

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**TESIS**

**“ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE PLATAFORMAS MARINAS  
FIJAS SOMETIDAS A OLEAJE”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR**

**FLORENCIO ERNEST CLAROS QUICHIZ**

**ASESOR**

**Dr. VÍCTOR I. FERNÁNDEZ DÁVILA GONZALES**

**LIMA- PERÚ**

**2018**

© 2018, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,  
con fines estrictamente académicos.”**

Claros Quichiz, Florencio Ernest

ernestcq@gmail.com

997798354

*Dedicado a mis padres, a mi familia y a mis amigos por el apoyo que me brindan día a día.*

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>7</b>
<b>PRÓLOGO</b>	<b>9</b>
<b>LISTAS DE CUADROS</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO.</b>	<b>21</b>
2.1 PLATAFORMAS MARINAS FIJAS	21
2.1.1 Información general de la estructura	21
2.1.2 Componentes estructurales de las plataformas Jacket.	21
2.2 CONDICIONES AMBIENTALES.	22
2.3 OLEAJE.	23
2.3.1 Teoría lineal de Airy.	24
2.4 FUERZA DE OLEAJE SOBRE ELEMENTOS CILÍNDRICOS - ECUACIÓN DE MORISON.	27
2.5 ANÁLISIS SÍSMICO	29
2.5.1 Consideraciones especiales.	29
2.5.2 Interacción fluido-estructura.	29
2.5.3 Interacción suelo-pilote-estructura.	30
2.5.4 Fuerza Sísmica	31
2.6 COSTOS	33
<b>CAPÍTULO III: GENERACIÓN DE LA FAMILIA DE ESTRUCTURAS</b>	<b>34</b>
<b>TIPO JACKET.</b>	
3.1 MODELOS ESTRUCTURALES.	34
3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CONFIGURACIONES DE LOS JACKETS.	34
3.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS PLATAFORMAS MARINAS SOMETIDAS A CARGAS DE OLEAJE.	34
3.3.1 Cargas sobre Estructuras Offshore.	35
3.3.2 Combinaciones de Carga.	35
3.3.3 Modelo Estructural.	36



3.3.4	Discretización espacial de la Estructura.	37
3.3.4.1	<i>Rigidez.</i>	40
3.3.4.2	<i>Amortiguamiento.</i>	42
3.3.4.3	<i>Masa.</i>	44
3.3.4.4	<i>Carga.</i>	45
3.3.5	Fuerza de oleaje sobre los elementos.	46
3.3.5.1	<i>Fuerza equivalente.</i>	47
3.3.5.2	<i>Fuerza resultante equivalente en los nudos.</i>	48
3.3.6	Fijación de la estructura al fondo marino.	49
3.3.6.1	<i>Suposición de empotramiento perfecto</i>	49
3.3.7	Análisis dinámico	50
3.3.7.1	<i>Ecuación de movimiento</i>	51
3.3.7.2	<i>Desacoplamiento de las ecuaciones de movimiento</i>	51
3.4	RESULTADOS	52
3.4.1	Periodos	53
3.4.2	Fuerzas de Oleaje	55
3.4.3	Desplazamientos	59
3.4.4	Fuerzas	61
3.4.4.1	<i>Fuerza axial</i>	61
3.4.4.2	<i>Momento flector</i>	62
	<b>CAPÍTULO IV: MODELO ESTRUCTURAL PARAMÉTRICO.</b>	<b>63</b>
4.1	PARAMETRIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA	63
4.1.1	Parámetros geométricos	63
4.1.1.1	<i>Relación h/H.</i>	64
4.1.1.2	<i>Relación <math>\phi_P / \phi_S</math>.</i>	64
4.1.1.3	<i>Tipo de arriostre.</i>	65
4.1.1.4	<i>Número de cuerpos.</i>	65
4.1.2	Parámetros dinámicos.	66
4.1.3	Parámetros de sitio $N_0$ .	66
4.2	GEOMETRÍA DEL MODELO PARAMÉTRICO.	67
4.2.1	Correlación Altura total (H) vs h/H.	67
4.2.2	Correlación Altura total (H) vs Ancho de base inferior (B).	68
4.2.3	Correlación Altura total (H) vs Ángulo de inclinación ( $\beta$ ).	69
4.2.4	Correlación Ancho de base superior (bs) vs Peso (P).	70

4.2.5	Correlación Altura del elemento ( $h_e$ ) – relación ( $h_e/D$ ) del elemento principal.	71
4.2.6	Correlación de espesores.	72
4.3	ASPECTOS DINÁMICOS DEL MODELO ESTRUCTURAL PARAMETRIZADO.	73
4.3.1	Discretización de la estructura.	74
4.3.2	Rigidez.	76
4.3.3	Amortiguamiento.	77
4.3.4	Masa.	77
4.3.5	Fuerza de oleaje.	79
4.3.6	Fijación al fondo marino.	79
	<b>CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE LOS MODELOS POR FUERZA DE OLEAJE.</b>	<b>80</b>
5.1	MODELOS PARAMETRIZADOS	80
5.2	ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LOS MODELOS.	80
5.2.1	Análisis cualitativo y cuantitativo de la altura de ola.	80
5.2.2	Análisis cualitativo y cuantitativo de la altura libre.	81
5.2.3	Modelos parametrizados disponibles.	82
5.3	ANÁLISIS DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS.	82
5.3.1	Modelos paramétricos – parámetro $h/H$ .	83
5.3.2	Modelos paramétricos – parámetro $\phi_P/\phi_S$ .	86
5.3.3	Modelos paramétricos – parámetro tipo de arriostre.	89
5.3.4	Modelos paramétricos – parámetro $A_w$ .	93
5.3.5	Modelos paramétricos – parámetro $T_w$ .	96
5.3.6	Modelos paramétricos – parámetro $N_0$ .	99
	<b>CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b>	<b>102</b>
6.1	RESULTADOS	102
6.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	103
6.2.1	Periodo fundamental de vibración	103
6.2.2	Desplazamiento lateral máximo	105
6.2.2.1	Parámetro $h/H$ .	105
6.2.2.2	Parámetro $\phi_P/\phi_S$ .	107
6.2.2.3	Parámetro tipo de Arriostre.	108
6.2.2.4	Parámetro Amplitud de la Ola $A_w$ .	109

6.2.2.5 Parámetro Periodo de la Ola $T_w$ .	110
6.2.2.6 Parámetro de Sitio $N_0$ .	111
6.2.3 Fuerza Axial.	112
6.2.3.1 Parámetro $h/H$ .	112
6.2.3.2 Parámetro Relación de diámetros $\phi_P/\phi_S$ .	113
6.2.3.3 Parámetro tipo de Arriostre.	114
6.2.3.4 Parámetro amplitud de oleaje $A_w$ .	116
6.2.3.5 Parámetro periodo de oleaje $T_w$ .	117
6.2.3.6 Parámetro de Sitio $N_0$ .	118
6.2.4 Momento Flector.	119
6.2.4.1 Parámetro geométrico $h/H$ .	119
6.2.4.2 Parámetro Relación de radios $\phi_P/\phi_S$ .	120
6.2.4.3 Parámetro tipo de Arriostre.	122
6.2.4.4 Parámetro amplitud de oleaje $A_w$ .	123
6.2.4.5 Parámetro periodo de oleaje $T_w$ .	124
6.2.4.6 Parámetro de Sitio $N_0$ .	125
<b>CAPÍTULO VII: MÉTODO SIMPLIFICADO.</b>	<b>127</b>
7.1 OBJETIVO DEL MÉTODO SIMPLIFICADO.	127
7.2 ESTIMACIÓN DEL PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACION	127
7.3 ESTIMACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO LATERAL MAXIMO	130
7.4 ESTIMACIÓN DE LA FUERZA AXIAL MAXIMA	132
7.5 ESTIMACIÓN DEL MOMENTO FLECTOR MAXIMO	135
7.6 EVALUACIÓN DEL METODO SIMPLIFICADO	137
7.7 APLICACIONES DEL METODO SIMPLIFICADO	143
<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>148</b>
<b>RECOMENDACIONES.</b>	<b>150</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>151</b>
<b>ANEXO A.</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO B.</b>	<b>163</b>

## RESUMEN

El presente trabajo contiene un estudio del comportamiento dinámico de las plataformas marinas fijas y sus respuestas dinámicas cuando se encuentran sometidas a carga de oleaje. Este estudio se realizó mediante modelos bidimensionales sujetos a una carga no lineal como lo es el oleaje marino. Los modelos en estudio fueron extraídos de estudios previos publicados en libros dedicados a cubrir los temas de estructuras marinas y de publicaciones realizadas en los congresos de ingeniería estructural.

La configuración estructural de las plataformas marinas no representa una dificultad; sin embargo, la carga del oleaje marino que rodea a la estructura sí lo representa debido a su naturaleza. Debido a lo anterior se recurre a teorías que representen el oleaje marino de manera matemática. En este estudio se emplea la teoría de Airy, una teoría lineal ampliamente difundida debido a su simplicidad, facilidad de uso y sus buenas estimaciones en la representación del oleaje marino.

A pesar de disponer de la teoría de Airy y la representación matemática del oleaje con ella, resulta difícil analizar la estructura con la fuerza hidrodinámica obtenida al emplear la teoría de Airy. Si bien es cierto que existen programas de cómputo especializados en dichos análisis, en este trabajo se realizaron suposiciones acerca de cómo se distribuye la fuerza de oleaje sobre los elementos sumergidos que permitan realizar un análisis sencillo y rápido en el programa Matlab.

En el presente trabajo se analizaron las características geométricas, dinámicas y de sitio de los modelos recopilados, con la finalidad de generar una familia de estructuras. De esta manera se amplió el análisis sobre un conjunto mucho más grande de modelos estructurales. El análisis estructural se llevó a cabo sobre una programación propia creada en Matlab para este tipo de estructuras que permitió obtener respuestas tales como el periodo fundamental de vibración, los desplazamientos laterales máximos en la parte superior de la plataforma marina, las fuerzas axiales en el elemento más cargado y el momento flector máximo sobre el elemento más cargado.

Posteriormente se analizó la dependencia de las respuestas obtenidas a los parámetros aquí considerados como la relación  $h/H$  (Altura sumergida/altura total), relación de diámetros  $\phi_P/\phi_S$ , el tipo de arriostre, la amplitud del oleaje, el periodo de la ola y el grado de fijación en el fondo marino ( $N_0$ ).

Finalmente, el análisis de las repuestas y su dependencia de los parámetros permitieron desarrollar una propuesta de un método simplificado que permite estimar las respuestas de la plataforma marina de una manera mucho más rápida. Este método propone fórmulas con tal objetivo, que son válidas dentro de los rangos de los parámetros aquí considerados.

## ABSTRACT

The present research contains the study of the dynamic behavior of fixed offshore platforms and their dynamic responses when they are under the action of wave loads in the sea. This study was carried out using two-dimensional models subjected to a non-linear load such as the ocean waves. The models under study were extracted from previous studies published in specialized books to cover the issues of marine structures and publications of structural engineering congresses.

The structural configuration of offshore platforms does not represent a difficulty; however, the load of ocean waves surrounding the structure does represent a difficulty because its nature. Due to the last reason, theories are used to represent the sea waves mathematically. In this study, Airy's theory is used, a linear theory widely spread due to its simplicity, ease of use and good estimates in the representation of the ocean waves.

Despite having Airy theory and the mathematical representation of the waves with it, it is difficult to analyze the structure with the hydrodynamic force obtained by using the theory of Airy. Although it is true that there are specialized computing programs for analyzing this type of structures and loads, in this study, it is made some assumptions about how the force of waves is distributed on submerged elements that allow us to perform a simple and quick analysis in Matlab program.

In this study geometric, dynamic and site characteristics of collected models were analyzed in order to generate a family of structures. In this way, the analysis was expanded on a much larger set of structural models. The structural analysis was carried out entirely on an own program created in Matlab for this type of structures that allowed to obtain responses such as the fundamental period of vibration, the maximum lateral displacements at the top of the platform, the axial forces on the most charged element and the maximum bending moment on the most loaded element.

Subsequently it was analyzed the dependence of the responses to the parameters considered here as the ratio  $h/H$  (submerged height / total height),  $\phi_p/\phi_s$  diameter ratio, type of bracing, the amplitude of the wave, the wave period and the degree of fixation on the seafloor ( $N_0$ ).

Finally, the analysis of the responses and their dependence on the parameters allowed the development of a simplified method to estimate the responses in a much faster way, this method proposes formulas for this purpose that are valid within the ranges of the parameters considered here.

## PRÓLOGO

En este trabajo se presentan los resultados derivados del estudio del comportamiento de estructuras no convencionales como son las plataformas marinas. Debido a que tales estructuras poseen una relativa importancia por el sector económico al cual representan, el medio en el cual se ubican, la forma atípica en que funcionan y por el efecto que pudiera ocasionar su operación en las instalaciones restantes, fue lo que motivó el interés del alumno Florencio Claros a desarrollar ésta investigación.

En efecto, se realizó un estudio numérico del modelo representativo de una estructura marina sometida a la acción del medio que la circunda tal como la fuerza del oleaje originados por el movimiento de las aguas (corrientes marinas y mareas).

La metodología empleada fue esencialmente un análisis paramétrico sobre la base de un previo análisis de sensibilidad que permitió identificar los parámetros físicos y geométricos que gobiernan el comportamiento elástico del sistema estructural.

La investigación culmina presentando a modo de aporte una serie de expresiones matemáticas que comprende el método simplificado, con lo cual es factible estimar razonablemente las respuestas dinámicas del modelo de una estructura correspondiente a una plataforma marina y cuyos resultados son aceptables desde el punto de vista de la ingeniería estructural.

*Víctor I. Fernández-Dávila*  
*Profesor de Ingeniería Civil*



## LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 2.1: Ecuaciones de la onda lineal.	26
Cuadro 2.2: Criterios de clasificación.	27
Cuadro 3.1: Periodo de vibración del modelo J2.	52
Cuadro 4.1: Relación h/H de los modelos en estudio.	63
Cuadro 4.2: Relación de diámetros $\phi_p/\phi_s$ en los modelos en estudio.	63
Cuadro 4.3: Tipo de arriostre de los modelos en análisis.	64
Cuadro 4.4: División de los armazones bidimensionales.	64
Cuadro 4.5: Amplitud y Periodo de diseño de ola.	65
Cuadro 4.6: Correlación h/H – H.	66
Cuadro 4.7: Correlación H – B.	67
Cuadro 4.8: Correlación H – $\beta$ .	68
Cuadro 4.9: Correlación bs – Peso.	69
Cuadro 4.10: Correlación he – he/D.	70
Cuadro 4.11: Correlación ep – es.	71
Cuadro 5.1: Parámetros y sus posibles valores.	79
Cuadro 5.2: Alturas totales según h/H y Aw.	80
Cuadro 5.3: Alturas totales según h/H, Aw y altura libre.	80
Cuadro 5.4: Cantidad de modelos parametrizados	81
Cuadro 6.1: Cambios en la nomenclatura.	102
Cuadro 7.1: Resumen de errores relativos en la estimación del periodo fundamental de vibración.	139
Cuadro 7.2: Resumen de errores relativos en la estimación del desplazamiento máximo.	140
Cuadro 7.3: Resumen de errores relativos en la estimación de la fuerza axial máxima.	141
Cuadro 7.4: Resumen de errores relativos en la estimación del momento flector.	142
Cuadro 7.5: Resumen de errores relativos en las respuestas elásticas del modelo J2.	147

**LISTA DE FIGURAS**

	Pág.
Figura N°2.1: Partes de una plataforma marina.	22
Figura N°2.2: Condiciones que afectan a una plataforma marina.	23
Figura N°2.3: Definición de la ola en un sistema de coordenadas xz.	25
Figura N°2.4: Fuerzas sobre elementos cilíndricos.	28
Figura N°2.5: Curvas P-y de resistencia lateral ante una deformación lateral.	31
Figura N°2.6: Comportamiento real de la estructura.	32
Figura N°2.7: Modelo simplificado para considerar la interacción suelo estructura.	32
Figura N°3.1: Movimiento de los nodos en ejes locales.	38
Figura N°3.2: Elemento viga con 6 grados de libertad.	39
Figura N°3.3: Matriz de rigidez de un elemento viga inclinada con 6 grados.	40
Figura N°3.4: Masa adicional sobre una plataforma.	42
Figura N°3.5: Distribución de la masa sobre un elemento tipo viga.	43
Figura N°3.6: Masa concentrada para elementos sumergidos.	43
Figura N°3.7: Distribución de la carga de oleaje sobre un elemento.	45
Figura N°3.8: Distribución equivalente de la fuerza de oleaje.	46
Figura N°3.9: Acciones sobre los nodos en ejes locales.	47
Figura N°3.10: Suposición de la altura equivalente.	49
Figura N°3.11: Primer modo de vibración de la plataforma J2.	52
Figura N°3.12: Segundo modo de vibración de la plataforma J2.	53
Figura N°3.13: Fuerza de oleaje en la superficie z=0 m.	54
Figura N°3.14: Fuerza de oleaje sobre la estructura en z=-17.5m.	55
Figura N°3.15: Fuerza de oleaje sobre la estructura en z=-35m.	56
Figura N°3.16: Fuerza de oleaje a distintas profundidades.	57
Figura N°3.17: Desplazamiento del nodo 17 en la plataforma J2.	58
Figura N°3.18: Desplazamiento del nodo 4 en la plataforma J2.	59
Figura N°3.19: Fuerza axial en el nodo 1 de la plataforma J2.	60
Figura N°3.20: Momento en el nodo 1 de la plataforma J2.	61
Figura N°4.1: Parámetros geométricos sobre una plataforma marina.	62
Figura N°4.2: Correlación h/H - H.	67
Figura N°4.3: Correlación H - B.	68
Figura N°4.4: Correlación H - $\beta$ .	69

Figura N°4.5:	Correlación $bs - P$ .	70
Figura N°4.6:	Correlación $he - he/D$ .	71
Figura N°4.7:	Correlación $ep - es$ .	72
Figura N°4.8:	Modelo simplificado con elementos discretos tipo barra.	73
Figura N°4.9:	Arriostre tipo K.	74
Figura N°4.10:	Arriostre tipo X.	74
Figura N°4.11:	Elemento tipo Barra.	75
Figura N°4.12:	Matriz de rigidez para un elemento tipo barra con 4gdl.	76
Figura N°4.13:	Masa concentrada del modelo paramétrico.	77
Figura N°4.14:	Fuerza resultante sobre la masa en el modelo paramétrico.	77
Figura N°5.1:	Esquema de ubicación de las respuestas obtenidas.	82
Figura N°5.2:	Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.	83
Figura N°5.3:	Desplazamientos laterales para diferentes valores de $h/H$ .	83
Figura N°5.4:	Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	84
Figura N°5.5:	Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de $h/H$ .	84
Figura N°5.6:	Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	85
Figura N°5.7:	Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de $h/H$ .	85
Figura N°5.8:	Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.	86
Figura N°5.9:	Desplazamientos laterales para diferentes valores de $\phi_P/\phi_S$ .	86
Figura N°5.10:	Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	87
Figura N°5.11:	Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de $\phi_P/\phi_S$ .	87
Figura N°5.12:	Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	88
Figura N°5.13:	Momentos en elemento 1 para diferentes valores de $\phi_P/\phi_S$ .	88
Figura N°5.14:	Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.	89
Figura N°5.15:	Desplazamientos laterales para diferentes tipos de arriostre.	89
Figura N°5.16:	Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	90
Figura N°5.17:	Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes tipos de arriostre.	90
Figura N°5.18:	Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	91
Figura N°5.19:	Momentos en elemento 1 para diferentes tipos de arriostre.	91
Figura N°5.20:	Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.	92
Figura N°5.21:	Desplazamientos laterales para diferentes valores de $A_w$ .	92
Figura N°5.22:	Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	93
Figura N°5.23:	Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de $A_w$ .	93

Figura N°5.24:	Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.	94
Figura N°5.25:	Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de $A_w$	94
Figura N°5.26:	Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.	95
Figura N°5.27:	Desplazamientos laterales para diferentes valores de $T_w$ .	95
Figura N°5.28:	Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-11.	96
Figura N°5.29:	Fuerzas Axiales en el elemento 1 para diferentes valores de $T_w$ .	96
Figura N°5.30:	Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-16.	97
Figura N°5.31:	Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de $T_w$ .	97
Figura N°5.32:	Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6-24.	98
Figura N°5.33:	Desplazamientos laterales para diferentes valores de $N_0$ .	98
Figura N°5.34:	Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6-34.	99
Figura N°5.35:	Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de $N_0$ .	99
Figura N°5.36:	Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6-24.	100
Figura N°5.37:	Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de $N_0$ .	100
Figura N°6.1:	Periodos fundamentales para distintos valores de $h/H$ .	103
Figura N°6.2:	Periodos fundamentales para distintos tipos de arriostre.	103
Figura N°6.3:	Periodos fundamentales para distintos valores de $N_0$ .	104
Figura N°6.4:	Desplazamientos laterales máximos para distintos valores de $h/H$ .	105
Figura N°6.5:	Desplazamiento lateral para distintas combinaciones de parámetros.	106
Figura N°6.6:	Desplazamiento lateral para distintos valores de $\phi_P/\phi_S$ .	106
Figura N°6.7:	Desplazamiento lateral para distintas combinaciones de parámetros.	107
Figura N°6.8:	Desplazamiento lateral de acuerdo al tipo de arriostre.	107
Figura N°6.9:	Desplazamiento lateral para arriostres tipo K y X.	108
Figura N°6.10:	Desplazamientos laterales para diferentes valores de $A_w$ .	108
Figura N°6.11:	Desplazamientos laterales para $A_w=3$ , $A_w=7$ , $A_w=11$ y $A_w=15$ .	109
Figura N°6.12:	Desplazamiento lateral versus la variación de $T_w$ .	110
Figura N°6.13:	Desplazamientos laterales para $T_w=6$ , $T_w=11$ , $T_w=16$ y $T_w=21$ .	110
Figura N°6.14:	Desplazamiento lateral suelo flexible y rígido.	111
Figura N°6.15:	Desplazamiento lateral para $N_0 = 4$ , $N_0 = 14$ , $N_0 = 24$	111
Figura N°6.16:	Variación de la fuerza axial para distintos valores de $h/H$ .	112

Figura N°6.17:	Variación de la fuerza axial en modelos paramétricos.	113
Figura N°6.18:	Fuerza axial en modelos con diferentes valores para $\phi_P/\phi_S$ .	113
Figura N°6.19:	Fuerza axial variando $\phi_P/\phi_S$ y los demás parámetros.	114
Figura N°6.20:	Fuerza axial según el tipo de arriostre.	114
Figura N°6.21:	Variación de la fuerza axial en diferentes modelos paramétricos.	115
Figura N°6.22:	Fuerza axial según $A_w$ en el modelo 0.75-1.5-K- $A_w$ -11.	115
Figura N°6.23:	Variación de la fuerza axial en otros modelos.	116
Figura N°6.24:	Fuerza axial para diferentes valores de $T_w$ .	117
Figura N°6.25:	Variación de la fuerza axial en modelos paramétricos.	117
Figura N°6.26:	Fuerza axial y para distintos valores de $N_0$ .	118
Figura N°6.27:	Variación de la fuerza axial debido a $N_0$ en modelos parametrizados.	118
Figura N°6.28:	Momento para diferentes valores de $h/H$ en modelo $h/H$ -2-K-11-16.	119
Figura N°6.29:	Momento Flector en diferentes modelos parametrizados.	120
Figura N°6.30:	Momento Flector para diferentes valores de $\phi_P/\phi_S$ .	120
Figura N°6.31:	Variación del Momento flector en diferentes modelos parametrizados.	121
Figura N°6.32:	Momento según el tipo de arriostre en el modelo $h/H$ -2.5-K-15-21.	122
Figura N°6.33:	Variación del Momento de acuerdo al tipo de arriostre.	122
Figura N°6.34:	Momento Flector para $A_w=3$ , $A_w=7$ , $A_w=11$ y $A_w=15$ .	123
Figura N°6.35:	Momento Flector en diferentes modelos parametrizados.	123
Figura N°6.36:	Momento Flector en el modelo 0.65-1-K-3- $T_w$ .	124
Figura N°6.37:	Variación del Momento en diferentes modelos parametrizados.	124
Figura N°6.38:	Momento Flector en el modelo 0.65-1-K-3-6- $N_0$ .	125
Figura N°6.39:	Momento Flector para diferentes modelos parametrizados.	125

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

- A,B:** Coeficientes.  
**C,D:** Coeficientes.  
**E,F:** Coeficientes.  
**A:** Área.  
**Ab:** Área del elemento horizontal de la estructura.  
**Ac:** Área del elemento principal de la estructura.  
**Ad:** Área del elemento diagonal de la estructura.  
**Ap:** Sección transversal del elemento principal ( $m^2$ )  
**Aw:** Amplitud de la ola.  
**a** Coeficiente real.  
 **$a_e$ :** Fuerzas de amortiguamiento.  
**B:** Ancho de la base inferior de la estructura.  
**Bm:** Base media de la estructura.  
**b** Coeficiente real.  
**bs:** Ancho de la base superior de la estructura.  
**C:** Matriz de amortiguamiento de la estructura.  
**Cj:** Matriz de amortiguamiento generalizada.  
**CP:** Cargas propias.  
**CL:** Cargas operativas.  
**CD:** Deformaciones.  
**CE:** Cargas ambientales o de entorno.  
 **$C_A$ :** Coeficiente de arrastre.  
 **$C_e$ :** Matriz de amortiguamiento de un elemento.  
 **$C_M$ :** Coeficiente de inercia.  
 **$C_D$ :** Coeficiente de arrastre.  
**Cx:** Coeficiente relacionado a la inclinación de los elementos.  
**Cy:** Coeficiente relacionado a la inclinación de los elementos.  
**c:** Celeridad.  
**D:** Diámetro exterior del elemento principal.  
 **$D_i$ :** Diámetro de un elemento estructural, principal o secundario. ( $m$ )  
 **$D_{ms}$**  Desplazamiento lateral máximo. ( $m$ )  
**d:** Profundidad del agua.

