centro de masa,  $C_m$ .

En una posición de equilibrio la fuerza de flotación ( $F_b$ ) y el peso ( $W$ ) tienen la misma línea de acción de igual magnitud, pero en sentido contrario como se muestra en la figura 4.6. Por lo que un cuerpo sumergido es estable si su centro de masa se localiza bajo el centro de flotabilidad. Sin

embargo, esta no es una condición esencial para la estabilidad de objetos flotantes (University, 2014).

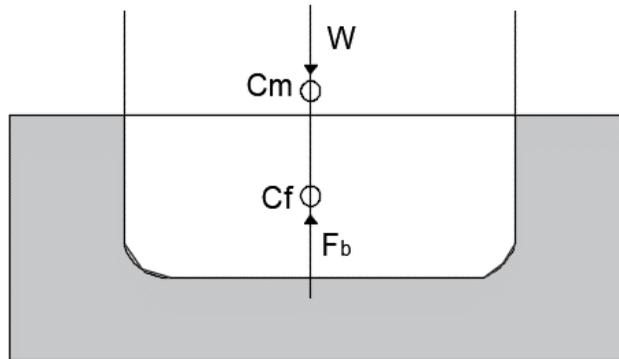


Figura 4.6 Fuerza y centro de flotación

Por otro lado, un objeto es estable en medida que exista un momento de restauración en caso de deflexión o inclinación de la posición de equilibrio. Como se muestra en la figura 4.7, el peso y la flotabilidad forman un par de fuerzas con el brazo de palanca ( $b$ ), el cual genera un momento. La distancia entre el centro de gravedad y el punto de intersección de la línea de acción de la fuerza de flotación y el eje de simetría es una medida de estabilidad. El punto de intersección es referido como metacentro ( $M$ ) y la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro es llamada altura metacéntrica  $G_m$  (University, 2014).

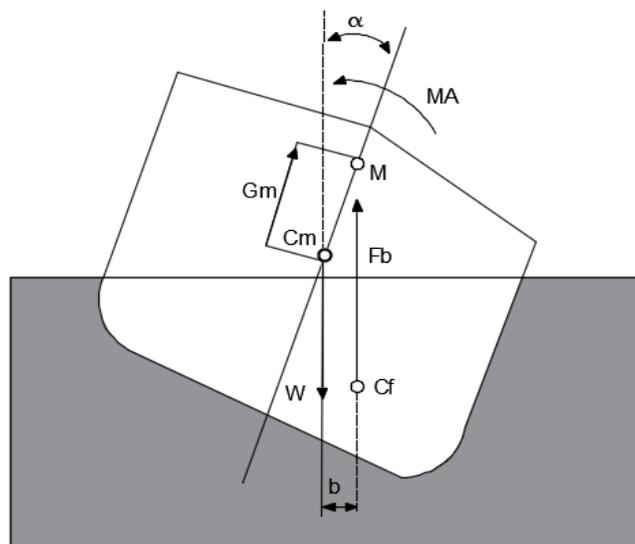


Figura 4.7 Metacentro “ $M$ ” y altura metacéntrica “ $G_m$ ”.

Además, un sistema flotante es estable cuando la altura metacéntrica es positiva, es decir, el metacentro está localizado sobre el centro de gravedad, de lo contrario es inestable.

La posición del metacentro no está gobernada por la posición del centro de gravedad. Esto depende simplemente de la forma de la porción del cuerpo sumergido.

#### 4.6 Cálculo de los periodos

Un aspecto importante es la obtención de los periodos naturales por lo que para el cálculo de los periodos naturales de vibrar en arfada (*heave*), cabeceo (*pitch*) y balanceo (*roll*) son aplicadas las ecuaciones (4.28 a la 4.31) de las recomendaciones practicas (DNV-RP-H103, 2017).

$$T_{Heave} = 2\pi \sqrt{\frac{m_s + A_{33}}{\rho_w * g * A_w}} \quad 4.28$$

donde:  $T_{Heave}$ , es el periodo natural en arfada (*heave*) (s),  $m_s$ , masa de la plataforma tipo semisumergible (kg),  $A_{33}$ , es la masa adherida (kg),  $\rho_w$ , es la densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>),  $g$ , es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>) y  $A_w$ , es el área del plano del agua (m<sup>2</sup>).

$$A_{33} = C_A * \rho_w * \pi \frac{BP^2}{2} l_p \quad 4.29$$

donde:  $C_A$ , es el coeficiente de masa adherida,  $BP$ , es el ancho del pontón (m) y  $l_p$ , es la longitud del pontón (m).

$$T_{Roll} = 2\pi \sqrt{\frac{m_s * r_{44}^2 + A_{44}}{\rho_w * g * \nabla * GM_t}} \quad 4.30$$

$$T_{Pitch} = 2\pi \sqrt{\frac{m_s * r_{55}^2 + A_{55}}{\rho_w * g * \nabla * GM_l}} \quad 4.31$$

donde:  $T_{Roll}$ , es el periodo natural en balanceo (*roll*) (s),  $T_{Pitch}$ , es el periodo natural en cabeceo (*pitch*) (s),  $r_{44}$ , es el radio de giro en balanceo (*roll*) (m),  $r_{55}$ , es el radio de giro en cabeceo (*pitch*) (m),  $A_{44}$ , es la masa adherida en balanceo (*roll*) (kg/m<sup>2</sup>),  $A_{55}$ , es la masa adherida en cabeceo (*pitch*) (kg/m<sup>2</sup>),  $\nabla$ , es la masa del volumen desplazado de la plataforma tipo semisumergible (m<sup>3</sup>),  $GM_t$ , es la distancia metacéntrica transversal (m) y  $GM_l$ , es la distancia metacéntrica longitudinal (m).

## 4.7 Condiciones ambientales

De acuerdo con las recomendaciones prácticas (DNV-RP-C103, 2005), las cargas ambientales más significativas para los cascos de las unidades estabilizadas por columnas (plataformas tipo semisumergibles) normalmente son las inducidas por el oleaje. Para establecer la respuesta hidrodinámica, las características del oleaje deben ser descritas a detalle, las cuales tienen que estar basadas en métodos de diseño de oleaje determinista o métodos de diseño estocásticos aplicando espectros de energía de oleaje.

Si una condición de diseño está limitada a un cierto rango de condiciones ambientales, estas limitaciones son aplicadas en la evaluación de las cargas ambientales para esas condiciones de diseño, más allá de la información ambiental real para el sitio o región. Se debe tener especial cuidado al elegir la combinación más desfavorable de las condiciones ambientales del rango especificado.

### 4.7.1 Parámetros de oleaje regular

Métodos deterministas son usados cuando el estado de mar se representa por medio de oleaje regular definido por los parámetros: altura de ola ( $H$ ) y periodo de ola ( $T$ ).

La altura de ola de referencia para una localización específica es de una ola de 100 años  $H_{100}$ , definida como la ola máxima con un periodo de retorno de 100 años. Para un servicio sin restricciones (operación mundial), la ola de 100 años podría ser tomada igual a 32 m.

Para asegurar suficiente precisión en los cálculos de la respuesta máxima, es necesario considerar un rango amplio de periodos de ola. Sin embargo, no es necesario tomar en cuenta periodos mayores a 18 s.

Además, existe una limitación de la pendiente de la ola, la cual queda definida con la ecuación (4.32).

$$S = \frac{2\pi H}{gT^2} \quad 4.32$$

La combinación de altura y periodo de ola considerada debe tener un valor menor al siguiente límite:

$$S = \begin{cases} \frac{1}{7} & \text{para } T \leq 6s \\ \frac{1}{7 + \frac{0.93}{H_{100}}(T^2 - 36)} & \text{para } T > 6s \end{cases}$$

Cuando  $H_{100} = 32$  m, la combinación de altura y periodo de ola, el límite de la pendiente está dado por los siguientes rangos:

$$H_s = \begin{cases} 0.22T^2 & \text{para } T \leq 6s \\ \frac{T^2}{4.5 + 0.02(T^2 - 36)} & \text{para } T > 6s \end{cases}$$

donde:  $T$  es en segundos y  $H$  en metros.

#### 4.8 Contorno ambiental

El concepto de contorno ambiental representa un procedimiento racional para definir una condición de estado de mar extrema. La idea es definir contornos en el espacio de parámetros ambientales (usualmente  $H_s$  y  $T_p$ ) a lo largo del cual deberían encontrarse las respuestas extremas con un periodo de retorno determinado (Winterstein *et al.*, 1993). Existen una serie de enfoques como, por ejemplo:

Enfoque IFORM (*Inverse First Order Reliability Method*):

1. Se determina el modelo ambiental conjunto del estado de mar de las variables de interés, para  $H_s$  y  $T_z$ .

$$f_{H_s T_z}(h, t) = f_{H_s}(h) f_{T_z|H_s}(t|h) \quad 4.33$$

2. Transforma la distribución a un espacio U normalizado estándar.

$$\Phi(u_1) = f_{H_s}(h_s) \text{ y estándar } \Phi(u_2) = f_{T_z|H_s}(t_z) \quad 4.34$$

3. Se establece el círculo para el periodo de retorno establecido en el espacio U. Para observaciones registradas cada 3 horas, el radio para un periodo de retorno de 100 años es.

$$\sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \beta = -\Phi^{-1} \left[ \frac{1}{100 \cdot 365 \cdot 8} \right] = 4.5 \quad 4.35$$

4. Se transforma el círculo a un espacio con parámetros del contorno ambiental

$$h_s = F_{H_s}^{-1}(\Phi(u_1)) \quad 4.36$$

$$t_z = F_{T_z|H_s}^{-1}(\Phi(u_2)) \quad 4.37$$

Enfoque de densidad de probabilidad constante:

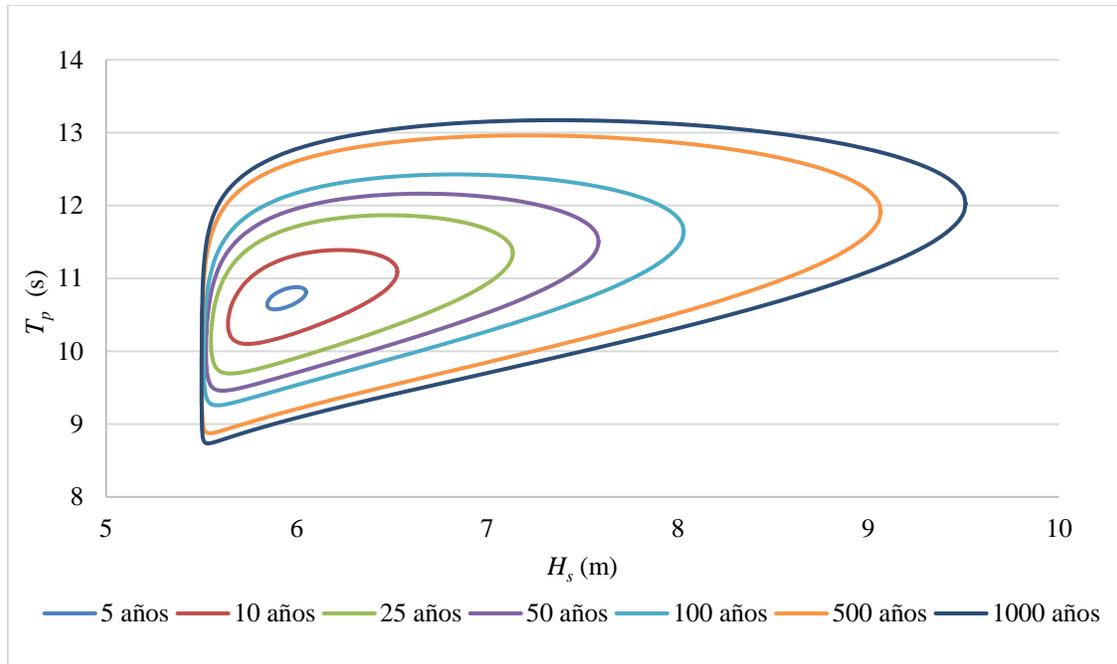
1. Se determina el modelo ambiental conjunto del estado de mar de las variables de interés para  $H_s$  y  $T_z$ .

$$f_{H_s T_z}(h, t) = f_{H_s}(h) f_{T_z|H_s}(t|h) \quad 4.33$$

2. Se estima el valor extremo para la variable gobernante para el periodo de retorno establecido y los valores asociados para otras variables. Por ejemplo, para un valor de 100  $H_s$  y la mediana condicional para  $T_z$ .

3. Se estima la línea de contorno a partir del modelo conjunto o el diagrama de dispersión como la densidad de probabilidad constante pasando a través de la combinación de los parámetros mencionados anteriormente.

En la figura 4.8 se muestra el contorno ambiental para diferentes periodos de retorno, para evaluar las respuestas máximas esperadas para diferentes periodos de retorno se toman los valores de  $H_s - T_p$  correspondientes al periodo de interés. Para el presente trabajo se seleccionan 18 parejas de altura de ola significativa y periodo pico de un periodo de retorno de 100 años requerido para condiciones de estado límite último. Es importante mencionar que los periodos que se requieren usar son los periodos de cruces por cero  $T_z$ , los cuales son calculados de acuerdo con (Kovacs, 1993) y se obtienen dividiendo el periodo pico ( $T_p$ ) entre 1.4.



**Figura 4.8 Contorno ambiental para diferentes periodos de retorno**

#### 4.9 Respuesta global

Las respuestas consideradas en el diseño óptimo de la geometría del casco de las plataformas tipo semisumergibles son las siguientes: 1)  $F_S$ , 2)  $M_t$ , 3)  $F_L$ , 4)  $a_L$ , 5)  $a_T$  y 6)  $a_V$ , 7) *Respuestas máximas más probables* y 8) *peso del casco*, a las cuales se les aplica el método de los algoritmos genéticos para encontrar el modelo óptimo, este proceso se presenta en el capítulo 5 del presente trabajo.

En la figura 4.9 se representa como actúan las fuerzas longitudinales y transversales, el momento y las aceleraciones longitudinales, transversales y verticales sobre el casco de las plataformas tipo semisumergible. Por otro lado, en la figura 4.10 se observan las secciones transversales o planos que se definen en el módulo de HydroD de la paquetería de SESAM para obtener las fuerzas, momentos y aceleraciones para los diferentes modelos. Antes de presentar los resultados sobre los operadores de amplitud de respuesta es importante explicar cómo se considera el *air gap*, el cual se presenta en el siguiente apartado.

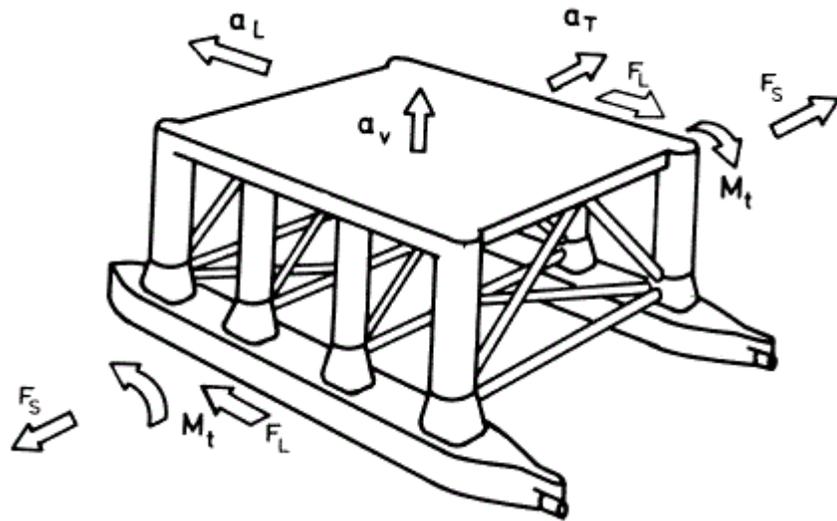


Figura 4.9 Respuesta hidrodinámica característica (fuente: DNV- RP - C103).

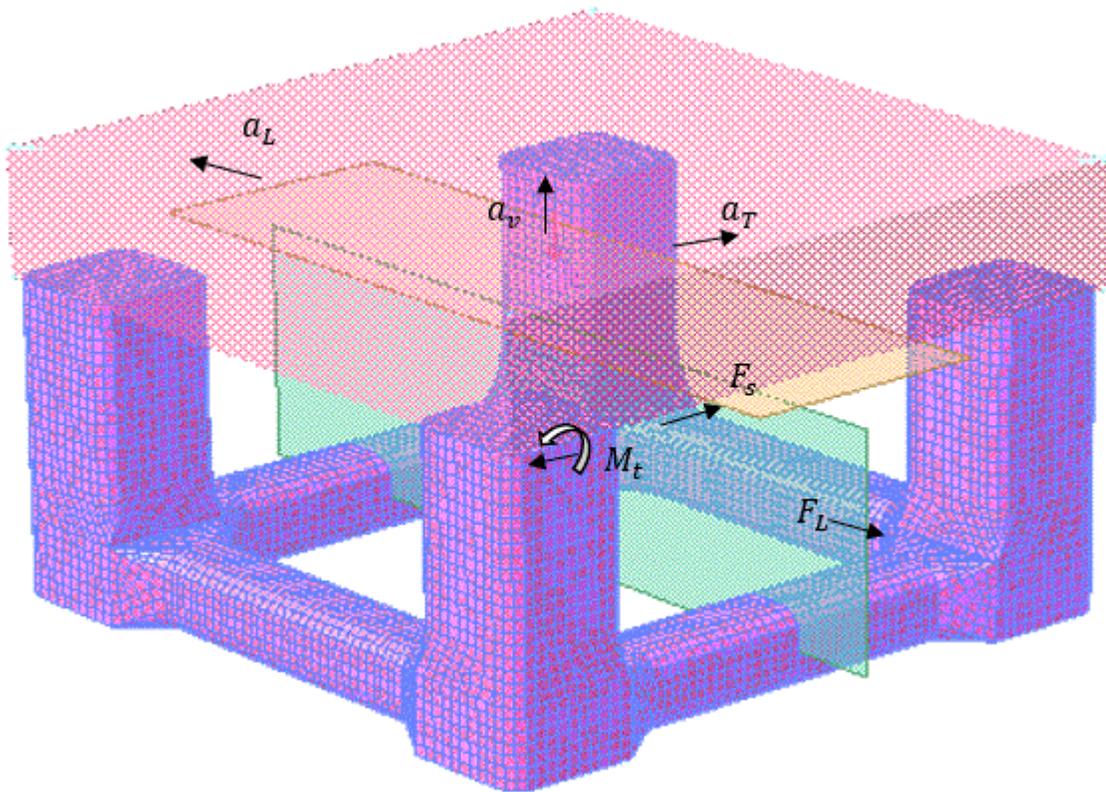


Figura 4.10 Planos para la obtención de elementos mecánicos y aceleraciones.

#### 4.10 Air gap

El air gap es la distancia que se encuentra entre la cresta de la ola y la parte inferior de la cubierta, la cual debe ser un valor positivo, de lo contrario parte de la cubierta se encontraría sumergida y esto generaría un impacto de la ola en la cubierta. En la figura 4.11 se muestra de manera esquemática la localización de los puntos (P) considerados para la obtención del *air gap*. Para las simulaciones se consideran 13 puntos con la finalidad de calcular el *air gap* (en las cuatro esquinas (círculos de color rojo), a la mitad de las longitudes en ambas direcciones (círculos de color azul), a un cuarto de las longitudes (círculos de color verde) y en el centro (círculo color amarillo)).

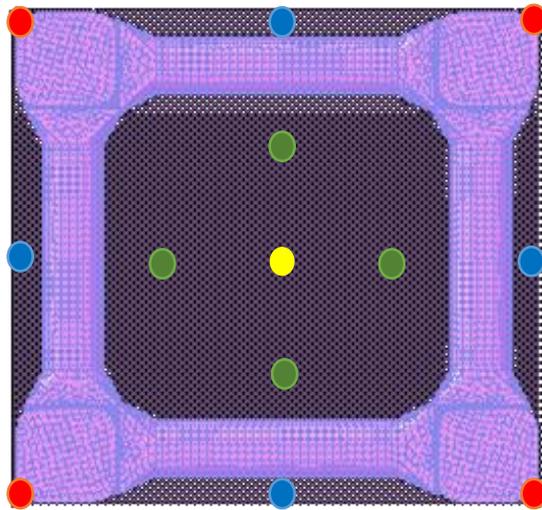


Figura 4.11 Esquematización de la ubicación de los puntos para la obtención del *air gap*.

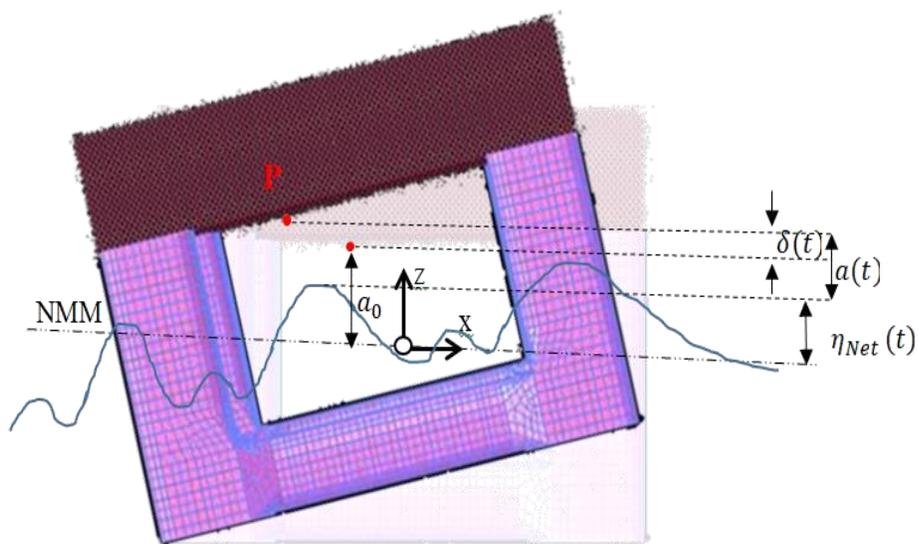


Figura 4.12 Esquematización de la obtención del *air gap*.

Para calcular el *air gap* se aplica la ecuación (4.33).

$$a(t) = a_0 + \delta(t) - \eta_{Net}(t) \quad 4.33$$

donde:  $\delta(t) - \eta_{NET}(t)$ , es el cambio del *air gap* y  $a_0$ , es el *air gap* en aguas tranquilas (*calm water*).

En la figura 4.13 se muestran los resultados del *air gap* para los cuatro anchos de columna y los tres calados, pero manteniendo fijos la altura y el ancho del pontón se observa que en ninguno de estos resultados se obtuvieron valores negativos, ya que por recomendaciones practicas se requiere que los valores de *air gap* deben ser positivos ya que de no ser así la cresta de la ola impactaría en la cubierta mojando los equipos y elementos.

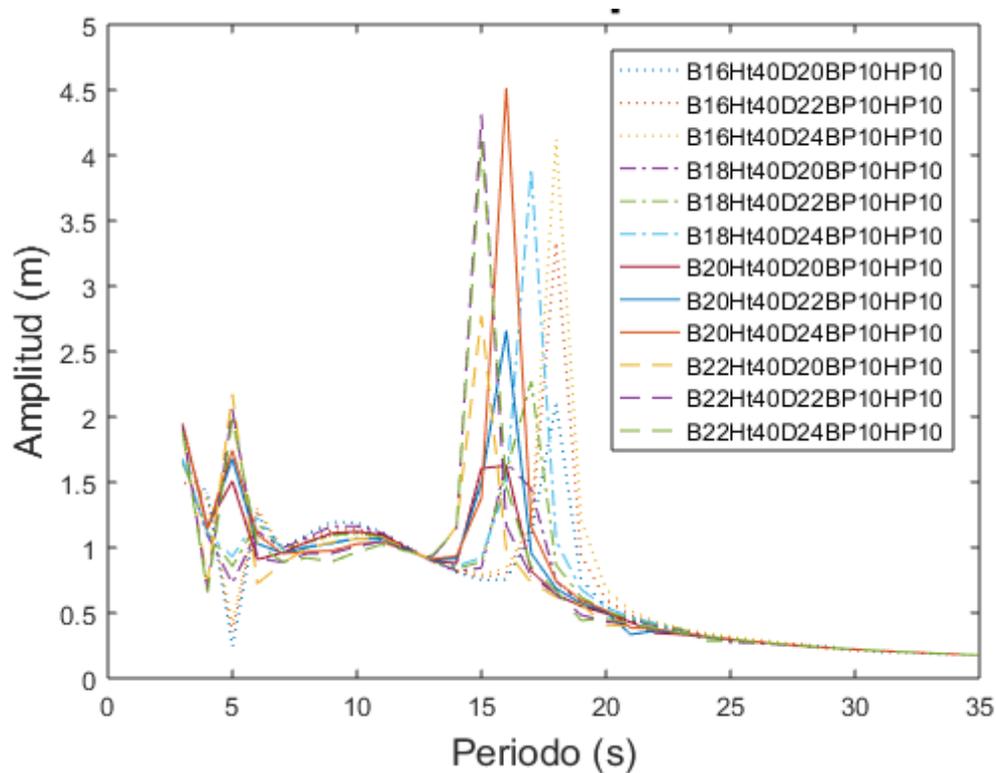


Figura 4.13 Resultados del *air gap* para los diferentes anchos de columna y los diferentes calados.

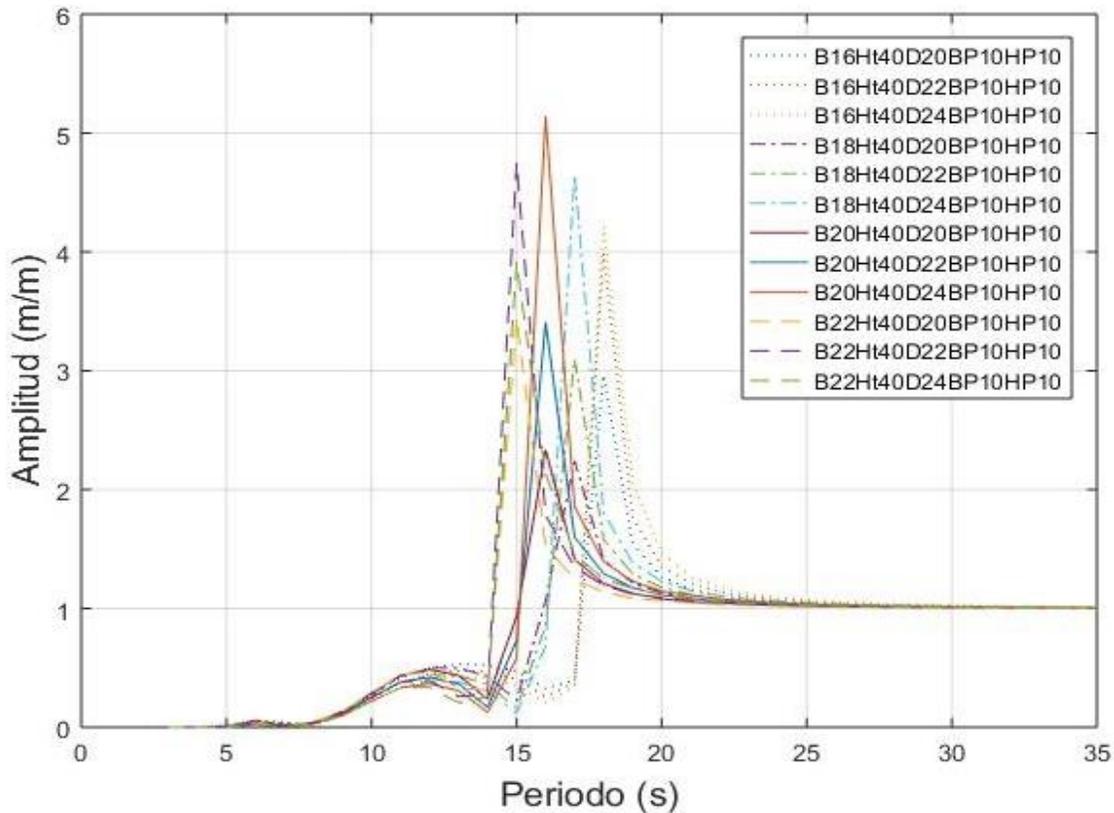
#### 4.11 Operadores de amplitud de respuesta y respuestas máximas

Dada la gran cantidad de información obtenida, se generan gráficas que permitan mostrar el comportamiento de las variables en estudio. En la figura 4.14 se muestran los operadores de amplitud de respuesta para el movimiento en arfada (*heave*), los resultados se presentan de la

siguiente manera, se crean cuatro grupos los cuales corresponden a cada uno de los anchos de la columna definidos anteriormente. Posteriormente, para cada ancho de columna se varía el calado.

Como se aprecia el primer bloque (líneas con puntos) tiene el periodo más grande de los cuatro bloques, lo cual es debido a que el área en el plano del agua es menor y por lo tanto la rigidez hidrostática disminuye dando como resultado una frecuencia angular más pequeña y por ende un periodo mayor.

Por otro lado, si se comparan las respuestas al variar el calado, el periodo se mantiene, pero lo que cambia es la amplitud de la respuesta, esto se debe a que al incrementar el calado aumenta el amortiguamiento, la masa y masa adherida; además disminuye la fuerza de excitación en dirección vertical provocando que la amplitud en la respuesta sea menor.



**Figura 4.14** Operador de amplitud de respuesta del movimiento de arfada variando ancho de columna y calado.

Por otro lado, en la figura 4.15 se muestran los operadores de respuesta del movimiento de arfada, solo que en esta ocasión lo que varía es el ancho de la columna, como se aprecia se presentan

diferencias en el periodo y en la magnitud de la respuesta, tal variación se observa más detalladamente en la figura 4.16 cuando el valor del calado se va modificando.

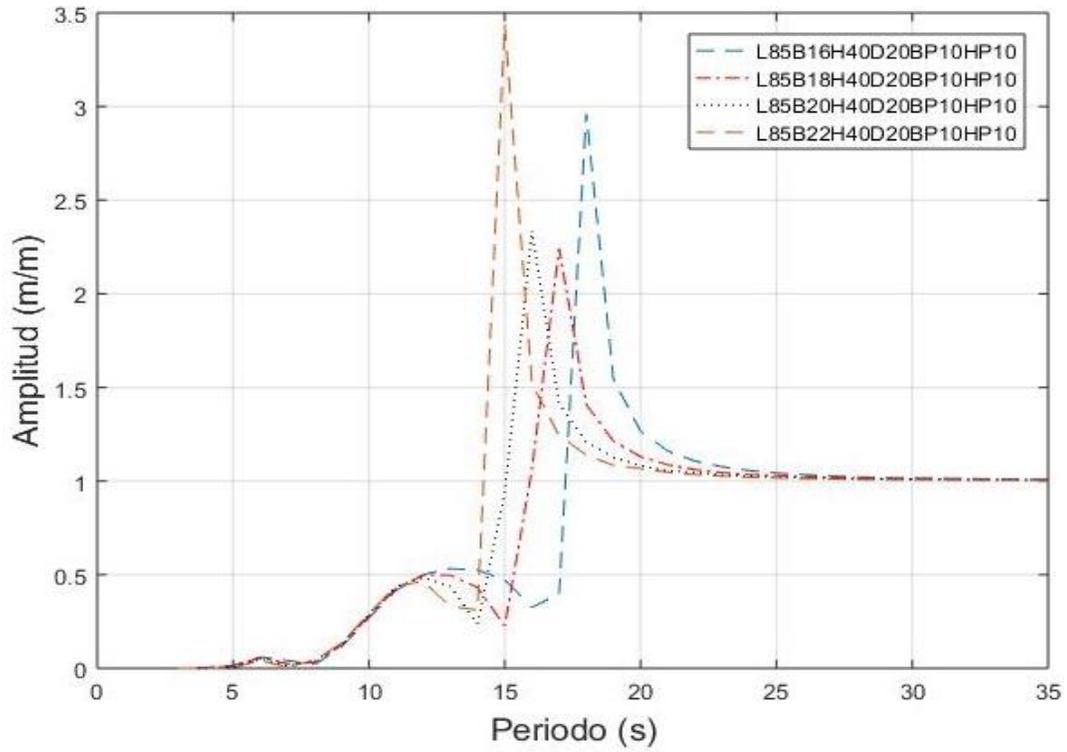


Figura 4.15 Operadores de amplitud de respuesta de arfada con 4 diferentes anchos de columna.

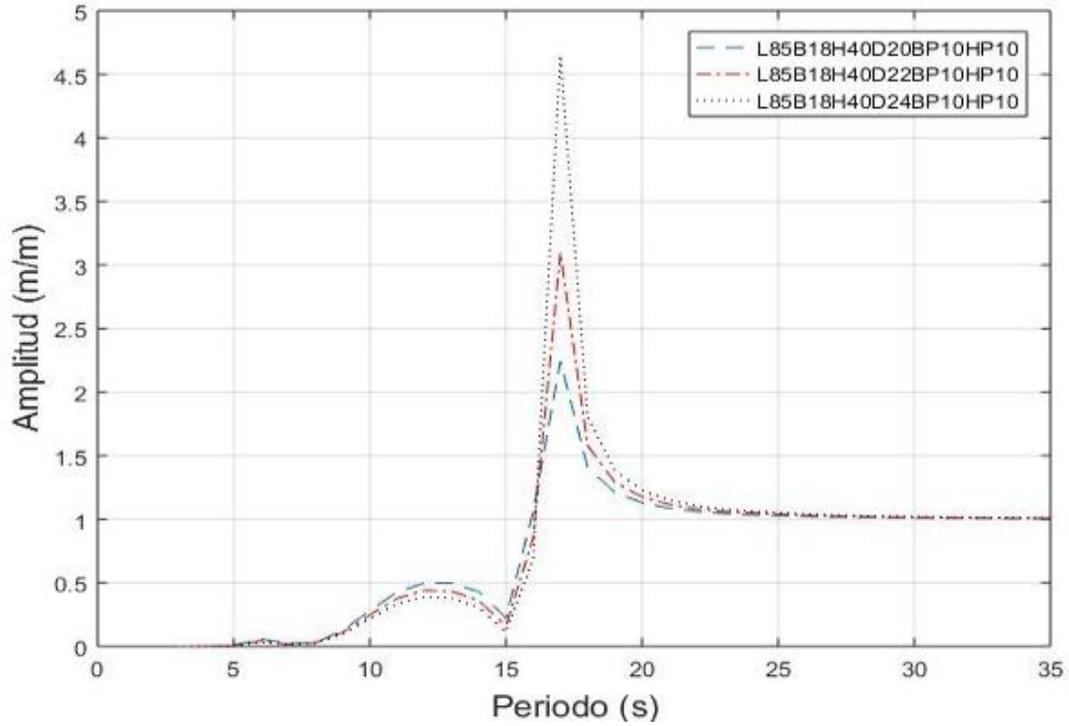


Figura 4.16 Operadores de amplitud de respuesta del movimiento de arfada con 3 diferentes calados.

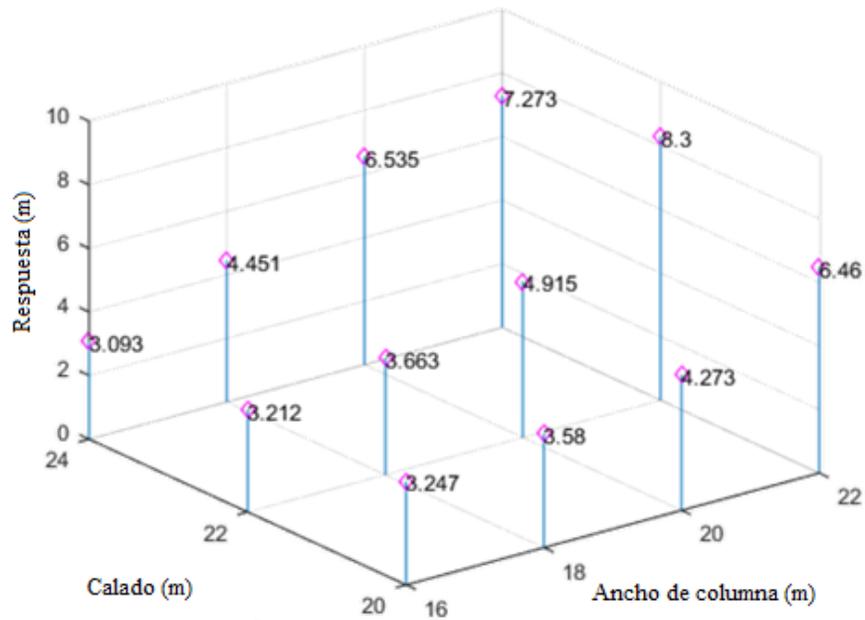


Figura 4.17 Respuesta máxima del movimiento de arfada en la dirección de oleaje de 0° con la variación del ancho de columna y calado.

En la figura 4.17 se muestra la variación de la respuesta máxima del movimiento de arfada considerando el cambio en el ancho de la columna y en el calado, se observa que las respuestas máximas se presentan al considerar una combinación de un ancho de columna de 22 m con un calado de 22 m, y también al combinar un ancho de columna de 20 m con un calado de 24 m.

Lo mismo que se lleva a cabo para el movimiento de arfada se realiza para el movimiento de cabeceo (*pitch*), cabe mencionar que no se presenta el movimiento de balanceo (*roll*) esto debido a la simetría del casco se obtienen los mismos valores de respuesta, pero para una dirección de incidencia del oleaje de  $90^\circ$ , lo cual es de esperarse.

Por otro lado, en la figura 4.18 se muestran los operadores de respuesta del movimiento de cabeceo (*pitch*) en los cuales se puede observar el corrimiento en el periodo debido al cambio de las dimensiones de la columna, y la variación de la amplitud de la respuesta debida al cambio del calado, considerando que son aspectos importantes en el comportamiento de la respuesta máxima, como se puede observar en la figura 4.19, existe una tendencia bastante marcada al incrementar el ancho de la columna. Sin embargo, al modificar el calado la variación en la respuesta máxima no es tan perceptible.

En la figura 4.21 se muestra la respuesta máxima del movimiento de cabeceo (*pitch*), donde se aprecia que la mayor respuesta se encuentra en la combinación de un ancho de columna de 22 m y un calado de 22 m, pero la mínima respuesta se encuentra al combinar un ancho de columna de 20 m y un calado de 24 m.

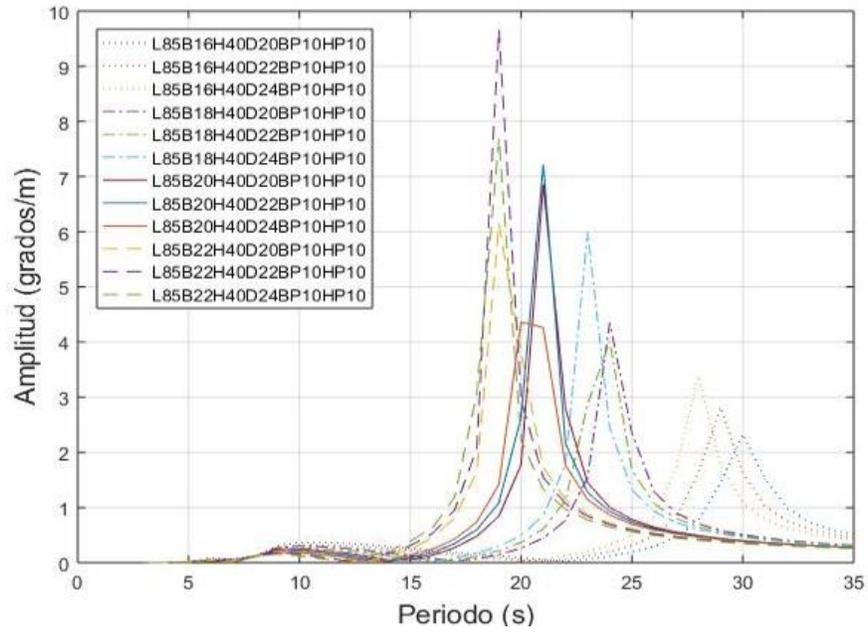


Figura 4.18 Operador de amplitud de respuesta del cabeceo variando el ancho de columna y calado.

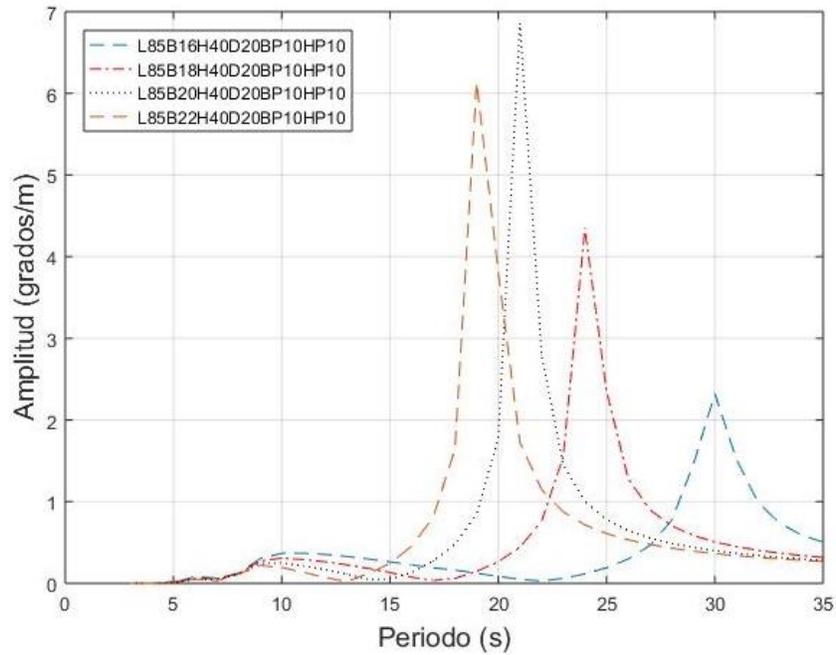


Figura 4.19 Operadores de amplitud de respuesta del movimiento de cabeceo, considerando diferentes anchos de columna.

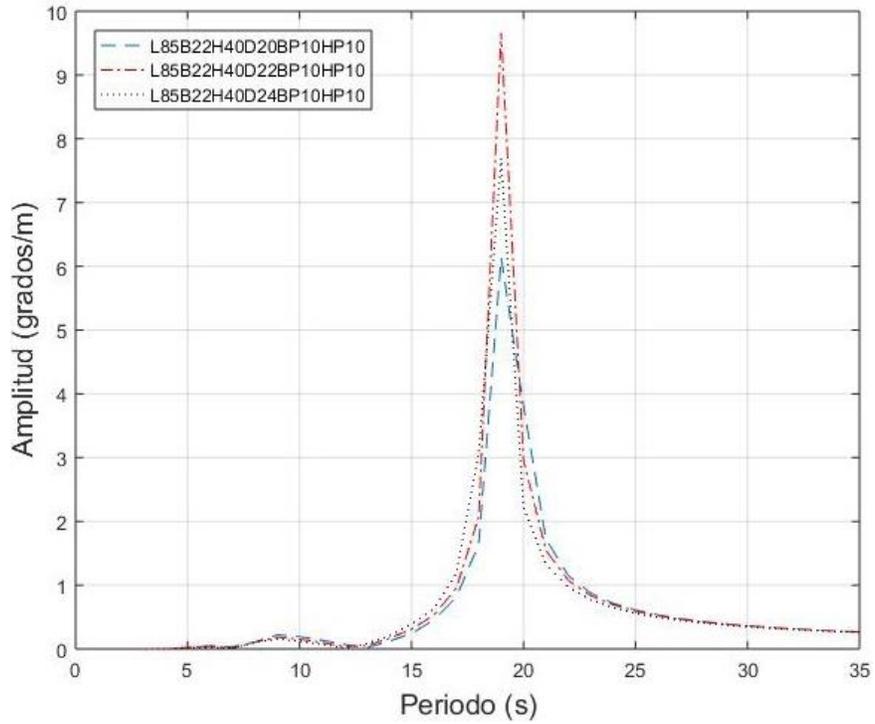


Figura 4.20 Operadores de amplitud de respuesta del cabeceo, considerando diferentes calados.

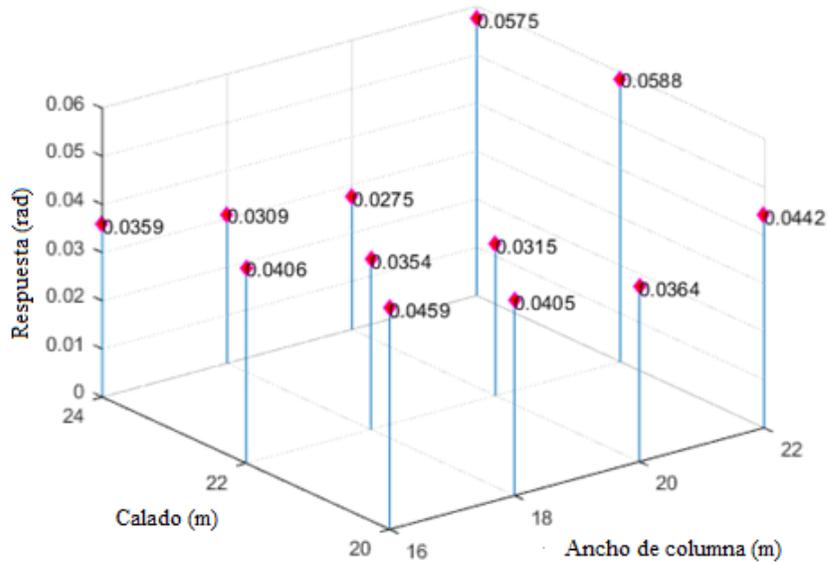


Figura 4.21 Respuesta máxima del movimiento de cabeceo en la dirección de oleaje de  $0^\circ$  considerando la variación del ancho de columna y calado.

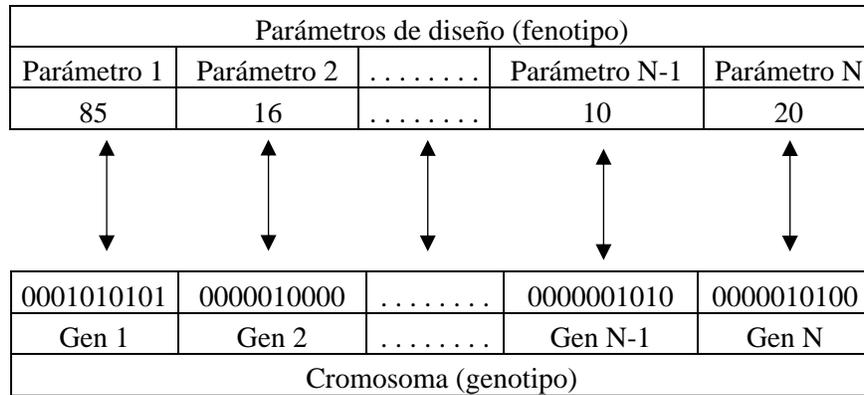
## **5 OPTIMIZACIÓN HIDRODINÁMICA DEL CASCO DE UN SISTEMA FLOTANTE TIPO SEMISUMERGIBLE**

En este capítulo se presenta la metodología para la optimización de sistemas flotantes tipo semisumergibles empleando la herramienta de algoritmos genéticos que viene en la paquetería de Matlab 2020a.

Farkas y Jarmai (2014) definen la optimización como buscar mejores soluciones, que cumplan mejor con los requisitos. Para una estructura óptima los principales requisitos son los siguientes: capacidad de carga (seguridad), manufacturabilidad y economía. Esos requerimientos son cumplidos por una síntesis del sistema estructural, en la cual una función de costo es minimizada considerando las restricciones en el diseño y fabricación (Farkas y Jarmai, 2014). Por lo mencionado anteriormente es importante desarrollar metodologías que permitan minimizar la respuesta de sistemas tipo flotantes, pero que además garanticen la seguridad de los ocupantes y recursos que ahí se emplean.

### **5.1 Algoritmos genéticos**

El algoritmo genético fue inicialmente introducido por John Holland en 1975 (Sivanandam y Deepa, 2008). Los algoritmos genéticos hacen evolucionar a una población de individuos someténdola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica, así como también a una selección de acuerdo con un criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados que sobreviven, y cuales los menos aptos que son descartados. Adicionalmente, existen algunos conceptos básicos que deben ser explicados en este procedimiento los cuales son: fenotipo, el cual define las características individuales en el dominio de la solución (parámetros de diseño), los cuales son codificados en una cadena de caracteres binaria referida como un cromosoma (genotipo), y cada característica individual en el cromosoma es llamado un gen. En la figura 5.1 se muestra la relación entre las características individuales en el modelo (fenotipo) y cromosoma (genotipo) representación de un individuo de la población. Los números representan un ejemplo básico de algunos valores relacionados entre el fenotipo y el genotipo.



**Figura 5.1 Modelo individual de las características y genes y la relación entre el fenotipo y el genotipo**

El procedimiento de algoritmos genéticos está basado en un proceso iterativo que permite que los individuos de una población se involucren en cada paso. Los elementos fundamentales del procedimiento de los algoritmos genéticos son los siguientes:

- 1.- Población inicial: una población inicial es generada aleatoriamente.
- 2.- Selección: basada en los valores de la función de aptitud, los padres son seleccionados para crear una nueva generación.
- 3.- Operadores: el operador de cruzamiento combina los genes de los padres seleccionados para crear un nuevo hijo y el operador de mutación hace cambios aleatorios de un solo padre para crear un nuevo hijo.
- 4.- Reemplazo: la población actual es reemplazada con los hijos creados para formar la siguiente generación.
- 5.- Término: el procedimiento termina si este alcanza el número máximo de las generaciones especificadas o si las diferencias entre la generación previa y la actual están por debajo de la tolerancia especificada.

Existen diferentes métodos para seleccionar los padres de las nuevas generaciones. Típicamente los algoritmos genéticos trabajan con los valores de aptitud individuales. El valor de aptitud es equivalente al valor de la función objetivo que es usada para conducir la optimización. Algunos de los métodos son:

- a) Selección por ruleta (*Roulette wheel*): El muestreo estocástico con remplazo, o selección por ruleta, es la técnica de selección más usada. Esta técnica consiste, en palabras coloquiales, en asignar un segmento de la ruleta a los individuos en base a la aptitud de estos y la aptitud total de la población actual, y girar la ruleta tantas veces como selecciones se requieran. El procedimiento es el siguiente:
1. Calcular el valor objetivo  $f(x_i)$  para cada cromosoma  $x_i$
  2. Calcular el valor objetivo total para la población:
  3. Calcular la probabilidad de selección  $p_k$  para cada cromosoma  $x_i$
  4. Calcular la probabilidad acumulada  $p_i$  para cada cromosoma  $x_i$

Después la selección se hace de la siguiente manera con  $i$  repeticiones:

1. Generar un número al azar  $p$  en un rango  $[0, 1]$ .
  2. Escoger el  $i$ -ésimo cromosoma  $x_i$  tal que  $q_{i-1} < p \leq q_i$
- b) Selección aleatoria: Los padres son seleccionados aleatoriamente de la población considerando sus valores de aptitud.
- c) Selección de rango: Los individuos son ordenados de acuerdo con su rango de aptitud. De esta manera si tenemos  $n$  cromosomas el individuo con peor aptitud se le asignará un 1 y el que tenga mejor aptitud se le asignará la  $n$ .
- d) La selección por torneos: Consiste en seleccionar un número  $N_u$  de individuos de la población aleatoriamente y de este conjunto de individuos seleccionar el que tenga el mejor valor de aptitud. Este proceso se repite todas las veces necesarias hasta formar la nueva población para ser padre.
- e) Elitismo: Los primeros mejores o alguno de los mejores permanecen para la siguiente generación.

Las ventajas de los algoritmos genéticos (AGs) son:

Intrínsecamente paralelos: la mayoría de los otros algoritmos son en serie y solo pueden explorar el espacio de soluciones hacia una solución en una dirección al mismo tiempo y, por lo tanto, la solución que descubren resulta subóptima, y no se puede hacer otra cosa que abandonar todo el trabajo hecho y comenzar de nuevo. Sin embargo, ya que los AGs tienen descendencia múltiple,

pueden explorar el espacio de soluciones en múltiples direcciones a la vez. Además, les permite evaluar implícitamente muchos esquemas a la vez, los algoritmos genéticos funcionan particularmente bien resolviendo problemas cuyo espacio de soluciones potenciales es realmente grande, demasiado vasto para hacer una búsqueda exhaustiva en un tiempo razonable.

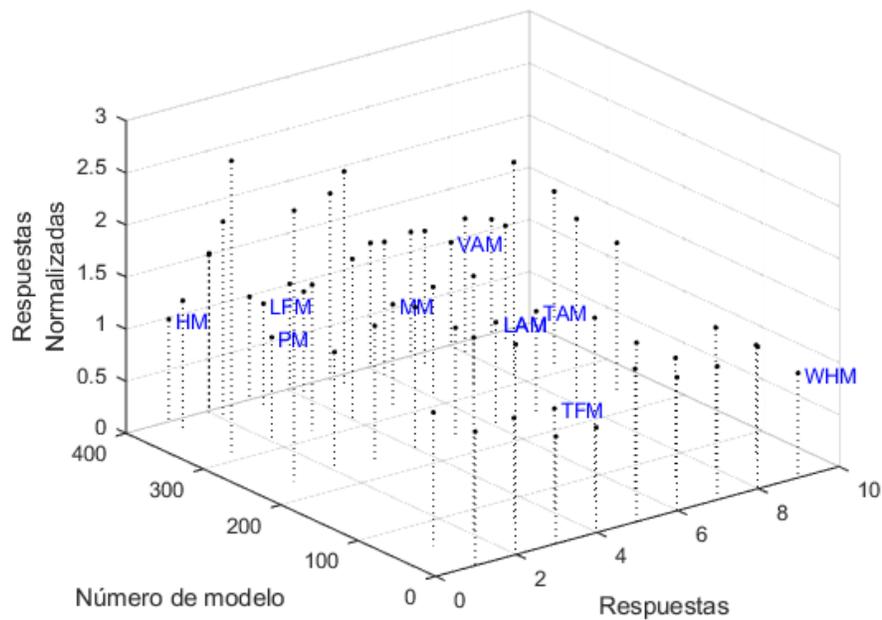
Otra ventaja notable es que estos se desenvuelven bien en problemas con un panorama adaptativo complejo: aquéllos en los que la función de aptitud es discontinua, ruidosa, cambia con el tiempo, o tiene muchos óptimos locales. La mayoría de los problemas prácticos tienen un espacio de soluciones vasta, imposible de explorar exhaustivamente, por lo tanto, el reto es evitar los óptimos locales, es decir, las soluciones que son mejores que todas las que son similares a ella, pero que no son mejores que otras soluciones distintas situadas en algún otro lugar del espacio de soluciones.

Otro aspecto que es importante destacar de los algoritmos genéticos es su habilidad para manipular muchos parámetros simultáneamente. Muchos problemas de la vida real no pueden definirse en términos de un único valor que hay que minimizar o maximizar, sino que deben expresarse en términos de múltiples objetivos, a menudo involucrando contrapartidas: uno sólo puede mejorar a expensas de otro. Si una solución particular a un problema con múltiples objetivos optimiza un parámetro hasta el punto en el que ese parámetro no puede mejorarse más sin causar una correspondiente pérdida de calidad en algún otro parámetro, esa solución se llama óptimo de Pareto o no dominada.

Finalmente, los AGs en lugar de utilizar información específica conocida a priori para guiar cada paso y realizar cambios encaminados expresamente hacia la mejora, estos realizan cambios aleatorios en sus soluciones elegidas y luego utilizan la función de aptitud para determinar si esos cambios producen una mejora. Como sus decisiones están basadas en la aleatoriedad, todos los caminos de búsqueda posibles están abiertos teóricamente a un AGs. Por otro lado, cualquier estrategia de resolución de problemas que dependa de un conocimiento previo, debe inevitablemente comenzar descartando muchos caminos a priori, perdiendo así cualquier solución nueva que pueda existir.

En las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran las respuestas normalizadas con respecto a cada uno de los valores mínimos de cada respuesta máxima, en uno de los ejes se encuentran cada una de las repuestas, las cuales se encuentra representada con números (1=*arfada*, 2= *cabeceo*, 3=fuerza longitudinal,4=fuerza transversal, 5=momento, 6=aceleración longitudinal, 7=aceleración

transversal, 8=aceleración vertical y 9=peso del casco), en otro de los ejes se coloca el número de modelo correspondiente al valor mínimo de la respuesta máxima y el eje vertical se encuentran los valores normalizados de cada una de las variables de respuesta. Como se aprecia ninguno de los modelos garantiza el valor mínimo en todas las variables de respuesta, por ejemplo, el valor mínimo en el desplazamiento vertical corresponde al mínimo valor en la aceleración vertical como es de esperarse por tal correlación, pero en relación con las otras variables de respuesta no corresponden con el valor mínimo. Otro caso en el cual se presenta es en la respuesta del movimiento de cabeceo y el momento. Finalmente, el que se presenta entre las aceleraciones vertical y transversal, debido a la geometría del casco.



**Figura 5.2 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 100 MBD.**

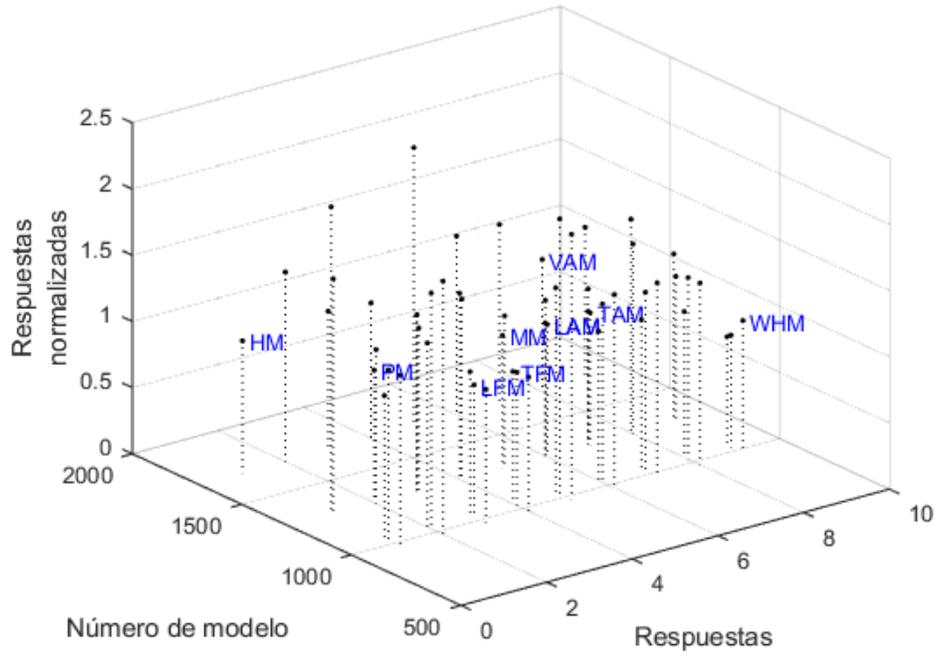


Figura 5.3 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 150 MBD.