- E:** Módulo de elasticidad del material.
- Eb:** Módulo de elasticidad del elemento horizontal de la estructura.
- Ec:** Módulo de elasticidad del elemento principal de la estructura.
- Ed:** Módulo de elasticidad del elemento diagonal de la estructura.
- EI<sub>eq</sub>:** Rigidez a la flexión equivalente.
- F:** Fuerza total sobre los elementos principales y secundarios. (*ton*)
- Fi:** Fuerza en el nodo i.
- Fj:** Fuerza en el nodo j.
- F<sub>Dp</sub>:** Fuerza sobre elementos principales, piernas de apoyo. (*ton*)
- F<sub>DS</sub>:** Fuerza sobre elementos secundarios, arriostres. (*ton*)
- F<sub>x1</sub>':** Fuerza resultante en el nodo i en el eje X.
- F<sub>yi</sub>':** Fuerza resultante en el nodo i en el eje Y.
- f:** Fuerza hidrodinámica normal al cilindro.
- f<sub>a</sub>:** Factor relacionado al tipo de arriostre. (*K o X*)
- f<sub>e</sub>:** Factor relacionado al espesor.
- f<sub>h</sub>:** Factor relacionado al parámetro h/H.
- f<sub>No</sub>:** Factor relacionado al parámetro No.
- GA<sub>seq</sub>:** Rigidez al corte equivalente.
- g:** Gravedad.
- H:** Altura total de la estructura.
- I:** Inercia de la sección.
- i,j:** Nodo inicial y final de un elemento estructural.
- K:** Matriz de rigidez de la estructura.
- K<sub>e</sub>:** Matriz de rigidez de un elemento.
- K,X:** Tipos de arriostre.
- Kj:** Matriz de rigidez generalizada.
- k:** Número de ola.
- L:** Longitud del elemento.
- LD:** Longitud del elemento diagonal.
- L<sub>e</sub>:** Longitud efectiva.
- L<sub>u</sub>:** Longitud última.
- M:** Matriz de masa de la estructura.
- M:** Masa total de un elemento estructural.
- Mad:** Masa adicional asociada por la interacción fluido-estructura.

<b>M<sub>p</sub>:</b>	Masa adicional sobre una plataforma.
<b>M<sub>i</sub>:</b>	Momento en el nodo i.
<b>M<sub>j</sub>:</b>	Matriz de masa generalizada.
<b>M<sub>e</sub>:</b>	Matriz de masas de un elemento.
<b>M<sub>i</sub>':</b>	Momento resultante en el nodo i.
<b>M<sub>ms</sub></b>	Máximo Momento Flector. ( <i>ton – m</i> )
<b>M<sub>v</sub>:</b>	Masa virtual.
<b>m:</b>	Masas concentradas en la estructura.
<b>N<sub>0</sub>:</b>	Parámetro de sitio (ton/ft <sup>3</sup> ).
<b>N<sub>i</sub>:</b>	Fuerza axial en el nodo i.
<b>N<sub>ms</sub></b>	Máxima fuerza Axial. ( <i>ton</i> )
<b>P:</b>	Peso sobre la cubierta de la estructura.
<b>P<sub>j</sub>:</b>	Matriz de carga generalizada.
<b>p:</b>	Presión dinámica.
<b>p(t):</b>	Matriz de fuerza en el tiempo.
<b>q:</b>	Distribución de carga por unidad de longitud.
<b>r(ξ, t):</b>	Función de interpolación.
<b>T<sub>w</sub>:</b>	Periodo de la ola.
<b>T<sub>ms</sub></b>	Periodo fundamental de vibración. ( <i>s</i> )
<b>t:</b>	Tiempo.
<b>u:</b>	Velocidad horizontal de las partículas de agua.
<b>ū:</b>	Velocidad horizontal de las partículas de agua.
<b>ü:</b>	Aceleración de la partícula de agua.
<b>ū<sub>e</sub>:</b>	Velocidad en los nodos.
<b>μ<sub>1</sub>, μ<sub>2</sub>:</b>	Desplazamientos longitudinales de los nodos.
<b>V:</b>	Volumen de un elemento estructural.
<b>V<sub>i</sub>:</b>	Fuerza cortante en el nodo i.
<b>V(t):</b>	Matriz de desplazamientos en el tiempo en coordenadas geométricas
<b>Ṽ(t):</b>	Matriz de velocidades en el tiempo en coordenadas geométricas.
<b>Ṽ̇(t):</b>	Matriz de aceleraciones en el tiempo en coordenadas geométricas.
<b>V̄:</b>	Matriz de coordenadas geométricas.
<b>w:</b>	Velocidad vertical de las partículas de agua.
<b>ẇ:</b>	Velocidad vertical de las partículas de agua.
<b>ω:</b>	Frecuencia de oscilación de la ola.



- $\dot{x}$ : Velocidad estructural.  
 $\ddot{x}$ : Aceleración estructural.  
 $Y_i$ : Coordenadas generalizadas.  
 $Y(t)$ : Matriz de aceleraciones en el tiempo en coordenadas generalizadas.  
 $\dot{Y}(t)$ : Matriz de velocidades en el tiempo en coordenadas generalizadas.  
 $\ddot{Y}(t)$ : Matriz de desplazamientos en el tiempo en coordenadas generalizadas.  
 $z$ : Coordenada vertical.  
 $\beta$ : Ángulo de inclinación de las piernas de la estructura.  
 $\beta$ : Relación entre el periodo de la fuerza y el periodo de la estructura..  
 $\Delta$ : Máximo Desplazamiento. ( $m$ )  
 $\delta$ : Desplazamiento lateral.  
 $\xi$ : Relación  $x/L$ .  
 $\eta$ : Ecuación de la ola.  
 $\theta$ : Giro de las secciones transversales.  
 $\theta_i$ : Giro de las secciones transversales en el nodo  $i$ .  
 $\lambda, \lambda_0$ : Longitud de onda de la ola.  
 $\mu$ : Desplazamiento Longitudinal  
 $\rho$ : Densidad del agua.  
 $v$ : Movimiento transversal de los puntos de la viga.  
 $v_i$ : Movimiento transversal de los puntos de la viga en el nodo  $i$ .  
 $\underline{\underline{\phi}}$ : Matriz modal.  
 $\phi_P$ : Diámetro del elemento principal (piernas) de la estructura.  
 $\phi_S$ : Diámetro del elemento secundario (arriostres) de la estructura.  
 $\varphi$  Factor para considerar el efecto de corte

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

El presente trabajo responde a un interés por el estudio y comprensión de las estructuras no convencionales en el mundo de la ingeniería civil, estructuras que implican un mayor conocimiento de las condiciones que la rodearán durante su vida debido a la importancia que poseen y el grado de seguridad que deben presentar.

El objetivo principal de esta tesis es estudiar el comportamiento dinámico y conocer las respuestas de las plataformas marinas fijas sometidas a cargas hidrodinámicas de oleaje. Son objetivos también el identificar los parámetros geométricos, dinámicos y de sitio que gobiernan en la estimación de las respuestas de las estructuras y el de formular un método simplificado que sirva de referencia en la obtención de las respuestas antes de realizar un complejo análisis dinámico o diseño estructural. Un objetivo final es el de abrir un nuevo frente de investigación dentro de las estructuras no convencionales que se realizan en el país.

El presente trabajo aborda conceptos fundamentales en el capítulo II, los cuales son necesarios para comprender la configuración estructural, el lugar de operación y las condiciones a las cuales se encuentra sometida la estructura durante su vida útil. También se menciona la teoría lineal de Airy que es empleada en este trabajo para obtener una representación matemática del oleaje y las fuerzas que produce.

En el capítulo III se presentan los modelos estructurales empleados, se analizan las características de los modelos que conforman la familia de estructuras que posteriormente serán analizadas, se elabora un modelo bidimensional sobre el cual se realiza un análisis para obtener respuestas que serán consideradas como respuestas reales debido a que las simplificaciones realizada son mínimas.

Posteriormente, en el capítulo IV, se parametrizan las estructuras considerando los parámetros geométricos, dinámicos y de sitio observados en la familia de estructuras y los intervalos entre los cuales varían tales parámetros.

Adicionalmente se realizan correlaciones que permitan estimar algunas características para obtener un modelo completamente definido.

En el capítulo V se realizan análisis cualitativos y cuantitativos sobre los modelos, con la finalidad de eliminar aquellos modelos que son físicamente imposibles y con los cuales no tendría sentido realizar un análisis dinámico. También se muestran las respuestas obtenidas y su variación en el tiempo de acuerdo a cada parámetro en estudio.

En el capítulo VI se analizan la dependencia entre las respuestas y los parámetros en estudio. Se presentan resultados para cada respuesta teniendo en cuenta cada parámetro en estudio sobre los cuales se pueden observar la variación de las repuestas frente a la variación de los parámetros.

El capítulo VII propone un método simplificado que tiene por objetivo servir como una herramienta y guía para la obtención de repuestas dinámicas útiles para el pre-dimensionamiento y evaluación de las plataformas marinas.

Finalmente se mencionan las conclusiones a las que se llegaron mediante este estudio respecto al modelo estructural, a las fuerzas de oleaje y a las respuestas. Asimismo, se dan recomendaciones para ser considerados por otros, que podrían conducir a un mejor análisis y comprensión de las plataformas marinas.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### 2.1 PLATAFORMAS MARINAS FIJAS

##### 2.1.1 Información general de la estructura.

Las plataformas marinas fijas, comúnmente conocidas como *Jackets*, son estructuras offshore muy utilizadas en el campo de la exploración y producción de petróleo y gas (Chakrabarti, 2005). El término *Offshore* implica que la estructura realiza su función fuera de la costa, es decir en el mar.

Estas estructuras son fabricadas en acero y consisten en un conjunto de elementos tubulares interconectados para formar un armazón tridimensional.

Para asegurar su estabilidad contra las fuerzas de olas y cualquier otra fuerza similar, estas estructuras tienen entre cuatro y ocho piernas. Las piernas que son introducidas en el fondo marino, de tal manera que la estructura obtenga una posición fija.

##### 2.1.2 Componentes estructurales de las plataformas Jacket.

Las plataformas fijas tienen básicamente 3 partes estructurales: superestructura, la subestructura y la cimentación.

Superestructura: Compuesta por los elementos que brindarán soporte a los equipos de la plataforma. Es en esta zona donde se aplica la mayor parte de la carga de gravedad.

Subestructura: Corresponde al armazón que proporciona soporte a la cubierta. Los principales componentes son:

Piernas: Elementos verticales principales de soporte.

Arriostres: Elementos horizontales, verticales y diagonales.

Cimentación: Consiste en un conjunto de pilotes, los cuales son introducidos una suficiente profundidad para fijar la estructura al fondo marino.

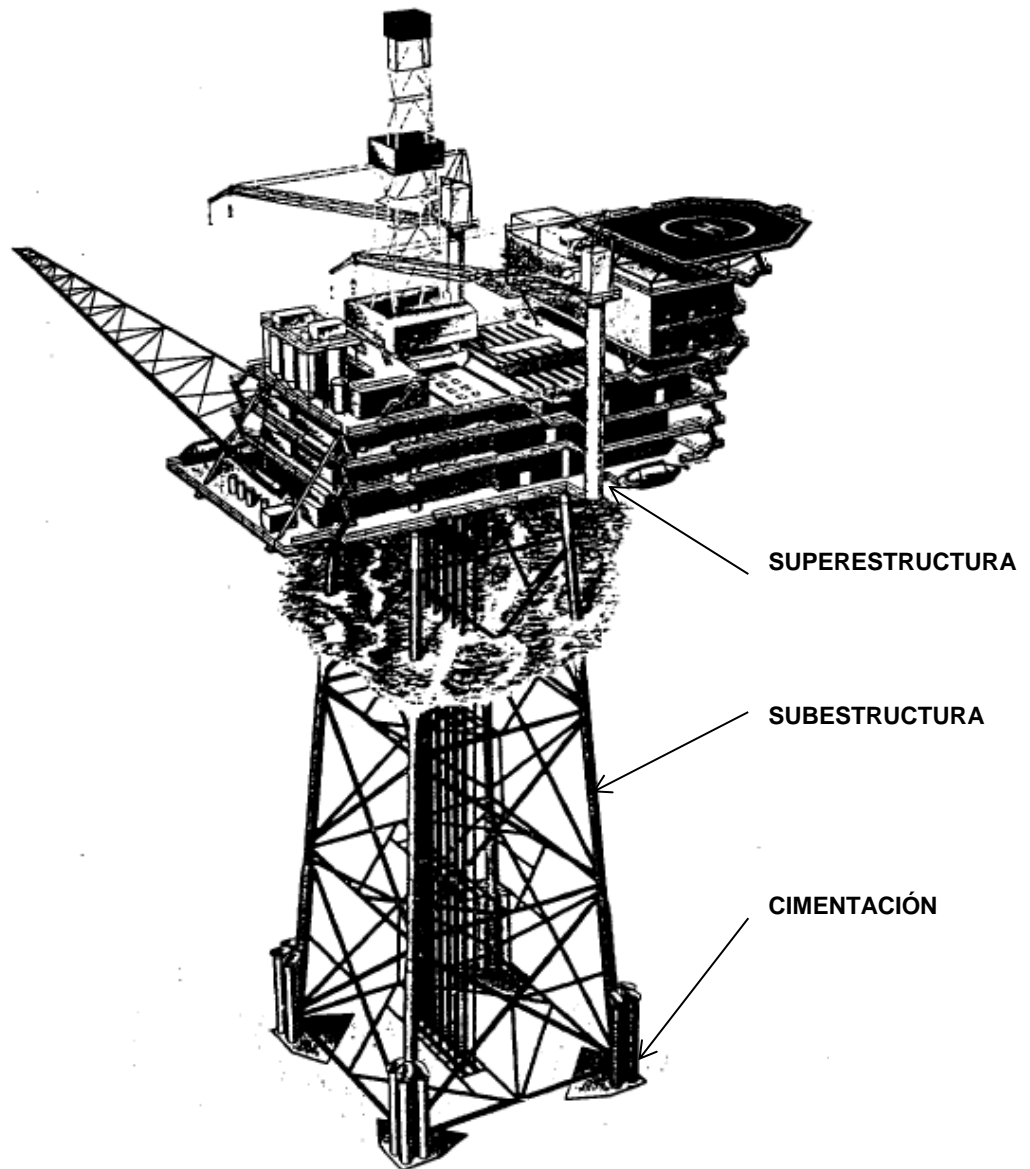


Figura N°2.1: Partes de una plataforma marina (Mather, 1995).

## 2.2 CONDICIONES AMBIENTALES

Las estructuras offshore además de estar sometidas a condiciones habituales, al estar ubicadas en el ambiente oceánico ven su comportamiento afectado por la interacción de la estructura con el fluido.

Las condiciones a las cuales está sometida una estructura offshore pueden clasificarse además como: condiciones normales, aquellas que se esperan que ocurran con frecuencia durante su etapa de servicio y construcción, y condiciones extremas, aquellas que ocurren rara vez durante la vida de la estructura (API, 2000).

Las estructuras offshore ubicadas en el entorno oceánico están a merced de las condiciones ambientales de dicho entorno. Tales condiciones pueden ser las olas del mar, el viento y la corriente marina, los sismos y tsunamis, eventos cuya ocurrencia se da en ciertas partes del mundo.

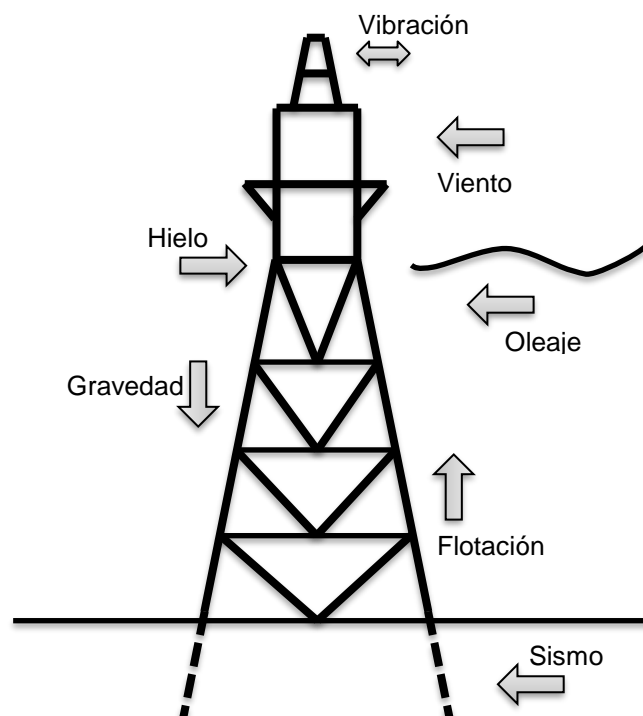


Figura N°2.2: Condiciones que afectan a una plataforma marina (Chakrabarti, 2005, Vol. I).

### 2.3 OLEAJE

Una ola se define como una perturbación que viaja sobre la superficie del mar. La perturbación viaja, pero las partículas de agua contenidas en la ola se mueven en una órbita elíptica casi cerrada, con un pequeño movimiento de avance neto (API, 2000).

La importancia de las olas radica en que son las que originan fuerzas periódicas sobre las estructuras al interactuar con ellas, sin importar si estas estructuras son fijas o flotantes, o si están en la superficie o son profundas.

Asimismo, las olas son la principal causa de inactividad y reducida eficiencia operativa; por lo tanto, las fuerzas que producen constituyen el principal criterio de diseño (Gerwick, 2007).

Para evaluar las fueras que se producen por la iteración fluido-estructura, sobre una estructura offshore o sobre alguno de sus elementos, es necesario conocer el flujo que lo rodea.

Existen diferentes teorías que permiten representar el flujo circundante; una de las teorías de mayor aceptación es la teoría lineal de Airy propuesta en 1845. Esta teoría es una de las más importantes teorías clásicas debido a su extensa y fácil aplicación.

### 2.3.1 Teoría Lineal de Airy.

También conocida como teoría lineal, teoría de la amplitud pequeña o teoría de primer orden, teoría desarrollada primero por Airy (1845).

En esta teoría se hacen una serie de suposiciones que son necesarias para realizar una descripción simple de la ola (Wilson, 2003); se mencionan a continuación:

1. La amplitud  $A$  de la superficie perturbada es muy pequeña en comparación con la longitud de onda  $\lambda$  y la profundidad de agua  $d$ .
2. La carga debida a la velocidad  $(u^2 + w^2)/2g$  es pequeña comparada con la presión hidrostática  $\rho g z$ .
3. La profundidad de agua es uniforme.
4. El fluido es no viscoso e irrotacional.
5. El fluido es incompresible y homogéneo.
6. La fuerza de Coriolis debida a la rotación de la tierra es despreciable.
7. La tensión superficial es despreciable.

8. El fondo es liso e impermeable.
9. El nivel de la presión atmosférica  $p_a$  es uniforme.

Supone una curva armónica para describir el perfil de la onda. La ecuación de la curva es la siguiente:

$$\eta = Aw \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \quad (2.1)$$

Donde:

$Aw$  : Amplitud de la ola.

$\omega$ : Frecuencia de oscilación de la ola.

$k$ : Número de ola.

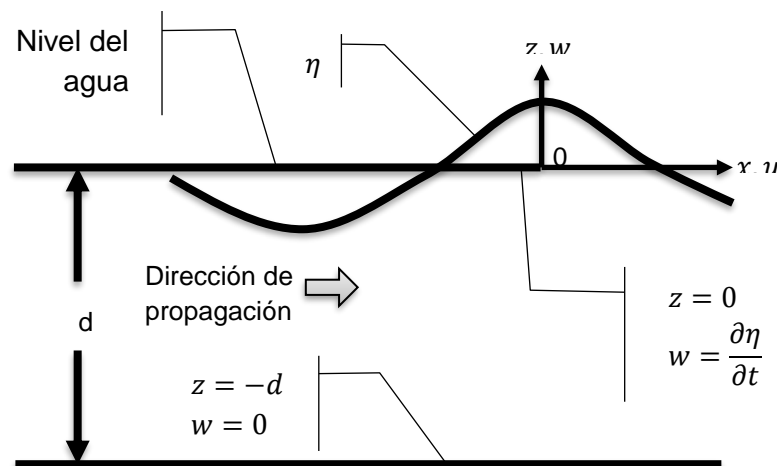


Figura N°2.3: Definición de la ola en un sistema de coordenadas xz (Wilson, 2003)

La ecuación anterior describe un movimiento armónico simple de la superficie libre, esta descripción establece que la ola varía en función del tiempo  $t$  y de la variable espacial  $x$  en forma armónica.

La ecuación anterior se puede reescribir a la siguiente forma:

$$\eta = Aw \cdot \cos k(x - \frac{\omega}{k} \cdot t) \quad (2.2)$$

La forma anteriormente descrita sugiere que el perfil de onda se mueve en la dirección horizontal  $x$  con una velocidad igual a  $c = \omega/k$ .



Para describir el movimiento de las partículas del fluido dentro del campo de la onda, se deben establecer las propiedades cinemáticas y dinámicas de las partículas, para tal fin se supone que el fondo es plano de tal manera que la profundidad del agua es constante en todos los puntos a lo largo de la dirección x.

A continuación, en el siguiente cuadro se muestran las ecuaciones que establecen las propiedades cinemáticas y dinámicas para una ola descrita mediante la teoría lineal o teoría de Airy.

Cuadro 2.1: Ecuaciones de la onda lineal (Chakrabarti, 2005).

CANTIDAD	PROFUNDIDAD FINITA	PROFUNDO
Relación de dispersión	$\omega^2 = gk \tanh kd$	$\omega^2 = gk$
Perfil de Ola	$\eta = \frac{H}{2} \cos[k(x - ct)]$	$\eta = \frac{H}{2} \cos[k(x - ct)]$
Velocidad Horizontal	$u = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cos kd} \cos[k(x - ct)]$	$u = \frac{gkH}{2\omega} \exp(kz) \cos[k(x - ct)]$
Velocidad Vertical	$w = \frac{gkH}{2\omega} \frac{\sinh k(z+d)}{\cos kd} \sin[k(x - ct)]$	$w = \frac{gkH}{2\omega} \exp(kz) \sin[k(x - ct)]$
Aceleración Horizontal	$\dot{u} = \frac{gkH}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\cos kd} \sin[k(x - ct)]$	$\dot{u} = \frac{gkH}{2} \exp(kz) \sin[k(x - ct)]$
Aceleración Vertical	$\dot{w} = -\frac{gkH}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\cos kd} \cos[k(x - ct)]$	$\dot{w} = \frac{gkH}{2} \exp(kz) \cos[k(x - ct)]$
Presión Dinámica	$p = \rho g \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\cos kd} \cos[k(x - ct)]$	$p = \rho g \frac{H}{2} \exp(kz) \cos[k(x - ct)]$

Se puede apreciar en la tabla anterior que se presentan ecuaciones para 2 casos, el primer caso es cuando la profundidad es finita, mientras que el segundo caso es para aguas profundas. El uso del cuadro 2.2 permite realizar tal distinción; se realiza la clasificación en función a la relación de la profundidad del agua d y la longitud de la ola  $\lambda$ .

Cuadro 2.2: Criterios de clasificación de la profundidad del agua (Chakrabarti, 2005, Vol. I).

PROFUNDIDAD DEL AGUA	CRITERIO	Tanh(kd)	PROFUNDIDAD
Agua Profunda	$\frac{d}{\lambda} > 1/2$	1	$\lambda_0 = gT^2/2\pi$
Agua Superficial	$\frac{d}{\lambda} \leq 1/20$	kd	$\lambda = T\sqrt{gd}$
Agua intermedia	$\frac{1}{20} < \frac{d}{\lambda} < 1/2$		$\lambda = \lambda_0 [\tanh(2\pi d/\lambda_0)]^{1/2}$

La teoría lineal define las velocidades hasta el nivel del agua quieta y no se puede determinar en la superficie libre.

La magnitud de la componente vertical de la velocidad es pequeña en relación a la componente horizontal. Sus valores entre si se aproximan conforme se incrementa la profundidad del agua. La componente vertical tiene una velocidad nula en el fondo a fin de satisfacer la condición límite inferior (Chakrabarti, 2005).

En el cuadro 2.1 es posible apreciar mediante la expresiones de  $u$  y  $w$ , que las 2 velocidades son ortogonales, una es máxima cuando la otra es mínima.

#### 2.4 FUERZA DE OLEAJE SOBRE ELEMENTOS CILÍNDRICOS – ECUACIÓN DE MORISON.

Las fuerzas hidrodinámicas sobre elementos cilíndricos se calculan mediante el uso de una fórmula semi-empírica extensamente utilizada, denominada ecuación de Morison (Morison et Al, 1850)

La fuerza de Morison es una suma de fuerzas hidrodinámicas de inercia y de arrastre. La fuerza de arrastre es una función de la velocidad mientras que la fuerza de inercia es función de la aceleración.

$$f = \rho \cdot C_M \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \ddot{u} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot |\dot{u}| \cdot \dot{u} \quad (2.3)$$

Donde:

$f$  = fuerza hidrodinámica normal al cilindro.

$D$  = Diámetro exterior del elemento.

$C_D$  = Coeficiente de arrastre.

$C_M$  = Coeficiente de inercia.

$\rho$  = Densidad del agua.

$\dot{u}$  = Velocidad de la partícula de agua.

$\ddot{u}$  = Aceleración de la partícula de agua.

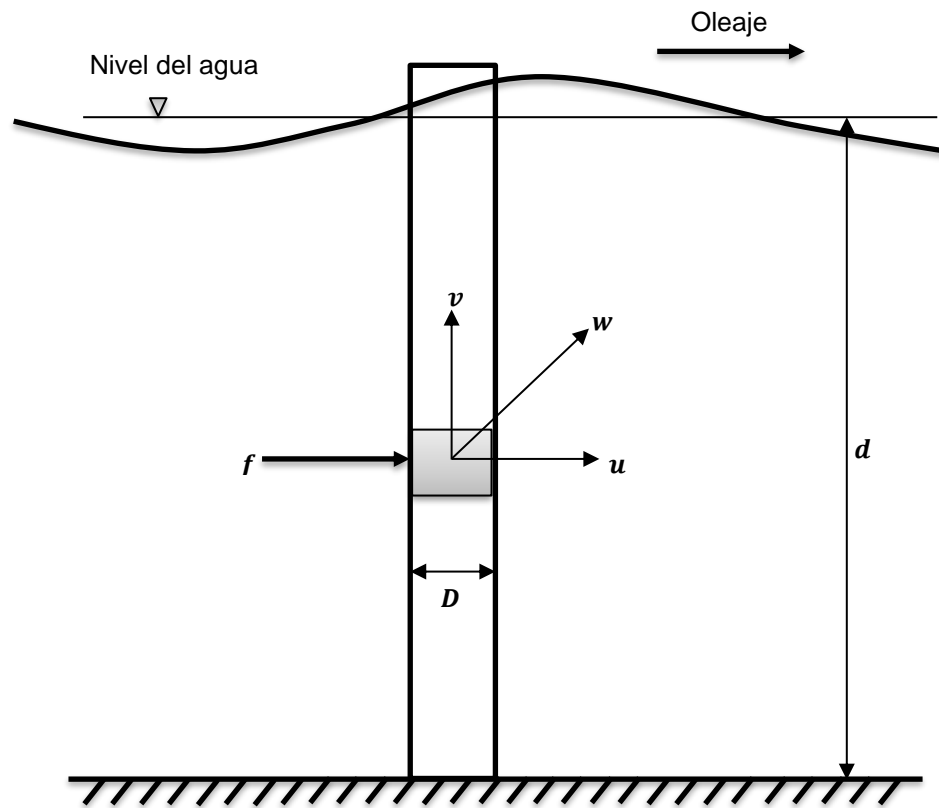


Figura N°2.4: Fuerza sobre elementos cilíndricos (Chakrabarti, 2005, Vol. I).

Dado que la ecuación de Morison es empleada para calcular las fuerzas actuando sobre elementos verticales, es necesario realizar algunas consideraciones para aplicarla sobre elementos inclinados. El método empleado en este trabajo, considera que solo las componentes normales de velocidad y aceleración de las partículas de agua producen fuerzas sobre los elementos (Beltrán y Cerrolaza, 1989).

Aunque en realidad los elementos son miembros con un grado de flexibilidad, que experimentan movimiento al interactuar con el fluido. La fórmula de Morison debe modificarse para tomar en cuenta el movimiento de los miembros; sin embargo, dado que son deformaciones pequeñas pueden ser omitidas sin obtener una variación significativa en los resultados (Beltrán y Cerrolaza, 1989).

$$f = \rho \cdot C_M \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \dot{u} - \rho \cdot (C_M - 1) \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \ddot{x} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot |\dot{u} - \dot{x}| \cdot (\dot{u} - \dot{x}) \quad (2.4)$$

$\dot{x}$ = Velocidad estructural

$\ddot{x}$ = Aceleración estructural.

Al ser la velocidad y aceleración estructural pequeñas, la ecuación queda reducida a:

$$f = \rho \cdot C_M \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \ddot{u} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot |\dot{u}| \cdot \dot{u} \quad (2.5)$$

## 2.5 ANÁLISIS SÍSMICO

El análisis estructural por fuerzas sísmicas y su posterior diseño ha tomado mucha importancia desde que las plataformas empezaron a ser emplazadas en regiones sísmicas. Este tipo de análisis es necesario para garantizar la operatividad e integridad de la estructura después de un sismo con la finalidad de evitar las pérdidas humanas, ambientales y económicas.

### 2.5.1 Consideraciones especiales

Para realizar un análisis sísmico sobre las plataformas marinas es indispensable conocer el medio que rodea a la estructura. Existe una clara diferencia entre las estructuras convencionales sobre el terreno y sobre las estructuras ubicadas en el mar, y es que las estructuras ubicadas sobre el mar se encuentran rodeada por agua, que interactúa con la estructura.

La interacción suelo estructura es otro factor a tener en consideración. Típicamente la estructura se encuentra emplazada en un lugar con el fondo marino saturado. El fondo tiene un comportamiento dinámico que puede acentuar los efectos del sismo sobre la estructura.

### 2.5.2 Interacción fluido-estructura

Los efectos del agua circundante sobre la estructura sometida a fuerza sísmica son principalmente dos. El primer efecto es el incremento de las fuerzas dinámicas, mientras que el segundo efecto es la modificación de las propiedades dinámicas de la estructura.

La interacción del agua circundante ocasiona un incremento del periodo debido a que una porción de la masa de agua se asocia a la estructura en su movimiento, incrementando la masa total del sistema.

La plataforma marina sometida a una excitación sísmica no se comporta de la misma manera como lo hace una estructura en tierra. Las plataformas marinas, al encontrarse rodeadas por agua, presentan un incremento del amortiguamiento en las respuestas dinámicas.

Este fenómeno de la interacción fluido-estructura se puede tomar en cuenta en los análisis dinámicos trabajando con lo que se denomina la masa virtual que es la masa de la plataforma más la masa adicional asociada a los elementos sumergidos de la plataforma. Así también incrementando las propiedades dinámicas como el periodo y el amortiguamiento del sistema.

La masa total recibe el nombre de masa virtual, que es el resultado de la masa de la estructura y la masa adicional de agua.

### 2.5.3 interacción suelo-pilote-estructura

Las plataformas marinas fijas siempre se emplazan sobre pilotes que se encuentran hincados en el fondo marino a una profundidad tal que le sea posible transmitir las fuerzas cortantes y momento flectores que provienen de la estructura.

El pilote se considera una extensión de la estructura que se encuentra sumergida en el fondo marino; sin embargo, el fondo marino presenta un comportamiento no lineal, razón por la cual debe linealizarse de manera iterativa el comportamiento del suelo – pilote hasta encontrar una relación compatible entre la carga y el desplazamiento. Una vez compatibilizado el comportamiento suelo-pilote se puede simular las reacciones provistas por los pilotes mediante un modelo simplificado de resortes.

Una metodología empleada para simular la rigidez vertical y horizontal del suelo es a través de curvas empíricas denominadas P-y y T-z respectivamente.

Las curvas P-y representan la resistencia lateral del suelo frente a una deformación lateral. Las curvas dependen de la profundidad y el tipo de suelo.

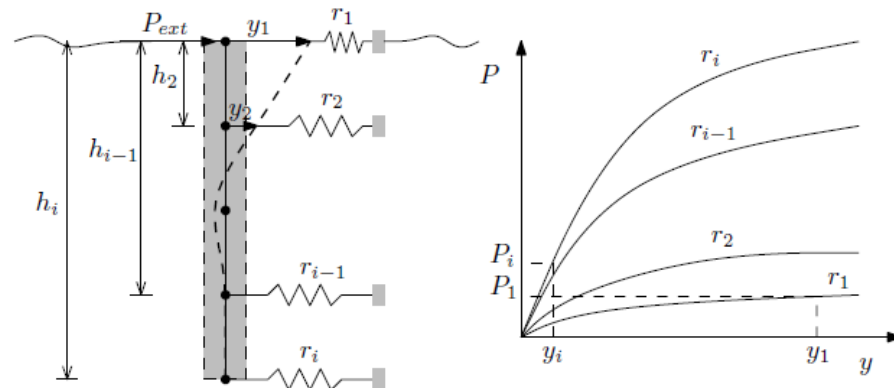


Figura N° 2.5: Curvas P-y de resistencia lateral ante una deformación lateral (Turello y otros, 2014).

Las curvas T-z representan la resistencia axial frente a una deformación vertical.

A continuación, se presenta el modelo estructural de una estructura considerando la interacción suelo estructura.

#### 2.5.4 Fuerza Sísmica

La fuerza sísmica se transmite a través del fondo en el cual se apoya la estructura, a diferencia del oleaje que aplica las fuerzas a través del agua. Es por ello que el suelo y la interacción que existe entre el suelo, los pilotes de anclaje y la estructura adquieren importancia.

La fuerza sísmica puede abordarse a través de fuerzas estáticas o por medio de un análisis dinámico del tipo espectral considerando un espectro de diseño que contemple los parámetros locales.

El modelo estructural corresponde a un péndulo invertido, debido a que la mayor cantidad de masa se encuentra en la parte superior de la estructura, en la cubierta, lugar donde se encuentran los equipos y donde se encuentra el mayor porcentaje de las cargas de gravedad.

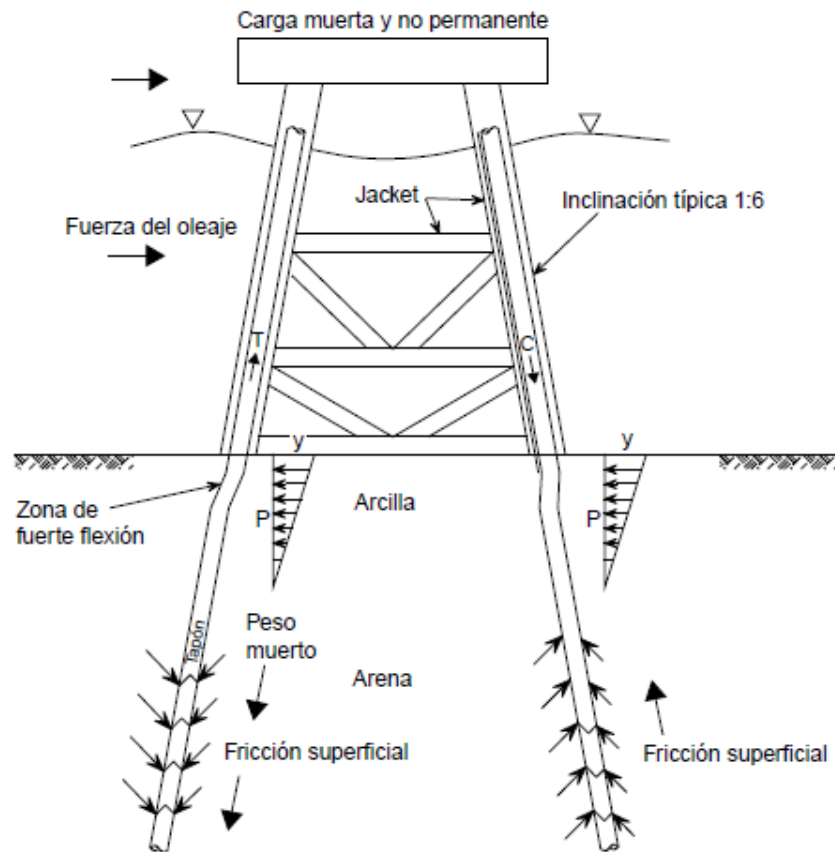


Figura N° 2.6: Comportamiento real de la estructura (ITEA, s.f.).

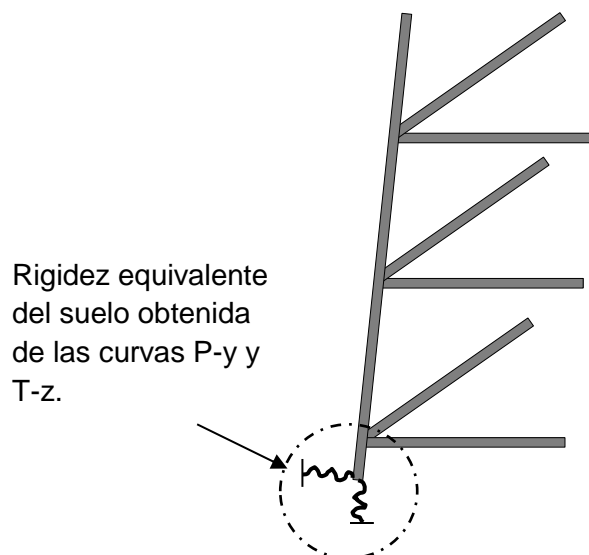


Figura N° 2.7: Modelo simplificado para considerar la interacción suelo – estructura (ITEA, s.f.).

## 2.6 COSTOS

Las plataformas marinas fijas constituyen las estructuras marinas más simples y de mayor uso debido a su bajo costo de construcción en comparación con otras estructuras.

Los costos varían de una estructura a otra; sin embargo, se pueden obtener ratios de costos de acuerdo a la altura total de la plataforma. Una plataforma de hasta 30 metros puede costar 28 millones de dólares, mientras que una plataforma de hasta 60 metros puede costar 60 millones. Es por ello que es muy importante garantizar la integridad estructural de las plataformas marinas.

Los costos que están involucrados en este tipo de estructuras son considerables. Es por ello que se deben evaluar cada cierto tiempo con la finalidad de ajustarla a los cambios normativos de tal manera que se evite su falla y los posteriores costos debido a las reparaciones que se deben realizar.

Algunos costos relacionados a este tipo de estructura se pueden encontrar en la bibliografía actual (Byrd et al., 2014; Wilson, 2003) que pueden dar una idea de la importancia de tales estructuras y los costos que están involucrados.

La inspección técnica de un nodo puede alcanzar un costo alrededor de 2 mil dólares; el costo de reparar un nudo sumergido dependiendo del tipo de reparación varía de los 3 mil a 15 mil dólares. La inspección de los elementos de acero sumergidos puede conllevar costos de hasta los 25 mil dólares.

El reforzamiento de las plataformas marinas puede demandar de varios miles de dólares; y es por esta razón que debe evaluarse las estructuras de manera que la inversión realizada sea beneficiosa económicamente.

El costo de remoción de tales estructuras al final de su vida de trabajo varía desde un valor de 1 a 3 millones de dólares.



## CAPÍTULO III

### GENERACIÓN DE LA FAMILIA DE ESTRUCTURAS TIPO JACKET

#### 3.1 MODELOS ESTRUCTURALES.

En este proyecto las estructuras de interés y en estudio son las plataformas marinas fijas o Jackets. Es por ello que se recopilaron 5 modelos generales 2D (Anexo A), los cuales han sido extraídos de artículos y publicaciones de estudios anteriores sobre este tipo de estructuras (Sunder & Connor, Beltrán y Cerrolaza, Harish et al., Zeinoddini et al.). Estos modelos permitirán determinar parámetros comunes que son determinantes en las respuestas dinámicas de las estructuras al ser sometidas a oleaje.

#### 3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CONFIGURACIONES ESTRUCTURALES DE LOS JACKETS.

Las plataformas marinas son armazones tubulares 3D de acero. En este trabajo los modelos son marcos planos extraídos de dichas estructuras con cargas proporcionales a su área tributaria.

Para asegurar su estabilidad contra las fuerzas de olas y cualquier otra fuerza similar, estas estructuras tienen entre cuatro y ocho piernas. Las piernas son introducidas en el fondo marino de tal manera que la estructura obtenga una posición fija.

Las estructuras en estudio son de diferentes dimensiones, desde un máximo de 220 metros hasta un mínimo de 44.2 m de altura. Asimismo, están divididas en altura desde un mínimo de 4 cuerpos hasta un máximo de 10 cuerpos.

#### 3.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LAS PLATAFORMAS MARINAS SOMETIDAS A CARGAS DE OLEAJE.

El análisis estructural de toda estructura requiere conocer las cargas que la estructura debe soportar de acuerdo en base a las condiciones que se presentan en el medio que la rodea. Asimismo, es necesario emplear un

modelo que describa de manera apropiada el comportamiento dinámico de la estructura en estudio. Las cargas constituyen una información muy importante y conocerlas es vital para las evaluaciones que se realizarán sobre el modelo estructural.

### 3.3.1 Cargas sobre Estructuras Offshore.

Las cargas se pueden clasificar como estáticas y dinámicas. Son cargas estáticas sobre una estructura aquellas que provienen de cargas de gravedad, las cargas de la cubierta, las cargas hidrostáticas y cargas de la corriente; mientras que las cargas dinámicas son aquellas que se originan por la variación del viento y las olas (Chakrabarti, 2005).

Carga de gravedad: Corresponde a la carga viva y muerta. Las cargas muertas son aquellas permanentes de la estructura y los equipos que no son susceptibles de cambiar durante la vida útil de la estructura; mientras que las cargas vivas son cargas variables debido al almacenamiento de líquido y sólidos (Chakrabarti, 2005).

Carga Hidrostática: Fuerza sobre la estructura en la parte sumergida.

Carga de viento: La fuerza de viento es una condición ambiental, la cual tiene influencia sobre toda la estructura que se encuentra encima del nivel del agua.

Carga de oleaje: Fuerza originada generalmente por la corriente marina.

Existen otros tipos de cargas como las de instalación y operación, entre las cuales se encuentran las vibraciones a causa de los equipos y cargas de impacto.

### 3.3.2 Combinaciones de carga.

Las combinaciones de carga dependen del método de diseño, es decir si se utiliza el método del estado límite o el de esfuerzos admisibles.

Según el método de esfuerzos admisibles las combinaciones son:

- a. Cargas propias más cargas del entorno operativas más cargas dinámicas máximas, apropiadas para los procesos de trabajo normales de la plataforma.
- b. Cargas propias más cargas del entorno operativas más cargas dinámicas mínimas, apropiadas para los procesos de trabajo normales de la plataforma.
- c. Cargas propias más cargas extremas del entorno (previstas) más cargas dinámicas máximas, apropiadas para su combinación con condiciones extremas.
- d. Cargas propias más cargas extremas del entorno (previstas) más cargas dinámicas mínimas, apropiadas para su combinación con condiciones extremas.

Las cargas ambientales del entorno deben combinarse de una manera consistente, teniendo en cuenta su probabilidad de ocurrencia; además deben considerarse de manera separada (ITEA, s.f.).

De otro lado, de acuerdo al método del estado límite.

- a. Estado limite último:

$$\text{Habitual: } 1.3CP+1.3CL+1.0CD+0.7CE$$

$$\text{Extrema: } 1.0CP+1.3CL+1.0CD+1.3CE$$

- b. Estado límite de fatiga:  $1.0CP+1.0CL+1.0CD+1.0CE$
- c. Estado límite de colapso progresivo:  $1.0CP+1.0CL+1.0CD+1.0CE$
- d. Estado límite de la utilidad:  $1.0CP+1.0CL+1.0CD+1.0CE$

Donde CP, CL, CD y CE representan cargas propias, cargas operativas (dinámicas), deformación y ambientales.

Es preciso señalar que los coeficientes varían de acuerdo a la norma empleada.

### 3.3.3 Modelo estructural.

Las plataformas marinas son armazones tubulares tridimensionales de acero. Dada la suposición de que la estructura se encuentra rodeada por un flujo irrotacional, la estructura puede ser modelada y analizada como

una estructura bidimensional, tomando uno de los marcos que la componen. Las cargas que se consideran en el análisis quedan establecidas según el área tributaria del marco seleccionado.

### 3.3.4 Discretización espacial de la estructura.

Los elementos de la estructura pueden modelarse como elementos tipo viga, los cuales poseen 6 grados de libertad (GDL) y en los que se considera desacoplado el comportamiento axial y el comportamiento a flexión.

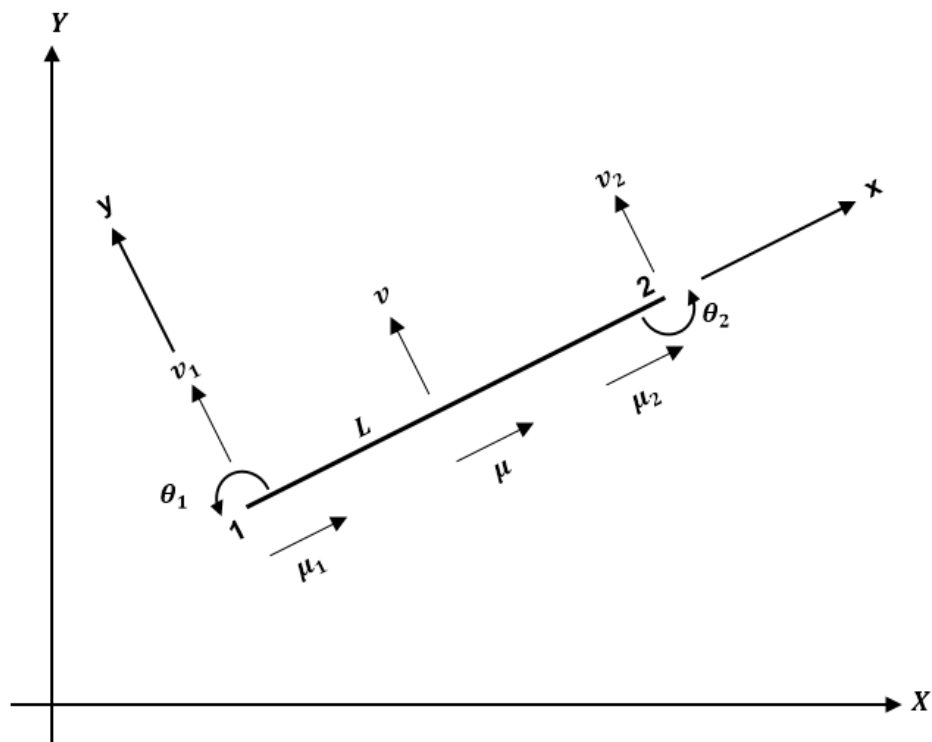


Figura N°3.1: Movimientos de los nodos en ejes locales (Beltrán y Cerrolaza, 1989).

El desplazamiento longitudinal  $\mu$  de los puntos de la viga se aproxima mediante un polinomio de primer grado:

$$\mu = A + B \cdot x = \mu_1 \cdot (1 - \xi) + \mu_2 \cdot \xi \quad (3.1)$$

Donde  $\xi = \frac{x}{L}$ , L es la longitud del elemento y  $\mu_1, \mu_2$  son los desplazamientos longitudinales de los nodos.

El desplazamiento transversal  $v$  de los puntos de la viga se aproxima mediante un polinomio de tercer grado y se hace la suposición de que el giro  $\theta$  de las secciones transversales es la derivada de  $v$  con respecto a la coordenada longitudinal  $x$ .

$$\theta = \frac{dv}{dx} \quad (3.2)$$

De lo anterior resulta:

$$v = C + D \cdot x + E \cdot x^2 + F \cdot x^3 \quad (3.3)$$

$$= v_1 \cdot (1 - 3 \cdot \xi^2 + 2 \cdot \xi^3) + \theta_1 \cdot L \cdot \xi \cdot (\xi - 1)^2 + v_2 \cdot (3 \cdot \xi^2 - 2 \cdot \xi^3) + \theta_2 \cdot L \cdot \xi^2 \cdot (\xi - 1) \quad (3.4)$$

Para obtener la matriz de rigidez se emplean las funciones de interpolación junto con los principios del método de trabajo virtual. El principio del método establece que para cualquier desplazamiento virtual  $\delta$  el trabajo total externo  $W_{ext}$  hecho por las fuerzas nodales debe ser igual al trabajo total interno  $W_{int}$  hecho por las fuerzas internas.

$$\delta = \begin{Bmatrix} \mu_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ \mu_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix}, \quad f = \begin{Bmatrix} Fx_1 \\ Fy_1 \\ M_1 \\ Fx_2 \\ Fy_2 \\ M_2 \end{Bmatrix}$$

$$W_{ext} = \delta^T f = \mu_1 \cdot Fx_1 + v_1 \cdot Fy_1 + \theta_1 \cdot M_1 + \mu_2 \cdot Fx_2 + v_2 \cdot Fy_2 + \theta_2 \cdot M_2 \quad (3.5)$$

En tanto que el trabajo interno es:

$$W_{int} = \int_V \{\delta^* \epsilon\}^T \{\sigma\} dV \quad (3.6)$$

Donde:

$$\epsilon = [Q] \cdot \delta \quad (3.7)$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (3.8)$$

$$\sigma = E \cdot [Q] \cdot \delta \quad (3.9)$$

Reemplazando las ecuaciones 3.7 y 3.9 en la ecuación 3.6 se obtiene:

$$f = \delta \cdot \int_V [Q]^T \cdot E \cdot [Q] dV \quad (3.10)$$

Donde  $[Q]$  es la matriz de desplazamiento-deformación.