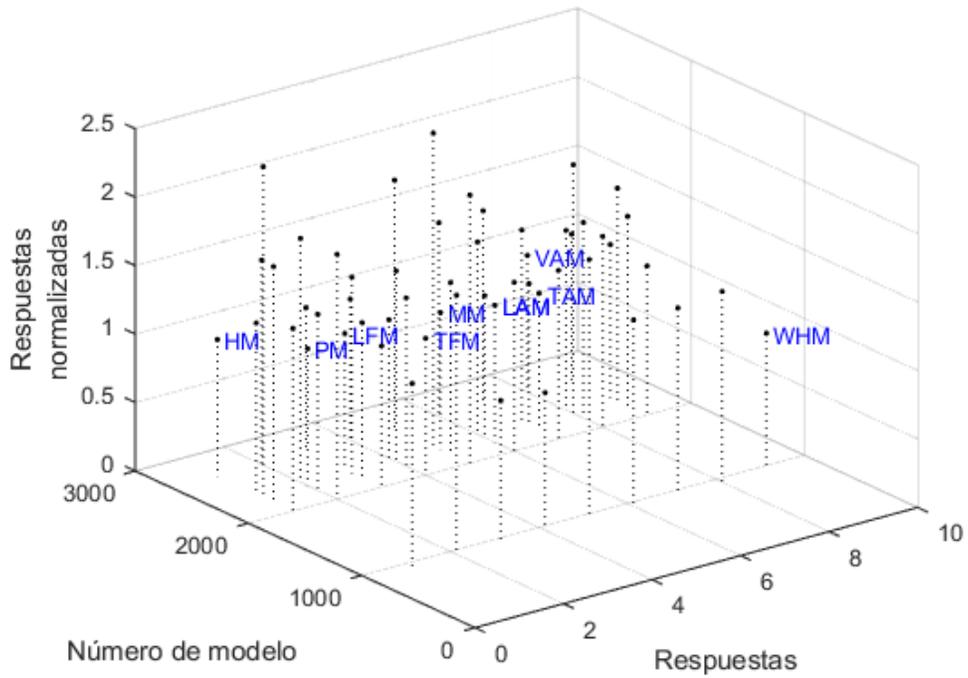


Figura 5.4 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 200 MBD.

## 5.2 Metodología de optimización

La metodología aplicada en este trabajo es la siguiente y se observa en la figura 5.5:

- 1.- Primero se generan las simulaciones para cada volumen de producción considerado con sus correspondientes combinaciones de variables de diseño (ancho de la columna, altura total de la columna, distancia paño a paño entre columnas, calado, altura y ancho del pontón) como se muestra en la tabla 4.1.
- 2.- Posteriormente se verifica que se cumpla con la estabilidad en cada uno de los modelos si el modelo cumple se continua con el proceso de no ser así se proponen otros límites y se repite este paso.
- 3.- Una vez que los modelos cumplen con la estabilidad se calcula la respuesta hidrodinámica para cada uno de los sistemas tipo flotantes.
- 4.- En el siguiente paso se hace uso de un contorno ambiental para un periodo de retorno de 100 años, en el cual se seleccionan 18 espectros de oleaje ( $H_s$  y  $T_p$ ).
- 5.- En este paso se obtienen las respuestas máximas más probables las cuales se obtienen de la siguiente forma:

La respuesta máxima más probable que ocurre dentro de un intervalo de tiempo de respuesta máxima de  $N_c$  esta aproximadamente dado por la ecuación (5.1).

$$MPM_R = \sqrt{2} \cdot \sigma_x [\sqrt{1 - \varepsilon^2} \cdot N_c]^{1/2} \quad 5.1$$

En caso de un espectro de banda angosta (es decir,  $\varepsilon = 0$ ), la máxima respuesta probable se calcula con la ecuación (5.2).

$$MPM_R = \sqrt{2} \cdot \sigma_x \sqrt{\ln N_s} \quad 5.2$$

donde:  $N_s$ , representa el número de cruces por cero en el estado de mar a corto plazo. Bajo condiciones de banda angosta, el número por cruces por cero,  $N_s$ , es igual al número de máximos de la respuesta,  $N_c$ . El término  $\sigma_x$ , es la desviación de estándar de la respuesta y  $\varepsilon$ , es el parámetro de ancho espectral.

El número de cruces por cero,  $N_s$ , se determina con la ecuación (5.3) como la duración del estado de mar a corto plazo,  $D_s$ , entre el periodo de respuesta medio de cruces por cero  $T_x$ .

$$N_s = D_s/T_x \quad 5.3$$

Cuando se ve en las estadísticas de valor extremo. El valor de la respuesta máxima más probable tiene un 63% de probabilidad de ser excedido. En otras palabras, que el 63% de las estructuras tipo flotantes idénticas ubicadas en la misma área oceánica experimentará un valor máximo más grande que la respuesta máxima más probable (DNV manual, 2007).

6.- Una vez que las respuestas máximas más probables son obtenidas se normalizar con respecto a los valores mínimos de cada una de ellas formando superficies de respuesta en donde son aplicados los algoritmos genéticos tomando en cuenta las variables de diseño.

De forma general las funciones de respuesta con base en dichas variables quedan definidas mediante el ajuste como se muestra en la ecuación (5.4).

$$[X]\{\alpha\} = \{R_i\} \quad 5.4$$

Despejando el vector  $\{\alpha\}$ , que es el vector de los coeficientes, el cual queda definido en la ecuación (5.5).

$$\{\alpha\} = [[X]^T[X]]^{-1}[X]^T\{R_i\} \quad 5.5$$

donde:  $\{\alpha\}$ , es el vector de los coeficientes para llevar a cabo el ajuste,  $[X]$  y  $[X]^T$ , son la matriz que se genera a partir de las variables de diseño y sus relaciones entre ellas y su matriz transpuesta, respectivamente y  $\{R_i\}$ , es el vector de las respuestas, obtenido a partir de las simulaciones de cada combinación y correspondiente al tipo de respuesta considerada (desplazamientos, fuerzas, momento o aceleraciones).

La función de aptitud considera las seis variables de diseño tomando en cuenta los términos lineales, cuadráticos y sus combinaciones llegando a un total de 57 términos, la cual se muestra a continuación de manera expandida.

$$\begin{aligned}
FA = & \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \alpha_4 x_4 + \alpha_5 x_5 + \alpha_6 x_6 + \alpha_7 x_1^2 + \alpha_8 x_2^2 + \alpha_9 x_3^2 + \alpha_{10} x_4^2 + \alpha_{11} x_5^2 \\
& + \alpha_{12} x_6^2 + \alpha_{13} x_1 x_2 + \alpha_{14} x_1 x_3 + \alpha_{15} x_1 x_4 + \alpha_{16} x_1 x_5 + \alpha_{17} x_1 x_6 + \alpha_{18} x_2 x_3 \\
& + \alpha_{19} x_2 x_4 + \alpha_{20} x_2 x_5 + \alpha_{21} x_2 x_6 + \alpha_{22} x_3 x_4 + \alpha_{23} x_3 x_5 + \alpha_{24} x_3 x_6 + \alpha_{25} x_4 x_5 \\
& + \alpha_{26} x_4 x_6 + \alpha_{27} x_5 x_6 + \alpha_{28} x_1 x_2^2 + \alpha_{29} x_1 x_3^2 + \alpha_{30} x_1 x_4^2 + \alpha_{31} x_1 x_5^2 + \alpha_{32} x_1 x_6^2 \\
& + \alpha_{33} x_2 x_3^2 + \alpha_{34} x_2 x_4^2 + \alpha_{35} x_2 x_5^2 + \alpha_{36} x_2 x_6^2 + \alpha_{37} x_3 x_4^2 + \alpha_{38} x_3 x_5^2 + \alpha_{39} x_3 x_6^2 \\
& + \alpha_{40} x_4 x_5^2 + \alpha_{41} x_4 x_6^2 + \alpha_{42} x_5 x_6^2 + \alpha_{43} x_1^2 x_2 + \alpha_{44} x_1^2 x_3 + \alpha_{45} x_1^2 x_4 + \alpha_{46} x_1^2 x_5 \\
& + \alpha_{47} x_1^2 x_6 + \alpha_{48} x_2^2 x_3 + \alpha_{49} x_2^2 x_4 + \alpha_{50} x_2^2 x_5 + \alpha_{51} x_2^2 x_6 + \alpha_{52} x_3^2 x_4 + \alpha_{53} x_3^2 x_5 \\
& + \alpha_{54} x_3^2 x_6 + \alpha_{55} x_4^2 x_5 + \alpha_{56} x_4^2 x_6 + \alpha_{57} x_5^2 x_6
\end{aligned}$$

7.- Una vez obtenidas las funciones de ajuste de las respuestas con base en las variables de diseño, se implementa la herramienta de algoritmos genéticos, la cual viene incorporada en el programa de Matlab (2020<sup>a</sup>), para obtener los modelos óptimos para cada uno de los volúmenes de producción.

8.- Finalmente, se obtiene la configuración del casco óptimo de acuerdo con las variables de diseño definidas y la metodología es aplicada a cada uno de los volúmenes de producción seleccionados.

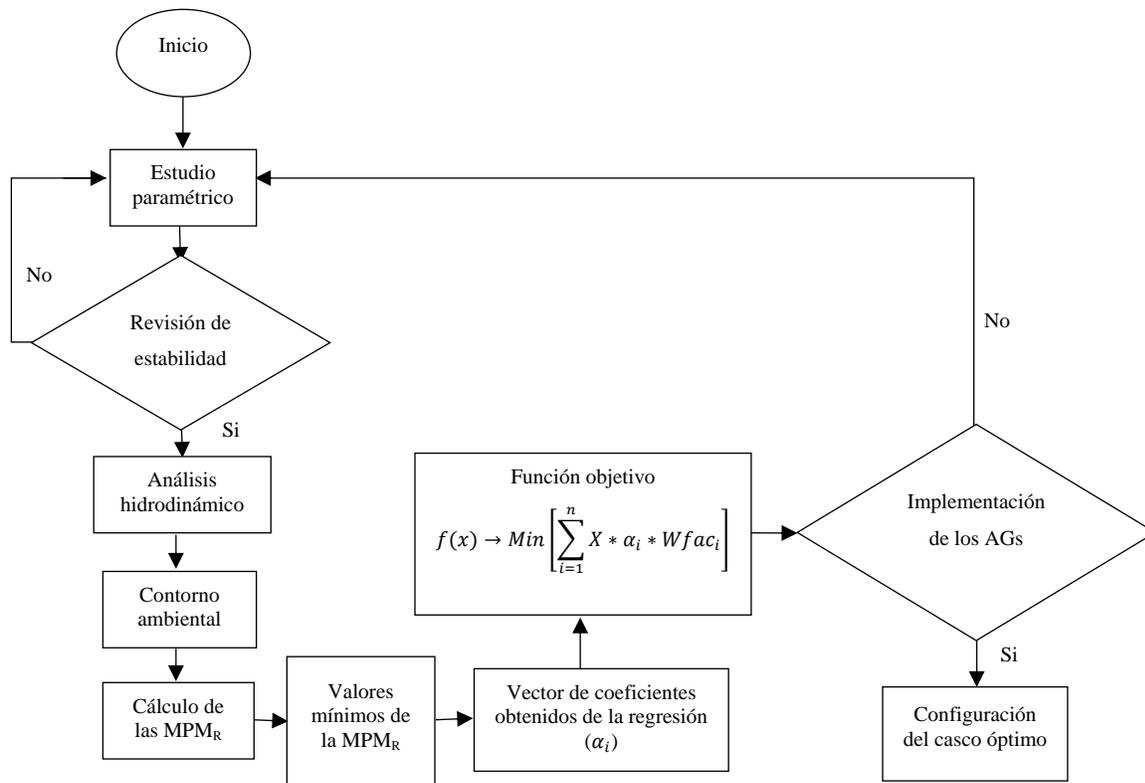


Figura 5.5 Diagrama de flujo de la optimización de la configuración del casco de SFP tipo semisumergibles

### 5.3 Resultados de la implementación de los AGs de los tres casos de estudio

Una vez obtenidas las superficies de respuesta e implementada la herramienta de AGs son aplicados diferentes factores de peso para cada una de las respuestas como se presentan en la tabla 5.1 por ejemplo, en el primer caso se considera el mismo factor de peso para todas las respuestas. Mientras, que del segundo al noveno caso el factor de peso es del 100% en una de las respuestas y el resto con un valor de cero, esto se lleva a cabo para calibrar el método usando los algoritmos genéticos y comparando con lo que se obtiene de manera manual. Finalmente, en los últimos dos casos el factor de peso fue mayor en la respuesta del peso del casco. De estos factores se obtienen los siguientes resultados.

**Tabla 5.1 Distribución de los factores de peso para cada variable**

| Arfada | Cabeceo | Fuerza longitudinal | Fuerza transversal | Momento | Aceleración longitudinal | Aceleración transversal | Aceleración vertical | Peso del casco |
|--------|---------|---------------------|--------------------|---------|--------------------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| 11.11% | 11.11%  | 11.11%              | 11.11%             | 11.11%  | 11.11%                   | 11.11%                  | 11.11%               | 11.11%         |
| 0 %    | 0 %     | 0 %                 | 0 %                | 0 %     | 0 %                      | 0 %                     | 0 %                  | 100 %          |
| 100 %  | 0 %     | 0 %                 | 0 %                | 0 %     | 0 %                      | 0 %                     | 0 %                  | 0 %            |
| 0 %    | 100 %   | 0 %                 | 0 %                | 0 %     | 0 %                      | 0 %                     | 0 %                  | 0 %            |
| 0 %    | 0 %     | 100 %               | 0 %                | 0 %     | 0 %                      | 0 %                     | 0 %                  | 0 %            |
| 0 %    | 0 %     | 0 %                 | 100 %              | 0 %     | 0 %                      | 0 %                     | 0 %                  | 0 %            |
| 0 %    | 0 %     | 0 %                 | 0 %                | 100 %   | 0 %                      | 0 %                     | 0 %                  | 0 %            |
| 0 %    | 0 %     | 0 %                 | 0 %                | 0 %     | 100 %                    | 0 %                     | 0 %                  | 0 %            |
| 0 %    | 0 %     | 0 %                 | 0 %                | 0 %     | 0 %                      | 100 %                   | 0 %                  | 0 %            |
| 0 %    | 0 %     | 0 %                 | 0 %                | 0 %     | 0 %                      | 0 %                     | 100 %                | 0 %            |
| 5.56%  | 5.56%   | 5.56%               | 5.56%              | 5.56%   | 5.56%                    | 5.56%                   | 5.56%                | 55.56%         |
| 3.57%  | 3.57%   | 3.57%               | 3.57%              | 3.57%   | 3.57%                    | 3.57%                   | 3.57%                | 71.43%         |
| 2.63%  | 2.63%   | 2.63%               | 2.63%              | 2.63%   | 2.63%                    | 2.63%                   | 2.63%                | 78.95%         |

En la tabla 5.2 se muestra la comparación de los resultados entre los algoritmos genéticos y de Excel para el volumen de producción de 100 MBD, los resultados se presentan en términos de las dimensiones de las variables de estudio y del peso del casco. De acuerdo con los resultados que se observan en la tabla se destaca lo siguiente: los modelos de las casillas de color verde muestran una pequeña variación entre los resultados obtenidos de los AGs y de Excel, teniendo incrementos en el peso del casco del 4% y 14% para los modelos 73 y 397, respectivamente. Por otro lado, para los modelos con las casillas de color amarillo los resultados obtenidos de los AGs son menores que los obtenidos de Excel, como es el caso de los modelos 316, 379, 55, 316 y 235 con una disminución en el peso del casco del 24, 2, 2, 6 y 11%. Con respecto a los modelos de las casillas de color blanco no existen variaciones en términos del peso del casco ya que los resultados obtenidos de la implementación de los algoritmos genéticos y de la hoja de Excel son iguales.

El modelo óptimo para un volumen de producción de 100 MBD sería el modelo 19 en términos del peso del casco, sin embargo, ese modelo no es elegido como el óptimo debido a la distancia libre que queda entre la cubierta y el calado, además de que no cumple por estabilidad, por lo que el modelo óptimo es el 73 ya que la distancia libre es mayor y en términos de peso el modelo 73 tiene un 13% más que el modelo 19, sin embargo, lo más importante es garantizar que se cumpla con una buena estabilidad. Posteriormente, en la tabla 5.3 se muestran los resultados para el volumen de producción de 150 MBD, de los cuales se observa lo siguiente: para los modelos 1045 y 1693 las dimensiones del ancho y altura de la columna obtenidas usando el método de los algoritmos genéticos en términos del peso del casco tienen un incremento del 6 y 7%, respectivamente en comparación a las dimensiones que se obtienen usando Excel.

Mientras, que para los modelos 1027, 1693 y 1288 ocurre lo contrario las dimensiones obtenidas con el uso de los AGs son menores con respecto a las obtenidas con Excel por lo que en términos del peso del casco la variación es del 7, 3 y 7.5 %. Finalmente, para los modelos 973, 1045 y 991 la diferencia se presenta en el calado, pero en términos del peso del casco no hay ningún cambio, esto se debe a que el valor del calado no es una dimensión geométrica de la estructura, por lo que esta variable modifica la respuesta, debido a que se modifica el desplazamiento de la estructura por medio de agua de lastre, pero no el peso del casco. Para el segundo caso el modelo óptimo es el modelo 1045 tomando en cuenta las mismas consideraciones que en el volumen de producción de 100 MBD. Finalmente, los resultados para el volumen de producción de 200 MBD se presentan en la tabla 5.4, los modelos 2017, 2665, 2323, 1999 y 2665 observan en algunos casos valores

menores en las dimensiones del ancho y altura de la columna, ancho del pontón o hasta en la distancia entre columnas. En términos del peso del casco existen variaciones entre el 1 y el 5 % con respecto a los resultados encontrados con el método de algoritmos genéticos y de los obtenidos con Excel.

Por otro lado, para el modelo 2170 el valor en la dimensión del ancho de columna encontrado con los AGs es mayor con respecto al que se obtiene con el uso de Excel, por lo que en términos del peso del casco se observa un incremento de hasta el 6%. Sin embargo, para los modelos 2260 y 1963 no se observa variación en los resultados encontrados. El modelo óptimo para el tercer volumen de producción es el modelo 2017, que a pesar de que no es el modelo con menor peso sino más bien porque cumple con una dimensión adecuada entre la altura de la columna y el calado, ya que además del peso es importante considerar que el modelo óptimo también cumpla con la estabilidad, ya que el salvaguardar la vida de la gente y la integridad estructural de la plataforma es la parte fundamental en un buen diseño.

**Tabla 5.2 Comparación de resultados entre los AGs y Excel del volumen de producción de 100 MBD**

| Ancho de columna (m) | Altura de columna (m) | Distancia entre columnas (m) | Calado (m) | Ancho de pontón (m) | Altura de pontón (m) | Herramienta | Número de modelo | Peso del casco (t) | Suma |
|----------------------|-----------------------|------------------------------|------------|---------------------|----------------------|-------------|------------------|--------------------|------|
| 16.5                 | 46                    | 86                           | 24         | 10                  | 10                   | AGs         | 73               | 21,569             | 1.19 |
| 16                   | 46                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 20,667             | 1.2  |
| 16                   | 40                    | 85                           | 20         | 10                  | 10                   | AGs         | 1                | 19,089             | 1.0  |
| 16                   | 40                    | 85                           | 20         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 19,089             | 1.0  |
| 16                   | 46                    | 95                           | 24         | 13                  | 10                   | AGs         | 397              | 24,293             | 0.9  |
| 16                   | 46                    | 90                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 21,303             | 1.0  |
| 19                   | 45.5                  | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | AGs         | 316              | 25,527             | 1.1  |
| 22                   | 46                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 31,716             | 1.0  |
| 16                   | 46                    | 86.5                         | 20         | 10                  | 10                   | AGs         | 379              | 20,858             | 1.0  |
| 16                   | 46                    | 90                           | 20         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 21,303             | 1.0  |
| 16                   | 44.5                  | 85                           | 20         | 10                  | 10                   | AGs         | 55               | 20,207             | 1.0  |
| 16                   | 46                    | 85                           | 20         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 20,667             | 1.0  |
| 21                   | 45                    | 90                           | 24         | 10                  | 10                   | AGs         | 316              | 29,786             | 1.2  |
| 22                   | 46                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 31,716             | 1.0  |
| 18.5                 | 46                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | AGs         | 235              | 24,807             | 1.0  |
| 20                   | 46                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 27,609             | 1.0  |
| 18.5                 | 46                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | AGs         | 235              | 24,807             | 1.0  |
| 20                   | 46                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 27,609             | 1.0  |
| 16.5                 | 46                    | 95                           | 24         | 12                  | 10                   | AGs         | 397              | 24,256             | 0.99 |
| 16                   | 46                    | 90                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 21,303             | 1.0  |
| 16                   | 42                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | AGs         | 19               | 19,615             | 1.1  |
| 16                   | 40                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 19,089             | 1.0  |
| 16                   | 40                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | AGs         | 19               | 19,089             | 1.1  |
| 16                   | 40                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 19,089             | 1.1  |
| 16                   | 40                    | 85                           | 23.75      | 10                  | 10                   | AGs         | 19               | 19,089             | 1.1  |
| 16                   | 40                    | 85                           | 24         | 10                  | 10                   | Excel       |                  | 19,089             | 1.0  |

**Tabla 5.3 Comparación de resultados entre los AGs y Excel del volumen de producción de 150 MBD**

| Ancho de columna (m) | Altura de columna (m) | Distancia entre columnas (m) | Calado (m) | Ancho del pontón (m) | Altura del pontón (m) | Herramienta | Numero de modelo | Peso del casco (t) | Suma |
|----------------------|-----------------------|------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|-------------|------------------|--------------------|------|
| 19.5                 | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | AGs         | 1045             | 28,830             | 1.19 |
| 18                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 27,115             | 1.18 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                    | AGs         | 973              | 25,104             | 1.00 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 25,104             | 1.00 |
| 18.25                | 45.5                  | 95                           | 24         | 14                   | 12                    | AGs         | 1693             | 30,973             | 0.97 |
| 18                   | 46                    | 95                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 28,992             | 1.00 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | AGs         | 1288             | 39,020             | 1.02 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 39,020             | 1.00 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                    | AGs         | 1027             | 25,104             | 1.02 |
| 18                   | 46                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 27,115             | 1.00 |
| 18                   | 45                    | 85                           | 23.5       | 12                   | 12                    | AGs         | 1045             | 27,115             | 1.00 |
| 18                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 27,115             | 1.00 |
| 24                   | 40.5                  | 87                           | 24         | 12                   | 12                    | AGs         | 1288             | 36,084             | 1.24 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 39,020             | 1.00 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 23.50      | 12                   | 12                    | AGs         | 1279             | 39,020             | 0.97 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 22         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 39,020             | 1.00 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 23.5       | 12                   | 12                    | AGs         | 1279             | 39,020             | 0.97 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 22         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 39,020             | 1.00 |
| 18.75                | 44.5                  | 95                           | 24         | 12.25                | 12                    | AGs         | 1693             | 29,934             | 0.99 |
| 18                   | 40                    | 95                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 28,992             | 1.00 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 23.5       | 12                   | 12                    | AGs         | 991              | 25,104             | 1.12 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 25,104             | 1.1  |
| 18                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | AGs         | 991              | 25,104             | 1.07 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 25,104             | 1.06 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 23.75      | 12                   | 12                    | AGs         | 991              | 25,104             | 1.05 |
| 18                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                    | Excel       |                  | 25,104             | 1.05 |

**Tabla 5.4 Comparación de resultados entre los AGs y Excel del volumen de producción de 200MBD**

| Ancho de columna (m) | Altura de columna (m) | Distancia entre columnas (m) | Calado (m) | Ancho del pontón (m) | Altura de pontón (m) | Herramienta | Numero de modelo | Peso del casco (t) | Suma |
|----------------------|-----------------------|------------------------------|------------|----------------------|----------------------|-------------|------------------|--------------------|------|
| 20                   | 45                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | AGs         | 2017             | 30,341             | 1.17 |
| 20                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 30,653             | 1.16 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                   | AGs         | 1945             | 28,159             | 1.00 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 28,159             | 1.00 |
| 20                   | 40.5                  | 92                           | 24         | 15                   | 12                   | AGs         | 2665             | 31,961             | 0.95 |
| 20                   | 46                    | 95                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 32,529             | 1.00 |
| 26                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | AGs         | 2260             | 43,849             | 1.02 |
| 26                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 43,849             | 1.00 |
| 20                   | 43                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                   | AGs         | 2323             | 30,029             | 1.00 |
| 20                   | 46                    | 90                           | 20         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 31,591             | 1.00 |
| 20                   | 45.25                 | 85                           | 20         | 12                   | 12                   | AGs         | 1999             | 30,237             | 1.00 |
| 20                   | 46                    | 85                           | 20         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 30,653             | 1.00 |
| 26                   | 42.5                  | 85                           | 23.5       | 12                   | 12                   | AGs         | 2260             | 41,371             | 1.11 |
| 26                   | 46                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 43,849             | 1.00 |
| 24.75                | 46                    | 85                           | 22.5       | 12                   | 12                   | AGs         | 2170             | 40,781             | 0.99 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 22         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 39,020             | 1.00 |
| 25                   | 46                    | 85                           | 22.5       | 12                   | 12                   | AGs         | 2170             | 41,381             | 0.99 |
| 24                   | 46                    | 85                           | 22         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 39,020             | 1.00 |
| 20                   | 42.75                 | 95                           | 24         | 12                   | 12                   | AGs         | 2665             | 31,179             | 0.98 |
| 20                   | 46                    | 95                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 32,529             | 1.00 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | AGs         | 1963             | 28,159             | 1.10 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 28,159             | 1.09 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | AGs         | 1963             | 28,159             | 1.07 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 28,159             | 1.06 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | AGs         | 1963             | 28,159             | 1.05 |
| 20                   | 40                    | 85                           | 24         | 12                   | 12                   | Excel       |                  | 28,159             | 1.04 |

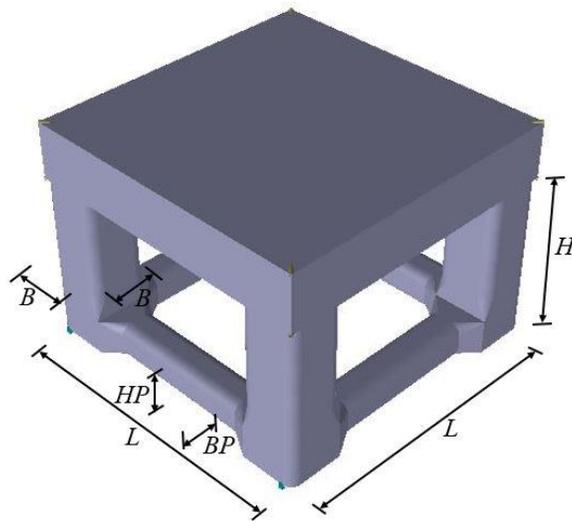
Finalmente, se presentan en la tabla 5.5 los valores óptimos finales para cada una de las variables de diseño consideradas en este estudio, y para cada uno de los volúmenes de producción. Como se observa en esta tabla, el proceso de optimización con algoritmos genéticos confirma que la respuesta hidrodinámica óptima se obtiene con los valores geométricos del límite inferior para la separación entre columnas, ancho de la columna, y al ancho y la altura de los pontones para los

tres volúmenes de producción seleccionados. Por otro lado, la respuesta óptima se obtiene con los valores del límite superior para el calado y la altura de la columna, lo cual resulta evidente ya que es conocido en que la amplitud de la respuesta disminuye si el calado y la altura del sistema incrementa (Clauss y Birk, 1996; Gosain, Sharma y Kim, 2017).

**Tabla 5.5 Valores finales de las variables de diseño de cada volumen de producción**

| Volumen de producción (MBD) | Columnas           |               |                | Calado $D$ (m) | Pontones       |                 |
|-----------------------------|--------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|                             | Separación $L$ (m) | Ancho $B$ (m) | Altura $H$ (m) |                | Ancho $BP$ (m) | Altura $HP$ (m) |
| 100                         | 85                 | 16            | 46             | 24             | 10             | 10              |
| 150                         |                    | 18            |                |                | 12             | 12              |
| 200                         |                    | 20            |                |                |                |                 |

En la figura 5.6 se muestran las variables de diseño de las plataformas tipo semisumergibles, las cuales varían con respecto a la tabla 5.5.



**Figura 5.6 Variables de diseño**

## 6 OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL CASCO

Una vez que se obtiene el modelo óptimo con las dimensiones geométricas que minimiza la respuesta hidrodinámica, como se discute en la sección anterior, en este capítulo se toma como base para obtener la configuración estructural óptima utilizando también el método de los algoritmos genéticos.