Además:

$$f = K \cdot \delta \quad (3.11)$$

Por lo tanto:

$$K = \int_V [Q]^T \cdot E \cdot [Q] dV \quad (3.12)$$

A partir de la ecuación de la ecuación 3.12 se obtiene la matriz de rigidez para efectos axiales que en coordenadas locales es:

$$K_l^e = \begin{bmatrix} EA/L & -EA/L \\ -EA/L & EA/L \end{bmatrix}$$

Mientras que, para los efectos de transversales como la flexión, la matriz de rigidez en coordenadas locales es:

$$K_l^e = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Teniendo en cuenta el orden de los GDL la matriz de rigidez  $K_l^e$  en coordenadas locales se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Para obtener la matriz de rigidez en coordenadas globales, es necesario multiplicarla por una matriz de transformación.

$$K_G^e = Z^T K_l^e Z \quad (3.13)$$

Donde Z es la matriz de transformación:

$$Z = \begin{bmatrix} Cx & -Cy & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Cy & Cx & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Cx & -Cy & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Cy & Cx & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3.3.4.1 Rigidez.

La rigidez global de la estructura se obtiene a partir del ensamble de las rigideces de todos los elementos que conforman el marco plano.

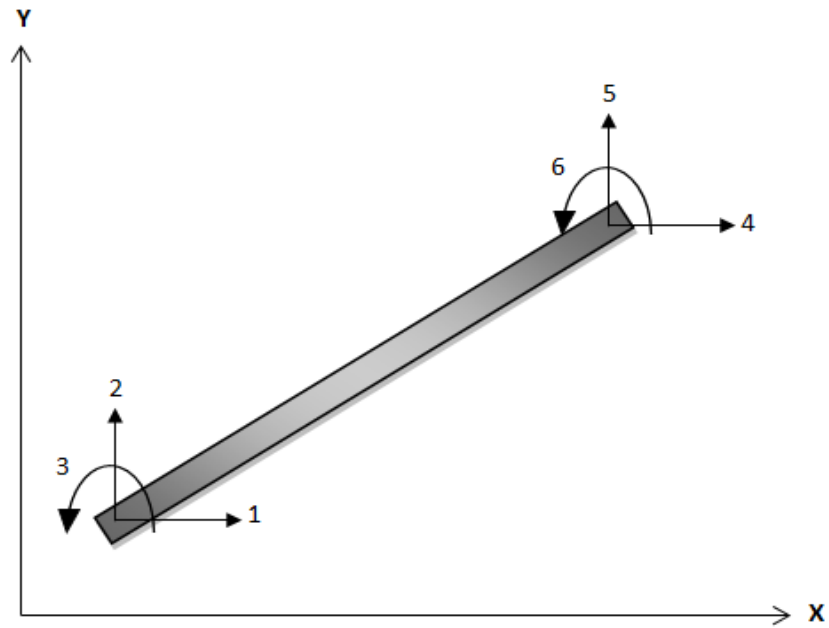


Figura N°3.2: Elemento viga inclinada con 6 grados de libertad.

En la matriz de rigidez no se considera el efecto de las deformaciones de corte, solo se considera el efecto axial y de flexión.

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L}Cx^2 + \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{EA}{L}Cx^2 - \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{6EI}{L^2}Cy \\ \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{EA}{L}Cy^2 + \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & \frac{6EI}{L^2}Cx & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{EA}{L}Cy^2 - \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & \frac{6EI}{L^2}Cx \\ -\frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{4EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L}Cx^2 - \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{EA}{L}Cx^2 + \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{6EI}{L^2}Cy \\ \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{EA}{L}Cy^2 - \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{EA}{L}Cy^2 + \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & -\frac{6EI}{L^2}Cx \\ -\frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{2EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Figura N°3.3: Matriz de rigidez de un elemento viga inclinada con 6 grados de libertad.

Donde:

E=Módulo de elasticidad del material.

A=Área de la sección transversal del elemento.

L= Longitud del elemento.



$I$ = Inercia de la sección transversal con respecto a un eje que pasa por centro de gravedad.

$$C_x = \Delta x / L$$

$$C_y = \Delta y / L$$

$$\Delta x = x_2 - x_1$$

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

$x_1, y_1$ = Coordenadas de un extremo del elemento.

$x_2, y_2$ = Coordenadas del otro extremo del elemento.

### 3.3.4.2 Amortiguamiento

El amortiguamiento es la disipación de energía que ocurre en todo tipo de estructura durante el movimiento. El amortiguamiento puede tener varias fuentes: el amortiguamiento propio del material, amortiguamiento a través de un sistema mecánico o el amortiguamiento por el medio que lo rodea. Para un análisis dinámico es necesario medir el amortiguamiento de la estructura experimentalmente; sin embargo, es un proceso muy complejo desde el punto de vista de la ingeniería. Existen formulaciones que permiten estimar el amortiguamiento. Una formulación muy conocida es la propuesta de Rayleigh.

La formulación de Rayleigh básicamente supone que la matriz de amortiguamiento  $C$  es una combinación lineal de la matriz de masa y rigidez tal como se muestra a continuación:

$$C = a \cdot M + b \cdot K \quad (3.14)$$

Donde  $a, b$  son dos coeficientes reales.

Dada la ecuación del movimiento dinámico:

$$M \cdot \ddot{V}(t) + C \cdot \dot{V}(t) + K \cdot V(t) = -M I \ddot{u}_g \quad (3.15)$$

Aplicando la transformación por superposición modal para obtener ecuaciones desacopladas

$$V = \sum_{i=1}^n \phi_i Y_i \quad (3.16)$$

Se obtiene:

$$M \cdot \phi \cdot \ddot{Y}_i + C \cdot \phi \cdot \dot{Y}_i + K \cdot \phi \cdot Y_i = -MI\ddot{u}_g \quad (3.17)$$

A su vez, si se premultiplica la ecuación 3.8 por  $\phi_i^T$ :

$$\phi_i^T \cdot M \cdot \phi \cdot \ddot{Y}_i + \phi_i^T \cdot C \cdot \phi \cdot \dot{Y}_i + \phi_i^T \cdot K \cdot \phi \cdot Y_i = -\phi_i^T MI\ddot{u}_g \quad (3.18)$$

Se obtiene la ecuación desacoplada para cada GDL:

$$M_i \cdot \ddot{Y}_i + C_i \cdot \dot{Y}_i + K_i \cdot Y_i = -\phi_i^T MI\ddot{u}_g \quad (3.19)$$

Reemplazando la ecuación 3.14 en la ecuación 3.19 y dividiendo por  $M_i$  se obtiene:

$$\ddot{Y}_i + (a + b \cdot \omega_i^2) \cdot \dot{Y}_i + \omega_i^2 \cdot Y_i = -\Gamma_i \ddot{u}_g \quad (3.20)$$

El coeficiente relacionado al amortiguamiento es:

$$2\zeta_i \omega_i = a + b \cdot \omega_i^2 \quad (3.21)$$

La Ec. (3.21) puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\zeta_n = \frac{a}{2} \cdot \frac{1}{\omega_n} + \frac{b}{2} \cdot \omega_n \quad (3.22)$$

y de manera general de la siguiente forma:

$$\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1/\omega_1 & \omega_1 \\ 1/\omega_2 & \omega_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{Bmatrix} \quad (3.23)$$

Donde:

$\omega_1, \omega_2$ = frecuencias naturales del primero y segundo modo.  
(Rad/s)

$\zeta_1, \zeta_2$ = porcentaje de amortiguamiento (3 % en estructuras marinas fijas).

La matriz C proporciona las fuerzas de amortiguamiento  $a_e$  que aparecen en los nodos cuando estos se desplazan con una velocidad  $\dot{\mu}_e$ :

$$a = -C \cdot \dot{\mu} \quad (3.24)$$

La matriz de amortiguamiento se puede ensamblar al emplear el método de Rayleigh teniendo en cuenta los 2 primeros modos de vibración.

### 3.3.4.3 Masa

La masa global de una plataforma fija proviene de la masa de todos los elementos que la conforman, así como también de la masa de la plataforma en sí que se encuentra por encima de la superficie de agua.

La masa de los elementos estructurales se encuentra distribuida en toda su longitud. Por esta razón para considerar esta masa distribuida en el análisis dinámico debería adoptarse el criterio de las masas consistentes de tal manera que se obtengan resultados exactos; sin embargo, debido al esfuerzo computacional que significa emplear matrices de masa llenas según el criterio de masas consistentes, se realiza una aproximación al emplear el criterio de las masas concentradas.

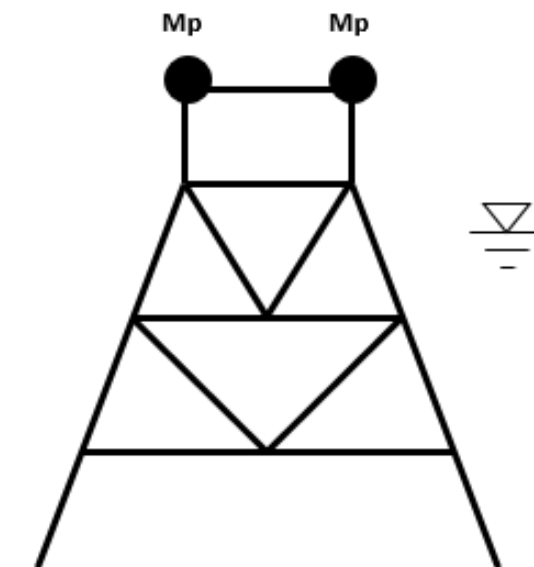


Figura N°3.4: Masa adicional sobre una plataforma.

Este criterio supone que la masa total del elemento en estudio se concentra en los extremos del mismo. Este criterio reduce la matriz de masas convirtiéndola de una matriz de masa llena a una matriz de masa

diagonal ( $M_e$ ). Esta aproximación significa una reducción en gran medida los cálculos computacionales.

$$\text{diag}(M_e) = \left[ \frac{M}{2}, \frac{M}{2}, \frac{ML^2}{12}, \frac{M}{2}, \frac{M}{2}, \frac{ML^2}{12} \right] \quad (3.25)$$

Donde M representa la masa total del elemento y se ha mantenido la numeración de grados de libertad empleada al escribir la matriz de rigidez.

Sin embargo, es necesario especificar que la masa concentrada de los elementos sumergidos de las plataformas debe ser interpretada como una masa virtual debido a la interacción fluido-estructura. Es decir, a la masa del elemento debe añadirse una masa adicional que es arrastrada por el elemento. Esta masa del fluido asociada al elemento es un porcentaje del volumen del elemento.

Wilson (2003) recomienda usar una masa adicional en cada extremo igual a 37.5% del volumen desplazado por el elemento.

$$M_V = 0.5 \cdot \text{masa total del elemento} + 0.375 \cdot C_A \cdot \rho \cdot V \quad (3.26)$$

La masa  $M_V$  reemplaza el valor de M en las matrices de masa para los elementos que se encuentran sumergidos.

#### 3.3.4.4 Carga

La carga aplicada sobre los elementos por el agua es la fuerza hidrodinámica que ejerce esta sobre los elementos y es calculada a través de la ecuación de Morison.

$$f = \rho \cdot C_M \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \ddot{u} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot D \cdot |\dot{u}| \cdot \dot{u} \quad (3.27)$$

$$\dot{u} = \frac{2\pi \cdot A \cosh[k \cdot (z+d)] \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)}{T \sinh(k \cdot d)} \quad (3.28)$$

$$\ddot{u} = \frac{4\pi^2 \cdot A \cosh[k \cdot (z+d)] \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t)}{T^2 \sinh(k \cdot d)} \quad (3.29)$$

Es necesario indicar que la carga no varía linealmente con la velocidad del fluido, tal como se puede notar en la ecuación, por lo que es

necesario emplear procedimientos que permitan llevar un manejo apropiado de la carga.

Asimismo, es importante notar que la variación de la velocidad y aceleración depende tanto de la posición y profundidad de un punto en cuestión y del tiempo.

### 3.3.5 Fuerzas de oleaje sobre los elementos.

Las fuerzas de oleaje se presentan sobre todo elemento de estructura que se encuentra sumergido.

De acuerdo a la ecuación de Morison mostrada previamente, la distribución de fuerza en profundidad para un tiempo determinado es como se muestra en la figura N°3.7.

Para un análisis dinámico las fuerzas externas tienen que ser llevadas a los nodos de una manera consistente desde el punto de vista energético. Estas fuerzas equivalentes deben producir los mismos efectos. Esto facilita el análisis de la estructura y simplifica los cálculos en gran manera como se detalla más adelante.

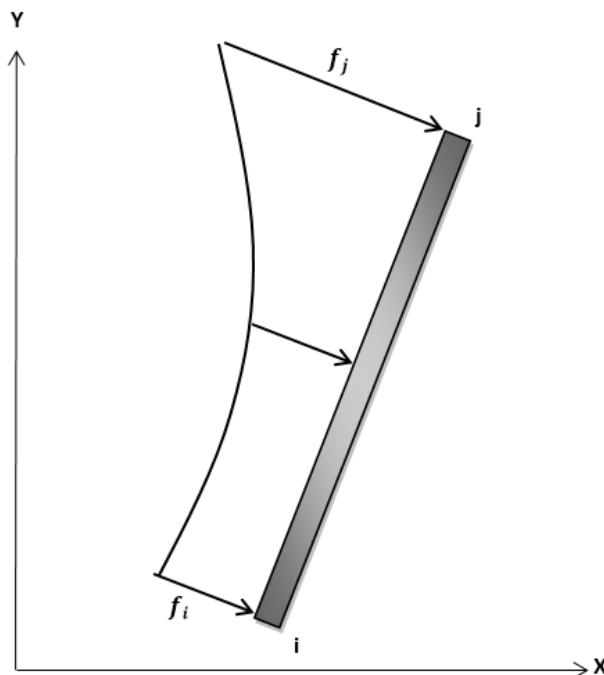


Figura N°3.5: Distribución de la carga de oleaje sobre un elemento.

### 3.3.5.1 Fuerza equivalente

El cálculo de las fuerzas de oleaje mediante las ecuaciones de la velocidad y aceleración provistas por la ecuación de Airy no es sencillo y se complica aún más cuando se quiere llevar los efectos de la carga a lo largo del elemento a los nudos, por lo que es necesario considerar una fuerza equivalente.

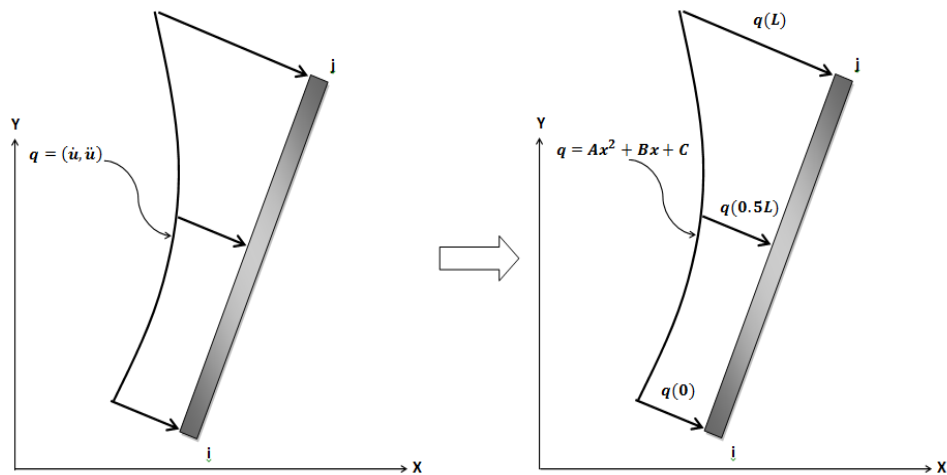


Figura N°3.6: Distribución equivalente de la fuerza de oleaje.

Para simplificar el cálculo de la fuerza hidrodinámica que actúa sobre los elementos, se calcula la fuerza de acuerdo a las ecuaciones de Airy en tres puntos sobre el elemento, al inicio del elemento (nudo 1), al final del elemento (nudo 2) y a la mitad, es decir a 0, 0.5L y L. A partir de estos tres puntos la distribución original es reemplazada por un polinomio de segundo grado. Este procedimiento facilita en gran manera a su vez conocer las fuerzas equivalentes en los extremos.

De la figura N°3.8 se pueden plantear 3 ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} q(0) \\ q(0.5 \cdot L) \\ q(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{L^2}{4} & \frac{L}{2} & 1 \\ L^2 & L & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{L^2} & \frac{-4}{L^2} & \frac{2}{L^2} \\ \frac{-3}{L} & \frac{4}{L} & \frac{-1}{L} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(0) \\ q(0.5 \cdot L) \\ q(L) \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Con los valores de A, B y C la distribución de la fuerza está definida para cada punto.

### 3.3.5.2 Fuerza resultante equivalente en los nudos.

Con la nueva distribución de fuerza hidrodinámica, es decir con la distribución en base a un polinomio de segundo grado, se debe obtener las fuerzas resultantes equivalentes en los nudos.

Las funciones de interpolación que se emplean aquí se muestran a continuación:

$$\begin{bmatrix} F_{y1} \\ M_1 \\ F_{y2} \\ M_2 \end{bmatrix} = \int_0^1 \begin{bmatrix} 1 - 3 \cdot \xi^2 + 2 \cdot \xi^3 \\ L \cdot \xi \cdot (\xi - 1)^2 \\ 3 \cdot \xi^2 - 2 \cdot \xi^3 \\ L \cdot \xi^2 \cdot (\xi - 1) \end{bmatrix} [r(\xi, t)] L d\xi \quad (3.32)$$

Donde:

$$r(\xi, t) = A \cdot \xi^2 + B \cdot \xi + C \quad (3.33)$$

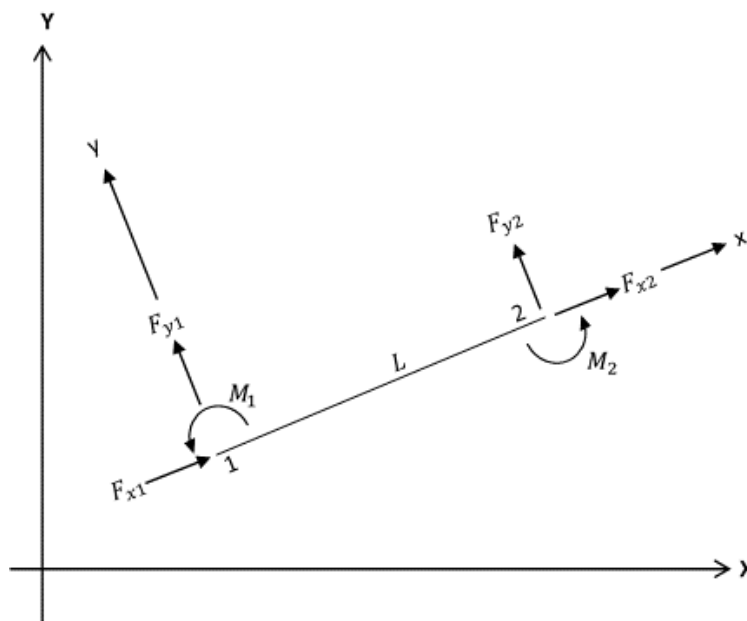


Figura N°3.7: Acciones sobre los nodos en ejes locales.

Obteniéndose:

$$F'_{x1} = 0 \quad F'_{x2} = 0 \quad (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} F_{y1}' \\ M_1' \\ F_{y2}' \\ M_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A \cdot L}{15} + \frac{3 \cdot B \cdot L}{20} + \frac{C \cdot L}{2} \\ \frac{A \cdot L^2}{60} + \frac{B \cdot L^2}{30} + \frac{C \cdot L^2}{12} \\ \frac{4 \cdot A \cdot L}{15} + \frac{7 \cdot B \cdot L}{20} + \frac{C \cdot L}{2} \\ -\frac{A \cdot L^2}{30} - \frac{B \cdot L^2}{20} - \frac{C \cdot L^2}{12} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Esta última matriz es la fuerza resultante equivalente en los nudos en el sistema de coordenadas local. Para llevar las fuerzas a coordenadas globales es necesario multiplicar la matriz anterior por una matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} F_{1X} \\ F_{1Y} \\ M_1 \\ F_{2X} \\ F_{2Y} \\ M_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cx & -Cy & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Cy & Cx & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Cx & -Cy & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Cy & Cx & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x1}' \\ F_{y1}' \\ M_3' \\ F_{x2}' \\ F_{y2}' \\ M_2' \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

### 3.3.6 Fijación de la estructura al fondo marino.

Las plataformas se fijan en el fondo marino a través de unos pilotes hincados. El fondo es un suelo saturado y desde el punto de vista dinámico no restringe totalmente el giro, por lo que al momento de analizar la estructura no es del todo correcto considerar una estructura empotrada. Sin embargo, es posible considerar una condición empotrada si se considera una altura equivalente para la plataforma.

#### 3.3.6.1 Suposición de empotramiento perfecto.

El empotramiento perfecto puede ser considerado si se utiliza una altura equivalente para la estructura de tal manera que bajo la misma carga el desplazamiento real en un extremo considerando el suelo flexible sea igual al desplazamiento del mismo extremo considerando un apoyo empotrado.



El cálculo de la altura equivalente se realiza mediante unas ecuaciones que consideren tanto la altura original  $L$ , la profundidad  $L_u$ , la rigidez del elemento y la constante  $N_0$  del suelo (Wilson, 2003).

$$L_e = L_u \cdot \left[ 0.4 + 1.353 \cdot \left( \frac{L}{L_u} \right) + 1.875 \cdot \left( \frac{L}{L_u} \right)^2 + \left( \frac{L}{L_u} \right)^3 \right]^{1/3} \quad (3.37)$$

Donde:

$$L_u = \left( \frac{102.9 \cdot E \cdot I}{N_0} \right)^{1/5} \quad (3.38)$$

En la ecuación,  $N_0$  es constante de reacción horizontal de subrasante, el valor para suelos arenosos sumergidos varía entre 140 ton/m<sup>3</sup> (4 ton/pie<sup>3</sup>) y 1200 ton/m<sup>3</sup> (34 ton/pie<sup>3</sup>) (Wilson, 2003).

Con esta consideración de la altura equivalente se modifica la altura sumergida de los modelos, de esta manera se considera la flexibilidad del suelo.

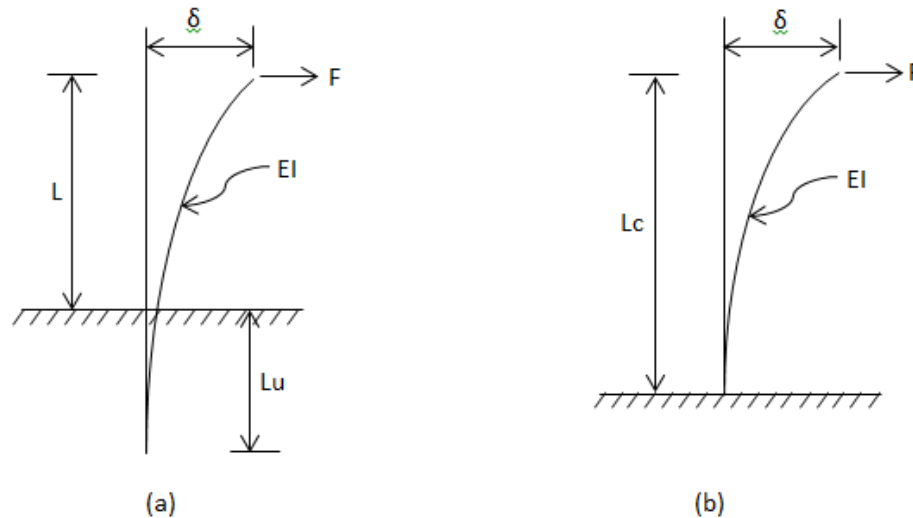


Figura N°3.8: Suposición de la altura equivalente. (a) Desplazamiento horizontal para una carga horizontal considerando un suelo flexible. (b) Desplazamiento horizontal para una carga horizontal con altura equivalente considerando un suelo rígido (Wilson, 2003).

### 3.3.7 Análisis dinámico.

El análisis dinámico que se realiza es un análisis modal debido a que se supone que las deformaciones son pequeñas y que la estructura permanece en el rango de comportamiento lineal.

El análisis modal consiste en convertir ecuaciones simultáneas diferenciales, que describen las condiciones de equilibrio de cada grado de libertad, en un conjunto de ecuaciones de equilibrio independientes. El método de solución modal de la ecuación dinámica que gobierna el movimiento de la estructura requiere las frecuencias de vibración y las formas de modo para la condición de vibración libre no amortiguada.

### 3.3.7.1 Ecuación de movimiento.

La ecuación que gobierna el movimiento de las estructuras es la siguiente.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{V}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{V}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{V}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (3.39)$$

$\mathbf{K}$  = Matriz de rigidez.

$\mathbf{C}$  = Matriz de amortiguamiento

$\mathbf{M}$  = Masa de la estructura.

$\mathbf{p}(t)$  = Fuerzas exteriores.

$\mathbf{V}(t)$  = Matriz de desplazamientos.

$\dot{\mathbf{V}}(t)$  = Matriz de velocidades.

$\ddot{\mathbf{V}}(t)$  = Matriz de aceleraciones.

Las matrices de masa, amortiguamiento, rigidez y de carga se ensamblan de la manera clásica.

Debido a que tratamos con una estructura de muchos grados de libertad es necesario desacoplar las ecuaciones de movimiento. Esto se realiza empleando la propiedad de ortogonalidad de los modos.