En la figura 6.1 se muestra la ubicación de la sección transversal crítica en estudio, la cual se encuentra a la mitad del pontón debido a que es donde se presentan los mayores elementos mecánicos por el peso del pontón, peso del lastre, fuerzas de flotación, oleaje y presión hidrostática.

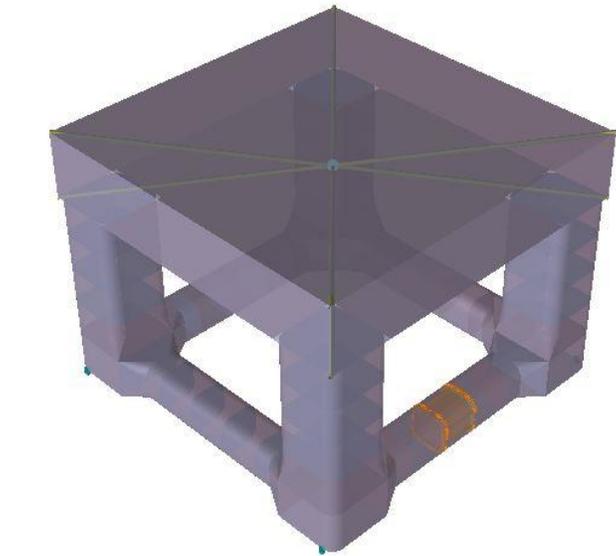


Figura 6.1 Ubicación de la sección transversal en el pontón.

En la figura 6.2 se presenta de manera esquemática las cargas permanentes que se consideran en condiciones estáticas o de aguas tranquilas (*calm water*). Por un lado, se tiene el peso del pontón ( $W_p$ ) y el peso del lastre ( $W_l$ ), los cuales son contrarrestados por una fuerza de flotación ( $F_f$ ) y la presión hidrostática. Por otro lado, el efecto de presión hidrostática genera una fuerza axial ( $F_T$ ) y un momento ( $M_{F_l}$ ) sobre el pontón. Además, en la figura 6.3 se muestra de manera esquemática como las fuerzas generan un efecto de anillo sobre los pontones en la dirección transversal, donde  $F_1$  y  $F_2$  son las fuerzas resultantes debidas a la presión hidrostática. Mientras que  $F_{R1}$  y  $F_{R2}$  son las fuerzas axiales en la dirección transversal del panel en la parte superior e inferior del pontón, las cuales se utilizan para el cálculo de los esfuerzos en la dirección transversal.

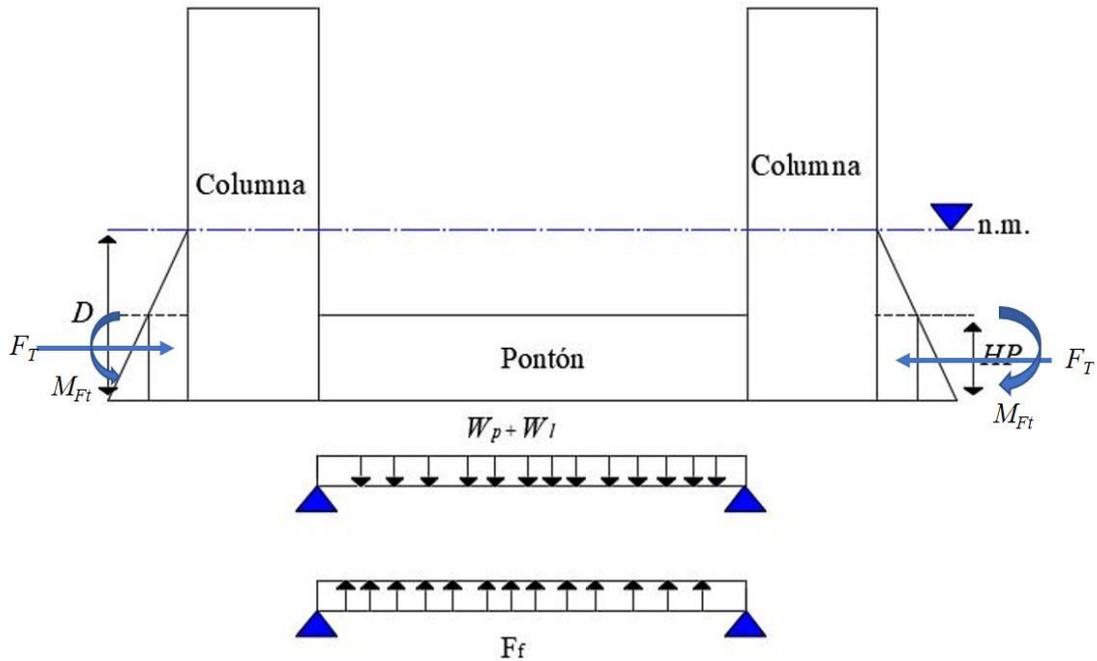


Figura 6.2 Esquematización de la condición de carga estática (*calm water*)

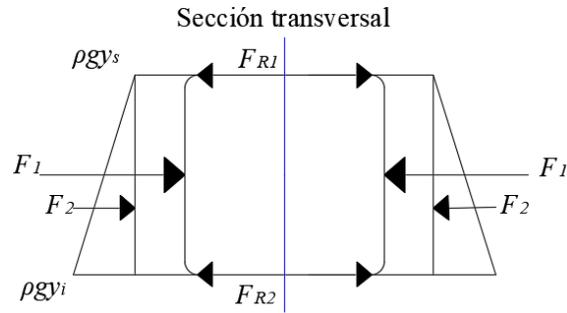
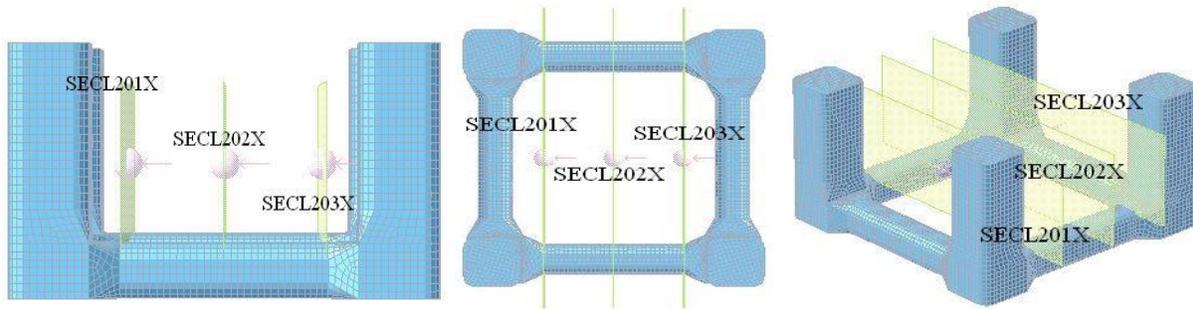


Figura 6.3 Fuerzas transversales sobre el pontón

Posteriormente, en la figura 6.4 se muestran diferentes vistas del modelo seleccionado para este estudio. Se eligieron tres ubicaciones a lo largo del pontón llamadas secciones de carga (*load section*) para obtener los elementos mecánicos. Las cuales se identifican de la siguiente manera: SECL201X, SECL202X y SECL203X en donde el número 201, 202 y 203 identifican la posición y número de sección de carga y la última posición corresponde al grado de libertad.



**Figura 6.4 Localización de las secciones de carga**

En las tablas 6.1, 6.2 y 6.3 se muestra la revisión de la amplitud de la ola para las tres diferentes secciones de carga a lo largo del pontón, la cual contiene el número del modelo, la variable de respuesta (fuerzas y momentos), la dirección de incidencia del oleaje, las máximas respuestas, los máximos RAOs, el periodo del oleaje, la amplitud de la altura de ola, el límite, y finalmente, la revisión que se hace comparando la amplitud de la ola calculada y el límite. La amplitud de la ola se obtiene del cociente de la máxima respuesta y el máximo RAO, mientras que el valor del límite se calcula de acuerdo con los valores que se presentan en el apartado 4.7.1 de este trabajo.

Como se aprecia para todos los elementos mecánicos y en las tres secciones de carga la amplitud de la ola es menor al límite establecido. Además, los máximos RAOs se utilizan en el cálculo de los esfuerzos en la dirección longitudinal. Por otro lado, se observa que los valores máximos se encuentran en diferentes direcciones de incidencia del oleaje y periodos por lo que se requieren seleccionar los valores de fuerza normal, momento alrededor del eje  $y$  y  $z$  asociados a cada uno de los elementos mecánicos despreciando en este estudio a las fuerzas cortantes (SECL2022, SECL2023, SECL2012, SECL2013, SECL2032 y SECL2033) y el momento de torsión (SECL2024, SECL2014 y SECL2034).

**Tabla 6.1 Resumen de resultados de las cargas ambientales parte central del pontón**

| Modelo | Variable de respuesta | Dirección | Máxima respuesta | Máximo RAO | Periodo | Cálculo de amplitud | Límite | Revisión |
|--------|-----------------------|-----------|------------------|------------|---------|---------------------|--------|----------|
| 73     | SECL2021              | 30°       | 1.92E7 N         | 5.13E6 N   | 7 s     | 3.8 m               | 5.2 m  | OK       |
|        | SECL2022              | 90°       | 6.14E7 N         | 9.68E6 N   | 10 s    | 6.3 m               | 8.8 m  | OK       |
|        | SECL2023              | 90°       | 1.51E7 N         | 2.64E6 N   | 8 s     | 5.7 m               | 6.4 m  | OK       |
|        | SECL2024              | 90°       | 7.24E8 N-m       | 1.10E8 N-m | 10 s    | 6.6 m               | 8.8 m  | OK       |
|        | SECL2025              | 45°       | 3.50E8 N-m       | 7.03E7 N-m | 8 s     | 5.0 m               | 6.4 m  | OK       |
|        | SECL2026              | 60°       | 1.02E9 N-m       | 1.82E8 N-m | 9 s     | 5.6 m               | 7.6 m  | OK       |

**Tabla 6.2 Resumen de resultados de las cargas ambientales lado izquierdo del pontón**

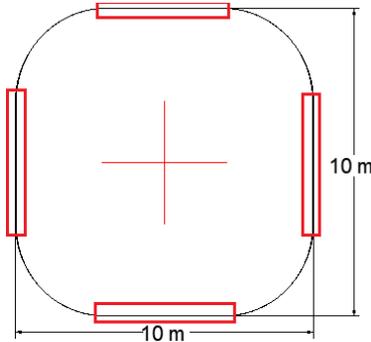
| Modelo | Variable de respuesta | Dirección | Máxima respuesta | Máximo RAO | Periodo | Cálculo de amplitud | Límite | Revisión |
|--------|-----------------------|-----------|------------------|------------|---------|---------------------|--------|----------|
| 73     | SECL2011              | 30°       | 1.87E7 N         | 4.9E6 N    | 7 s     | 3.8 m               | 5.2 m  | OK       |
|        | SECL2012              | 90°       | 5.96E7 N         | 9.39E6 N   | 10 s    | 6.4 m               | 8.8 m  | OK       |
|        | SECL2013              | 60°       | 1.12E7 N         | 9.36E6 N   | 18 s    | 1.2 m               | 16.4 m | OK       |
|        | SECL2014              | 90°       | 7.62E8 N-m       | 1.23E8 N-m | 10 s    | 6.2 m               | 8.8 m  | OK       |
|        | SECL2015              | 0°        | 1.58E8 N-m       | 3.56E7 N-m | 6.9 s   | 4.4 m               | 5.0 m  | OK       |
|        | SECL2016              | 45°       | 1.18E9 N-m       | 2.11E8 N-m | 9 s     | 5.6 m               | 7.6 m  | OK       |

**Tabla 6.3 Resumen de resultados de las cargas ambientales lado derecho del pontón**

| Modelo | Variable de respuesta | Dirección | Máxima respuesta | Máximo RAO | Periodo | Cálculo de amplitud | Límite | Revisión |
|--------|-----------------------|-----------|------------------|------------|---------|---------------------|--------|----------|
| 73     | SECL2031              | 30°       | 1.86E7 N         | 5.02E6 N   | 7 s     | 3.7 m               | 5.2 m  | OK       |
|        | SECL2032              | 90°       | 6.17E7 N         | 9.63E6 N   | 10 s    | 6.4 m               | 8.8 m  | OK       |
|        | SECL2033              | 30°       | 9.48E6 N         | 8.73E6 N   | 18 s    | 1.1 m               | 16.4 m | OK       |
|        | SECL2034              | 90°       | 7.52E8 N-m       | 1.21E8 N-m | 10 s    | 6.2 m               | 8.8 m  | OK       |
|        | SECL2035              | 0°        | 1.52E8 N-m       | 3.46E7 N-m | 6.4 s   | 4.4 m               | 4.5 m  | OK       |
|        | SECL2036              | 60°       | 1.07E9 N-m       | 1.85E8 N-m | 9 s     | 5.8 m               | 7.6 m  | OK       |

En la figura 6.5 se muestra la sección transversal del pontón que se obtiene del modelo hidrodinámico óptimo que se discute en el capítulo anterior, el cual mide 10 m de altura y 10 m de ancho. Además, en los bordes del pontón se tiene una curvatura con radio de 3 m. Los paneles de estudio son los que se encuentran marcados con un recuadro de color rojo, sin embargo, el panel plano más desfavorable es el que se encuentra ubicando en la parte central inferior del pontón por ser éste el que tiene mayores esfuerzos de compresión debido a las cargas. Aunque los bordes tienen un comportamiento que también es crítico, en este trabajo no se toman en cuenta. Sin

embargo, es importante mencionar que para los bordes se fijaron un número constante de atiesadores para los cálculos posteriores, y lo que se modifica únicamente son las dimensiones.



**Figura 6.5 Sección transversal del pontón y definición de paneles de estudio.**

Las variables que se consideran para minimizar el peso de los paneles en el casco son las siguientes:

- Tipo de atiesador: T, placa y ángulo
- Número de atiesadores: 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- Espesor del panel: 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23 y 25 mm
- Altura del alma: 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 y 500 mm
- Espesor del alma: 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25 mm
- Ancho del patín: 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170 y 180 mm
- Espesor del patín: 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 25 mm
- Longitud del panel: 2400, 2600, 2800, 3000, 3200, 3400, 3600, 3800, 4000 y 4200 mm

Por otro lado, en la figura 6.6 se muestra la sección transversal de los pontones con los tres tipos de atiesadores que se consideran. En esta figura, las áreas con las etiquetas 1, 2, 3 y 4 corresponden al panel de estudio, mientras que las áreas 5, 6, 7 y 8 son de los atiesadores de cada panel; las áreas 9 y 10 son las correspondientes a los bordes redondeados del pontón, mientras que las áreas 11a, 11b y 11c son para los atiesadores en la parte superior, y las áreas 12a, 12b y 12c a los atiesadores en la parte inferior.

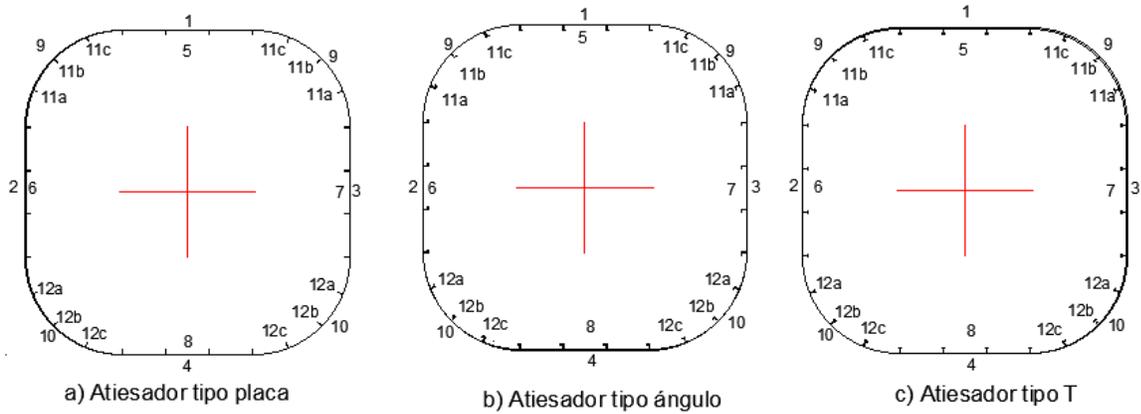


Figura 6.6 Definición de áreas para el cálculo de los momentos de inercia.

En la figura 6.7 se muestran la parte interna del pontón donde se encuentra ubicado el panel individual de estudio, así como las solicitaciones a las que se encuentra sometida: presión normal generada por la presión hidrostática externa,  $P_{sd}$ , así como esfuerzos biaxiales internos,  $\sigma_x$  y  $\sigma_z$ , inducidos por el complemento del pontón y el efecto del cortante, el cual no se tomó en cuenta para este estudio.

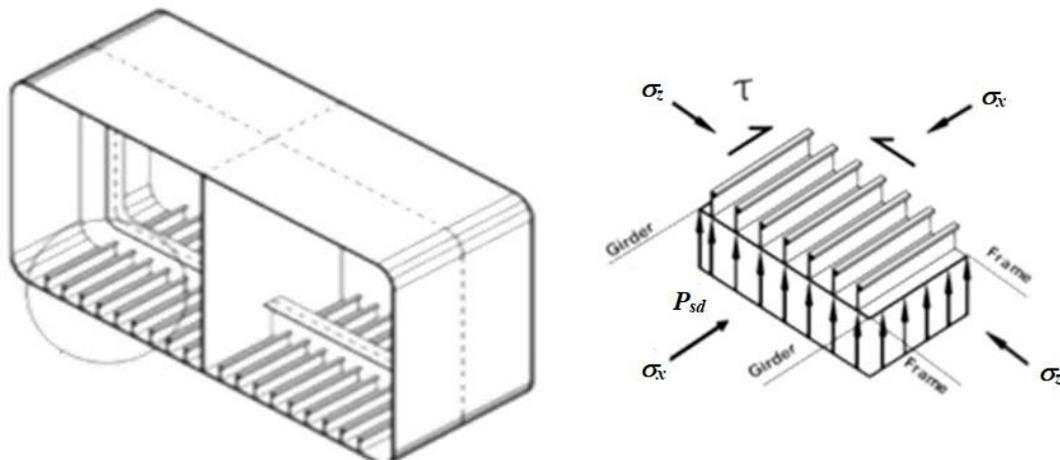


Figura 6.7 Esfuerzos biaxiales y presión hidrostática (fuente: adaptada de DNV-OS-C102).

Existen diferentes metodologías para la obtención de la resistencia última de este tipo de paneles. Por un lado, se tienen los análisis por el método de elementos finitos, en el cual se puede hacer uso de programas de cómputo FEM (e.g. Ansys o Abaqus). Otra metodología es a través del programa

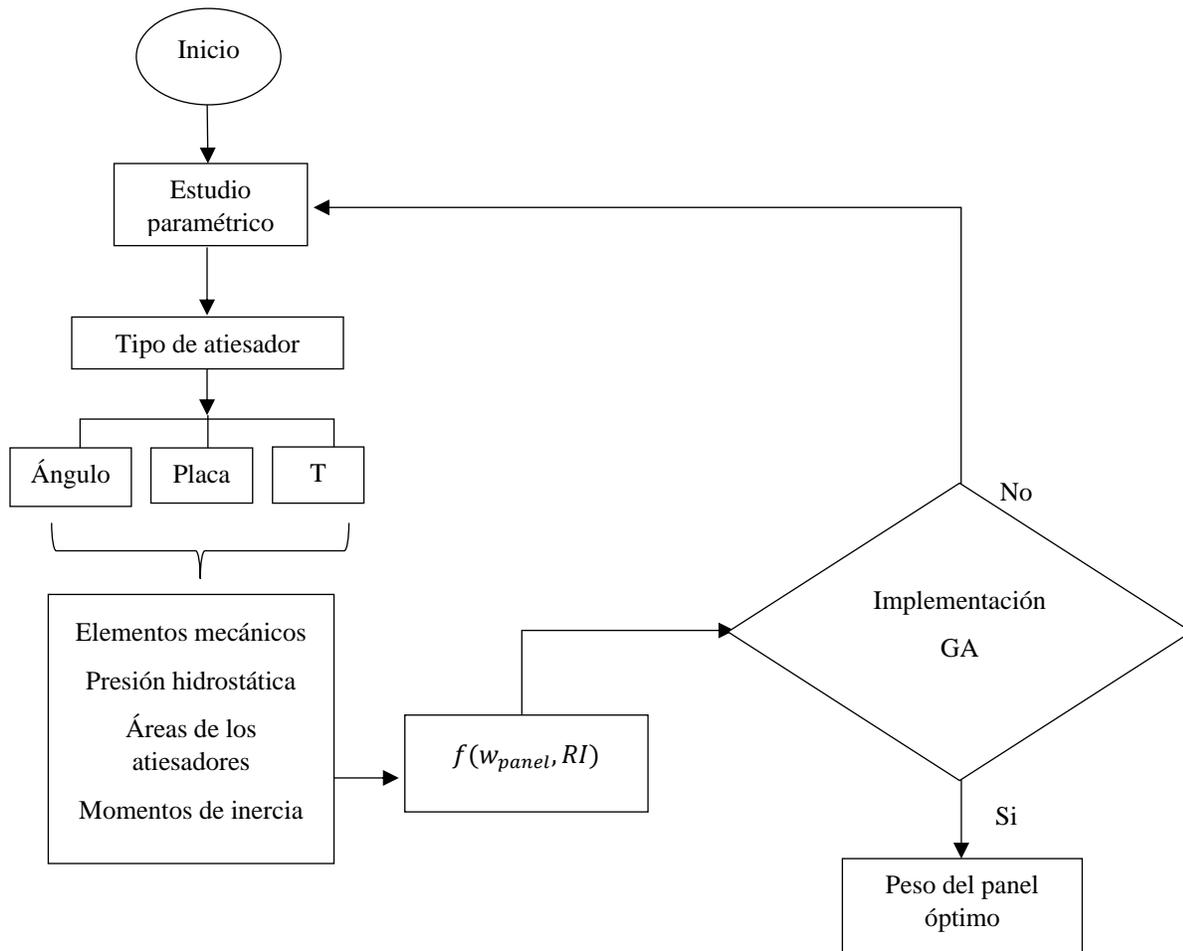
de cómputo PULS (*i.e. Panel Ultimate Limit State*), en el cual se evalúa el pandeo y la resistencia última de paneles rigidizados y no rigidizados con base en la teoría no-lineal de placas. Otra de las metodologías es usando las fórmulas de interacción que se encuentran en las recomendaciones prácticas DNV-RP-C201 (2002), siendo una de las mejores opciones para ser programadas. Estas ecuaciones se programan para este trabajo en el software de Matlab (2020a) con la opción de valores discretos que ayuda a que el programa encuentre una convergencia más rápida y resultados precisos.

## 6.1 Metodología

La resistencia de los paneles con las ecuaciones de interacción de las recomendaciones prácticas DNV-RP-C201 (2002) se determina con la siguiente metodología y se muestra un diagrama de flujo en la figura 6.8:

1. Se definen las variables de diseño, y sus límites inferiores, superiores e incrementos.
2. Como en este caso se toman en cuenta tres diferentes tipos de atiesadores, se manejan tres diferentes funciones, en las cuales se consideran las ecuaciones que se presentan en el apartado 3.10 de este trabajo para calcular las relaciones de interacción. Además, se calculan a partir de los elementos mecánicos los esfuerzos biaxiales a través de las áreas y momentos de inercia de cada tipo de atiesador. También, se define el valor de la presión hidrostática a la que se encuentra sometido el panel.
3. La función objetivo está definida por el peso del panel, el cual se calcula en una función creada en Matlab (2020a) donde se obtiene la relación de interacción con la que el programa principal evoluciona para encontrar el menor peso al cumplir con una relación de interacción segura. Motivo por el cual se consideran dos intervalos para encontrar el peso óptimo del panel en función del valor de la relación de interacción demanda-resistencia: el primer rango es cuando se obtienen relaciones de interacción negativas, en donde se asigna un valor en el peso del panel lo suficiente grande para penalizar la función objetivo, y con ello encontrar una convergencia mucho más rápida; el segundo rango es con relaciones de interacción positivas entre 0 y 0.95, en el cual se toma el valor del peso del panel real calculado.

4. El programa principal evoluciona y guarda en un archivo los valores asociados a cada variable de diseño, y si el caso lo requiere se puede llevar a cabo la graficación de cómo se presenta la evolución de los AGs.
5. Otro aspecto que se toma en cuenta son los límites de la relación ancho-espesor y de aspecto de la norma (DNV manual, 2015) y se enlistan a continuación.
  - Esbeltez para rigidizadores tipo placa:  $h_w / t_w < 35$
  - Esbeltez del alma en rigidizadores ángulo y T:  $h_w / t_w < 90$
  - Esbeltez del patín en rigidizadores ángulo y T:  $b_f / t_f < 15$
  - Esbeltez de la placa del panel entre rigidizadores:  $s / t_p < 200$
  - Relación de aspecto de la placa entre rigidizadores:  $0.17 < L_l / s < 20$



**Figura 6.8 Diagrama de flujo de la optimización del panel óptimo**

## 6.2 Discusión de resultados

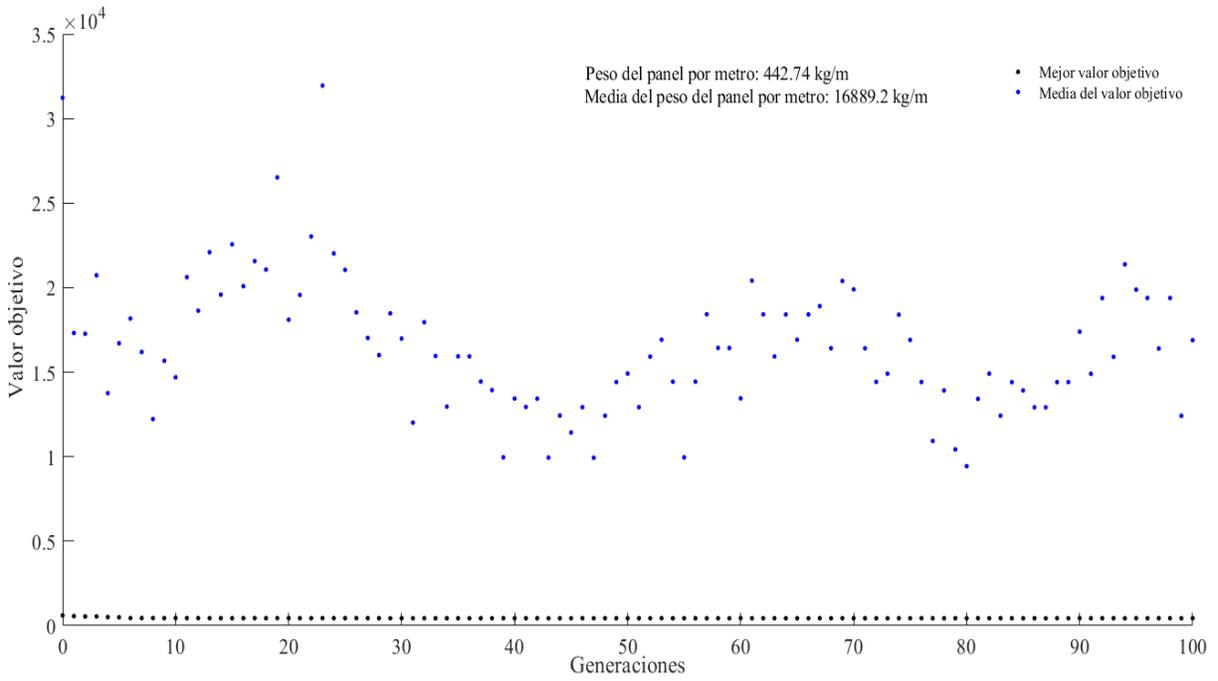
Con el fin obtener de manera rápida el peso del casco se consideran los elementos de refuerzo longitudinales, en las figuras 6.9 y 6.10 se muestra la tendencia del mejor valor y la media del peso del panel por metro que se obtienen del proceso de optimización con el método de los algoritmos genéticos para un número de 100 y 200 generaciones, respectivamente.

El eje horizontal de estas figuras representa el número de generaciones que se consideran en el proceso de optimización (*i.e.* 100 generaciones en la figura 6.9, y 200 generaciones en la figura 6.10), mientras que el eje vertical corresponde al mejor valor objetivo del peso del panel por metro para dicha generación. Los AGs parten de una población inicial (*i.e.* 200 individuos), que evolucionan a través de las generaciones.

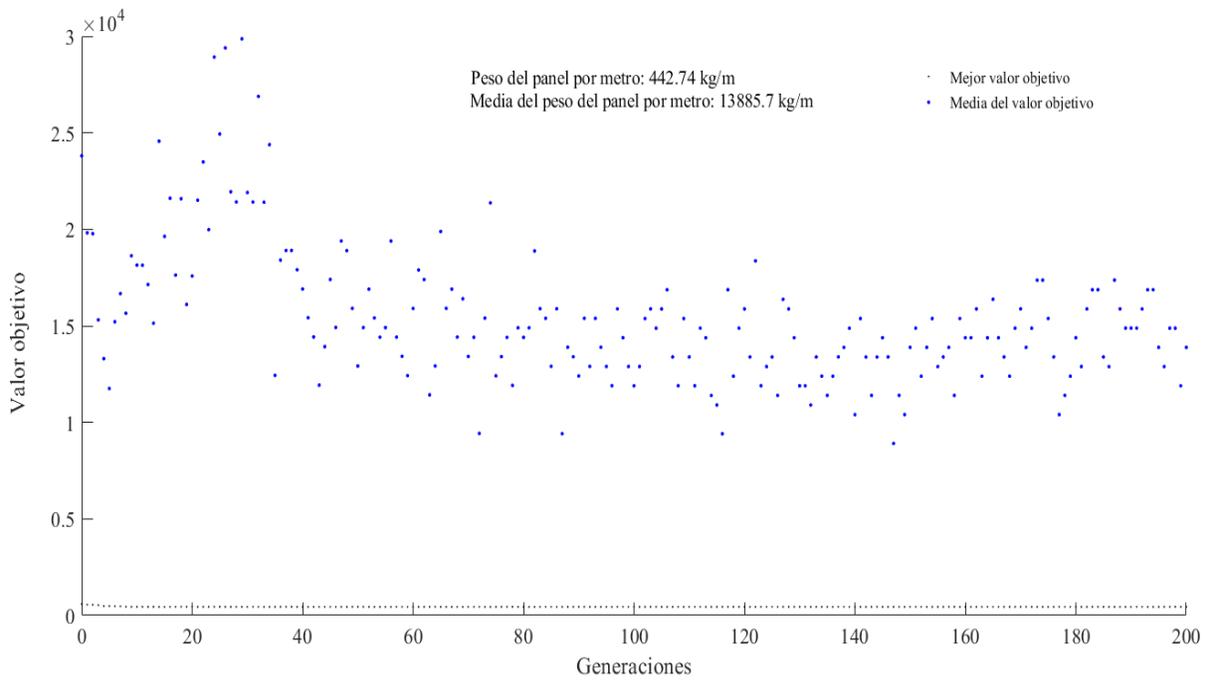
Los puntos de color negro que se observan en la parte inferior de ambas figuras 6.9 y 6.10 representan el mejor valor del peso del panel por metro que se obtiene de los 200 individuos en cada generación, en donde se obtiene prácticamente un valor constante de 442.74 kg/m para todas las generaciones; por otro lado, los puntos de color azul representan la media del peso del panel por metro de todos los individuos (100) en cada generación. Se observa que a pesar de que el valor de la media del peso del panel por metro arroja valores muy altos, el mejor valor del peso del panel por metro se conserva de 442.74 kg/m a través de las generaciones.

Por otro lado, como se observa entre las figuras 6.9 y 6.10, al incrementar el número de generaciones de 100 a 200 existen dos diferencias: (1) el tiempo computacional aumenta, y (2) el valor de la media del peso del panel por metro disminuye, aunque el mejor valor objetivo del peso se sigue manteniendo en el mismo valor de 442.74 kg/m.

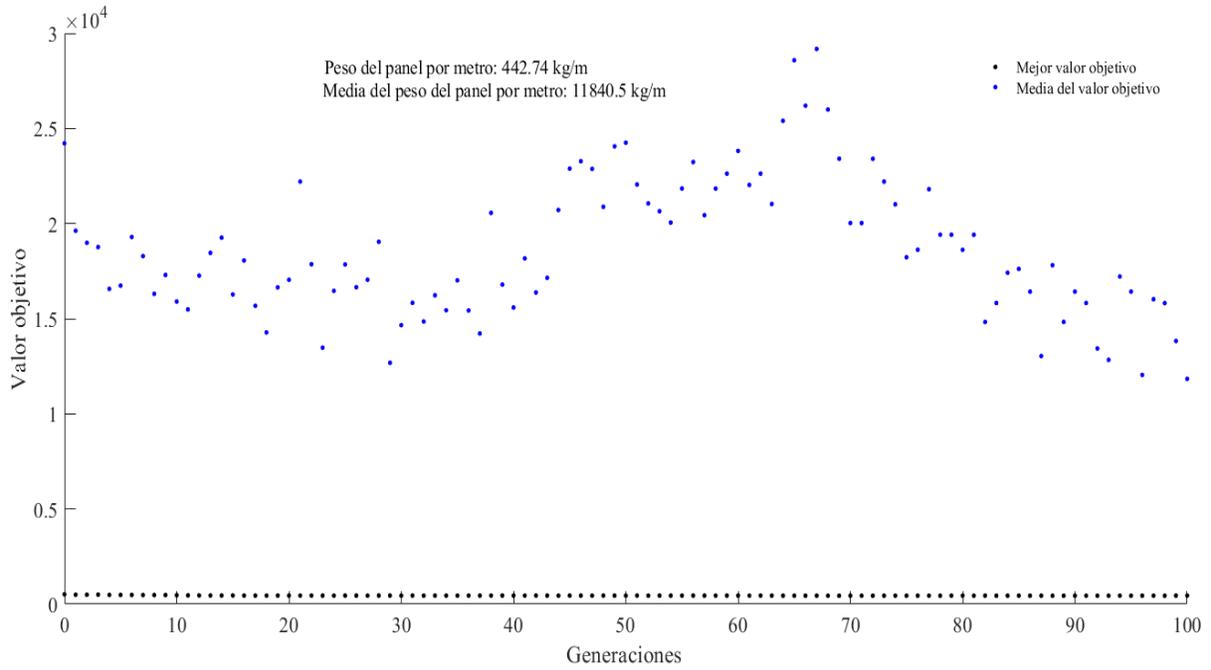
Sin embargo, en las figuras 6.11 y 6.12 se muestran los resultados de la optimización también para 100 y 200 generaciones, pero ahora se toman en cuenta en el proceso de optimización a 500 individuos. También para este caso con 500 individuos se llega a que el mejor valor objetivo del peso del panel por metro es de 442.74 kg/m, como se observó en las figuras 6.9 y 6.10 para 200 individuos. En este caso con 500 individuos se obtienen mayores valores medios del peso del panel por metro y se requiere mayor tiempo computacional en comparación con el caso de 200 individuos.



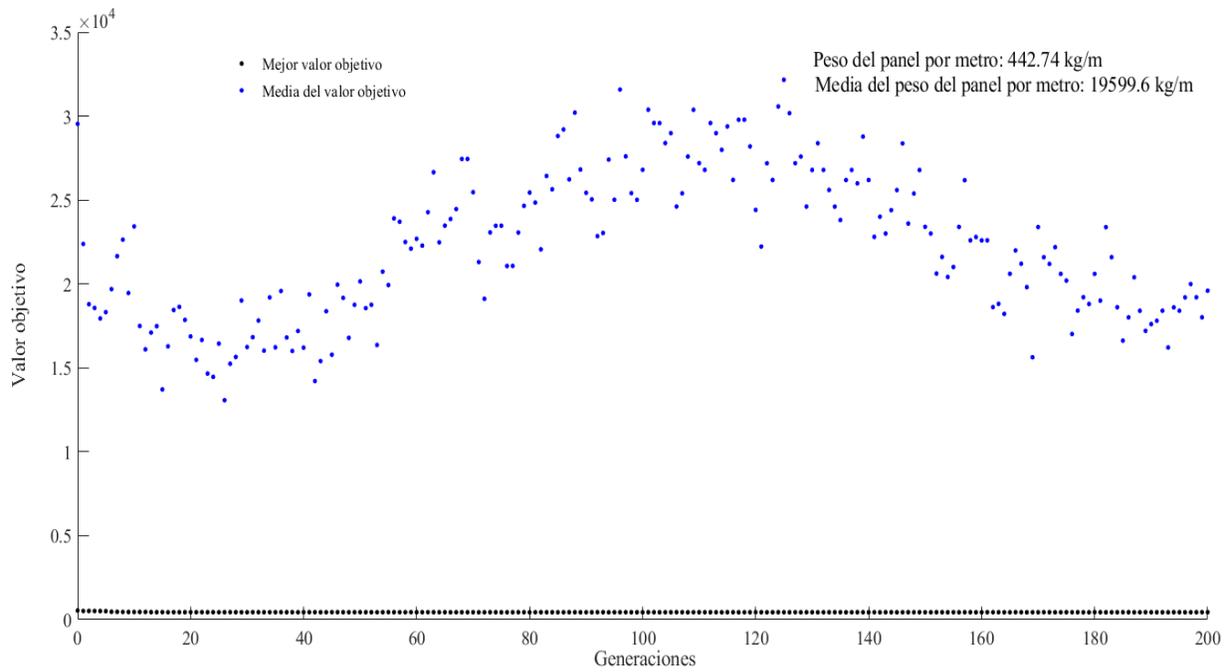
**Figura 6.9 Número de generaciones (100) vs mejor valor con 200 individuos.**



**Figura 6.10 Número de generaciones (200) vs mejor valor con 200 individuos.**



**Figura 6.11 Número de generaciones (100) vs mejor valor con 500 individuos.**



**Figura 6.12 Número de generaciones (200) vs mejor valor con 500 individuos.**

Por lo tanto, en términos de trabajo computacional, el proceso de optimización que se describe en esta sección es rápido y es viable revisar un gran número de combinaciones con las variables de diseño que se consideran, al tomar treinta minutos en promedio; no obstante, este proceso es más rápido que si se lleva a cabo todo ese número de análisis en algún programa de elementos finitos, aunque si este último procedimiento se automatiza también resulta efectivo.

Finalmente, este proceso de optimización arroja que el panel óptimo es aquel con un espesor de 9 mm (3/8 pulg.), con cuatro atiesadores tipo ángulo de 250 mm de altura del alma, 90 mm en el ancho del patín, y 15 mm (5/8 pulg.) de espesor del alma y patín; en este estudio se considera un esfuerzo de fluencia de 355 MPa para todo el acero estructural.

Por otro lado, en la tabla 6.4 se muestra un resumen de las características geométricas de cada uno de los tipos de atiesadores con el peso óptimo de cada panel, los cuales serán empleados en el capítulo 7 de este trabajo.

**Tabla 6.4 Características geométricas de los modelos óptimos**

| $t_p$<br>(mm) | $L_z$<br>(mm) | Tipo de atiesador |               |                |               |               |               |               |                |               |               |               |               |                | Número de atiesadores |
|---------------|---------------|-------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|
|               |               | Placa             |               |                | T             |               |               |               |                | Ángulo        |               |               |               |                |                       |
|               |               | $h_w$<br>(mm)     | $t_w$<br>(mm) | Peso<br>(kg/m) | $h_w$<br>(mm) | $t_w$<br>(mm) | $b_f$<br>(mm) | $t_f$<br>(mm) | Peso<br>(kg/m) | $h_w$<br>(mm) | $t_w$<br>(mm) | $b_f$<br>(mm) | $t_f$<br>(mm) | Peso<br>(kg/m) |                       |
| 9.0           | 2400          | 350               | 15            | 447.4          | 250           | 15            | 90            | 16            | 445.6          | 250           | 15            | 90            | 15            | 442.7          | 4                     |

Con el fin de evaluar si el panel óptimo que se obtiene en el proceso de optimización es válido, se repite el procedimiento dejando fijo el tipo de atiesador, y se obtiene el valor óptimo para cada tipo de atiesador por separado. El resultado final coincide con el que se obtiene al ingresar los tres atiesadores en grupo.

Otro aspecto que se toma en cuenta en el proceso de optimización es la longitud del panel; en los análisis se consideran longitudes de 2400 a 4200 mm; como es de esperarse, al incrementar la longitud del panel también aumentan las dimensiones requeridas de los atiesadores.

Es importante mencionar que, a los espesores que se obtienen con el método de los algoritmos genéticos se le agrega el valor correspondiente al espesor de sacrificio por corrosión. De acuerdo con la norma DNVGL (2016), el valor del espesor de sacrificio por corrosión se debe tomar como:

$$t_k = 1.5 \text{ mm} \quad \text{para espesor de placa } t_p \leq 11.5 \text{ mm}$$

$$t_k = 0.09t_p + 0.45 \text{ mm} \quad \text{para espesor de placa } t_p > 11.5 \text{ mm}$$

Por lo que, el espesor de 9 mm (3/8 pulg.) en la placa del panel considera el primer límite (*i.e.*  $t_k = 1.5$  mm), mientras que los espesores de 15 mm (5/8 pulg.) en el alma y el patín de los atiesadores se aplica el segundo límite. Para los atiesadores con espesor de 15 mm aplica el valor de  $t_k = 1.8$  mm, mientras que para el espesor de 16 mm en el patín del atiesador T aplica el valor de  $t_k = 1.9$  mm.

Finalmente, si se comparan los tres diferentes paneles en términos de peso el panel rigidizado con atiesadores tipo placa es 1% mayor que el panel óptimo (panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo), mientras que el panel rigidizado con atiesadores tipo T es 0.655% mayor. Aunque la diferencia por panel no es significativa, si lo es cuando se toman en cuenta el diseño estructural de todo el casco.

Mas adelante, en la sección 7.2 se muestra la comparación de la resistencia última de los paneles que se obtuvieron en este capítulo empleando las recomendaciones practicas DNV-RP-C201 y las que se obtienen con análisis de elementos finitos.

## 7 OBTENCIÓN DE LA RESISTENCIA ÚLTIMA USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Con la finalidad de validar el diseño óptimo del panel (*i.e.* que se obtuvo con el método de los AGs y las ecuaciones de interacción de las recomendaciones prácticas DNV-RP-C201) descrito en la sección anterior, en este capítulo se muestran los resultados del análisis de este panel óptimo empleando el método de los elementos finitos. Las dimensiones de cada uno de los paneles se encuentran en la tabla 6.4 del capítulo 6.

### 7.1 Descripción del modelo con elementos finitos

Para los análisis de elementos finitos descritos se utiliza el programa de cómputo Abaqus. Para estos análisis se toman en cuenta las siguientes consideraciones.

#### 7.1.1 Curva esfuerzo-deformación del acero

La figura 7.1 muestra la curva esfuerzo-deformación con valores verdaderos (*true*) del acero estructural que se emplea en los análisis, y en la que se considera un comportamiento elastoplástico con esfuerzo de fluencia de 355 MPa y un módulo de elasticidad de 210 GPa.

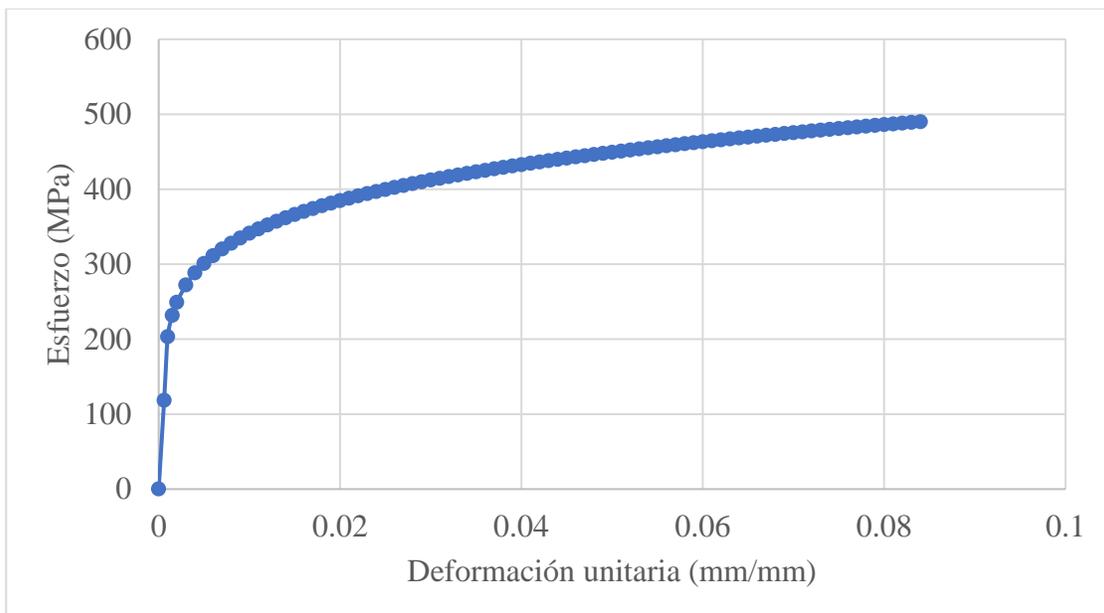


Figura 7.1 Curva esfuerzo – deformación del acero.

### 7.1.2 Apoyos

Los apoyos o condiciones de frontera que se considera en los bordes son simplemente apoyados, como se muestra en las figuras 7.2, 7.3 y 7.4 correspondientes para cada uno de los paneles con atiesadores tipo placa, ángulo y T, respectivamente. Además, se presentan las dimensiones que tienen los paneles, siendo 2400 mm de ancho y 4000 mm en la longitud del panel.

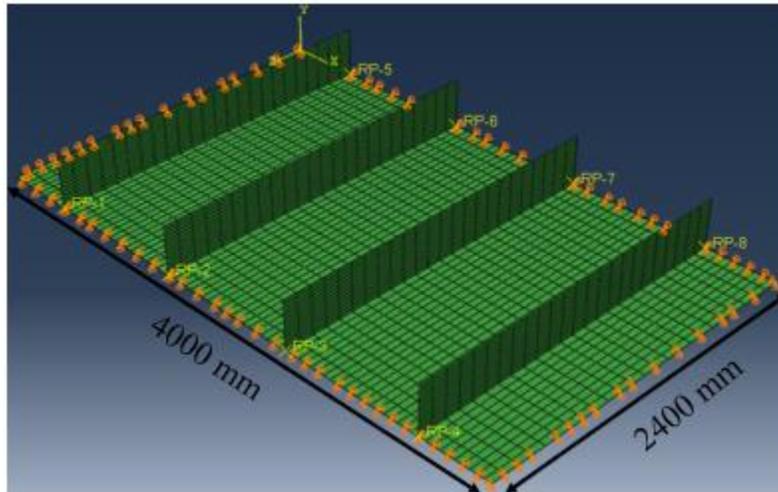


Figura 7.2 Bordes simplemente apoyados para atiesadores tipo placa.

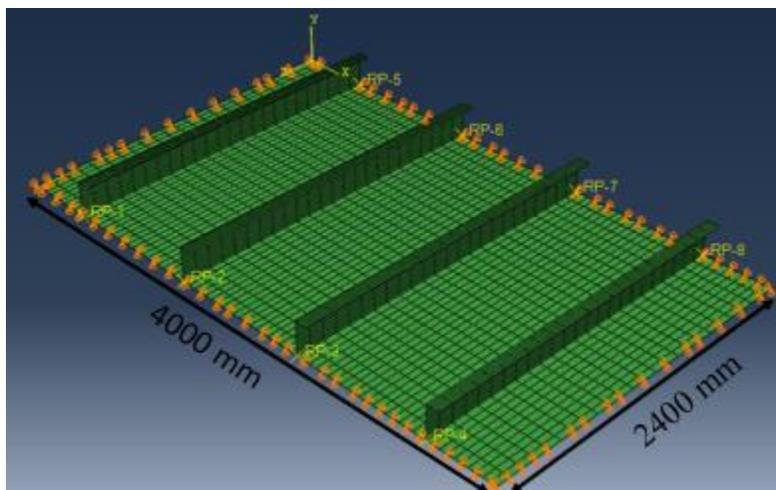
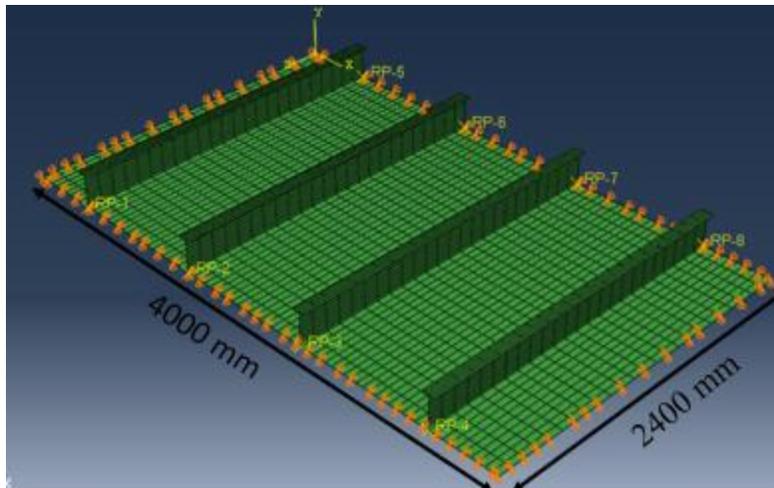


Figura 7.3 Bordes simplemente apoyados para atiesadores tipo ángulo.

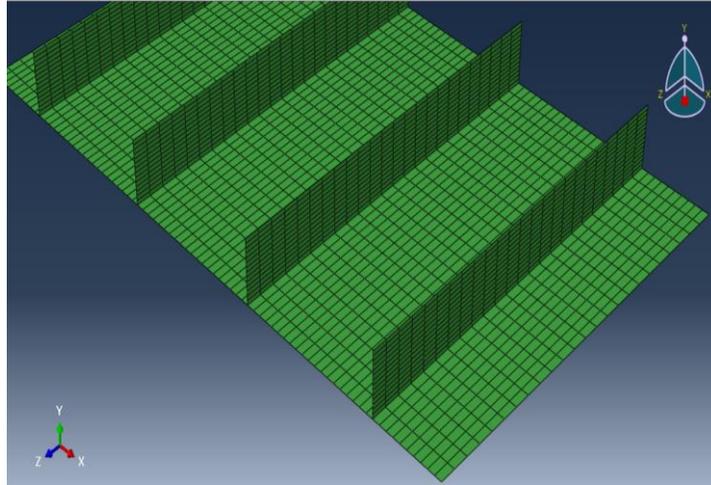


**Figura 7.4 Bordes simplemente apoyados tipo T.**

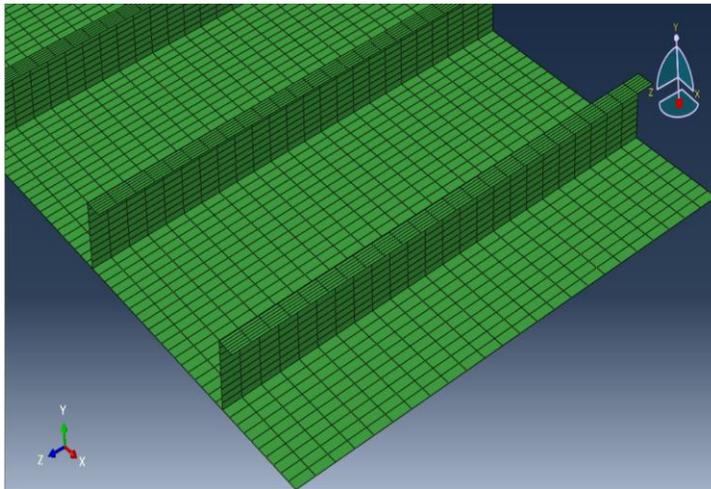
### ***7.1.3 Tipo de elemento finito y mallado***

El elemento utilizado en la librería de Abaqus para estos análisis es el elemento placa (*shell*) tipo S4R. Este elemento consiste en un cuadrilátero con cuatro nodos e integración reducida, el cual minimiza el tiempo de ejecución a la tercera parte respecto a la de elementos de integración completa. Estos elementos son eficientes para análisis no lineales complejos que involucran contacto, plasticidad y grandes deformaciones.

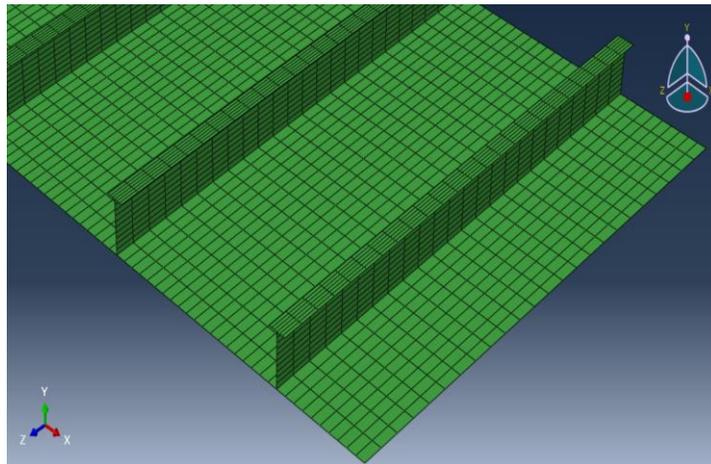
Por otro lado, el modelo y mallado se genera de manera automática a través de un código elaborado en Matlab (2020a). Este programa genera automáticamente la geometría del panel con los rigidizadores, aplica los apoyos correspondientes en los bordes del panel y los diferentes pasos de carga, y realiza el mallado con los elementos placa con un tamaño de 100 mm en la dirección transversal, 50 mm en la dirección longitudinal, 25 mm en la dirección perpendicular, y para el caso donde se tiene patín de 15 mm. En las figuras 7.5, 7.6 y 7.7 se muestra el mallado para cada uno de los paneles rigidizados con los tres tipos de atiesadores (*i.e.* placa, ángulo y T).



**Figura 7.5** Mallado del panel con atiesador tipo placa.



**Figura 7.6** Mallado del panel con atiesador tipo ángulo.



**Figura 7.7** Mallado del panel con atiesador tipo T.

#### 7.1.4 *Secuencia para la aplicación de la carga*

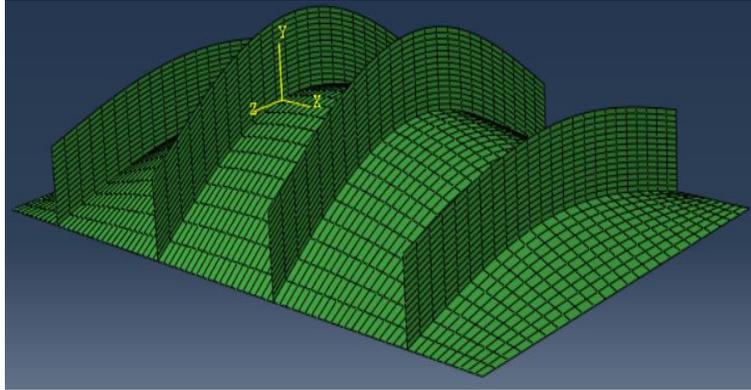
Los análisis en los paneles se realizan al aplicar secuencialmente los siguientes pasos de desplazamientos o de carga.

##### 7.1.4.1 *Imperfecciones iniciales*

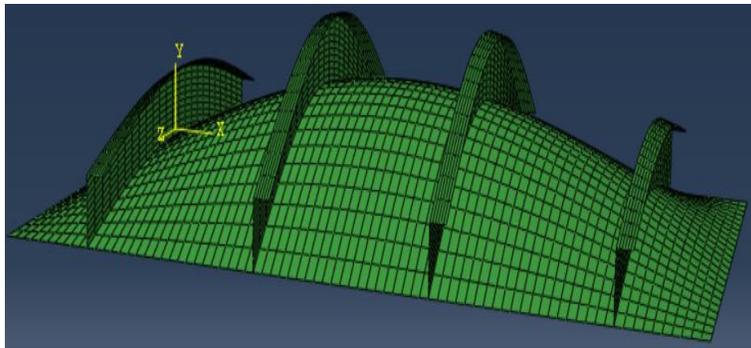
Antes de las secuencias de cargas se consideran las imperfecciones iniciales debidas al proceso de fabricación, transportación y manejo de los paneles. Las cuales alteran la geometría inicial de la malla de EF. Las coordenadas de cada nodo de la malla son modificadas de acuerdo con las funciones que se presentan en la ecuación (7.1), donde:  $y_0$ , es la nueva coordenada para cada nodo,  $y_{max}$ , es el desplazamiento máximo,  $n$ , define los modos de pandeo de la placa,  $x_i$ , es la coordenada en la dirección longitudinal de cada nodo y  $z_i$ , es la coordenada en la dirección transversal de cada nodo. Estas imperfecciones iniciales consideran las máximas tolerancias de fabricación en los paneles que integran el pontón. Las imperfecciones iniciales que se aplican consideran deformaciones equivalentes a un primer modo de pandeo de la placa con un desplazamiento máximo de 5 mm, que corresponde a una tolerancia máxima igual a un milésimo de la longitud del panel (*i.e.*  $L_x/1000$ ).

$$y_0 = y_{max} \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{L_x} \cdot x_i\right) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{L_z} \cdot z_i\right) \quad (7.1)$$

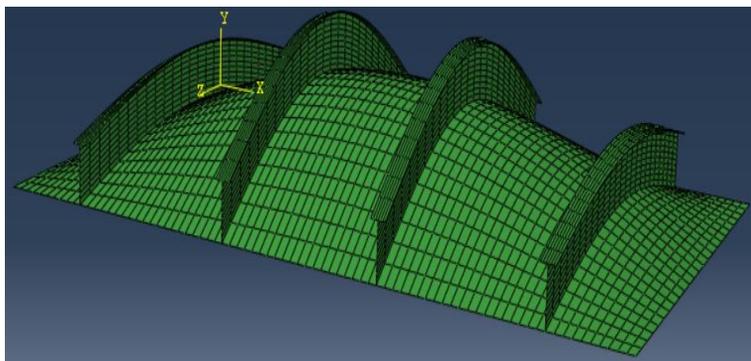
Para observar de manera gráfica las imperfecciones iniciales en los paneles rigidizado con los diferentes tipos de atiesadores (tipo placa, tipo ángulo y tipo T). En las figuras 7.8, 7.9 y 7.10 se muestran las mallas deformadas con un factor de amplificación de 100 veces, donde se toma en cuenta el primer modo de pandeo como se mencionó en el párrafo anterior.