### 3.3.7.2 Desacoplamiento de las ecuaciones de movimiento.

Se sabe que la transformación fundamental de coordenadas del método de superposición modal es:

$$\underline{\mathbf{V}} = \underline{\underline{\phi}} \cdot [\mathbf{Y}] \quad (3.40)$$

$$\underline{\mathbf{V}} = \phi_1 Y_1 + \phi_2 Y_2 + \dots + \phi_n Y_n = \sum_{i=1}^n \phi_i Y_i \quad (3.41)$$

Esta ecuación muestra la transformación entre las coordenadas geométricas ( $V$ ) y las coordenadas generalizadas ( $Y$ ) a través de la matriz modal ( $\underline{\phi}$ ).

Reemplazando las coordenadas generalizadas se obtiene:

$$\mathbf{M} \cdot \underline{\phi} \cdot \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C} \cdot \underline{\phi} \cdot \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K} \cdot \underline{\phi} \cdot \mathbf{Y}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (3.42)$$

Premultiplicando por  $\phi_j^T$  se obtiene:

$$\phi_j^T \cdot \mathbf{M} \cdot \phi_j \cdot \ddot{Y}(t) + \phi_j^T \cdot \mathbf{C} \cdot \phi_j \cdot \dot{Y}(t) + \phi_j^T \cdot \mathbf{K} \cdot \phi_j \cdot Y(t) = \phi_j^T \cdot \mathbf{p}(t) \quad (3.43)$$

$$M_j \cdot \ddot{Y}_j + C_j \cdot \dot{Y}_j + K_j \cdot Y_j = P_j \quad (3.44)$$

Donde:

$M_j$  = Matriz de masa generalizada.

$C_j$  = Matriz de amortiguamiento generalizada.

$K_j$  = Matriz de rigidez generalizada.

$P_j$  = Matriz de carga generalizada.

En esta ecuación la matriz de masa, amortiguamiento y de rigidez son matrices diagonales. Por lo tanto, se tienen n ecuaciones desacopladas, por lo que el problema de respuesta elástica de un sistema de n GDL se reduce a la solución de n problemas de un GDL.

### 3.4 RESULTADOS.

Los resultados mostrados a continuación pertenecen a la plataforma J2 (ver Anexo A). Los resultados comprenden los periodos de las tres primeras formas de modo, los desplazamientos laterales de la estructura en un nodo, las fuerzas axiales y los momentos flectores para una ubicación dada.

De la misma manera se obtuvo resultados similares para el resto de las estructuras.

Estos resultados permitirán calibrar el modelo paramétrico que se presenta en el siguiente capítulo.

### 3.4.1 Periodos

Mediante un análisis modal de la estructura J2 (ver Anexo A), teniendo en cuenta las dimensiones de los elementos de la estructura y la masa presente, en el programa SAP2000 se obtienen los periodos de vibración.

Cuadro 3.1: Períodos de vibración del modelo J2 (Elaboración propia).

MODO	PERÍODO (s)
1ER MODO	0.729
2DO MODO	0.192
3ER MODO	0.148

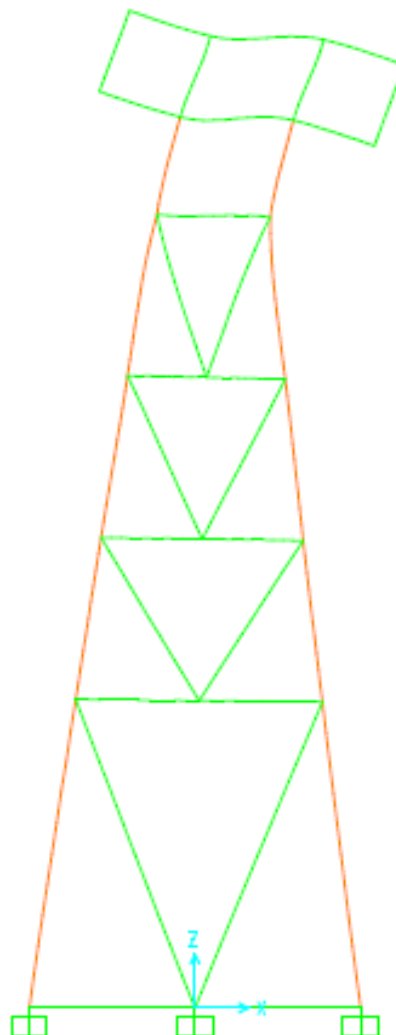


Figura N° 3.9: Primer modo de vibración de la plataforma J2.

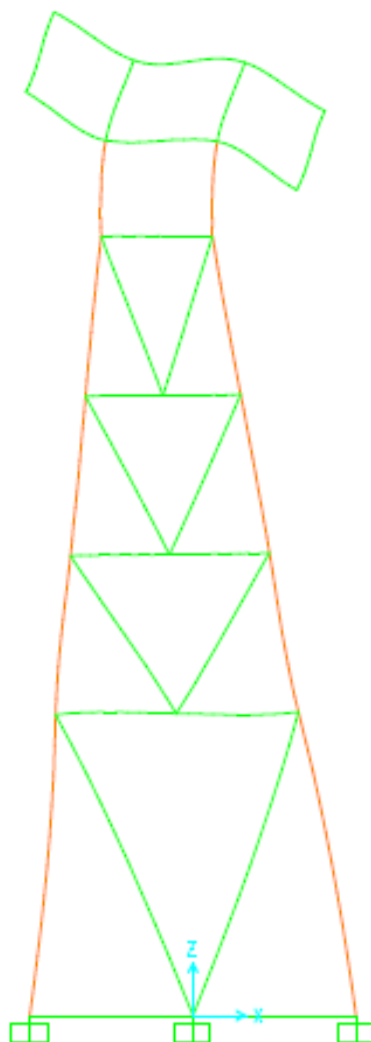


Figura N° 3.10: Segundo modo de vibración de la plataforma J2.

### 3.4.2 Fuerzas de Oleaje

En la Figura N°3.11 se muestra la fuerza de oleaje sobre un punto de la estructura ubicado en la superficie  $z=0$  m.

Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

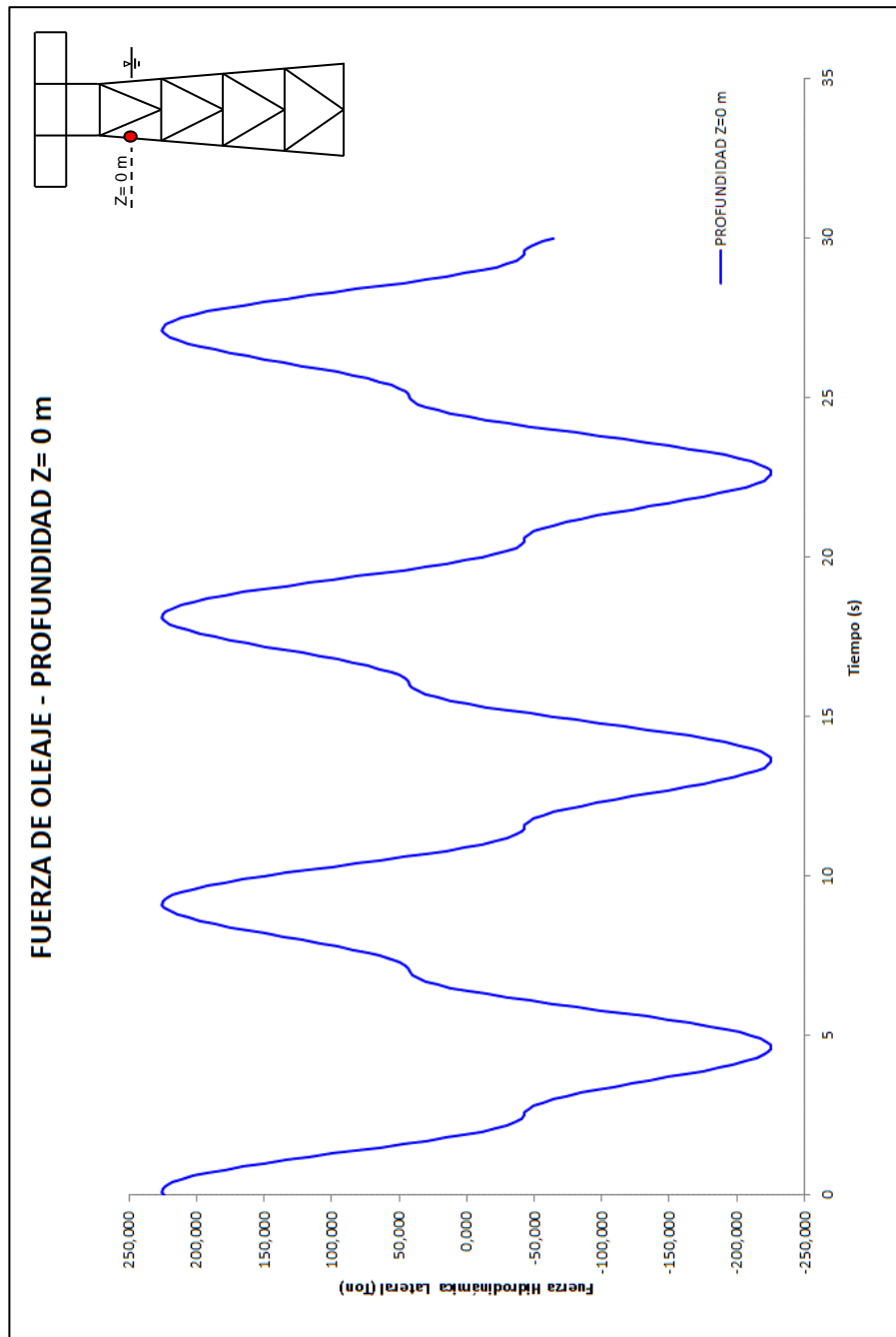


Figura N° 3.11: Fuerza de oleaje en la superficie  $z=0$  m.

En la Figura N°3.12 se muestra la fuerza de oleaje sobre un punto de la estructura ubicado en la mitad de la profundidad sumergida  $z=-17.5$  m.

Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

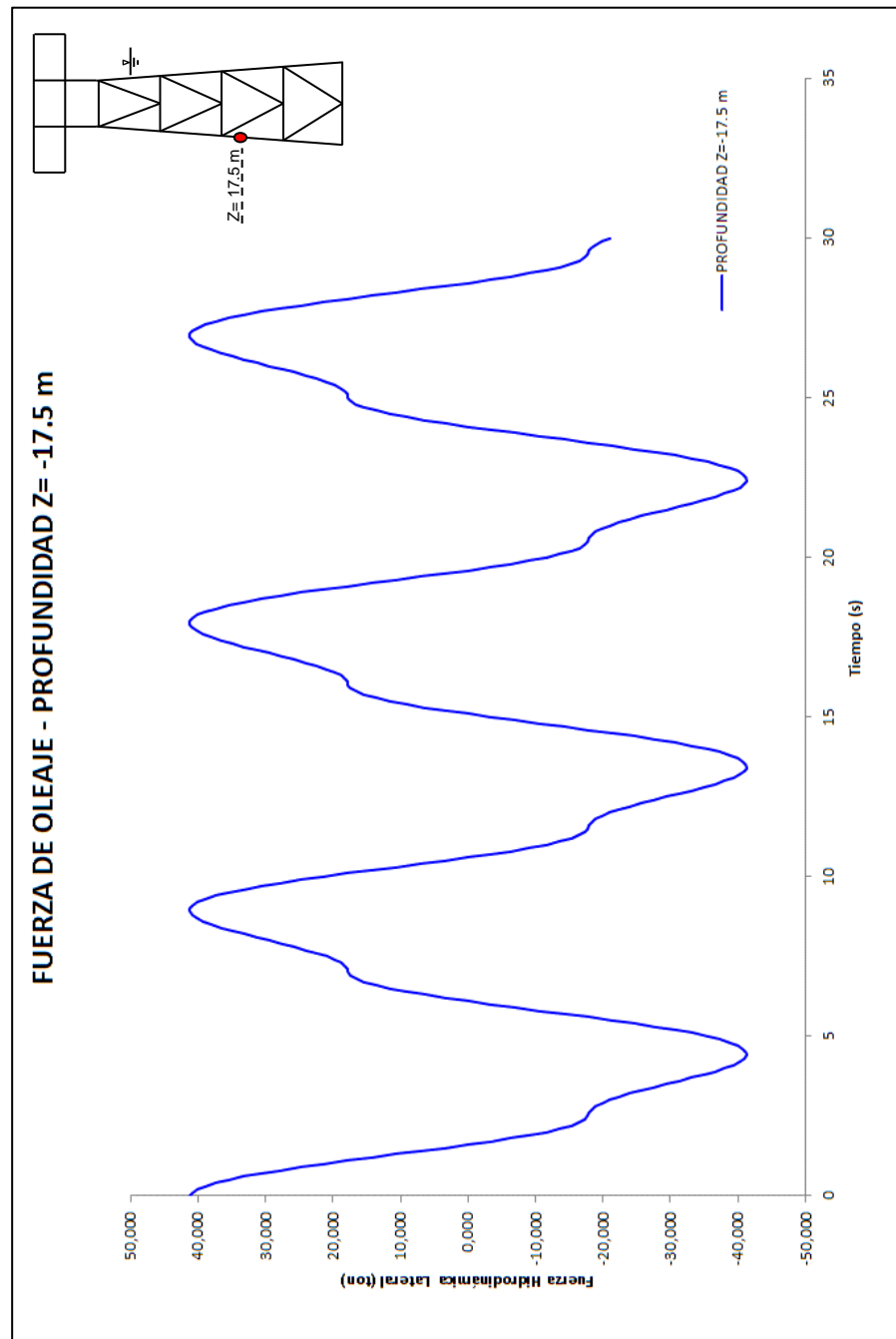


Figura N° 3.12: Fuerza de oleaje sobre la estructura en  $z=-17.5$ m.

En la Figura N°3.13 se muestra la fuerza de oleaje sobre un punto de la estructura ubicado en el fondo de la profundidad sumergida  $z=-35$  m.

Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

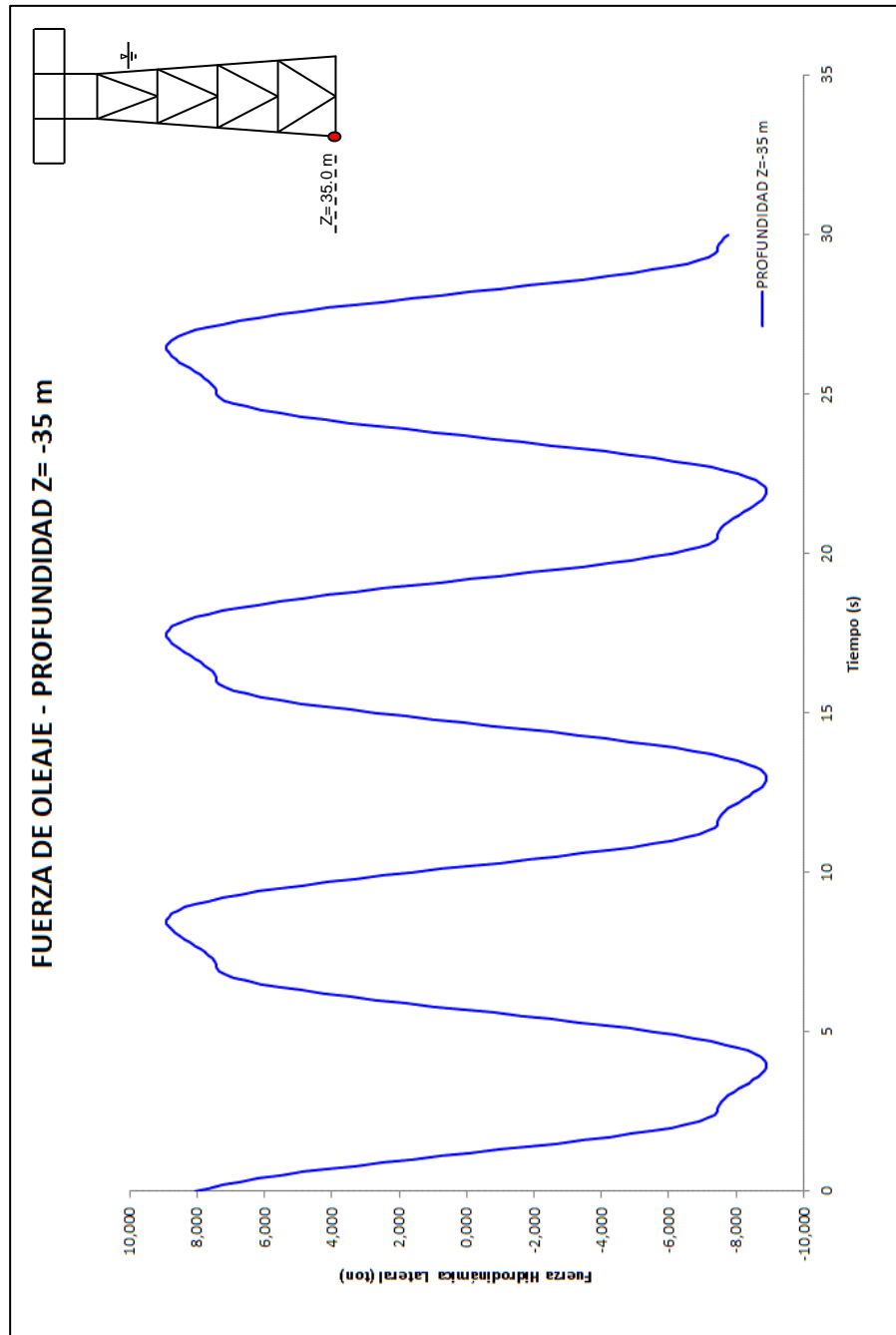


Figura N° 3.13: Fuerza de oleaje sobre la estructura en  $z=-35$ m.



En la Figura N°3.14 se comparan las fuerzas de oleaje sobre puntos de la estructura ubicados a diferentes profundidades. Se aprecia que la fuerza de oleaje sobre la estructura varía de acuerdo a la profundidad.

Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

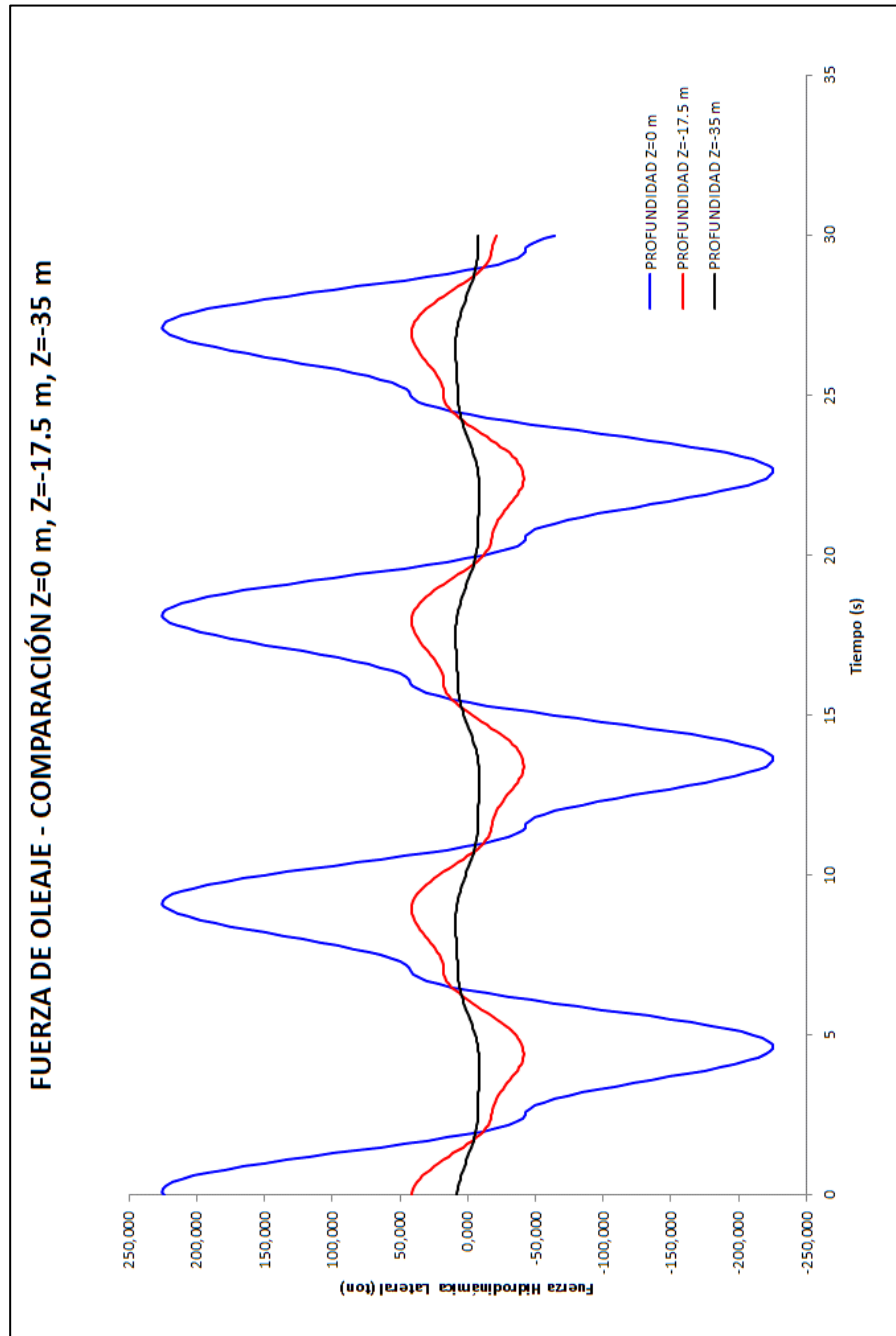


Figura N° 3.14: Fuerza de oleaje a distintas profundidades.

### 3.4.3 Desplazamientos

En la Figura N°3.15 se muestra los desplazamientos laterales del punto más elevado de la estructura.

Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

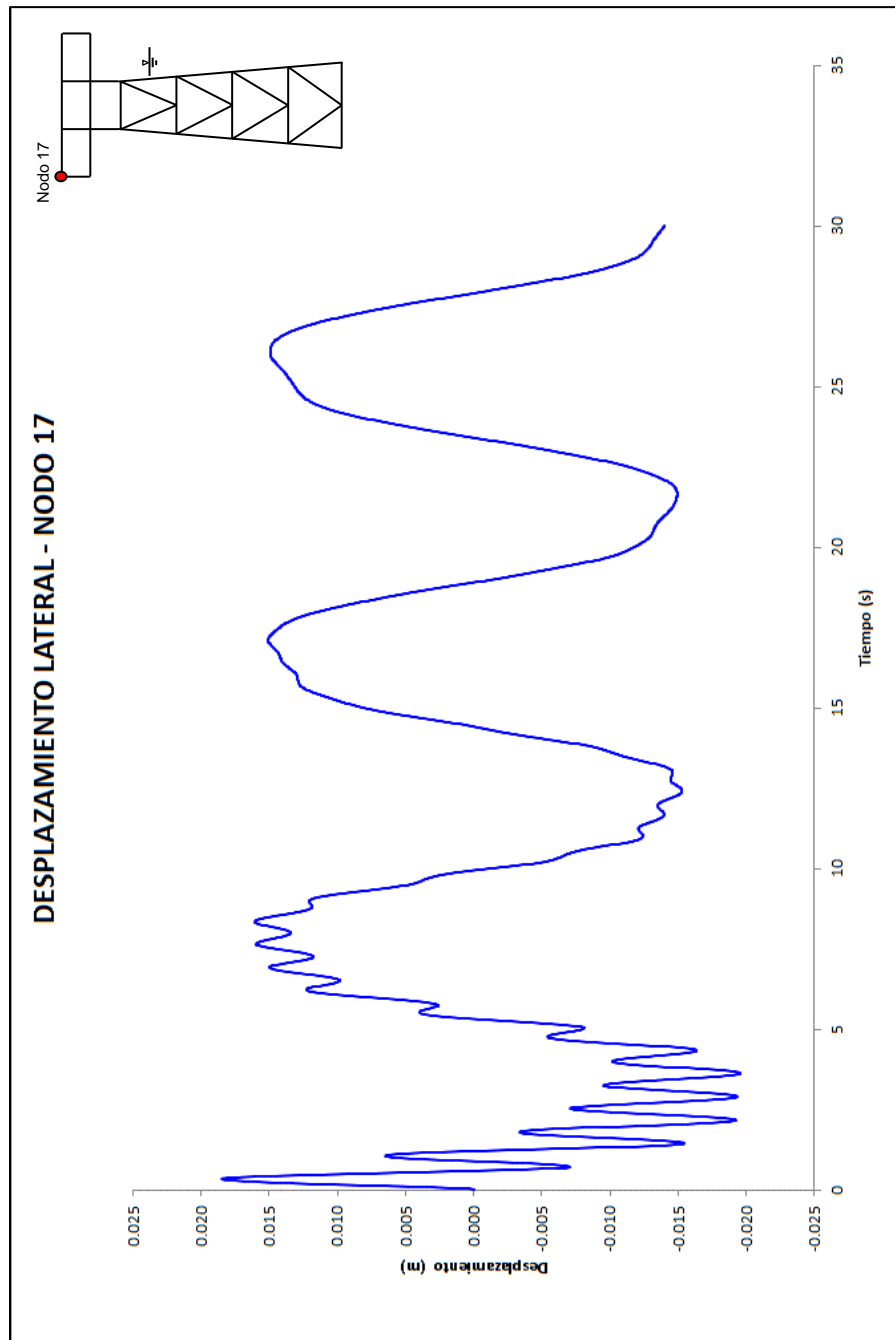


Figura N° 3.15: Desplazamiento del nodo 17 en la plataforma J2. El punto se encuentra por encima de la superficie de agua y existe una carga concentrada.

En la Figura N°3.16 se muestra los desplazamientos laterales de un punto de la estructura que se halla sumergido.

Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

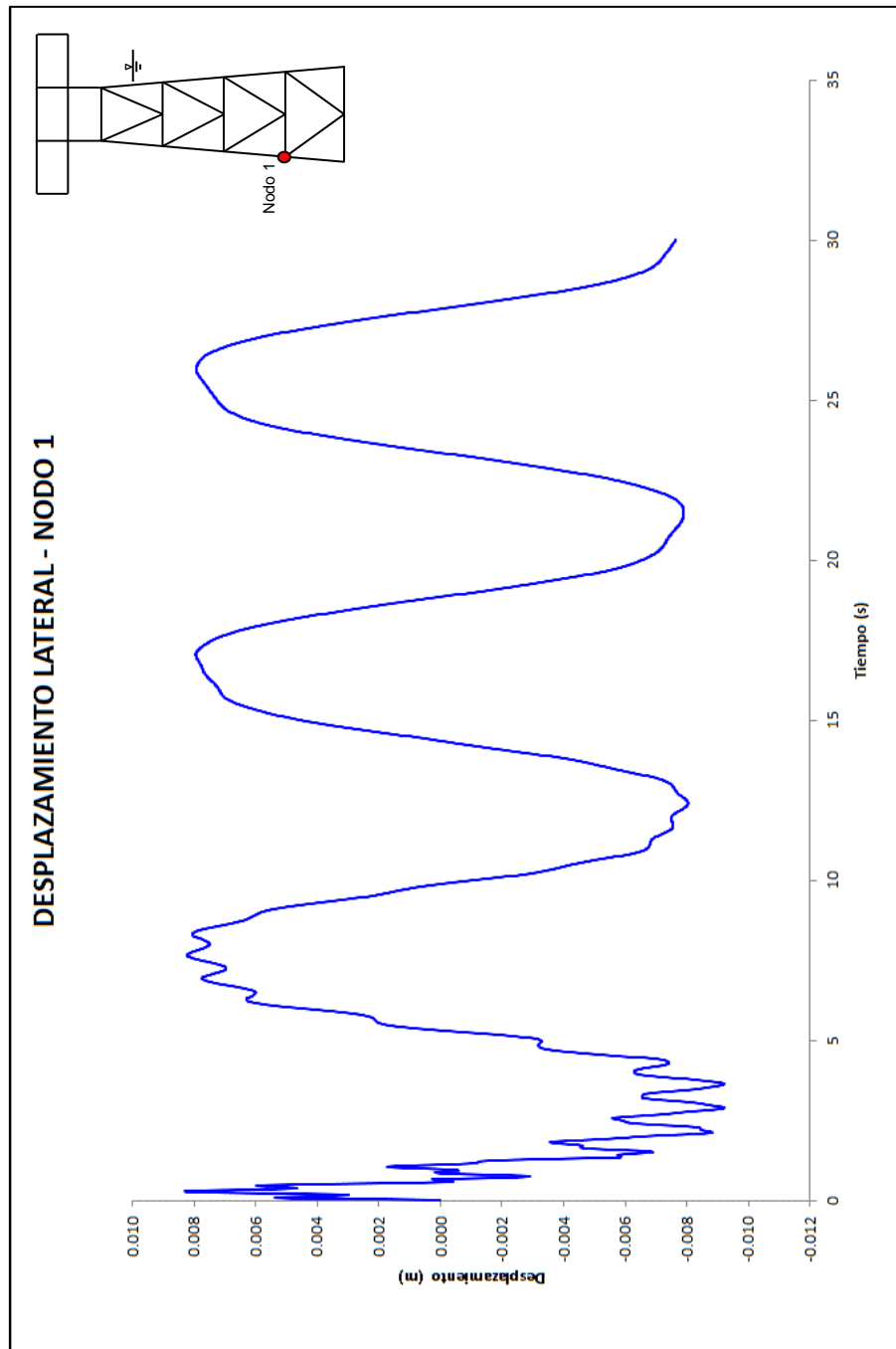


Figura N° 3.16: Desplazamiento del nodo 4 en la plataforma J2. El punto se encuentra sumergido.

### 3.4.4 Fuerzas

#### 3.4.4.1 Fuerza axial

En la Figura N°3.17 se muestra la variación en el tiempo de la fuerza axial sobre el elemento 1.

Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

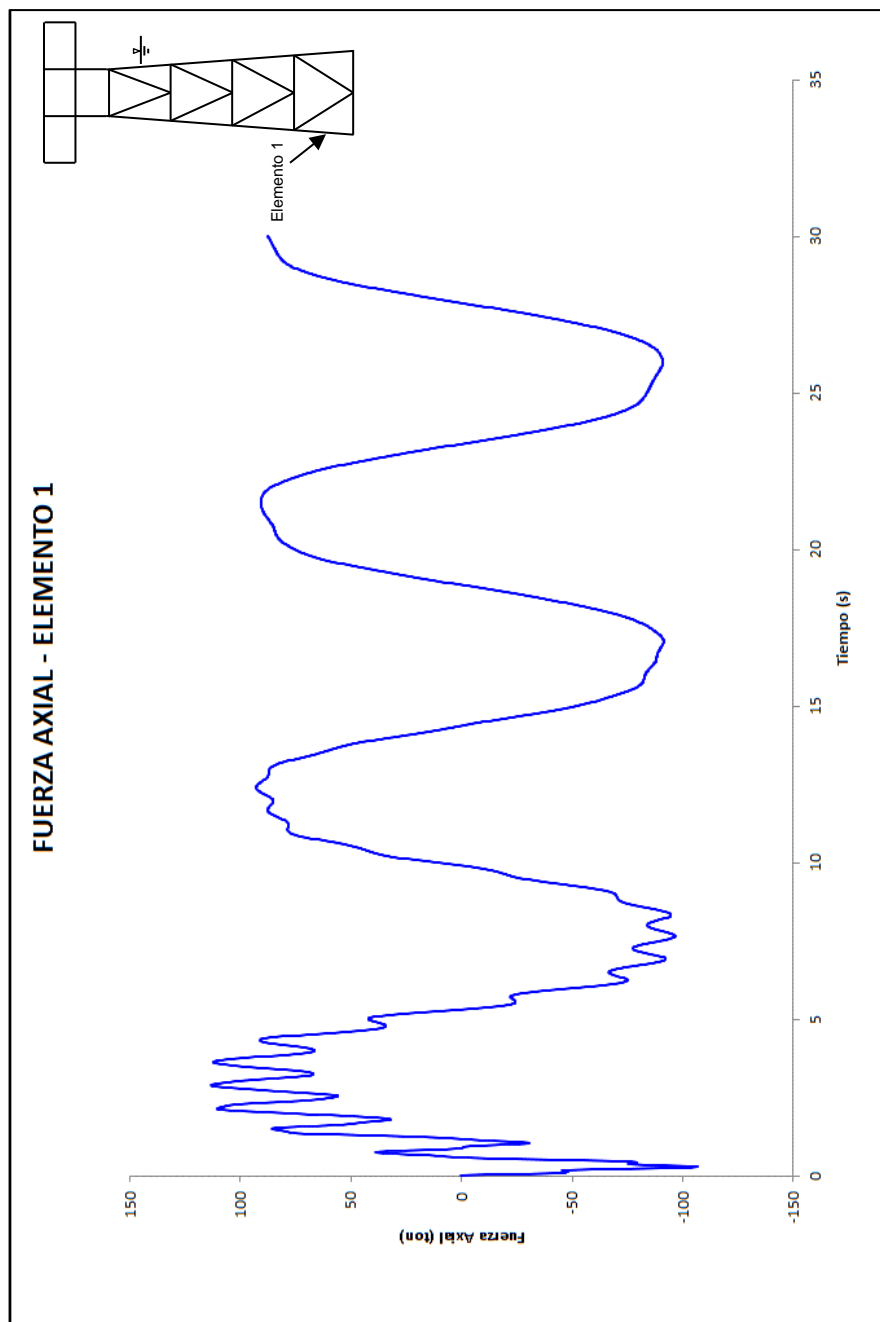


Figura N° 3.17: Fuerza axial en el elemento 1 de la plataforma J2. El punto se encuentra sumergido.

### 3.4.4.2 Momento Flector

En la Figura N°3.18 se muestra la variación en el tiempo del momento flector sobre el elemento 1.

#### Características de la ola:

Amplitud de la ola  $A_w$ : 3m.

Período de la ola  $T_w$ : 9s.

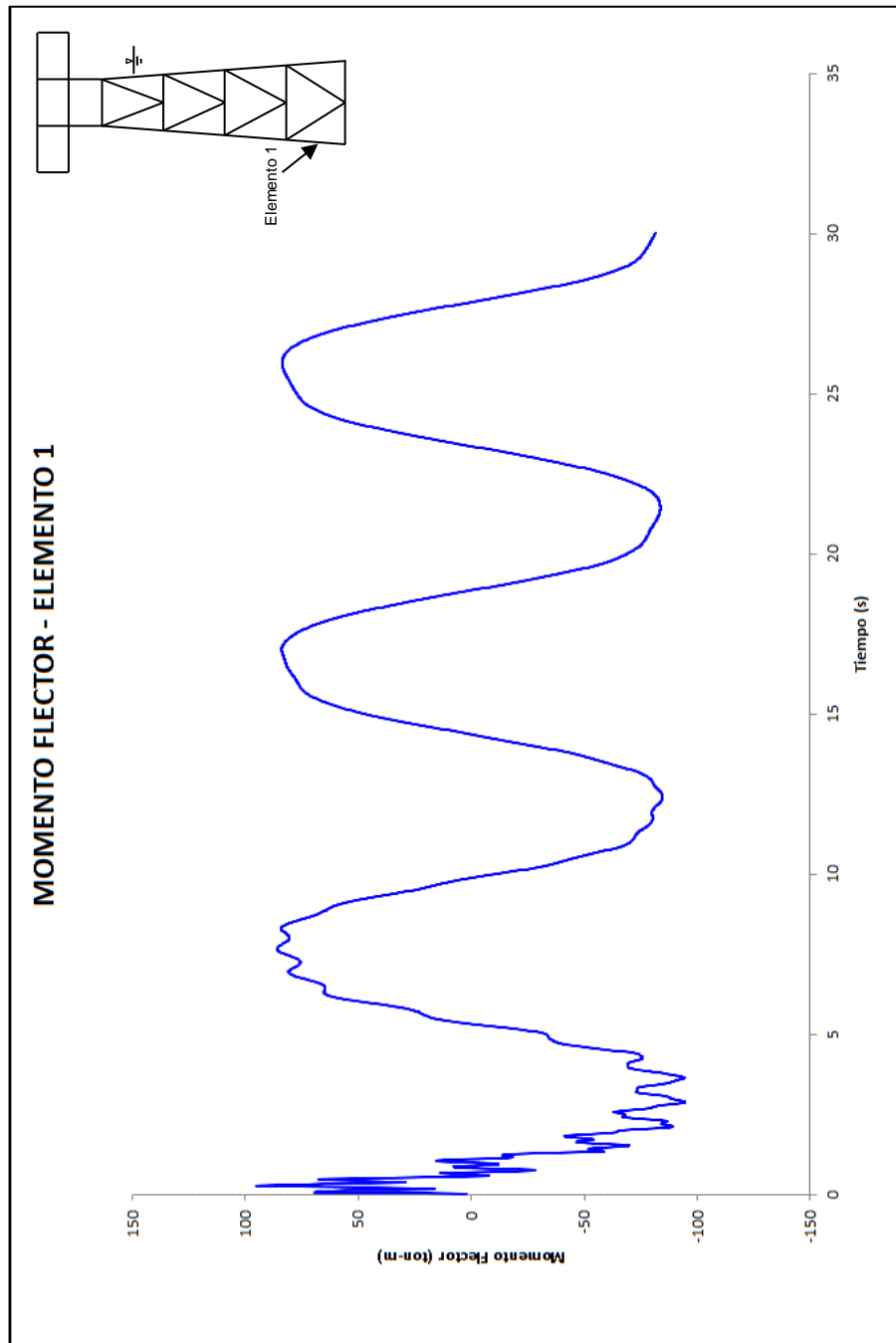


Figura N° 3.18: Momento en el elemento 1 de la plataforma J2. El punto se encuentra sumergido.

## CAPÍTULO IV

### MODELO ESTRUCTURAL PARAMÉTRICO

#### 4.1 PARAMETRIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura se parametriza considerando los factores que ejercen una influencia en las respuestas de las estructuras cuando están sometidas a las cargas de oleaje.

Se pueden identificar una serie de parámetros que influyen en el comportamiento de la estructura. Estos parámetros son agrupados aquí en parámetros geométricos, dinámicos y de sitio.

Es necesario mencionar que existe una variedad de parámetros que podrían ser considerados; sin embargo, aquí se tratan aquellos que tienen una gran influencia en el cálculo de las respuestas.

##### 4.1.1 Parámetros geométricos

Los parámetros están directamente relacionados a la geometría y a las dimensiones de la estructura. Los parámetros que se estudian se muestran en la Figura N°4.1 y son los siguientes: la relación  $h/H$  que representa la porción de la estructura que está sumergida debajo de la superficie de agua, la relación entre diámetros de los elementos principales y secundarios que componen la estructura  $\phi_P/\phi_S$ , el tipo de arriostamiento (K ó X) y el número de divisiones o cuerpos en la cual se encuentra dividido el armazón de acero.

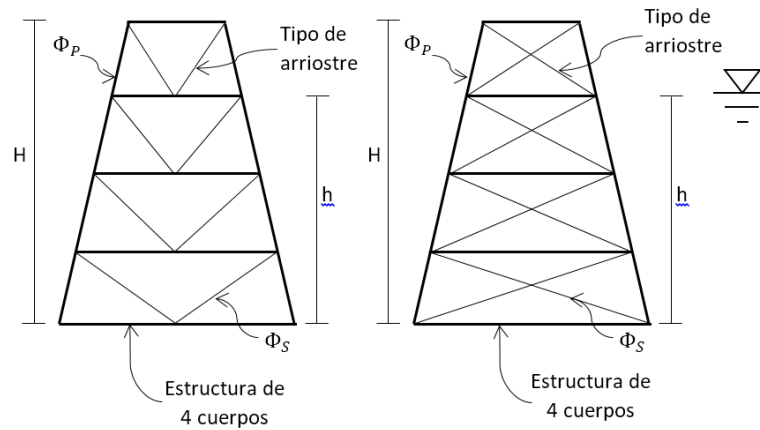


Figura N°4.1: Parámetros geométricos sobre una plataforma marina.

#### 4.1.1.1 Razón $h/H$

La razón  $h/H$  es un parámetro geométrico que indica la porción de la estructura que se encuentra sumergida bajo el agua. Esta porción de la estructura que se encuentra bajo el agua es la que interactúa con el fluido y sobre la cual se va a ejercer la fuerza producida por el oleaje.

De los modelos empleados aquí se puede extraer la siguiente información:

Cuadro N°4.1: Razón  $h/H$  de los modelos en estudio. (Elaboración propia).

Modelo	$h$ (m)	$H$ (m)	$h/H$
J-1	31.70	44.20	0.72
J-2	35.00	51.00	0.68
J-3	97.40	123.00	0.80
J-4	198.00	220.00	0.90
J-5	66.80	72.80	0.92

En el Cuadro 4.1 se observa que la razón  $h/H$  tiene un valor mínimo de 0.68 y un valor máximo de 0.92. Para el análisis paramétrico se cubre el rango de valores para  $h/H$  de 0.65 a 0.95 con incrementos de 0.1, es decir se emplean razones  $h/H$  iguales a 0.65, 0.75, 0.85 y 0.95.

#### 4.1.1.2 Razón $\phi_P/\phi_S$

La razón entre los diámetros de los elementos de soporte (elementos principales) y los elementos de arriostre  $\phi_P/\phi_S$  tiene una influencia debido a que ambos definen la rigidez lateral de la plataforma.

De acuerdo a los modelos estudiados aquí, se obtienen las siguientes razones de  $\phi_P/\phi_S$ .

Cuadro N°4.2: Razón de diámetros  $\phi_P/\phi_S$  en los modelos en estudio. (Elaboración propia).

Modelo	$\phi_P$ (mm)	$\phi_S$ (mm)	$\phi_P/\phi_S$
J-1	865	355	2.44
J-2	850	600	1.42
J-3	1575	915	1.72
J-4	1500	1250	1.20
J-5	1656	700	2.37

La razón  $\phi_P/\phi_S$  varía desde un valor mínimo de 1.20 hasta un valor máximo de 2.44. En este estudio se analiza esta razón en un rango de 1.00 a 2.50 con variación de 0.5, es decir una razón  $\phi_P/\phi_S$  de 1.00, 1.50, 2.00 y 2.50.

#### 4.1.1.3 Tipo de arriostre

El arriostramiento permite que la estructura presente una mayor rigidez al desplazamiento lateral. El aporte del arriostramiento a la rigidez depende del tipo, es decir de la configuración de los elementos de arriostre.

Cuadro N°4.3: Tipo de arriostre de los modelos en análisis. (Elaboración propia).

<b>Modelo</b>	<b>Tipo de arriostre</b>
J-1	K
J-2	K
J-3	K
J-4	X
J-5	X

En los modelos en estudio se presentan 2 tipologías de arriostramiento, el primero es el tipo K y el segundo es el tipo X.

#### 4.1.1.4 Numero de Cuerpos

De los modelos observados se ha notado el siguiente número de cuerpos en los diferentes armazones de las plataformas marinas.

Cuadro N°4.4: División de los armazones bidimensionales. (Elaboración propia).

<b>Modelo</b>	<b>Cuerpos</b>
J-1	5
J-2	6
J-3	6
J-4	10
J-5	4

Es necesario señalar que el número de cuerpos que predomina en la parte sumergida es de 4, por lo que esta cantidad es considerada para elaborar el modelo paramétrico simplificado.



De otro lado, el número de cuerpos totales que predominan en las plataformas es de 6, por lo que en el modelo parametrizado se tomará en cuenta esta cantidad para su formulación. De lo anterior se puede concluir que se emplearán 6 cuerpos encontrándose 4 de ellas sumergidas y los 2 restantes sobre la superficie de agua.

#### 4.1.2 Parámetros dinámicos.

Los parámetros dinámicos están referidos a aquellos que definen al fluido que rodea a la estructura. Ellos son la amplitud de la ola  $A_w$  y el periodo de la ola  $T_w$ .

Cuadro N°4.5: Amplitud y Periodo de diseño de ola. (Elaboración propia).

Modelo	$A_w$ (m)	$T_w$ (s)
J-1	3.65	6.92
J-2	3.00	9
J-3	6.00	9.20
J-4	14.86	21.66
J-5	10.00	12.15

#### 4.1.3 Parámetros de sitio $N_0$ .

Debido a que la fijación de la estructura no es un empotramiento perfecto debe considerarse la flexibilidad del suelo. Como se mencionó anteriormente el valor de  $N_0$  es un valor que caracteriza al suelo (Wilson, 2003) y por medio del cual se puede hallar una longitud equivalente que permita considerar un empotramiento perfecto.

En este estudio se considera distintos valores de  $N_0$  tales como 140 ton/m<sup>3</sup> (4 ton/pie<sup>3</sup>), 494 ton/m<sup>3</sup> (14 ton/pie<sup>3</sup>), 848 ton/m<sup>3</sup> (24 ton/pie<sup>3</sup>), 1200 ton/m<sup>3</sup> (34 ton/pie<sup>3</sup>). Esto permitirá estudiar la influencia de este parámetro en el comportamiento estructural de la plataforma. Es importante señalar que los valores encontrados en la bibliografía se encuentran en unidades de ton/pie<sup>3</sup>; sin embargo, aquí se realiza una conversión a unidades conocidas y usuales como ton/m<sup>3</sup>.

## 4.2 GEOMETRÍA DEL MODELO PARAMÉTRICO.

Los parámetros definidos anteriormente no definen completamente a la estructura por si solos; por tal razón es necesario realizar algunas correlaciones que permitan relacionar los parámetros considerados con otras características (por ejemplo, la altura total, la inclinación de los elementos de la plataforma, los anchos de las bases superior e inferior, etc.).

### 4.2.1 Correlación Altura total (H) vs h/H.

Mediante esta correlación se obtiene una relación entre la altura y la razón h/H. El objetivo de este procedimiento es evitar el análisis de modelos con alturas totales y con razones h/H irreales o con poca probabilidad de ocurrencia. Considérese el caso de una plataforma con una altura de 100 metros y una razón h/H de 0.65; esto significa que hay 65 metros debajo de la superficie de agua y 35 metros sobre ella. Esto no tiene mucho sentido ya que es muy poco probable una estructura con esa altura fuera del agua y muy poco probable una ola de 35 metros.

A continuación, se muestra el cuadro N°4.6 con información de la altura total de la estructura y la razón h/H correspondiente a la porción sumergida de la estructura para los modelos empleados en este trabajo (Ver anexo A).

Cuadro N°4.6: Correlación h/H - H. (Elaboración propia).

<b>Estructura</b>	<b>H (m)</b>	<b>h/H</b>	<b>Ec. lineal</b>	<b>Error%</b>
J-1	44.20	0.72	64.27	45.40
J-2	51.00	0.68	31.34	38.55
J-3	123.00	0.80	130.13	5.80
J-4	220.00	0.90	212.46	3.43
J-5	72.80	0.92	228.93	Dato atípico

En la figura N° 4.2, el punto rojo muestra un dato atípico que puede ser eliminado, dado que se espera valores h/H altos para grandes alturas y valores h/H bajos para pequeñas alturas.

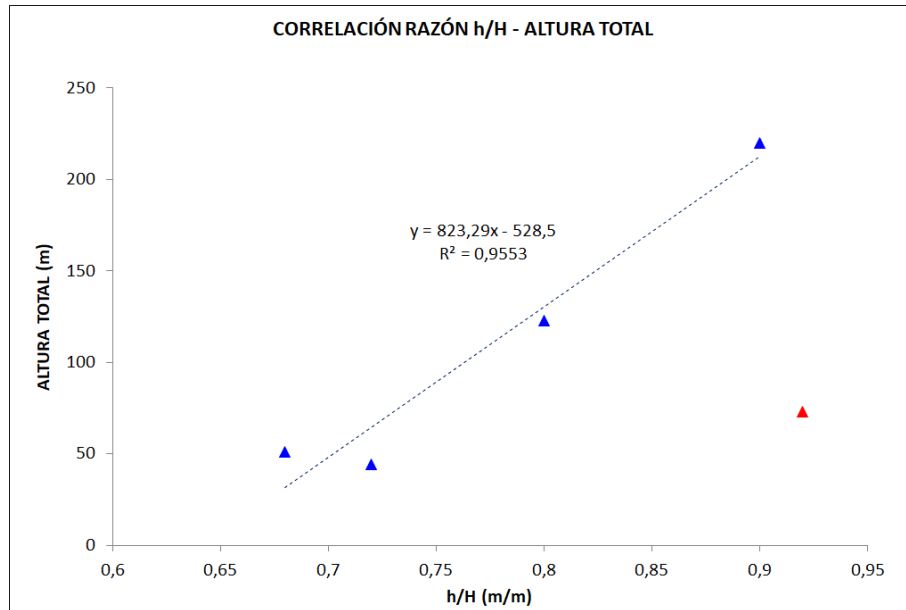


Figura N° 4.2: Correlación h/H - H.

#### 4.2.2 Correlación Altura total (H) vs Ancho de base inferior (B).

A través de esta correlación se pretende establecer el ancho de la base inferior teniendo en cuenta la altura total de la estructura.

Cuadro N°4.7: Correlación H – B. (Elaboración propia).

Estructura	H (m)	B (m)	Ec. Lineal	Error%	Ec. Cuad.	Error%
J-1	44.20	15.56	17.19	10.46	15.83	1.76
J-2	51.00	18.00	19.28	7.10	18.55	3.08
J-3	123.00	43.50	41.41	-4.80	44.53	2.36
J-4	220.00	70.00	71.23	1.75	71.32	1.88
J-5	72.80	28.00	25.98	-7.22	26.97	-3.70

El Cuadro N°4.7 muestra que la correlación a través de la ecuación cuadrática de la Figura N°4.3 ofrece un mejor ajuste y menores errores en comparación con los resultados obtenidos con la ecuación lineal. Es por ello que se emplea la ecuación cuadrática para correlacionar los valores de H y B con la finalidad de definir los modelos estructurales paramétricos.