**Figura 7.8 Imperfecciones iniciales en el panel rigidizado con atiesadores tipo placa con un factor de amplificación de 100 veces**



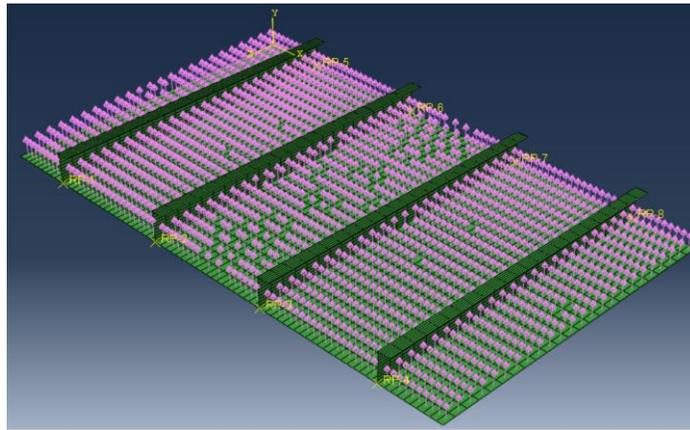
**Figura 7.9 Imperfecciones iniciales en el panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo con un factor de amplificación de 100 veces**



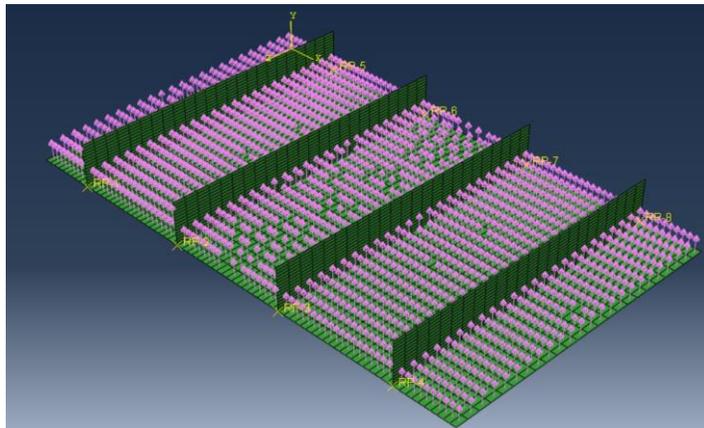
**Figura 7.10 Imperfecciones iniciales en el panel rigidizado con atiesadores tipo T con un factor de amplificación de 100 veces**

#### 7.1.4.2 Presión hidrostática

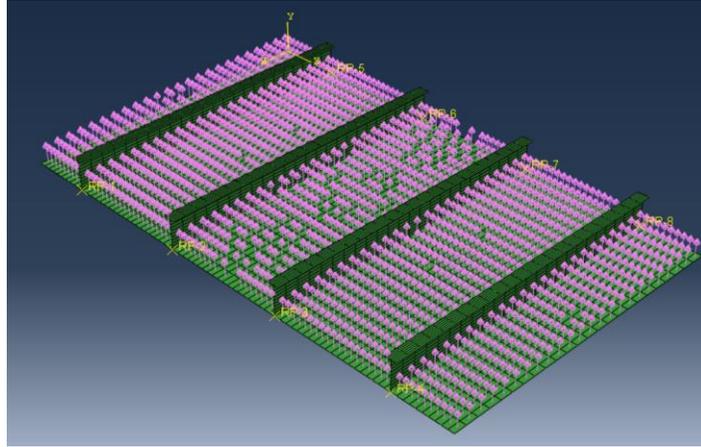
Una vez consideradas las imperfecciones iniciales en el panel se aplica la presión hidrostática, la cual es una carga constante con un valor de 0.3 MPa sobre los paneles. Esta presión hidrostática se obtiene del producto de la densidad del material, de la gravedad y la profundidad del calado ( $\rho g d$ ). Por lo tanto, en las figuras 7.11, 7.12 y 7.13 se muestra esquemáticamente los paneles cargados con la presión hidrostática para cada tipo de atiesador.



**Figura 7.11** Aplicación de la presión hidrostática con atiesador tipo ángulo.



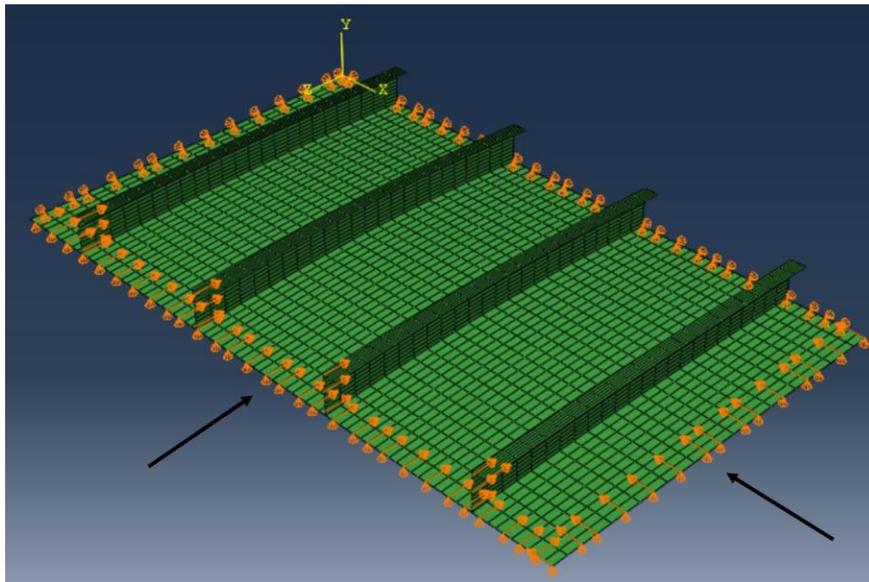
**Figura 7.12** Aplicación de la presión hidrostática con atiesador tipo placa.



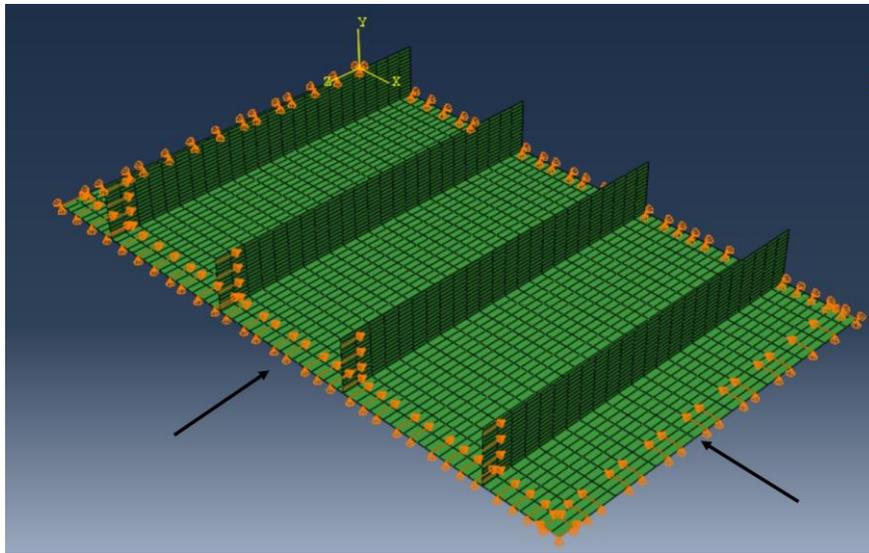
**Figura 7.13** Aplicación de la presión hidrostática con atiesador tipo T.

#### *7.1.4.3 Carga biaxial con control en desplazamiento proporcional*

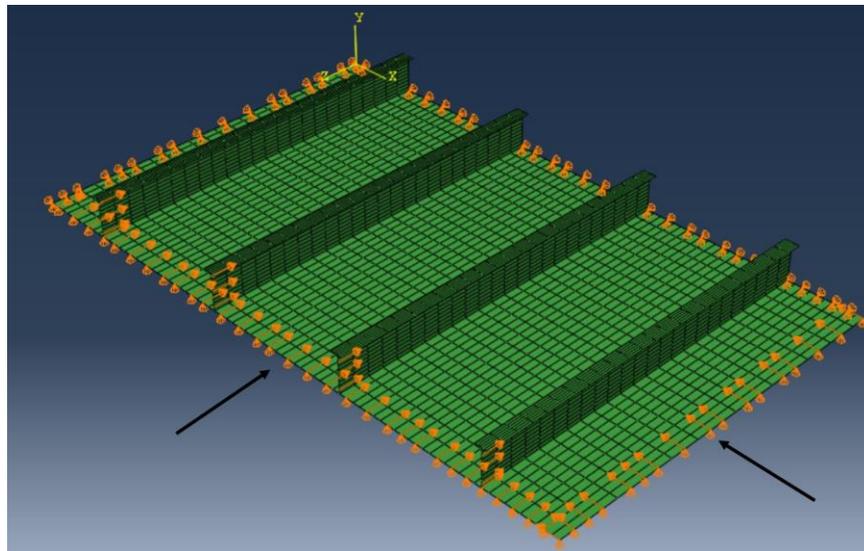
Posteriormente para determinar la resistencia última del panel rigidizado se aplica carga axial simultáneamente aplicada en ambas direcciones del panel controlando los desplazamientos de manera proporcional con diferentes relaciones. En las figuras 7.14 a 7.16 se ilustra esquemáticamente la forma en que se aplican los desplazamientos de manera simultánea en ambas direcciones para cada uno de los paneles rigidizados con el atiesador tipo placa, ángulo y T.



**Figura 7.14** Aplicación del desplazamiento proporcional (atiesador tipo ángulo).

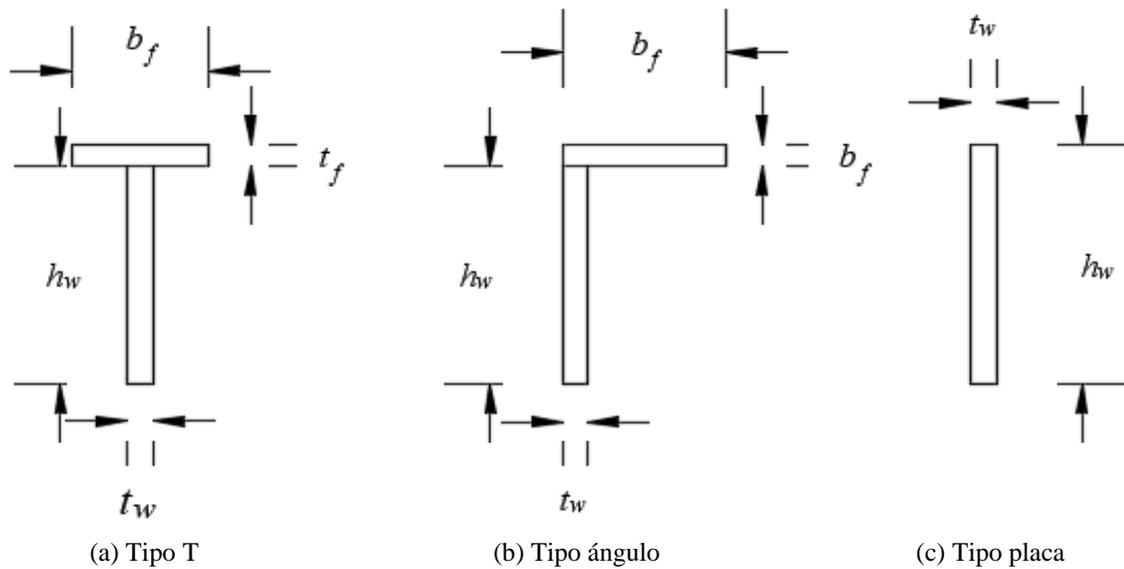


**Figura 7.15** Aplicación del desplazamiento proporcional (atiesador tipo placa).



**Figura 7.16** Aplicación del desplazamiento proporcional (atiesador tipo T).

Por otro lado, en la figura 7.17 se presenta la sección transversal de los tres tipos de atiesadores que se emplean en los análisis. Además, se muestran las dimensiones geométricas para cada uno de ellos, donde  $b_f$  es el ancho del patín,  $t_f$  es el ancho del patín,  $h_w$  es la altura del alma y  $t_w$  es el ancho del alma.



**Figura 7.17 Sección transversal y características geométricas del atiesador**

## 7.2 Resistencia última

En esta sección se presentan los patrones de desplazamiento. Así como la comparativa entre la envolvente calculada con las ecuaciones de las recomendaciones practicas DNV-RP-C201 y la envolvente obtenida de elementos finitos para cada uno de los paneles rigidizados con los tres diferentes tipos de atiesadores (ángulo, T y placa).

Como primer aspecto en las figuras 7.18, 7.19 y 7.20 se presentan las relaciones de proporcionalidad de la aplicación de los desplazamientos. En todas estas figuras el eje horizontal corresponde a los desplazamientos que se aplican en la dirección longitudinal, y el eje vertical representa los desplazamientos que se aplican en la dirección transversal. Por otro lado, las etiquetas L\_max y T\_max son los desplazamientos impuestos de manera uniaxial en la dirección longitudinal y transversal, respectivamente. Mientras que las etiquetas L1\_T1, L1\_T1.25, L1\_T1.5, L1\_T2, L1\_T3, L1\_T4, L1\_T10 y L1\_T30 corresponden a las relaciones de proporcionalidad 1:1, 1:1.25, 1:1.5, 1:2, 1:3, 1:4, 1:10 y 1:30, respectivamente. Donde el primer valor representa la aplicación del desplazamiento en la dirección longitudinal, el cual se incrementa de uno en uno. Por otro lado, el segundo valor representa el valor con el que se va incrementando el desplazamiento en la dirección transversal que crece al depender la relación de proporcionalidad.

Además, se observa cómo los patrones de desplazamiento de las diferentes relaciones de proporcionalidad varían de la relación de proporcionalidad menor (1:1) hacia las relaciones de proporcionalidad mayores (1:30) que es lo que ocurre en las envolventes, las cuales se muestran más adelante.

Para el caso del panel rigidizado con atiesadores tipo T y placa se observa que cuando se aplican los desplazamientos en la dirección longitudinal y transversal de manera unidireccional el nivel de estos es menor que en el panel rigidizado con los atiesadores tipo ángulo.

Además, se aprecia que para los casos de los paneles rigidizados con atiesadores tipo T y ángulo, cuando se tienen relaciones de proporcionalidad mayores, los desplazamientos en la dirección longitudinal son menores, lo cual tiene sentido ya que al incrementar de manera más rápida en la dirección transversal la dirección longitudinal tiene menores desplazamientos.

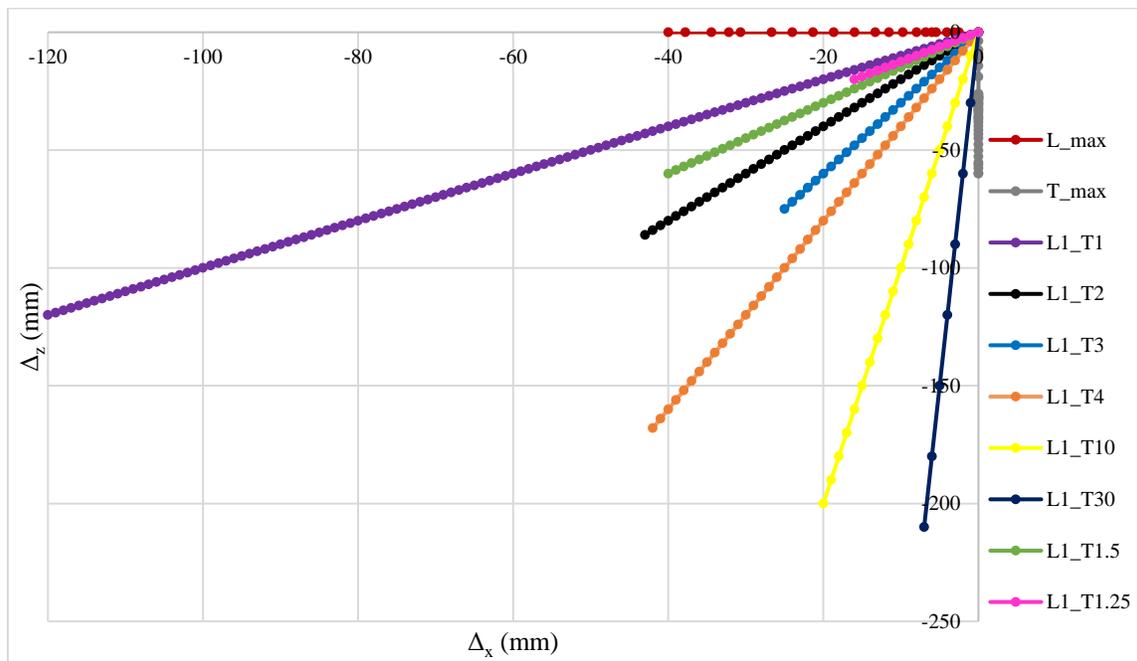


Figura 7.18 Relaciones de proporcionalidad de desplazamientos en panel con atiesadores tipo ángulo.

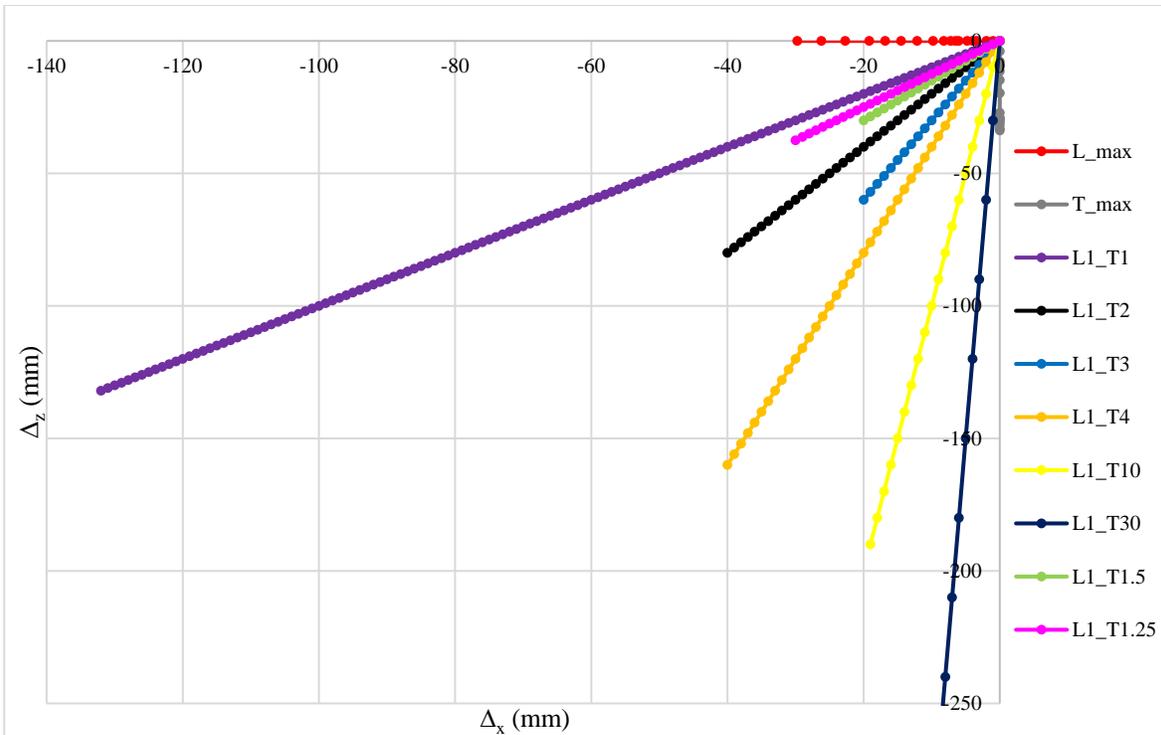


Figura 7.19 Relaciones de proporcionalidad de desplazamientos en panel rigidizado con atiesadores tipo T.

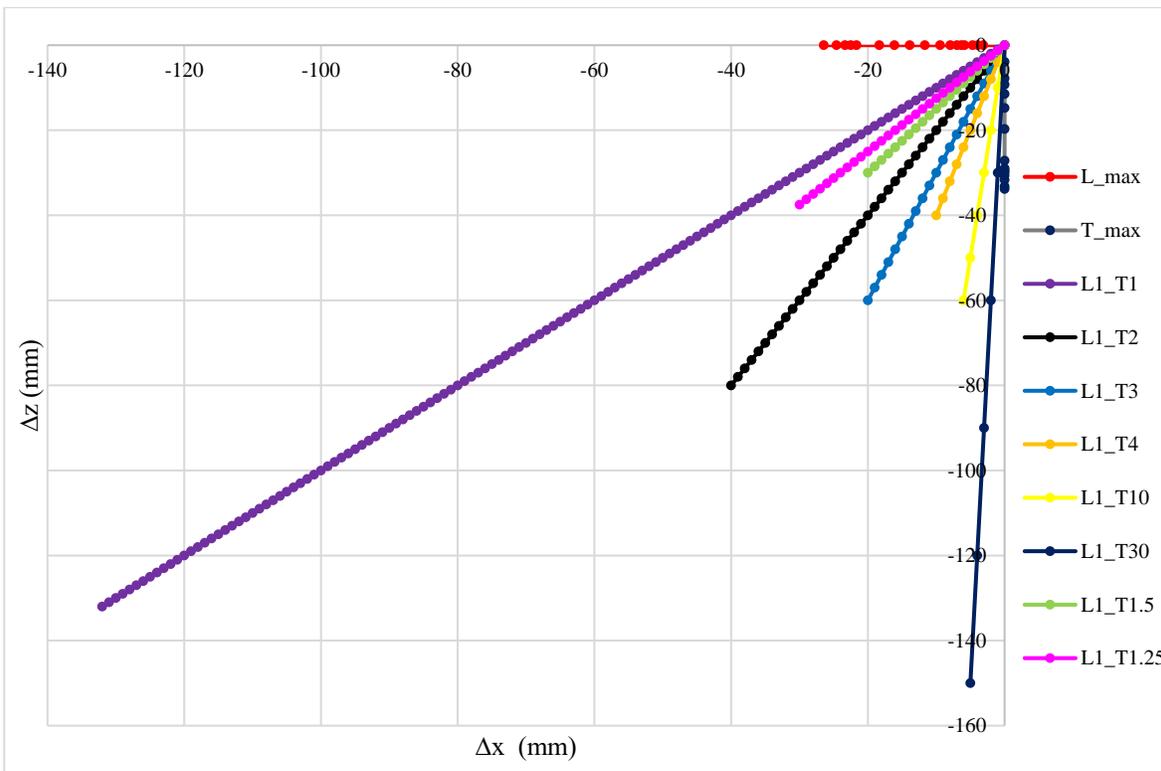


Figura 7.20 Relaciones de proporcionalidad de desplazamientos en panel rigidizado con atiesadores tipo placa

Por otro lado, en las figuras 7.21, 7.22 y 7.23 se muestran las envolventes de resistencia última de los paneles rigidizados con atiesadores tipo ángulo, tipo T y tipo placa. En estas figuras en el eje horizontal se presentan los esfuerzos en la dirección longitudinal. Mientras que el eje vertical corresponde a los esfuerzos en la dirección transversal. Además, la leyenda se organiza de la siguiente manera: L\_max y T\_max son los esfuerzos que se obtienen al aplicar desplazamientos de manera unidireccional dirección longitudinal y transversal, respectivamente. L1\_T1, L1\_T1.25, L1\_T1.5, L1\_T2, L1\_T3, L1\_T4, L1\_T10, L1\_T30 son los esfuerzos al tener una relación de proporcionalidad 1:1, 1:1.25, 1:1.5, 1:2, 1:3, 1:4, 1:10 y 1:30, respectivamente, y, DNV son los esfuerzos que se calculan con las ecuaciones de las recomendaciones prácticas (DNV- RP - C201.)

Es importante mencionar que en este estudio la tensión se toma positiva, mientras que la compresión se toma negativa. Como se observa en las figuras 7.21, 7.22 y 7.23 se presentan cuatro cuadrantes: tensión – tensión, tensión – compresión, compresión – compresión y compresión – tensión. En el primer cuadrante se tienen los esfuerzos correspondientes únicamente al efecto de la presión hidrostática, los cuales comienzan a incrementar hasta llegar a un par de esfuerzos de aproximadamente 60 MPa en la dirección longitudinal y 80 MPa en la dirección transversal en tensión – tensión. Es de esperarse que para todas las relaciones de proporcionalidad estas comienzan desde ese punto al aplicarse el patrón de desplazamientos debido a que el valor de la presión hidrostática es la misma para todos los patrones de desplazamiento empleados en esta sección. Por otro lado, en el segundo cuadrante se muestra como al ser impuestos diferentes patrones de desplazamiento las trayectorias van cambiando, lo cual es dependiente de la relación de proporcionalidad aplicada. Mientras, que en el tercer cuadrante se tiene la resistencia última del panel debida a los esfuerzos de compresión biaxiales, la cual se explicará de manera detallada más adelante. Finalmente, en el cuarto cuadrante se observa que para las relaciones de proporcionalidad con valores altos se mueven por ese cuadrante esto debido al incremento de desplazamientos en la dirección transversal.

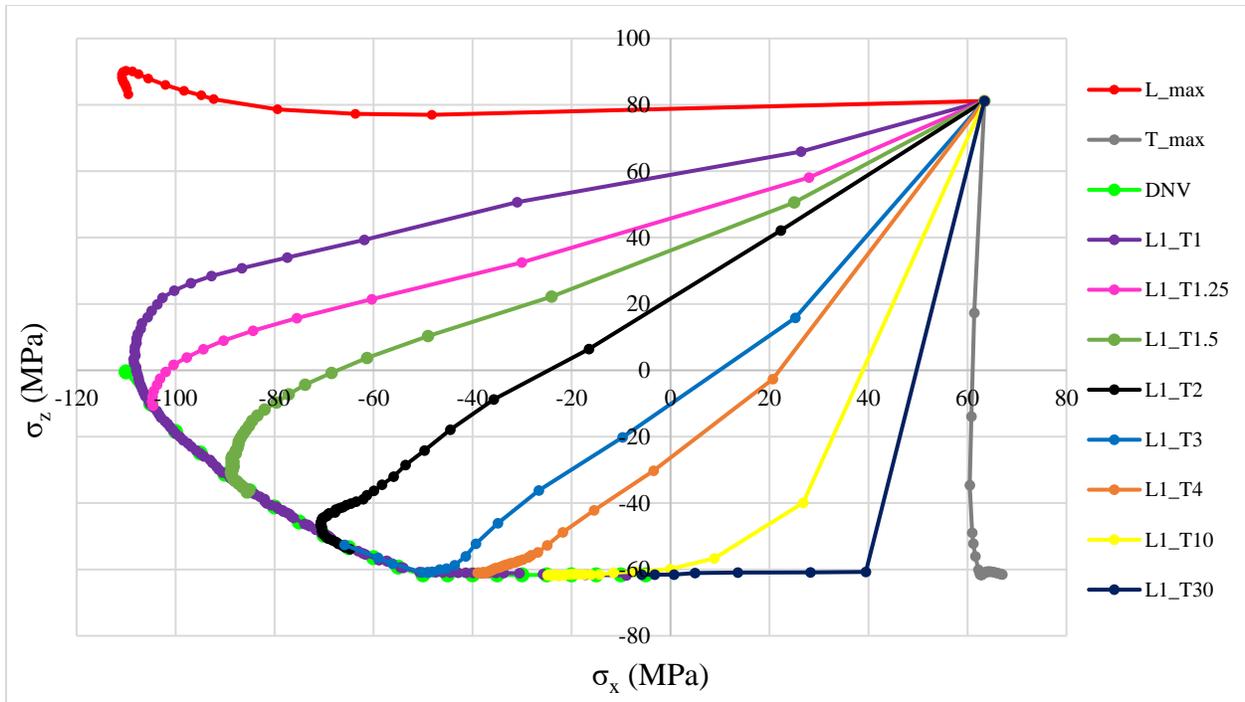


Figura 7.21 Envolvente de resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo.

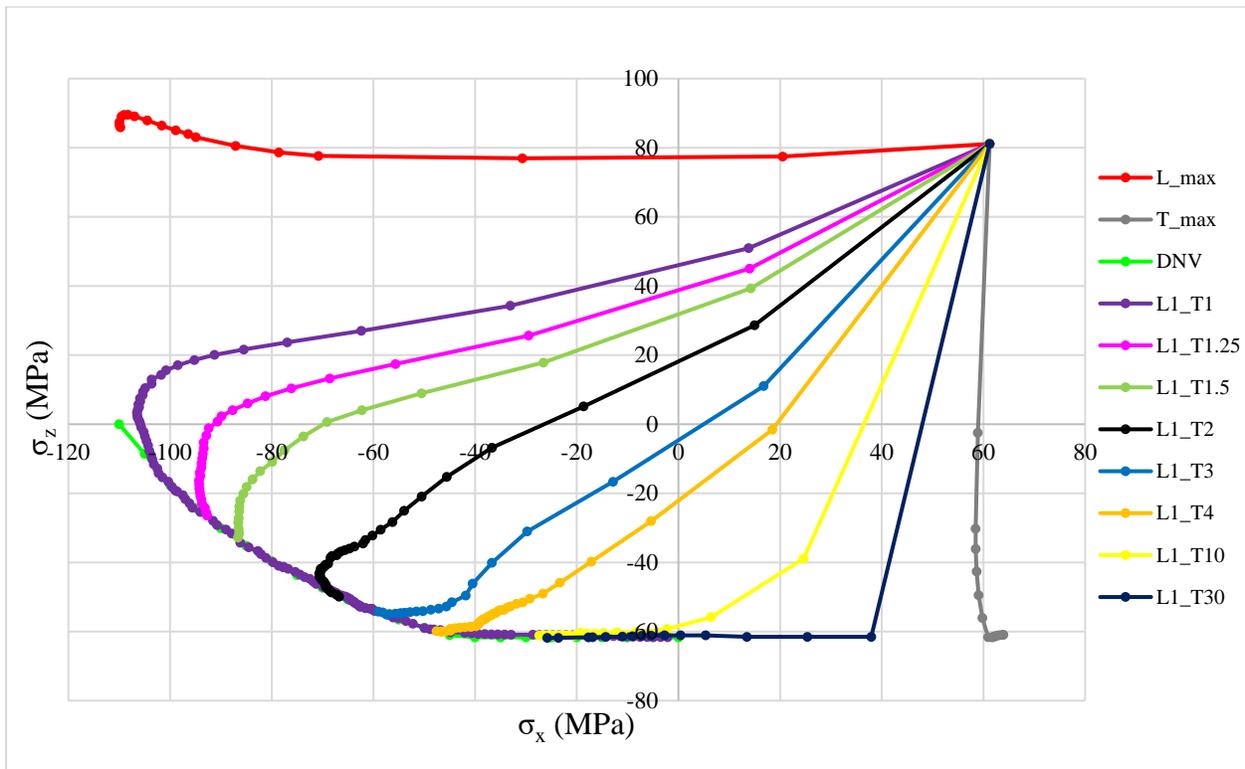
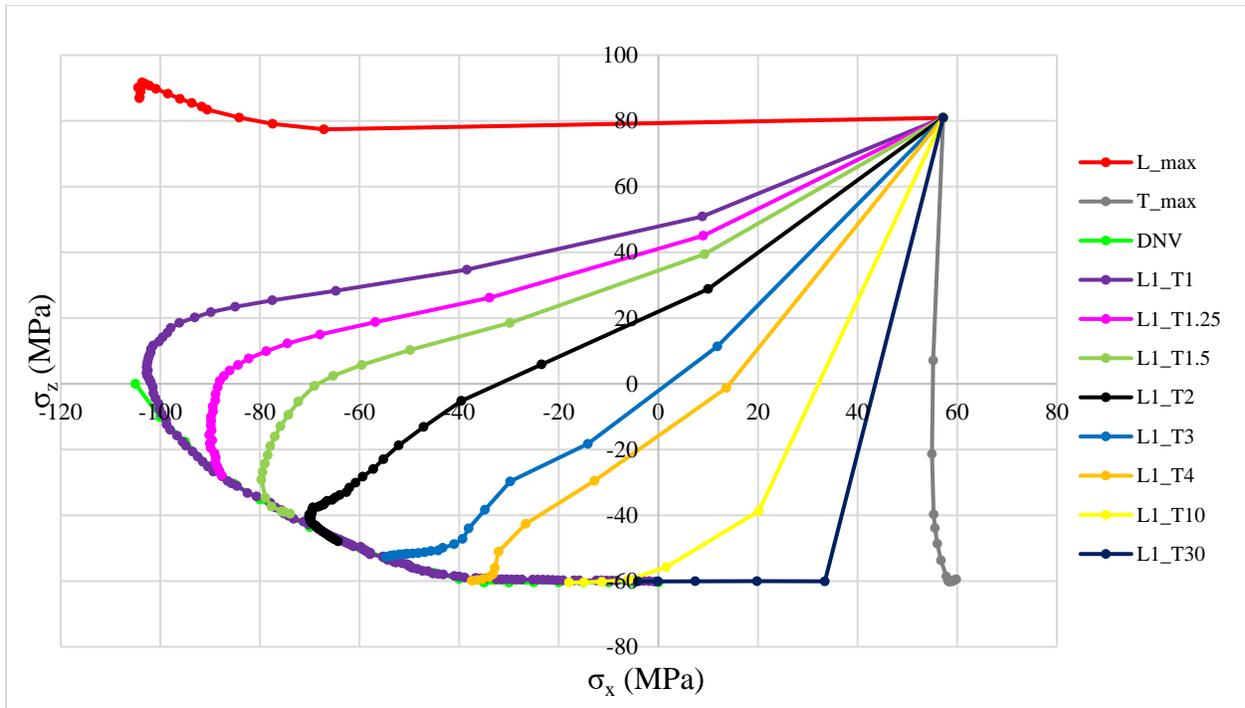


Figura 7.22 Envolvente de resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo T.



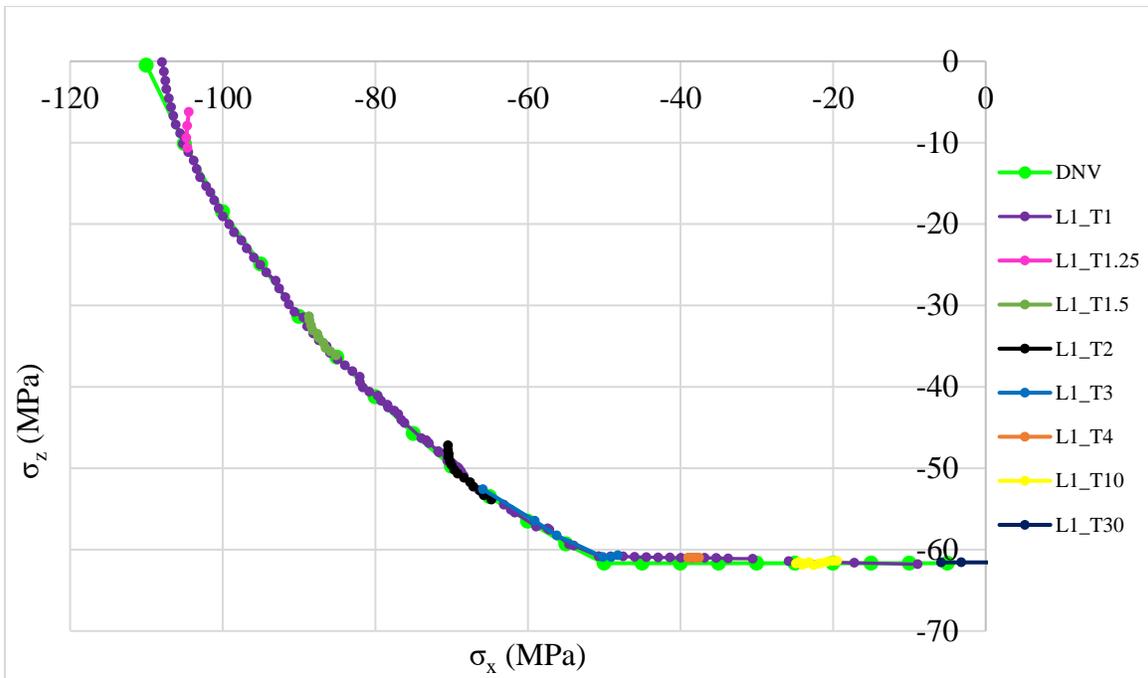
**Figura 7.23** Envoltura de resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo placa.

Por otro lado, para observar de manera detallada en las figuras 7.24, 7.25 y 7.26 se muestran únicamente los resultados del tercer cuadrante correspondientes a la resistencia última de cada uno de los paneles rigidizado con atiesadores tipo ángulo, tipo T y tipo placa. Además, se presenta una comparativa entre los resultados calculados de las ecuaciones de las recomendaciones prácticas DNV- RP - C201 y con el método de elementos finitos utilizando el software Abaqus 6.13.

Por lo tanto, se observa que los resultados obtenidos tanto con las recomendaciones prácticas DNV-RP-C201 y elementos finitos tienen una gran similitud con diferencias menores al 1% en la mayoría de los puntos. Además, se comparan los resultados de elementos finitos considerando diferentes relaciones de proporcionalidad de desplazamiento 1:1, 1:1.25, 1:1.5, 1:2, 1:3, 1:4, 1:10 y 1:30, las cuales también tienen gran concordancia con diferencias menores al 1%.

Sin embargo, al utilizar estas relaciones de proporcionalidad solo se tienen algunos puntos sobre la curva de resistencia última, los cuales se obtienen con un menor número de análisis que al elegir una relación de proporcionalidad igual a uno. Además, se tiene que el esfuerzo máximo a compresión en la dirección longitudinal es de aproximadamente 110 MPa para el panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo y T. Mientras que para el panel rigidizado tipo placa el esfuerzo es de

100 MPa. Por otro lado, el esfuerzo a compresión en dirección transversal es de 62 MPa para el panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo y tipo T. Mientras, para el panel rigidizado con atiesadores tipo placa es de 60 MPa. Lo cual era de esperarse, que los paneles rigidizados con los atiesadores tipo ángulo y tipo T reporten valores ligeramente mayores en los esfuerzos tanto en la dirección longitudinal como en la dirección transversal.



**Figura 7.24 Resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo con elementos finitos y con las ecuaciones de DNV.**

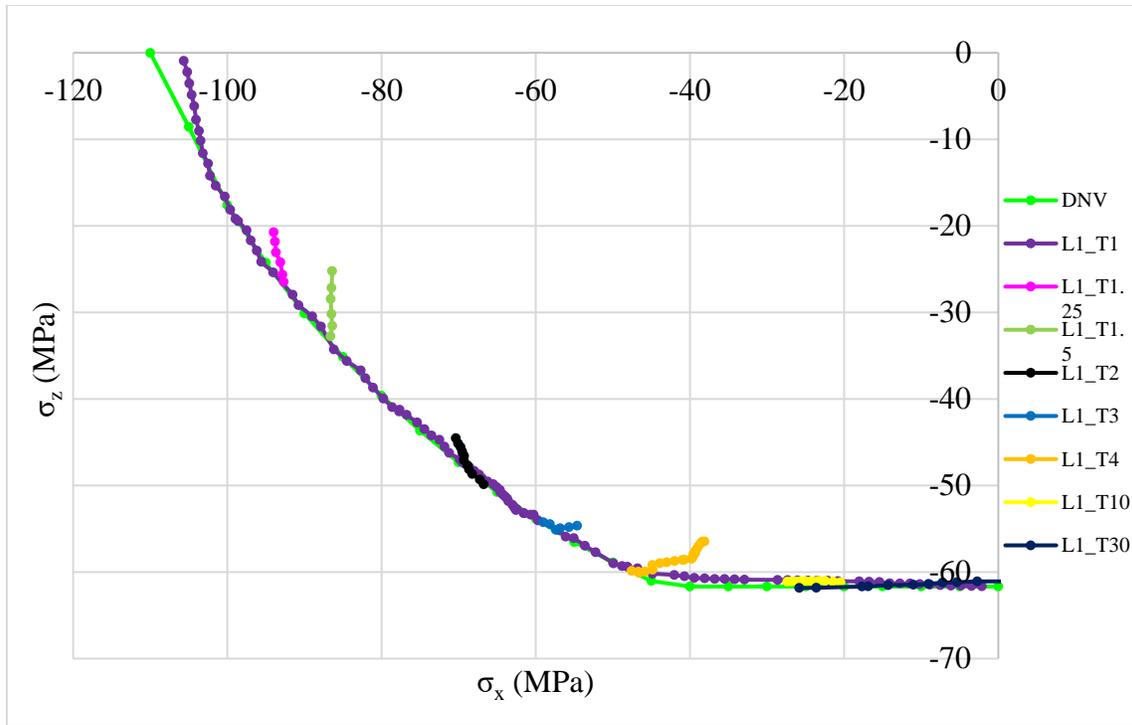


Figura 7.25 Resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo T con elementos finitos y con las ecuaciones de DNV.

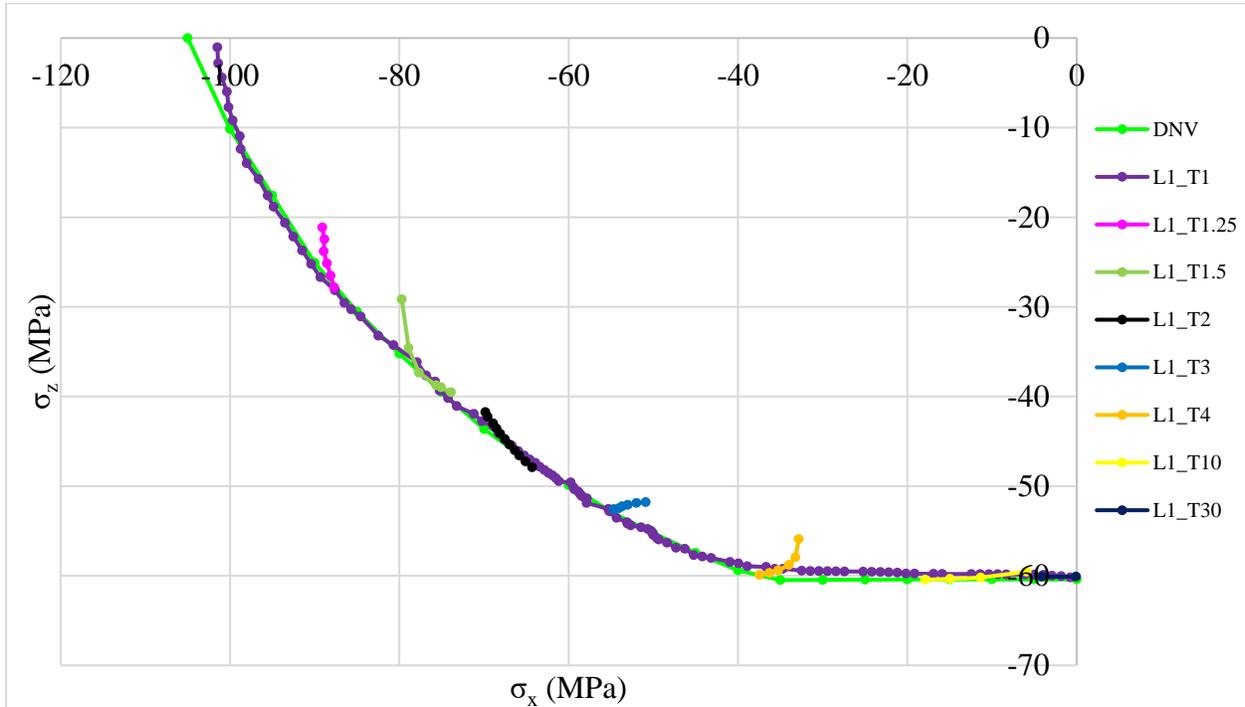
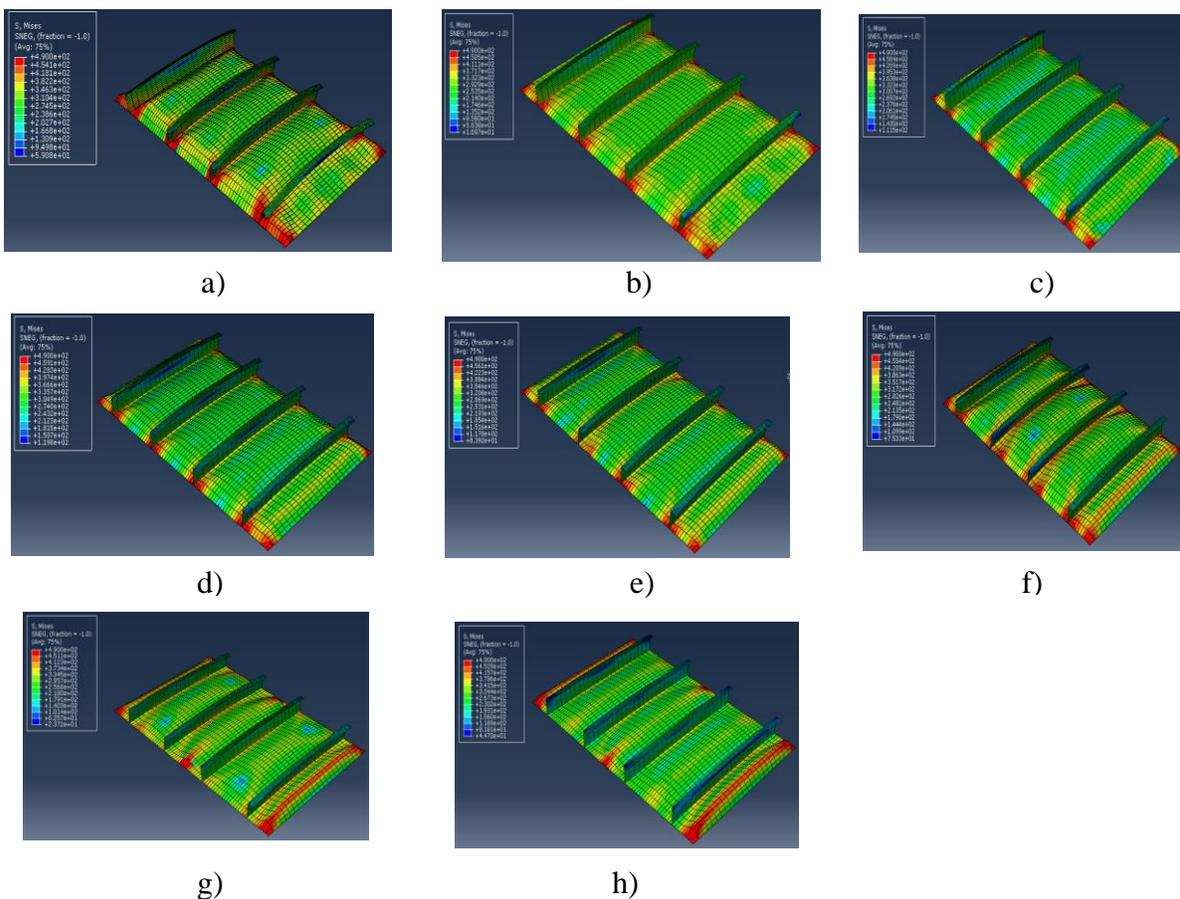


Figura 7.26 Resistencia última del panel rigidizado con atiesadores tipo placa con elementos finitos y con las ecuaciones de DNV.

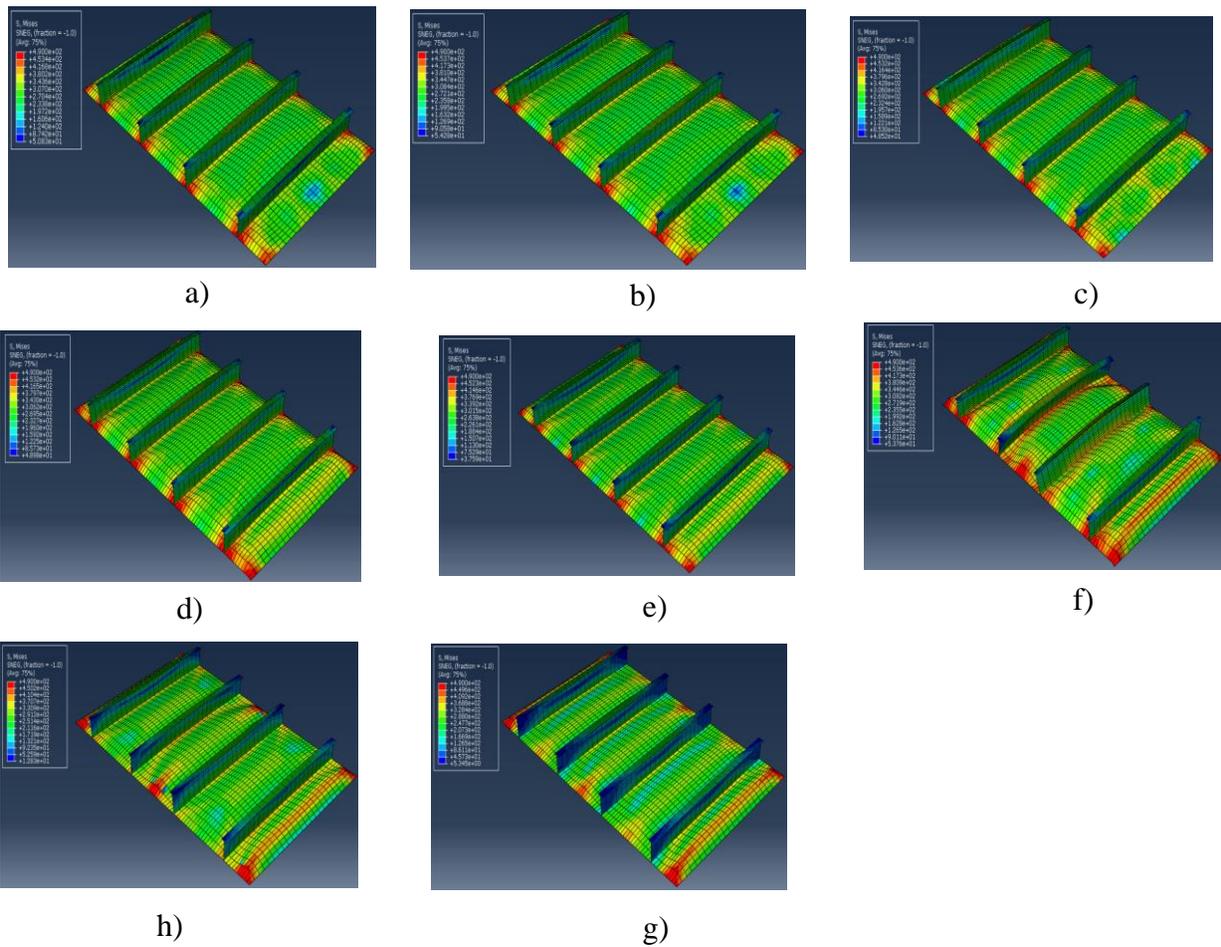
Sin embargo, aparte de las envolventes de la resistencia última, también se observa cómo actúan los esfuerzos en los paneles rigidizados de los análisis de elemento finito. Algunos de los resultados se presentan a continuación.

En la figura 7.27 se muestran los esfuerzos de Von Mises del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo en el que se consideran diferentes puntos sobre la curva de resistencia última de las diferentes relaciones de proporcionalidad. Como se observa en la mayoría de los puntos la placa sobre pasa el esfuerzo de fluencia del acero (355 MPa) para todos los elementos estructurales. Además, se aprecia que el lugar donde se comienza a esforzar primero es en los bordes cercanos a los atiesadores y, donde se encuentran los atiesadores lo cual es de esperarse que se tenga la mayor concentración de esfuerzos.



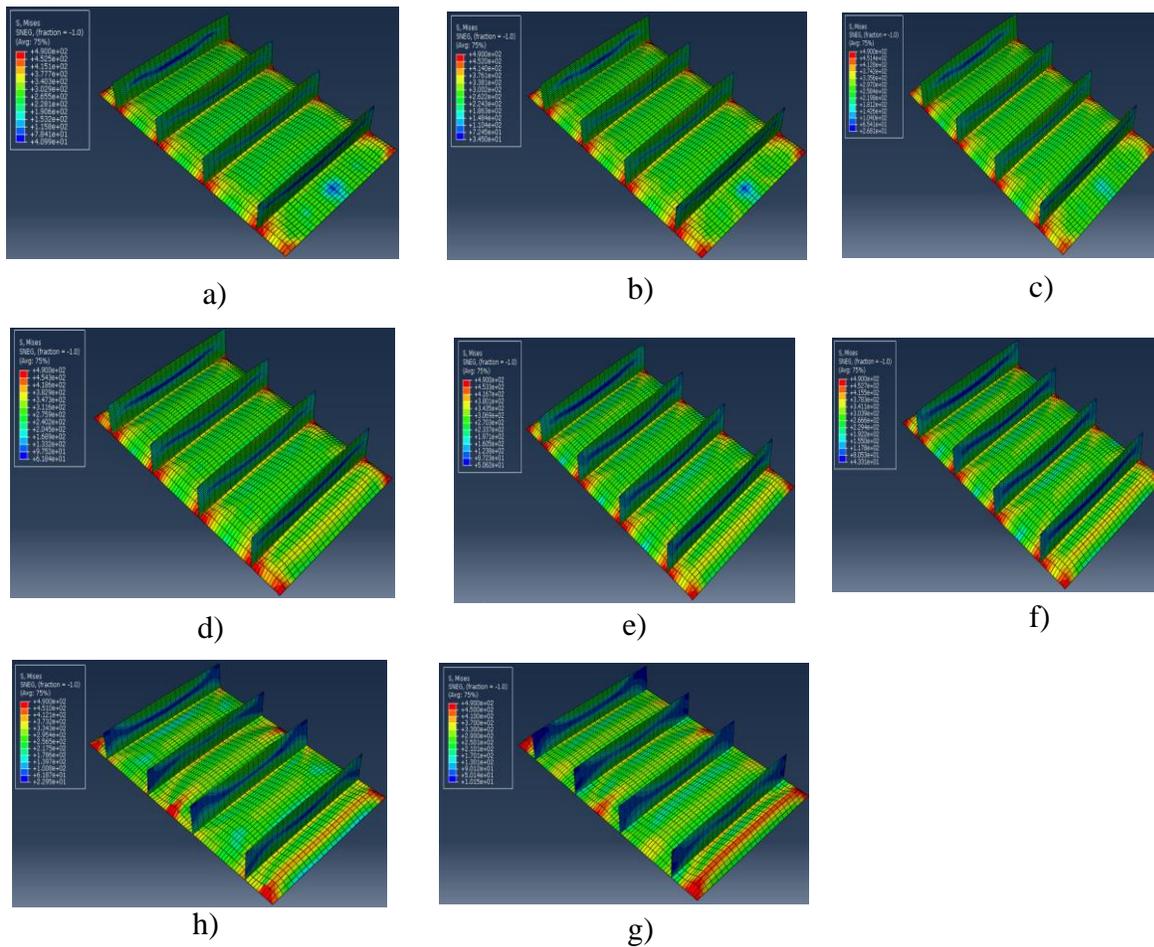
**Figura 7.27** Esfuerzos de la relación de proporcionalidad a) 1:1, b) 1:1.25, c) 1:1.5, d) 1:2, e) 1:3, f) 1:4, g) 1:10, h) 1:30 del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo.

Por otro lado, para el caso de los paneles rigidizados con atiesadores tipo T los esfuerzos de Von Mises se presentan en la figura 7.28. Como se observa al igual que en el caso del panel rigidizado con atiesadores tipo ángulo la concentración de esfuerzos se presenta en los bordes del panel, donde se encuentran los atiesadores. Además, se aprecia que al usar relaciones de proporcionalidad menores no se observan esfuerzos en los bordes paralelos a los atiesadores. Sin embargo, si la relación de proporcionalidad incrementa los esfuerzos también incrementan en esos bordes, lo cual es de esperarse.



**Figura 7.28** Esfuerzos de la relación de proporcionalidad a) 1:1, b) 1:1.25, c) 1:1.5, d) 1:2, e) 1:3, f) 1:4, g) 1:10, h) 1:30 del panel rigidizado con atiesadores tipo T.

Finalmente, en la figura 7.29 se presentan los esfuerzos de Von Mises del panel rigidizado con atiesadores tipo placa, en la cual se observa la misma tendencia que muestran los paneles rigidizados con los atiesadores tipo ángulo y T. Sin embargo, en comparación con los dos tipos de atiesadores anteriores el alma del atiesador se comienza a esforzar de afuera al centro del alma del atiesador esto debido a que estos atiesadores no cuentan con un patín que proporcione rigidez en el alma de los atiesadores.



**Figura 7.29** Esfuerzos de la relación de proporcionalidad a) 1:1, b) 1:1.25, c) 1:1.5, d) 1:2, e) 1:3, f) 1:4, g) 1:10, h) 1:30 del panel rigidizado con atiesadores tipo placa.

## 8 CONCLUSIONES

Una vez evaluados y revisados los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

En la primera etapa del trabajo de investigación la metodología propuesta se aplica en una etapa inicial de diseño donde la geometría óptima del casco de plataformas tipo semisumergibles de producción se obtiene de manera fácil y rápida. Además, la metodología fue eficazmente usada en tres casos de estudio con diferentes volúmenes de producción (100, 150 y 200 MBD) hipotéticamente localizadas en un tirante de agua de 2000 m en aguas territoriales en el Golfo de México. Después de la implementación de los AGs se observa que los valores de las dimensiones de las variables de diseño para los tres volúmenes de producción son: una separación entre columnas de 85 m, una altura de 46 m y un calado de 24 m. Sin embargo, para el caso del ancho de columnas se obtiene un valor de 16 m para el volumen de producción de 100 MBD, 18 m para el volumen de producción de 150 MBD y 20 m para el volumen de producción de 200 MBD. Por otro lado, para el ancho y la altura de los pontones se obtiene un valor de 10 m para ambas dimensiones. Sin embargo, para el caso de los volúmenes de producción de 150 y 200 MBD es de 12 m para la altura y ancho de los pontones.

Por otro lado, 5 de las 6 variables, que se consideran afectan el peso del casco siendo: ancho y altura de la columna, distancia entre columnas y la altura y ancho de los pontones. Sin embargo, el calado es la variable que afecta de manera directa la respuesta de movimientos lo cual se aprecia en los operadores de amplitud de respuesta considerados, que son: arfada, cabeceo y balanceo.