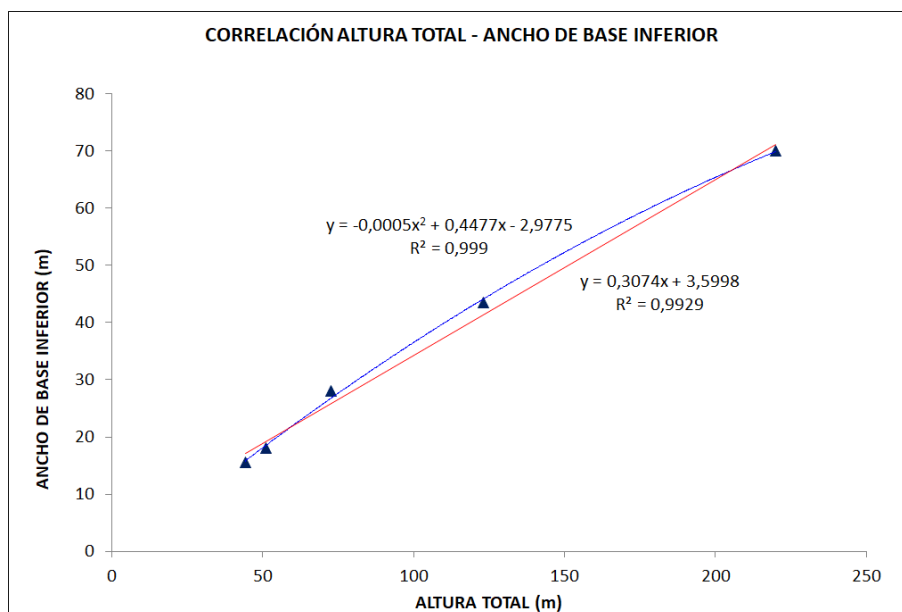


Figura N° 4.3: Correlación H – B. La Ec. Cuadrática muestra un mejor ajuste.

#### 4.2.3 Correlación Altura total (H) vs Ángulo de inclinación ( $\beta$ ).

A través de esta correlación se busca establecer una relación entre la altura total y la pendiente de los elementos de apoyo de la estructura.

Cuadro N°4.8: Correlación H –  $\beta$ . (Elaboración propia).

Estructura	H (m)	Pendiente	$\beta$ (°)	Ec. Cuad.	Error%
J-1	44.20	8.10	82.96	82.51	0.54
J-2	51.00	7.30	82.20	82.87	0.81
J-3	123.00	11.70	85.11	85.51	0.46
J-4	220.00	9.91	84.24	85.79	1.84
J-5	72.80	9.08	83.72	83.89	0.20

El Cuadro N°4.8 muestra que la correlación a través de la ecuación cuadrática de la Figura N°4.4 ofrece un mejor ajuste y menores errores en comparación con los resultados obtenidos con otras curvas o rectas. Es por ello que se emplea la ecuación cuadrática para correlacionar los valores de H y  $\beta$  con la finalidad de definir los modelos estructurales paramétricos.

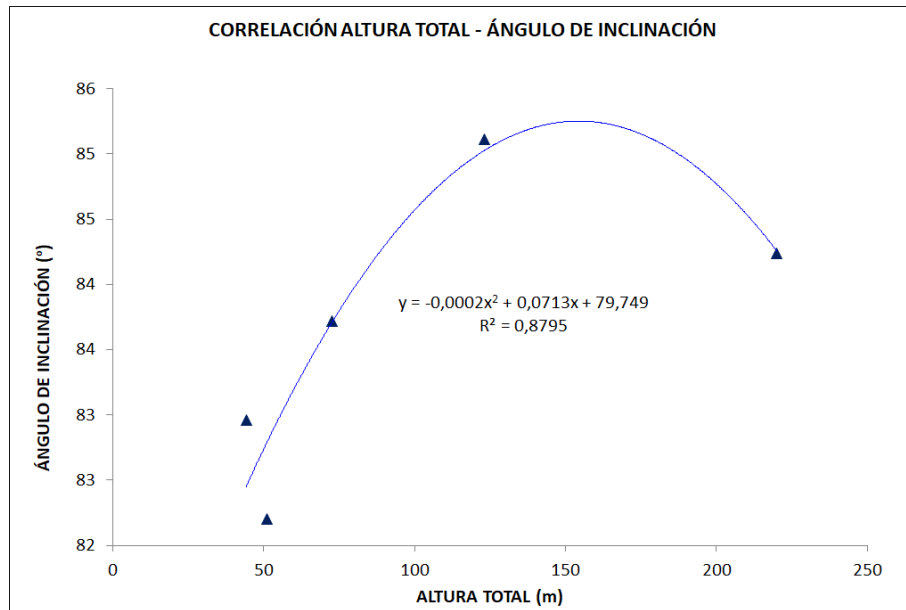


Figura N° 4.4: Correlación H –  $\beta$ .

#### 4.2.4 Correlación Ancho de base superior (bs) vs Peso (P).

Mediante este procedimiento se relaciona el ancho de base superior y el peso sobre la estructura.

El objetivo es trabajar con pesos consecuentes a los pesos empleados en el diseño de estructuras reales. Este procedimiento solo es una aproximación del peso.

A continuación, se muestran los pesos y los anchos de base correspondientes a las estructuras empleadas en este estudio (Ver anexo A).

Cuadro N°4.9: Correlación bs – Peso. (Elaboración propia).

Estructura	bs (m)	Peso	Ec. Cuad.	Error%
J-1	4.70	650.00	650.17	0.03
J-2	7.00	180.00	180.28	0.16
J-3	22.50	2890.00	2889.30	0.02
J-4	30.00	10000.00	9994.60	0.05
J-5	12.00	800.00	800.50	0.06

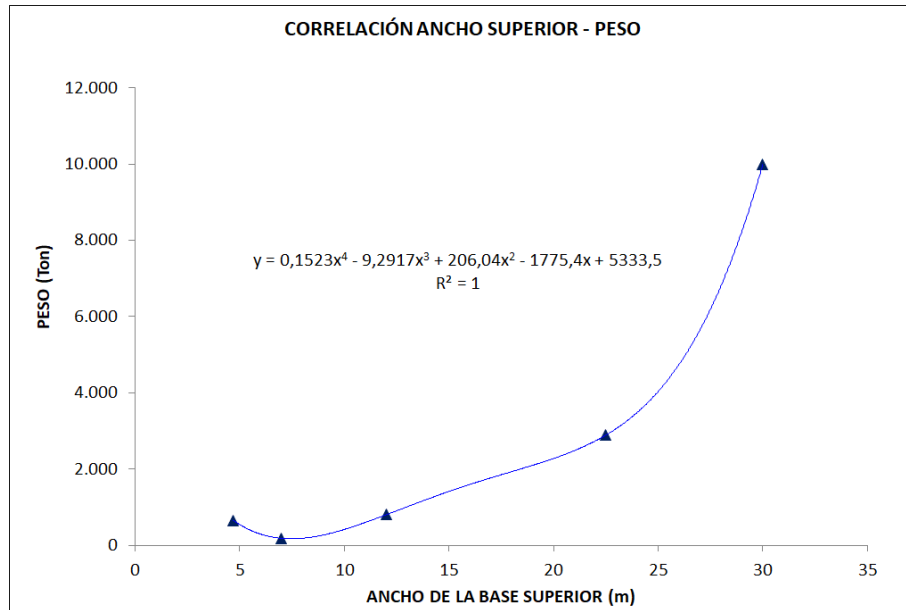


Figura N° 4.5: Correlación bs – P.

#### 4.2.5 Correlación Longitud del elemento (he) – razón (he/D) del elemento principal.

Este procedimiento tiene por objetivo relacionar el diámetro de los elementos principales con su longitud. De esta manera se trabaja con diámetros razonables y acordes a los empleados en el diseño de estructuras reales.

A continuación, se muestran los diámetros de los elementos principales y la razón he/D del elemento principal para cada estructura en estudio (ver anexo A).

Cuadro N°4.10: Correlación he – he/D. (Elaboración propia).

<b>Estructura</b>	<b>D (mm)</b>	<b>espesor</b>	<b>he (m)</b>	<b>He/D</b>	<b>Ln (he/D)</b>
J-1	865.00	9.50	9.15	10.58	2.36
J-2	850.00	25.00	10.00	11.76	2.47
J-3	1575.00	12.70	29.25	18.47	2.92
J-4	1500.00	200.00	22.00	14.67	2.69
J-5	1656.00	20.00	17.30	10.45	2.35

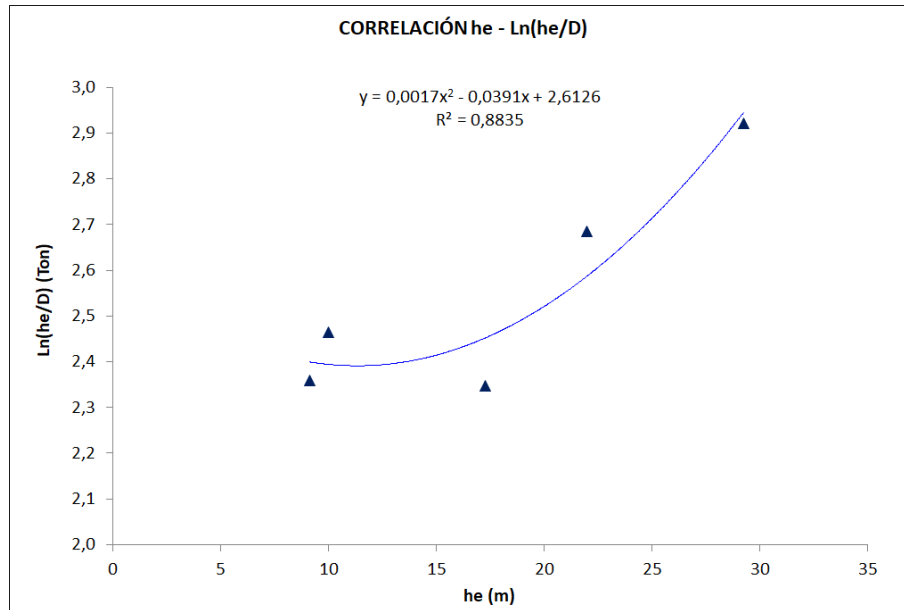


Figura N° 4.6: Correlación  $he - he/D$ .

#### 4.2.6 Correlación de espesores.

Mediante este procedimiento se relacionan los espesores entre los elementos principales y secundarios.

El objetivo es emplear espesores razonables que sean parecidos o similares a los que usualmente son empleados en el diseño de las plataformas marinas.

A continuación, se enlistan los datos de las estructuras empleadas en este estudio (Ver anexo A).

Cuadro N°4.11: Correlación  $ep - es$ . (Elaboración propia).

Estructura	ep (mm)	es (mm)
J-1	9.50	9.50
J-2	25.00	12.50
J-3	12.70	9.50
J-4	200.00	150.00
J-5	20.00	25.00

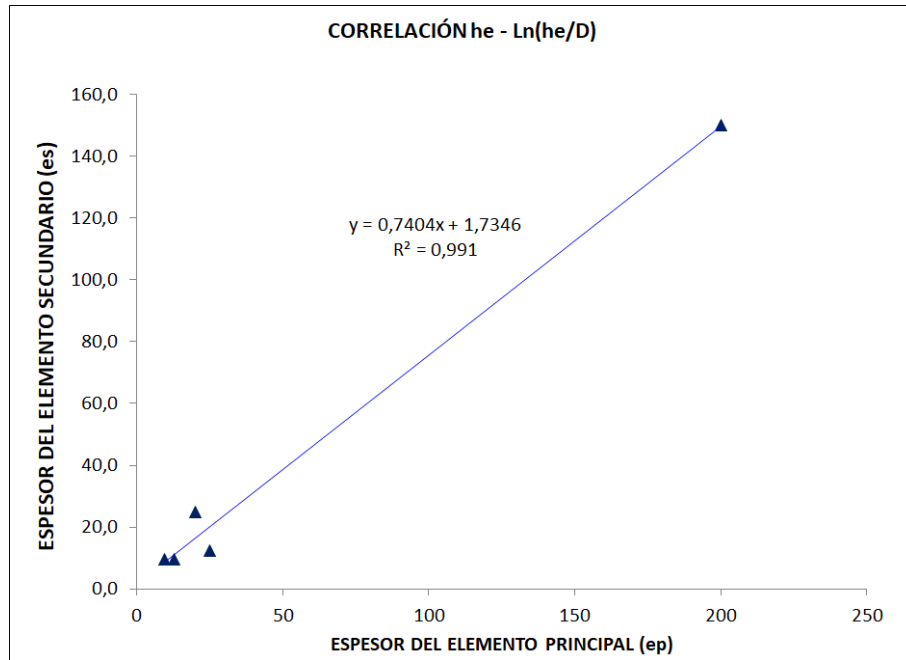


Figura N° 4.7: Correlación ep – es.

#### 4.3 ASPECTOS DINÁMICOS DEL MODELO ESTRUCTURAL PARAMETRIZADO.

El modelo estructural parametrizado se construye a partir de los parámetros empleados. Las estructuras inicialmente analizadas como armazones, ahora se analizan como un conjunto de elementos discretos tipo viga con masas concentradas en sus extremos fijada al fondo marino.

La figura N°4.8 muestra al modelo estructural paramétrico con los elementos tipo barra y con las masas concentradas en los extremos de los elementos.

Este modelo simplificado permite analizar la estructura de una manera más sencilla al reducir los elementos y los GDL de la estructura a considerar. Así se reducen las ecuaciones a considerar y por ende se reduce el tiempo computacional para obtener las respuestas de las estructuras.



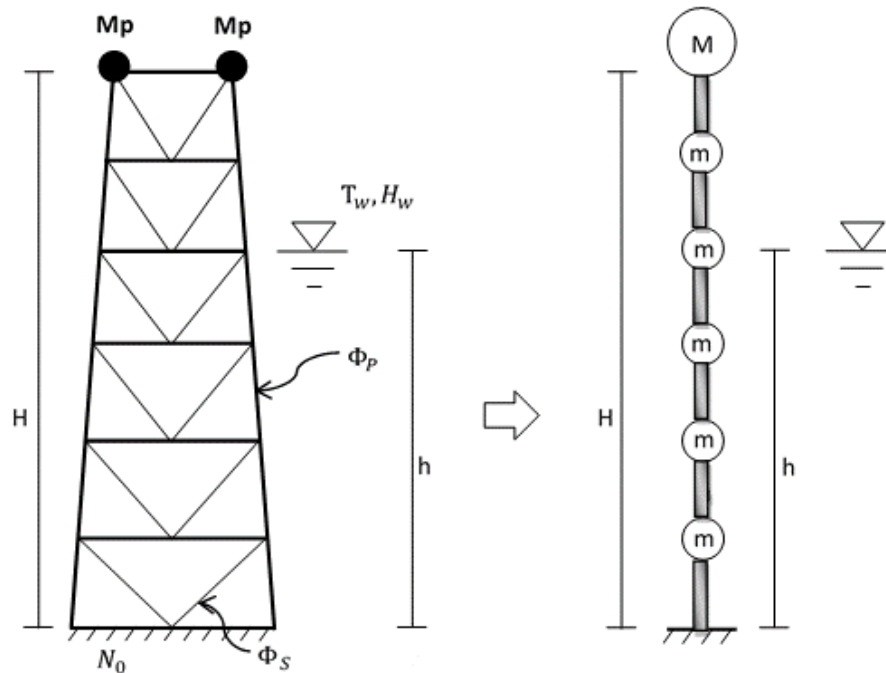


Figura N°4.8: Modelo simplificado con elementos discretos tipo barra.

#### 4.3.1 Discretización de la estructura

El elemento discreto es una barra con 2 GDL en cada extremo. Las propiedades de esta barra se obtienen partiendo del análisis de un cuerpo; de ella se extrae la rigidez equivalente a flexión y corte para el ensamble de la matriz de rigidez de los elementos barra.

Para ello es necesario obtener la rigidez a flexión equivalente y la rigidez a corte equivalente para cada uno de los tipos de arriostres que se emplean en las estructuras. En este trabajo se emplean los arrostramientos tipo K y X.

A continuación, se muestran las ecuaciones para obtener la rigidez a la flexión equivalente y la rigidez al corte equivalente para cada tipo de arriostre.

##### Arriostre tipo K

El siguiente segmento puede ser analizado como una barra, siendo necesario para esto encontrar las rigideces a la flexión y corte equivalentes.

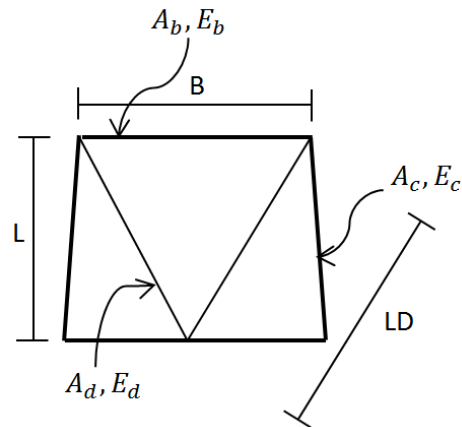


Figura N°4.9: Arriostre tipo K.

Para la configuración anterior las rigideces equivalentes son:

$$EI_{eq} = \frac{B^2 \cdot A_c \cdot E_c}{2} \quad (4.1)$$

$$GA_{seq} = \frac{2 \cdot L \cdot B^2 \cdot A_d \cdot E_d}{(L \cdot D)^3} \quad (4.2)$$

### Arriostre tipo X

Para la configuración tipo X también es posible encontrar una rigidez equivalente tanto para la flexión como para el corte.

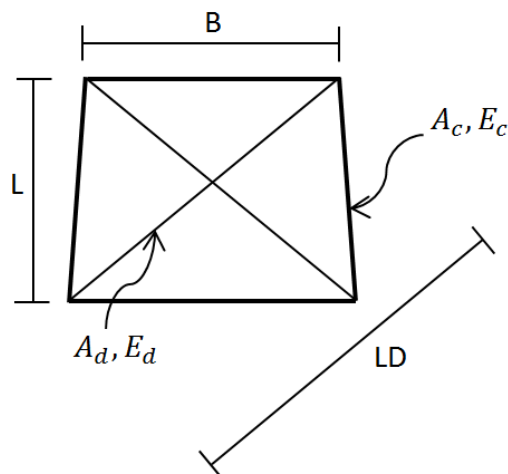


Figura N°4.10: Arriostre tipo X.

Para esta configuración las rigideces se pueden calcular mediante:

$$EI_{eq} = \frac{B^2 \cdot A_c \cdot E_c}{2} \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{GA_{seq}} = \frac{L^2}{2 \cdot B^2 \cdot A_c \cdot E_c} + \frac{B}{4 \cdot L \cdot B^2 \cdot A_b \cdot E_b} + \frac{2 \cdot L^3}{L \cdot B^2 \cdot A_d \cdot E_d} \quad (4.4)$$

#### 4.3.2 Rigidez

Los elementos discretos que se emplean en este modelo son elementos tipo barra. Estos elementos tipo barra poseen dos GDL y masa concentrada en cada extremo.

Las rigideces de los elementos discretos tipo barra se calculan de acuerdo a la siguiente matriz teniendo en cuenta la rigidez a la flexión equivalente según el tipo arriostre en estudio:

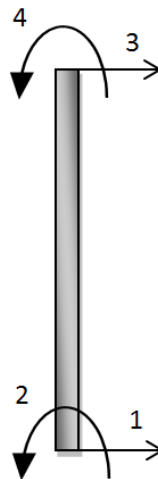


Figura N°4.11: Elemento tipo Barra.

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{(1+\varphi)L^3} & -\frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} & -\frac{12EI}{(1+\varphi)L^3} & -\frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} \\ -\frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} & \frac{(4-\varphi)EI}{(1+\varphi)L} & \frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} & \frac{(2-\varphi)EI}{(1+\varphi)L} \\ -\frac{12EI}{(1+\varphi)L^3} & \frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} & \frac{12EI}{(1+\varphi)L^3} & \frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} \\ -\frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} & \frac{(2-\varphi)EI}{(1+\varphi)L} & \frac{6EI}{(1+\varphi)L^2} & \frac{(4-\varphi)EI}{(1+\varphi)L} \end{bmatrix}$$

Figura N°4.12: Matriz de rigidez para un elemento tipo barra con 4gdl.

Donde  $\varphi$  es:

$$\varphi = \frac{EI_{eq}}{L^2 GA_s} \quad (4.5)$$

Es necesario mencionar que se considera el efecto de corte en el cálculo de la rigidez; aunque es posible omitir este efecto, aquí no se realiza esta omisión debido a que no se ha cuantificado en qué porcentaje afecta a la respuesta final.

#### 4.3.3 Amortiguamiento

El amortiguamiento a partir del método de Rayleigh, descrito en 3.3.4.2, que establece que la matriz de amortiguamiento  $C$  es la suma de:

$$C_e = a \cdot M_e + b \cdot K_e \quad (4.6)$$

Donde  $a$ ,  $b$  son dos coeficientes reales (Ver 3.3.4.2).

#### 4.3.4 Masa

Para el análisis dinámico, la masa incluye la masa de la estructura en sí, la masa de los equipos y una masa adicional que es la masa de agua asociada a los elementos por la interacción flujo-estructura (ITEA,1998) tal como se indicó en el ítem 3.3.4.3.

La masa se considera concentrada en los extremos de la barra.

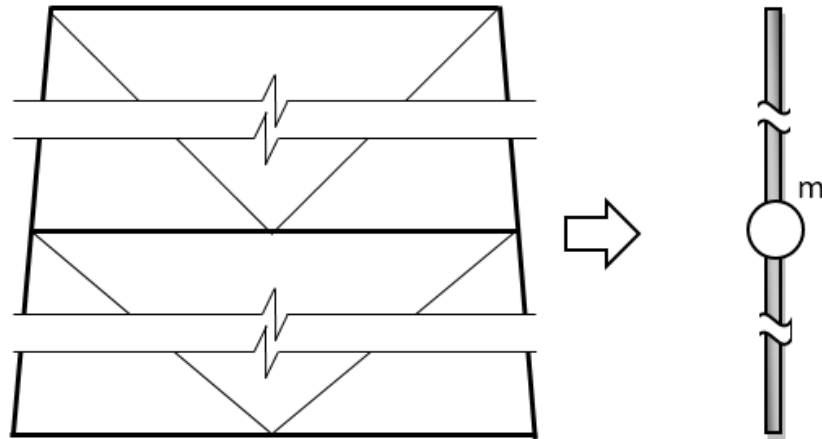


Figura N°4.13: Masa concentrada del modelo paramétrico.

#### 4.3.5 Fuerzas de oleaje.

La fuerza de oleaje se obtiene a partir de la configuración geométrica. La fuerza sobre la masa concentrada se obtiene de la suma de las fuerzas que ejerce el fluido sobre cada uno de los elementos.

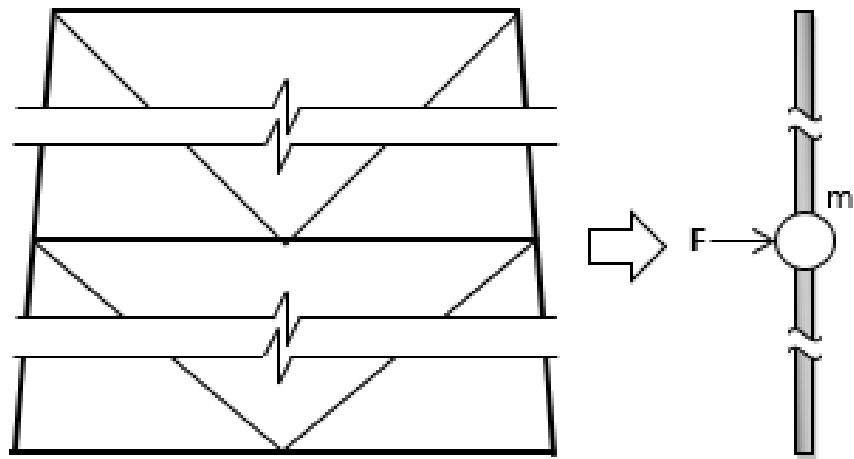


Figura N°4.14: Fuerza resultante sobre la masa en el modelo paramétrico.

La ecuación de Morison continúa siendo válida, y su aplicación es necesaria para la obtención de la fuerza hidrodinámica sobre los elementos.

#### 4.3.6 Fijación al fondo marino.

En este modelo se emplea un modelo en el cual se supone que la estructura está fija al fondo. Esta suposición permite simplificar en gran manera el análisis. Es una suposición necesaria a fin de obtener un modelo simplificado que sea de ayuda.

## CAPÍTULO V

## ANÁLISIS DE LOS MODELOS POR FUERZA DE OLEAJE

## 5.1 MODELOS PARAMETRIZADOS

El número de modelos parametrizados se obtiene a través de la combinación de todos los valores que puede adoptar cada uno de los parámetros en estudio.

Cuadro N°5.1: Parámetros y sus posibles valores (Elaboración Propia).

PARÁMETROS						
MODELOS	GEOMÉTRICOS			DINÁMICOS		SITIO
	h/H	$\phi_p/\phi_s$	Arriostre	Aw	Tw	$N_o$
	0.65	1.00	TIPO K	3	6	4
	0.75	1.50	TIPO X	7	11	14
	0.85	2.00		11	16	24
0.95	2.50		15	21	34	

El número total de modelos son 2048 modelos parametrizados.

## 5.2 ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LOS MODELOS

La cantidad de modelos totales ha sido obtenida a partir de la combinación de parámetros cuyos valores provienen de estructuras reales; sin embargo, no todos los modelos tienen sentido. Es decir, pueden existir a raíz de la combinación de los parámetros, pero físicamente son imposibles o son muy poco probables.

Por tal motivo se realiza un análisis con el objetivo de identificar que combinaciones producen modelos sin un sentido físico para luego proceder a su eliminación.

## 5.2.1 Análisis cualitativo y cuantitativo de la altura de ola

Dado que se considera una razón h/H (razón profundidad sumergida a altura total), la porción sobre la superficie libre es (1-h/H). Asimismo, la altura de ola es Aw y esta no debe ser mayor a la altura de libre de la estructura.