De acuerdo con los resultados que se muestran en el capítulo 6 referente al diseño óptimo de los paneles rigidizados que conforman los pontones al implementar los AGs se obtiene que el tipo de atiesador que arroja la mejor relación de interacción es el tipo ángulo con un peso del panel de 442.7 kg/m, un espesor de la placa del panel de 9 mm, más el espesor debido a la corrosión. Por otro lado, las dimensiones del perfil tipo ángulo son: altura del alma de 250 mm, espesor del alma y patín de 15 mm, ancho del patín de 90 mm. Además, el número de atiesadores es cuatro con una separación de 1.33 m, aproximadamente. Es importante mencionar que la versatilidad del código que se programa en el software de Matlab (2020a) permite incluir aspectos que no se toman en cuenta como, por ejemplo, el efecto del cortante.

Por otro lado, si se comparan los tres diferentes paneles en términos de peso el panel rigidizado con atiesadores tipo placa es 1% mayor que el panel óptimo (panel rigidizado con atiesadores tipo

ángulo), mientras que el panel rigidizado con atiesadores tipo T es 0.655% mayor. Aunque la diferencia por panel no es significativa, si lo es cuando se toman en cuenta el diseño estructural de todo el casco.

Finalmente, de la comparativa entre las curvas de capacidad o de resistencia última de los paneles rigidizados obtenidos con elementos finitos con el uso del software Abaqus 6.13 y con las ecuaciones de las recomendaciones prácticas DNV-RP-C201 (2005) arrojan una gran similitud entre ambos resultados con diferencias menores al 1%. Es importante destacar que al utilizar las ecuaciones dentro de los algoritmos genéticos se reduce el tiempo y esfuerzo computacional en comparación con los análisis de elementos finitos a pesar de generar hojas de entrada para el software Abaqus 6.13. Por otro lado, si se elige una relación de proporcionalidad 1:1 se requiere un gran número de análisis para cubrir toda la curva de resistencia última. Sin embargo, al elegir diferentes relaciones de proporcionalidad se requiere un número menor de análisis y, por ende, menor tiempo y esfuerzo computacional, aunque únicamente se obtienen algunos puntos sobre la curva de capacidad.

## **8.1 Trabajos futuros**

Existen algunos aspectos que no fueron considerados en este trabajo, los cuales podrían ser tomados en cuenta en trabajos futuros, por ejemplo, incluir en la respuesta la medida del air gap, considerar de una manera explícita la condición ambiental en la respuesta, debido a que en este trabajo fue analizado de una manera implícita.

Con respecto a la parte del diseño estructural se debe considerar el estado límite por fatiga debido a que en este trabajo únicamente se considera el estado límite último.

## 9 REFERENCIAS

- Akagi, S. y Ito, K. (1984) “Optimal design of semisubmersible form by minimizing its motion in random seas”, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 106(1), pp. 23–30. doi: 10.1115/1.3258555.
- Akagi, S., Yokoyama, R. y Ito, K. (1984) “Optimal design of semisubmersible’s form based on systems analysis”, *American Society of Mechanical Engineers (Paper)*, (84).
- Amante, D. y Estefen, S. F. (2011) “Buckling strength of damaged stiffened panels”, *OMAE-2011*, pp. 463–474. doi: 10.1115/OMAE2011-49650.
- Aubault, A., Cermelli, C. y Roddier, D. (2007) “Parametric optimization of a semi-submersible platform with heave plates”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 1, pp. 471–478. doi: 10.1115/OMAE2007-29391.
- Baarholm, R., Fylling, I., Stansberg, C. T. y Oritsland, O. (2006) “Model testing of ultra-deepwater floater systems: truncation and software verification methodology”, pp. 527–537. doi: 10.1115/OMAE2006-92492.
- Babu, K. y Raja, G. (1987) “Hydrodynamic behaviour of a semisubmersible”, en *OCEANS '87*, pp. 575–580. doi: 10.1109/OCEANS.1987.1160801.
- Bearman, P. W., Downie, M. J., Graham, J. M. R. y Obasaju, E. D. (1985) “Forces on cylinders in viscous oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter numbers”, *Journal of Fluid Mechanics*. 2006/04/20. Cambridge University Press, 154, pp. 337–356. doi: DOI: 10.1017/S0022112085001562.
- Bindingsbo, A. U. y Bjørset, A. (2002) “Deep draft semi submersible”, pp. 651–659. doi: 10.1115/OMAE2002-28369.
- Brebbia, C. A., and Walker, S. (1979). *Dynamic Analysis of Offshore Structures*.
- Chakrabarti, K. (2005) *Handbook of offshore engineering*. London: Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-08-044381-2.50014-X.
- Chakrabarti, S., Barnett, J., Kanchi, H., Mehta, A. y Yim, J. (2007) “Design analysis of a truss pontoon semi-submersible concept in deep water”, *Ocean Engineering*, 34(3), pp. 621–629. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2006.03.012>.

- Chakrabarti, S. K. (1985) “Recent advances in high-frequency wave forces on fixed structures”, *Journal of Energy Resources Technology*, 107(3), pp. 315–328. doi: 10.1115/1.3231194.
- Chen, H. y Mezbah, M. (2013) “Optimization of a floating platform design”, *Chalmers University of Technology: Department of shipping and marine technology*.
- Clauss, G. F., Schmittner, C. y Stutz, K. (2002) “Time-domain investigation of a semisubmersible in rogue waves”, pp. 509–516. doi: 10.1115/OMAE2002-28450.
- Clough, R. W. y Penzien, J. A. (1993) *Dynamics of structures*. New York: McGraw-Hill.
- De Conti, M., De Andrade, B. y Birk, L. (2008) “Differentiation between the lower and upper parts of columns of semi-submersibles for heave response improvement”, *Marine Systems & Ocean Technology*, 4(2), pp. 63–72. doi: 10.1007/BF03449233.
- Cui, J. y Wang, D. (2018) “A study of ultimate strengths of typical longitudinal girders with openings in container ships”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 3, pp. 1–9. doi: 10.1115/OMAE2018-77820.
- Das, P. K., Thavalingam, A. y Bai, Y. (2003) “Buckling and ultimate strength criteria of stiffened shells under combined loading for reliability analysis”, *Thin-Walled Structures*, 41(1), pp. 69–88. doi: 10.1016/s0263-8231(02)00093-9.
- Derbanne, Q., Haucloque, G. D., Gharbaoui, A. y Belizal, P. D. (2013) “Design wave selection for strength assessment of floating structures”, (January 2013), pp. 242–249.
- Dev, A. K. y Pinkster, J. A. (1997) “Viscous mean and low frequency drift forces on semi-submersibles”, en *International Conference on Behavior of Offshore Structures*. The Netherlands, pp. 351–366.
- DNV-OS-C101 (2015) “Design of offshore steel structures, general - LRFD method”.
- DNV-OS-C103 (2004) “Structural design of column”.
- DNV-OS-C301. (2015) “Stability and watertight integrity”.
- DNV-RP-C103 (2005) “Column - stabilised units”.
- DNV-RP-C201 (2002) “Buckling strength of plated structures”, *Recommended practice DNV-RPC201*, Høvik, Norway. Disponible en:

[http://davidmuir.com/offshore/ODB/Norwegian\\_Codes/RP-C201.pdf](http://davidmuir.com/offshore/ODB/Norwegian_Codes/RP-C201.pdf).

DNV-RP-H103 (2017) “Modelling and analysis of marine operations”.

DNV (2016) “Allowable thickness diminution for hull structure”, *No.72.1*, No.72.1(72), pp. 1–13.

DNV manual (2007) “Postprocessor for statistical response calculations”.

DNV manual (2015) “Nauticus tm hull”.

Do, H. C., Jiang, W., Jin, J. y Chen, X. (2013) “Ultimate limit state assessment of stiffened panel structures for very large ore carrier via nonlinear finite element method”, *International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering (IJMECH)*, 2(2), pp. 33–46.

Domala, V., Ranjeet, M. y Sharma, R. (2014) “A note on effect of geometric dimensions, shape and arrangement of columns and pontoons on heave and pitch response of semi-submersible”, *2014 Oceans - St. John's, OCEANS 2014*. doi: 10.1109/OCEANS.2014.7003061.

Doshi, K. y Vhanmane, S. (2014) “Ultimate strength of stiffened plates subjected to longitudinal compression and lateral pressure”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 4, pp. 1–11. doi: 10.1115/OMAE2014-24637.

Dung, N. T., Rigo, P. y Bayatfar, A. (2008) “Ultimate strength analysis of steel plates using Iso / Dis 1872-2 and Ulsap”.

Estefen, T. P. y Estefen, S. F. (2012) “Buckling propagation failure in semi-submersible platform columns”, *Marine Structures*. Elsevier Ltd, 28(1), pp. 2–24. doi: 10.1016/j.marstruc.2012.05.003.

Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*.

Farkas, J. y Jarmai, K. (2014) *Optimum design of steel structures 2013*. Engineering structures and technologies.

Frank, W. (1967) *Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids*. Washington, D.C.

Fujikubo, M., Yao, T., Khedmati, M. R., Harada, M., y Yanagihara, D. (2005) “Estimation of ultimate strength of continuous stiffened panel under combined transverse thrust and lateral pressure part 1: Continuous plate”, *Marine Structures*, 18(5–6), pp. 383–410. doi: 10.1016/j.marstruc.2005.08.004.

Gallala, J. R. (2013) “Hull dimensions of a semi-submersible rig”, (June), p. 123. Disponible en: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:649781/FULLTEXT01.pdf>.

Gao, S., Tao, L., Kou, Y., Lu, C. y Sun, J. (2018) “Numerical and experimental study on hydrodynamic performance of a novel semi-submersible concept”, *China Ocean Engineering*, 32(2), pp. 144–156. doi: 10.1007/s13344-018-0016-y.

Hatzidakis, N. y Bernitsas, M. M. (1994) “Comparative design of orthogonally stiffened plates for production and structural integrity—part 1: size optimization”, *Journal of Ship Production*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 10(03), pp. 146–155. Disponible en: <https://doi.org/>.

Hogben, N. (1976) “Wave loads on structures”, pp. 187–219.

Hong, L., Meng, L., Qin, Z., Zhang, E. y Li, L. (2016) “Ultimate strength analysis of stiffened panels of ship structures under combined load”, *ECCOMAS Congress 2016*.

Hooft, J. P. (1972) “A mathematical method of determining hydrodynamically induced forces on a semisubmersible”, *Annual Meeting of SNAME*, p. 36.

Houston, O. E. (2002) “Ultra deepwater dry tree system for drilling and production”, *RPSEA 1402*.

Hur, M., Lee, S., Kim, B., Cho, S., Lee, D. y Lee, D. (2013) “A study on the man-hour prediction system for shipbuilding”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(6), pp. 1267–1279. doi: 10.1007/s10845-013-0858-3.

Jang, B. S., Kim, J. D., Park, T. Y. and Jeon, S. B. (2019) “FEA based optimization of semi-submersible floater considering buckling and yield strength”, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. Elsevier Ltd, 11(1), pp. 82–96. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.02.010.

Kim, D. K., Lim, H. L., Kim, M. S., Hwang, O. J. and Park, K. S. (2017) “An empirical formulation for predicting the ultimate strength of stiffened panels subjected to longitudinal compression”, *Ocean Engineering*. Elsevier Ltd, 140(April 2016), pp. 270–280. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.05.031.

Kim, J.-D. y Jang, B.-S. (2016) “Application of the global optimization method to the preliminary design of tension leg platforms”, *Offshore and Arctic Engineering*. doi: 10.1115/OMAE2016-

54567.

Kovacs, G. (1993) “Environmental conditions and environmental testing”, *INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings)*, 2(October), pp. 92–99. doi: 10.1109/INTLEC.1993.388591.

Kyoung, J., O'Sullivan, J., Kostas, L., Whan, K. J. y Ermon, J. (2014) “Low motion semisubmersible hull for dry tree application”, *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, p. 13. doi: 10.4043/25388-MS.

Leal, M. y Gordo, J. M. (2017) “Hull’s manufacturing cost structure”, *Brodogradnja*, 68(3), pp. 1–24. doi: 10.21278/brod68301.

Lee, M.-Y., Zeng, J. y Poll, P. (2014) “The state of dry-tree semi-submersible platforms for deepwater Gulf of Mexico”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 7. doi: 10.1115/OMAE2014-23236.

Li, B., Liu, K., Yan, G. y Ou, J. (2011) “Hydrodynamic comparison of a semi-submersible, TLP, and Spar: numerical study in the south China sea environment”, *Journal of Marine Science and Application*, 10(3), p. 306. doi: 10.1007/s11804-011-1073-2.

Li, H., Ren, H., Wei, T. y Feng, G. (2009) “Study on the wave loads and strength assessment method on semi-submersible platform”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 2, pp. 463–471. doi: 10.1115/OMAE2009-79678.

Matos, V. L. F., Simos, A. N. y Sphaier, S. H. (2011) “Second-order resonant heave, roll and pitch motions of a deep-draft semi-submersible: theoretical and experimental results”, *Ocean Engineering*, 38(17), pp. 2227–2243. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.10.005>.

Minkenbergh, H. L. y Van Sluijs, M. F. (1972) “Motion optimization of semi-submersibles”, *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas: Offshore Technology Conference, p. 12. doi: 10.4043/1627-MS.

Mohamed, A. (2011) *Hydrodynamic loading and responses of semisubmersibles*. Philosophy School of Marine Science and Technology.

- Mohammed, E., Benson, S. D., Hirdaris, S. E. y Dow, R. S. (2016) “Design safety margin of a 10,000 TEU container ship through ultimate hull girder load combination analysis”, *Marine Structures*. Elsevier Ltd, 46, pp. 78–101. doi: 10.1016/j.marstruc.2015.12.003.
- Morison, J. R., Johnson, J. W. y Schaaf, S. A. (1950) “The force exerted by surface waves on piles”, *Journal of Petroleum Technology*. Society of Petroleum Engineers, 2(05), pp. 149–154. doi: 10.2118/950149-G.
- Newman, J. N. (2005) “Efficient hydrodynamic analysis of very large floating structures”, *Marine Structures*, 18(2), pp. 169–180. doi: 10.1016/j.marstruc.2005.07.003.
- Offshore magazine (2011) “2011 Worldwide survey of semi-FPSs and FPU’s”.
- Ogeman, E. (2014) *Sensitivity study of semisubmersible motions to hull form parameters and their optimisation*, TRITA-AVE NV - 2014:85. Disponible en: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:796783/FULLTEXT01.pdf>.
- Paik, J. K., Thayamballi, A. K., Kim, B. J., Wang, G., Shin, Y. S. and Liu, D. (2001) *Ultimate limit state design of ship stiffened panels and grillages*, *SNAME Transactions*.
- Paik, J. K., Wang, G., Kim, B. J. and Thayamballi, A. K. (2003) “Ultimate limit state design of ship hulls”, *Transactions - Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 110(M), pp. 473–496.
- Paik, J. K., Kim, B. J. y Seo, J. K. (2008a) “Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: part I-unstiffened plates”, *Ocean Engineering*, 35(2), pp. 261–270. doi: 10.1016/j.oceaneng.2007.08.004.
- Paik, J. K., Kim, B. J. y Seo, J. K. (2008b) “Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: part II stiffened panels”, *Ocean Engineering*, 35(2), pp. 271–280.
- Paik, J. K., Kim, B. J. y Seo, J. K. (2008c) “Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: part III hull girders”, *Ocean Engineering*, 35(2), pp. 281–286. doi: 10.1016/j.oceaneng.2007.08.008.
- Park, Y., Jang, B.-S. y Kim, J. Du (2015) “Hull-form optimization of semi-submersible FPU considering seakeeping capability and structural weight”, *Ocean Engineering*, 104, pp. 714–724.

doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.009>.

Pinkster, J. A. (1979) “Mean and low frequency wave drifting forces on floating structures”, *Ocean Engineering*, 6(6), pp. 593–615. doi: [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(79\)90010-6](https://doi.org/10.1016/0029-8018(79)90010-6).

Pinkster, J. A. (1980) *Low frequency second order wave exciting forces on floating structures*. Netherlands Ship Model Basin. Disponible en: <https://books.google.com.mx/books?id=lvXYGwAACAA>.

Qi, E. y Cui, W. (2006) “Analytical method for ultimate strength calculations of intact and damaged ship hulls”, *Ships and Offshore Structures*, 1(2), pp. 153–163. doi: 10.1533/saos.2006.0121.

Qi, E., Cui, W. y Wan, Z. (2005) “Comparative study of ultimate hull girder strength of large double hull tankers”, *Marine Structures*, 18(3), pp. 227–249. doi: 10.1016/j.marstruc.2005.11.002.

Ringsberg, J.W., Sarder, M. A., Sağlam, H. and Ulfvarson, A. (2011) “Optimization of corrugated shell plating for marine structures”, *Offshore and Arctic Engineerin*, pp. 1–10.

Ringsberg, J. W., Amdahl, J., Chen, B. Q., Cho, S. R., Ehlers, S., Hu, Z., Kubiczek, J. M. (2018) “Marstruct benchmark study on nonlinear FE simulation of an experiment of an indenter impact with a ship side-shell structure”, *Marine Structures*, 59(October 2017), pp. 142–157. doi: 10.1016/j.marstruc.2018.01.010.

Sarpkaya, T. y Isaacson, M. (1981) *Mechanics of wave forces on offshore structures*. New York (N.Y.) : Van Nostrand Reinhold. Disponible en: <http://lib.ugent.be/catalog/rug01:000140307>.

Sivanandam, S. N. y Deepa, S. N. (2008) *Introduction to genetic algorithms*. Springer, Berlin, Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-540-73190-0.

Soylemez, M. y Atlar, M. (1999) “A comparative study of two practical methods for estimating the hydrodynamic loads and motions of a semi-submersible”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 122(1), pp. 57–63. doi: 10.1115/1.533726.

Soares, C. G. y Gordo, J. M. (1997) “Design methods for stiffened plates under predominantly uniaxial compression”, *Marine Structures*, 10(6), pp. 465–497. doi: [https://doi.org/10.1016/S0951-8339\(97\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8339(97)00002-6).

Standing, R. G. (1988) “Second-order wave spectral methods, mooring forces and low-frequency

response of floating structures”.

Sunahara, S. (2004) “Viscous drift forces on a semi-submersible type mega-float comprised of circular cylinders”, pp. 757–764. doi: 10.1115/OMAE2004-51372.

Sweetman, B., Winterstein, S. R. y Meling, T. S. (2002) “Airgap prediction from second-order diffraction and stokes theory”, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 12(03), p. 5. Disponible en: <https://doi.org/>.

Tanaka, S., Yanagihara, D., Yasuoka, A., Harada, M., Okazawa, S., Fujikubo, M. y Yao, T. (2014) “Evaluation of ultimate strength of stiffened panels under longitudinal thrust”, *Marine Structures*. Elsevier Ltd, 36, pp. 21–50. doi: 10.1016/j.marstruc.2013.11.002.

Today.com, O. e (2017) *Offshore energy today.com*.

University, S. F. (2014) *Buoyancy and stability of a floating body*, School of Engineering Science Mechatronic Systems Engineering.

Virag, Z. (2004) “Optimum design of stiffened plates for different loads and shapes of ribs”, *Journal of Computational and Applied Mechanics*, 5.

Wang, S., Cao, Y., Fu, Q. y Li, H. (2015) “Hydrodynamic performance of a novel semi-submersible platform with nonsymmetrical pontoons”, *Ocean Engineering*, 110, pp. 106–115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.012>.

Wilmer, I. (2003) “Analytic expression of the buckling loads for stiffened plates with bulb-flat flanges”, p. 121.

Winterstein, S., Ude, T. C., Cornell, C. A., Bjerager, P. y Haver, S. (1993) “Environmental parameters for extreme response: inverse FORM with omission sensitivity”, *Proc. of Intl. Conf. on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR93)*.

Xiao, L., Yang, J., Yang, L. y Lu, H. (2009) “Analysis on low frequency heave, roll and pitch motions of a deepwater semisubmersible”, pp. 185–190. doi: 10.1115/OMAE2009-79215.

Xiong, L., Yang, J., Lv, H., Zhao, W. y Kou, Y. (2016) “Study on global performances and mooring-induced damping of a semi-submersible”, *China Ocean Engineering*, 30(5), pp. 671–686. doi: 10.1007/s13344-016-0043-5.

- Xu, M. C., Yanagihara, D., Fujikubo, M. y Soares, C.G. (2013) “Influence of boundary conditions on the collapse behaviour of stiffened panels under combined loads”, *Marine Structures*. Elsevier Ltd, 34, pp. 205–225. doi: 10.1016/j.marstruc.2013.09.002.
- Xu, M. C., Song, Z. J., Pan, J. y Soares, C. G. (2017) “Ultimate strength assessment of continuous stiffened panels under combined longitudinal compressive load and lateral pressure”, *Ocean Engineering*. Elsevier Ltd, 139(January), pp. 39–53. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.042.
- Xu, Q. (2011) “A new semisubmersible design for improved heave motion, vortex-induced motion and quayside stability”, pp. 95–103. doi: 10.1115/OMAE2011-49118.
- Yang, B., Soares, C. G. y Wang, D. yu (2018) “An empirical formulation for predicting the dynamic ultimate strength of rectangular plates under in-plane compressive loading”, *International Journal of Mechanical Sciences*. Elsevier Ltd, 141(February), pp. 213–222. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.04.015.
- Yu, Y., Feng, G. y Ren, H. (2017) “Ultimate strength assessment of semisubmersible platform under different load conditions”, *Offshore and Arctic Engineering*, pp. 1–9. doi: 10.1115/OMAE2017-61696.
- Yue, J., Qi, Y., Xiao, W., Yang, L. y Yang, Y. (2009) “Study on the general layout of semi-submersible offshore drilling platforms based on process flow”, *Journal of Marine Science and Application*, 8(2), pp. 117–122. doi: 10.1007/s11804-009-8102-4.
- Zhang, S. y Khan, I. (2009) “Buckling and ultimate capability of plates and stiffened panels in axial compression”, *Marine Structures*. Elsevier Ltd, 22(4), pp. 791–808. doi: 10.1016/j.marstruc.2009.09.001.
- Zhang, X., Song, X., Yuan, Z. y You, Y. (2017) “Global motion and airgap computations for semi-submersible floating production unit in waves”, *Ocean Engineering*, 141, pp. 176–204. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.004>.

## 10 ANEXOS

En las tablas 10.1, 10.2 y 10.3 se muestran los resultados de los valores mínimos de las respuestas máximas de los tres volúmenes de producción considerados.

**Figura 10.1 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 100 MBD**

| Respuestas máximas                           | Arfada (m) | Cabeceo (grados) | Fuerza longitudinal (T) | Fuerza transversal (T) | Momento (T-m) | Aceleración longitudinal (m/s <sup>2</sup> ) | Aceleración transversal (m/s) | Aceleración vertical (m/s <sup>2</sup> ) | Peso del casco (T) | Número de modelo |
|--|------------|------------------|-------------------------|------------------------|---------------|--|-------------------------------|--|--------------------|------------------|
| Arfada (m)                                   | 2.52       | 1.97             | 19120                   | 61040                  | 386900        | 0.995  | 0.995                         | 0.6333                                   | 2.13E+04           | 397              |
| Cabeceo (grados)                             | 7.00       | 1.30             | 26300                   | 92950                  | 256600        | 0.9422                                       | 0.9422                        | 1.2528                                   | 3.17E+04           | 316              |
| Fuerza longitudinal (T)                      | 3.06       | 2.47             | 18790                   | 61000                  | 528500        | 1.1344                                       | 1.1344                        | 0.7894                                   | 2.13E+04           | 379              |
| Fuerza transversal (T)                       | 3.24       | 2.47             | 19100                   | 60350                  | 453400        | 1.04   | 1.04                          | 0.8306                                   | 2.07E+04           | 55               |
| Momento (T-m)                                | 7.00       | 1.30             | 26300                   | 92950                  | 256600        | 0.9422                                       | 0.9422                        | 1.2528                                   | 3.17E+04           | 316              |
| Aceleración longitudinal (m/s <sup>2</sup> ) | 6.54       | 1.48             | 24090                   | 81880                  | 269800        | 0.8883                                       | 0.8889                        | 1.09                                     | 2.76E+04           | 235              |
| Aceleración transversal (m/s)                | 6.54       | 1.48             | 24090                   | 81880                  | 269800        | 0.8883                                       | 0.8889                        | 1.09                                     | 2.76E+04           | 235              |
| Aceleración vertical (m/s <sup>2</sup> )     | 2.52       | 1.97             | 19120                   | 61040                  | 386900        | 0.995  | 0.995                         | 0.6333                                   | 2.13E+04           | 397              |
| Peso del casco (T)                           | 3.24       | 2.62             | 19200                   | 60620                  | 439400        | 1.1328                                       | 1.1328                        | 0.8306                                   | 1.91E+04           | 1                |

**Figura 10.2 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 150 MBD**

| Respuestas máximas                           | Arfada (m) | Cabeceo (grados) | Fuerza longitudinal (T) | Fuerza transversal (T) | Momento (T-m) | Aceleración longitudinal (m/s <sup>2</sup> ) | Aceleración transversal (m/s) | Aceleración vertical (m/s <sup>2</sup> ) | Peso del casco (T) | Número de modelo |
|--|------------|------------------|-------------------------|------------------------|---------------|--|-------------------------------|--|--------------------|------------------|
| Arfada (m)                                   | 2.70       | 2.31             | 24170                   | 82550                  | 699200        | 1.1113                                       | 1.1113                        | 0.6796                                   | 2.90E+04           | 1693             |
| Cabeceo (grados)                             | 6.28       | 1.61             | 30700                   | 113400                 | 331600        | 0.8258                                       | 0.8258                        | 1.0967                                   | 3.90E+04           | 1288             |
| Fuerza longitudinal (T)                      | 3.48       | 2.88             | 23070                   | 81370                  | 689100        | 1.1083                                       | 1.1083                        | 0.9317                                   | 2.13E+04           | 1027             |
| Fuerza transversal (T)                       | 2.92       | 2.24             | 25040                   | 80760                  | 512300        | 0.9271                                       | 0.9271                        | 0.7483                                   | 2.71E+04           | 1045             |
| Momento (T-m)                                | 6.27       | 1.61             | 30710                   | 113400                 | 331600        | 0.9663                                       | 0.9663                        | 1.0958                                   | 3.90E+04           | 1288             |
| Aceleración longitudinal (m/s <sup>2</sup> ) | 4.82       | 1.87             | 28540                   | 110400                 | 382400        | 0.8221                                       | 0.8221                        | 0.9733                                   | 2.76E+04           | 1279             |
| Aceleración transversal (m/s)                | 4.82       | 1.87             | 28540                   | 110400                 | 382400        | 0.8221                                       | 0.8221                        | 0.9733                                   | 2.76E+04           | 1279             |
| Aceleración vertical (m/s <sup>2</sup> )     | 2.70       | 2.31             | 24170                   | 82550                  | 699200        | 1.1113                                       | 1.1113                        | 0.6796                                   | 2.90E+04           | 1693             |
| Peso del casco (T)                           | 3.48       | 3.09             | 23250                   | 81830                  | 664400        | 1.2004                                       | 1.2004                        | 0.9317                                   | 2.51E+04           | 973              |

**Figura 10.3 Valores mínimos de las respuestas máximas del volumen de producción de 200 MBD**

| Respuestas máximas                           | Arfada (m) | Cabeceo (grados) | Fuerza longitudinal (T) | Fuerza transversal (T) | Momento (T-m) | Aceleración longitudinal (m/s <sup>2</sup> ) | Aceleración transversal (m/s) | Aceleración vertical (m/s <sup>2</sup> ) | Peso del casco (T) | Número de modelo |
|--|------------|------------------|-------------------------|------------------------|---------------|--|-------------------------------|--|--------------------|------------------|
| Arfada (m)                                   | 2.80       | 2.21             | 26420                   | 92750                  | 600400        | 1.2637                                       | 1.2642                        | 0.8233                                   | 3.00E+04           | 2665             |
| Cabeceo (grados)                             | 6.77       | 1.48             | 35840                   | 125100                 | 331200        | 0.9254                                       | 0.9254                        | 1.495                                    | 4.39E+04           | 2260             |
| Fuerza longitudinal (T)                      | 3.50       | 2.64             | 24990                   | 90840                  | 757600        | 1.255  | 1.255                         | 1.0808                                   | 3.16E+04           | 2323             |
| Fuerza transversal (T)                       | 3.74       | 2.65             | 25770                   | 89850                  | 648600        | 1.1017                                       | 1.1017                        | 1.1467                                   | 3.07E+04           | 1999             |
| Momento (T-m)                                | 6.77       | 1.48             | 35840                   | 125100                 | 331200        | 0.9254                                       | 0.9254                        | 1.495                                    | 4.39E+04           | 2260             |
| Aceleración longitudinal (m/s <sup>2</sup> ) | 4.82       | 1.90             | 28400                   | 110500                 | 415300        | 0.8938                                       | 0.8938                        | 1.1767                                   | 3.90E+04           | 2170             |
| Aceleración transversal (m/s)                | 4.82       | 1.90             | 28400                   | 110500                 | 415300        | 0.8938                                       | 0.8938                        | 1.1767                                   | 3.90E+04           | 2170             |
| Aceleración vertical (m/s <sup>2</sup> )     | 2.80       | 2.21             | 26420                   | 92750                  | 600400        | 1.2637                                       | 1.2642                        | 0.8233                                   | 3.00E+04           | 2665             |
| Peso del casco (T)                           | 3.74       | 2.80             | 25860                   | 90290                  | 625800        | 1.2158                                       | 1.2163                        | 1.1467                                   | 2.82E+04           | 1945             |