Dado  $h/H$  y  $Aw$ : 
$$\left(1 - \frac{h}{H}\right)H > Aw \quad (5.1)$$

$$H > \frac{Aw}{\left(1 - \frac{h}{H}\right)} \quad (5.2)$$

Cuadro N°5.2: Alturas totales según  $h/H$  y  $Aw$ . (Elaboración propia).

$h/H \setminus Aw$	3	7	11	15
<b>0.65</b>	8.57	20.00	31.43	42.86
<b>0.75</b>	12.00	28.00	44.00	60.00
<b>0.85</b>	20.00	46.67	73.33	100.00
<b>0.95</b>	60.00	140.00	220.00	300.00

El cuadro anterior indica que para una razón  $h/H$  de 0.95 y un  $Aw$  de 11 o superior se requiere una altura total mayor de 220 m. Puesto que la altura total más alta de los modelos en estudio es 220 m, no sería conveniente realizar una combinación de  $h/H=0.95$  y un  $Aw=11$  o superior.

### 5.2.2 Análisis cualitativo y cuantitativo de la altura libre.

La altura libre es la diferencia de alturas entre la altura de la plataforma y el nivel de agua. Es evidente que el nivel de agua debe estar por debajo de la plataforma para asegurar la operación de la plataforma y reducir riesgos y sensaciones de peligro. Según los modelos de este estudio las estructuras tienen al menos una altura libre igual a un vano.

Dado  $h/H$  y  $Aw$ : 
$$\frac{1}{2}\left(1 - \frac{h}{H}\right)H > Aw \quad (5.3)$$

$$H > \frac{2 \cdot Aw}{\left(1 - \frac{h}{H}\right)} \quad (5.4)$$

Cuadro N°5.3: Alturas totales según  $h/H$ ,  $Aw$  y altura libre. (Elaboración propia).

$h/H \setminus Aw$	3	7	11	15
<b>0.65</b>	17.14	40.00	62.86	85.71
<b>0.75</b>	24.00	56.00	88.00	120.00
<b>0.85</b>	40.00	93.33	146.67	200.00
<b>0.95</b>	120.00	280.00	440.00	600.00

El cuadro anterior indica que para una razón  $h/H$  de 0.95 y un  $Aw$  de 7 o superior se requiere una altura total mayor de 280 m. Puesto que la altura



total más alta de los modelos en estudio es 220 m, no sería conveniente realizar una combinación de  $h/H=0.95$  y un  $A_w=7$  o superior.

### 5.2.3 Modelos parametrizados disponibles.

El número de modelos disponibles resultante es:

Cuadro N°5.4: Cantidad de modelos parametrizados. (Elaboración propia).

<b>h/H \ # casos</b>	<b>h/H</b>	<b>Tw</b>	<b>Otros parámetros</b>	<b>Subtotales</b>	<b>Total</b>
<b>0.65</b>	1	4	128	512	
<b>0.75</b>	1	4	128	512	
<b>0.85</b>	1	4	128	512	
<b>0.95</b>	1	1	128	128	<b>1664</b>

Del cuadro anterior se obtiene un total de 1664 modelos disponibles para ser analizados.

### 5.3 ANÁLISIS DE LOS MODELOS PARAMÉTRICOS:

Los modelos paramétricos resultantes se analizan considerando los diferentes parámetros que se identificaron previamente como la razón  $h/H$ , la razón de diámetros  $\phi_P/\phi_S$ , el tipo de arriostre, la amplitud de la ola, el periodo de la ola y el parámetro de sitio  $N_0$ .

Se emplea la siguiente nomenclatura general para identificar a los modelos en análisis y los parámetros empleados:

$$h/H - \phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - A_w - Tw - N_0$$

Esta nomenclatura emplea los valores del Cuadro N°5.1. Por ejemplo el código **0.75-2-X-15-11-24** indica que el modelo posee una razón  $h/H=0.75$ , una razón de diámetros  $\phi_P/\phi_S=2$ , se analiza con una ola de altura  $A_w=15\text{m}$ , un periodo de oleaje  $Tw=11\text{s}$  y un parámetro de suelo  $N_0=24\text{ ton/pie}^3$  ( $848\text{ ton/m}^3$ ). Es necesario señalar que cuando el código no tiene un valor para  $N_0$ , por ejemplo **0.75-2-X-15-11**, se asume un suelo rígido y apoyos empotrados

Las respuestas elásticas obtenidas del análisis estructural de los modelos son: el desplazamiento lateral máximo en la parte más elevada de la

estructura, la fuerza axial máxima y el momento flector máximo en el elemento más cargado de la estructura, al que se llamará en adelante el elemento 1.

En el siguiente esquema se muestra la ubicación de las respuestas obtenidas en el análisis.

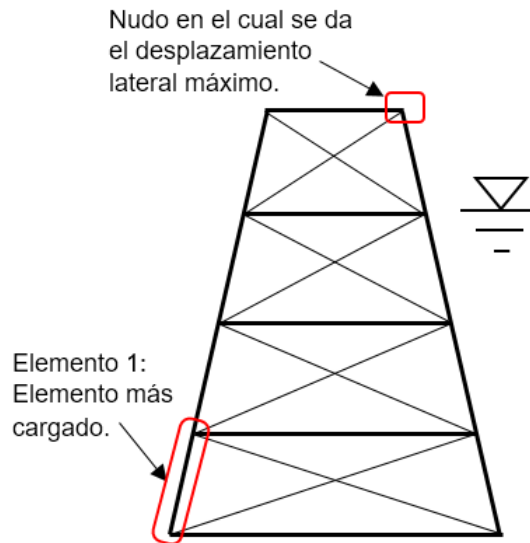


Figura N° 5.1: Esquema de ubicación de las respuestas obtenidas.

A continuación, se mostrará las respuestas de las estructuras según la variación de cada parámetro considerado en el estudio.

### 5.3.1 Modelos paramétricos – parámetro $h/H$ .

En este caso el parámetro  $h/H$  se hace variable de acuerdo a los valores del cuadro N°5.1, manteniendo los demás parámetros constantes o invariables. En la siguiente figura se muestra el desplazamiento lateral máximo en el punto más elevado (ver Figura N°5.1) de la estructura para un oleaje de 30s de duración.

Se emplean 30s debido a que este periodo de tiempo es varias veces el periodo fundamental de vibración de las estructuras que permite obtener respuestas estables en el tiempo.

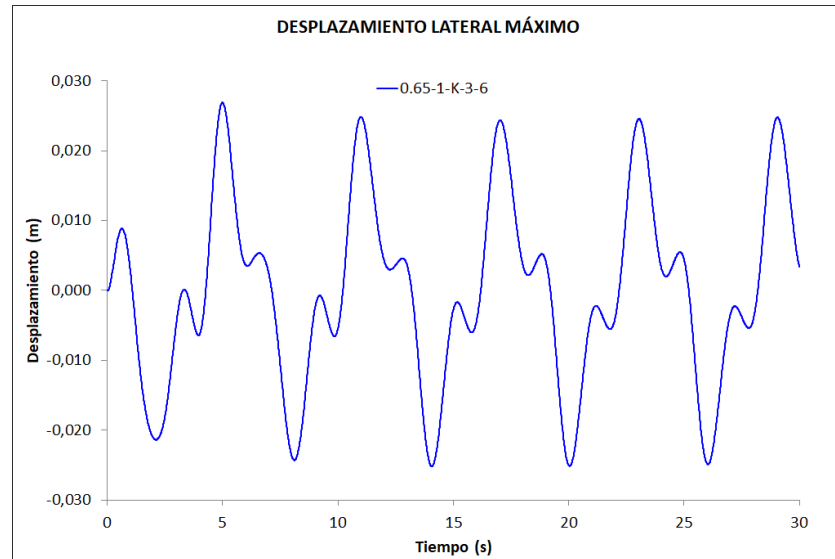


Figura N° 5.2: Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.

En la figura N° 5.3 se muestra la variación del desplazamiento lateral; la figura muestra el incremento del desplazamiento lateral ante un incremento del parámetro  $h/H$ .

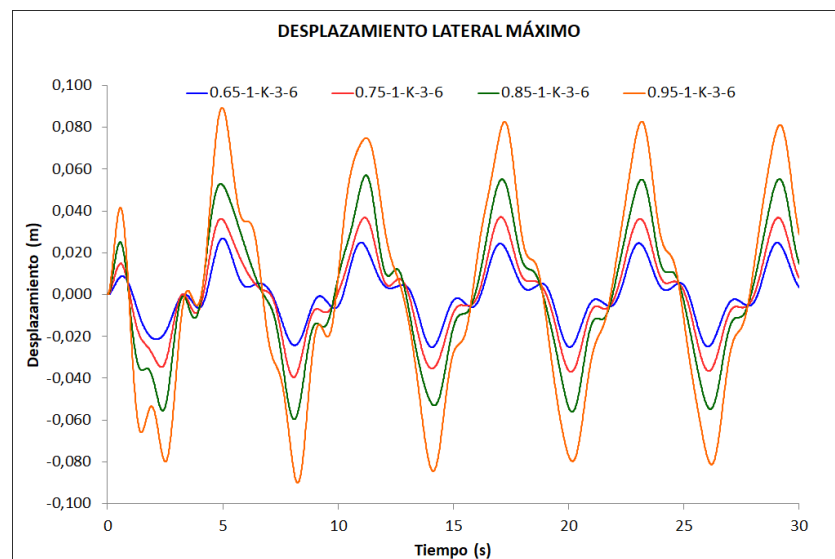


Figura N° 5.3: Desplazamientos laterales para diferentes valores de  $h/H$ .

La figura N° 5.4 muestra la fuerza axial para el elemento 1 (ver Figura N°5.1) el cual corresponde a una pierna de la estructura y su variación en el tiempo.

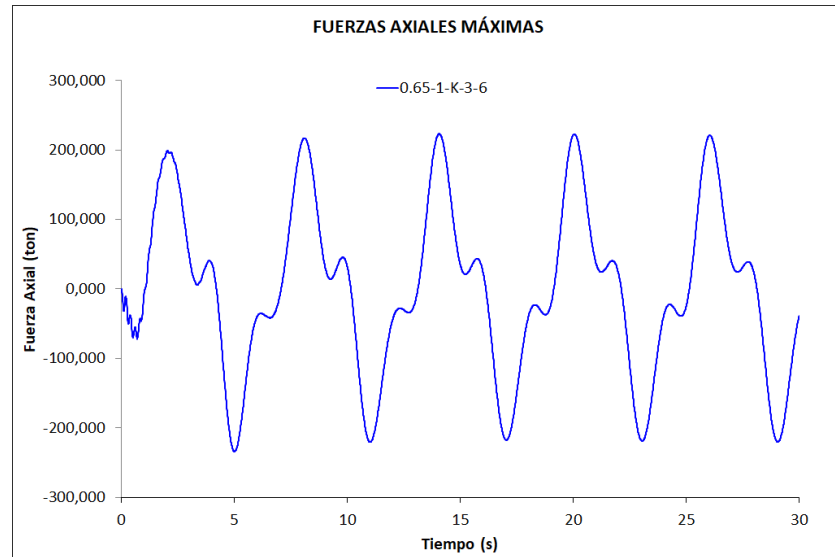


Figura N° 5.4: Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.5 muestra la variación de las fuerzas axiales para diferentes valores de  $h/H$ . Se aprecia que variación de la fuerza axial máxima en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) es directamente proporcional al valor de  $h/H$ .

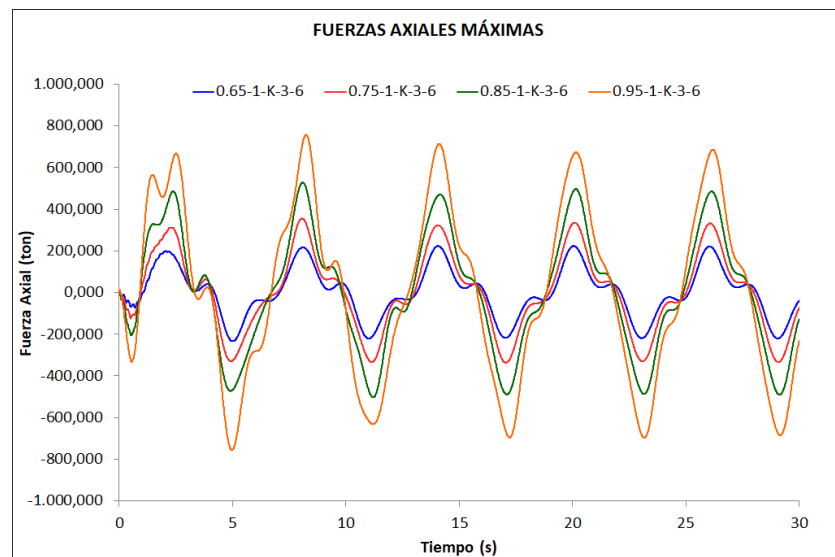


Figura N° 5.5: Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de  $h/H$ .

La figura N° 5.6 muestra los momentos flectores en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) de la estructura para una relación  $h/H=0.65$ . Los momentos máximos se dan en el empotramiento.

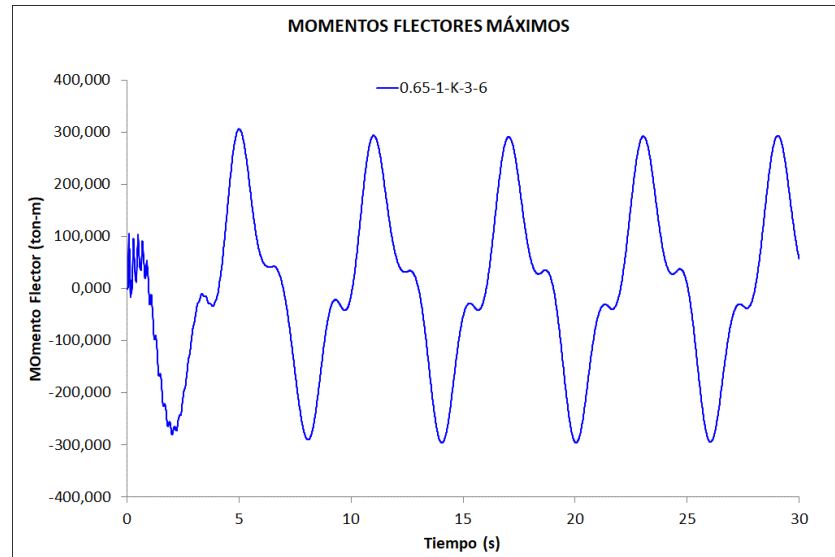


Figura N° 5.6: Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.7 muestra la variación de los momentos para distintos valores de la relación  $h/H$ . Los momentos flectores se incrementan ante un incremento del parámetro  $h/H$ .

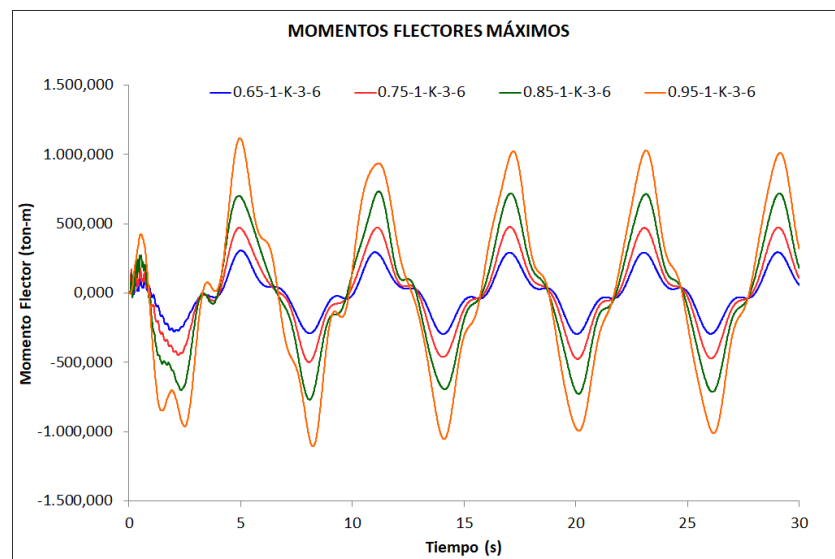


Figura N° 5.7: Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de  $h/H$ .

### 5.3.2 Modelos paramétricos – parámetro $\phi_P/\phi_S$ .

En este caso el parámetro  $\phi_P/\phi_S$  se hace variable, manteniendo los demás parámetros constantes. En la siguiente figura se muestra el desplazamiento lateral del punto más elevado de la estructura (ver Figura N°5.1) para un valor de  $\phi_P/\phi_S=1$ .

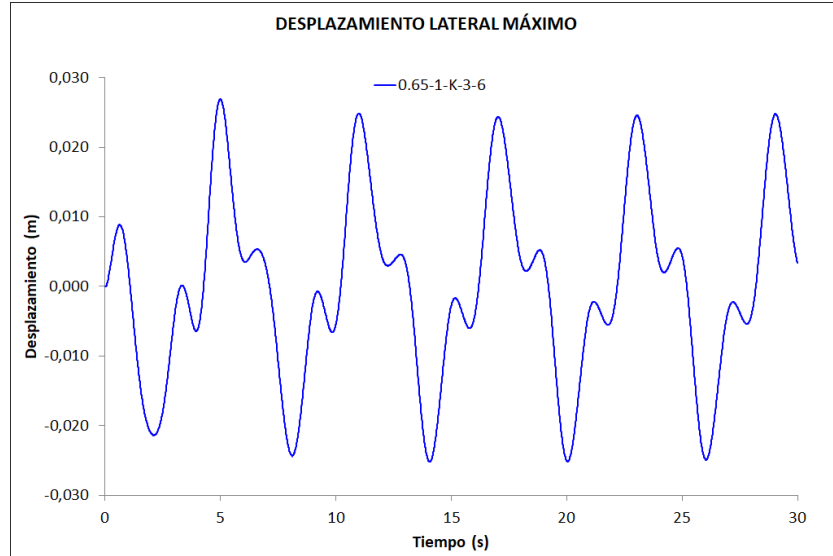


Figura N° 5.8: Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.9 muestra que el desplazamiento lateral no varía ante una variación del parámetro  $\phi_P/\phi_S$ ; es por ello que se obtiene una sola línea al superponer las respuestas obtenidas para diferentes valores de  $\phi_P/\phi_S$ . La incidencia de las propiedades geométricas del elemento principal es suficiente para obtener una buena aproximación en la estimación de las rigideces equivalentes EI y GAs (4.3.1)

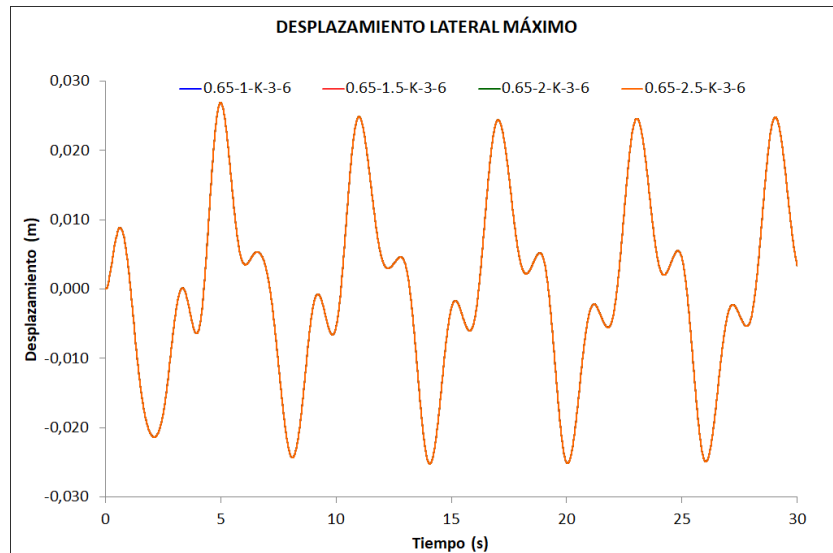


Figura N° 5.9: Desplazamientos laterales para diferentes valores de  $\phi_P/\phi_S$ .

La figura N° 5.10 muestra la fuerza axial y su variación en el tiempo para el elemento 1 (ver Figura N°5.1) considerando un valor de  $\phi_P/\phi_S=1$ .

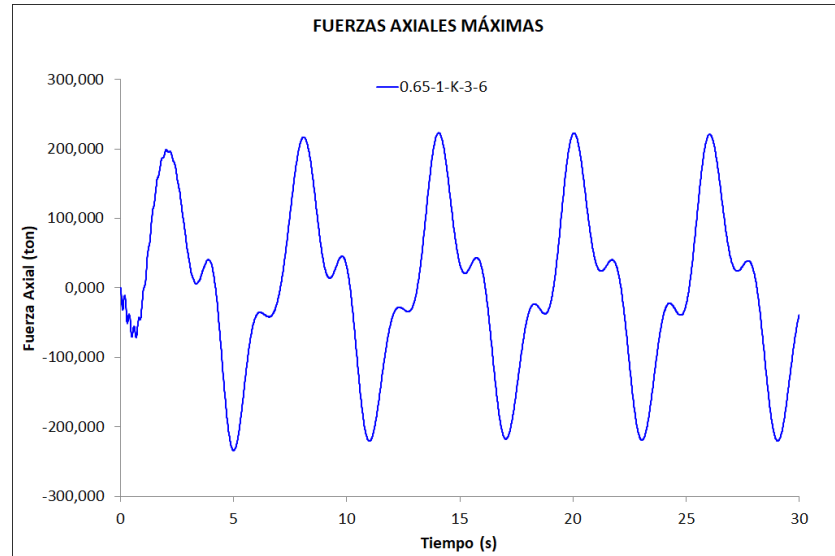


Figura N° 5.10: Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.11 muestra la variación de las fuerzas axiales en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) para diferentes valores de  $\phi_P/\phi_S$ . Se aprecia que no hay variación de las fuerzas axiales como consecuencia de una variación del parámetro  $\phi_P/\phi_S$ .

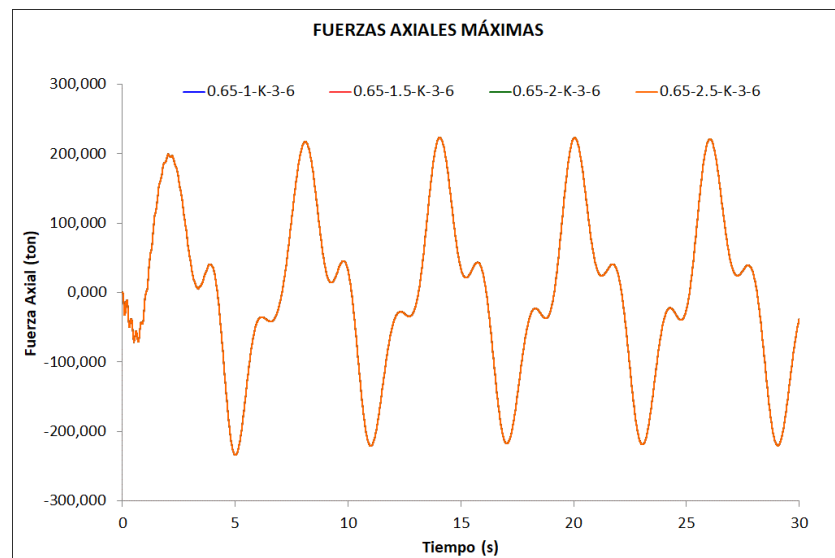


Figura N° 5.11: Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de  $\phi_P/\phi_S$ .

La figura N° 5.12 muestra los momentos flectores en el elemento 1 de la estructura (ver Figura N°5.1) para un valor de  $\phi_P/\phi_S=1$ . Los momentos máximos se dan en el empotramiento del elemento 1.

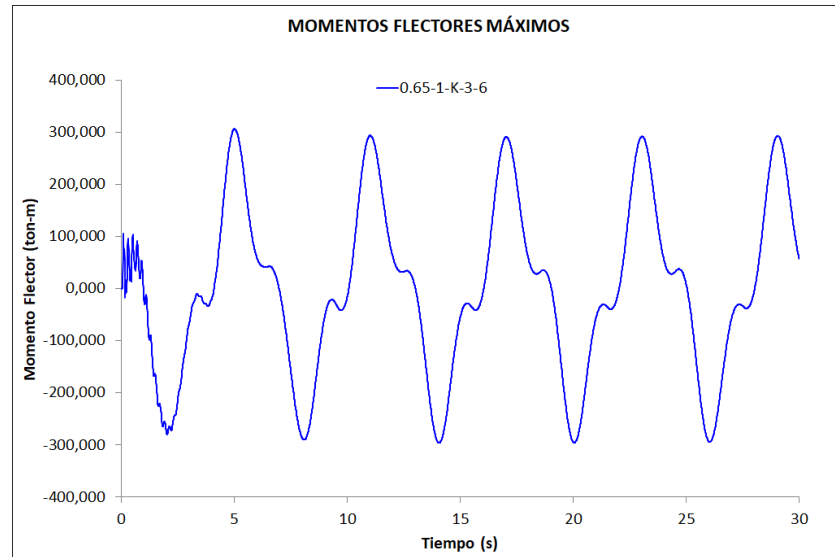


Figura N° 5.12: Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.13 muestra la variación de los momentos flectores máximos (ver Figura N°5.1) para distintos valores de la relación  $\phi_P/\phi_S$ . La figura muestra solo 1 línea ya que una variación del parámetro  $\phi_P/\phi_S$  no influye en el momento flector.

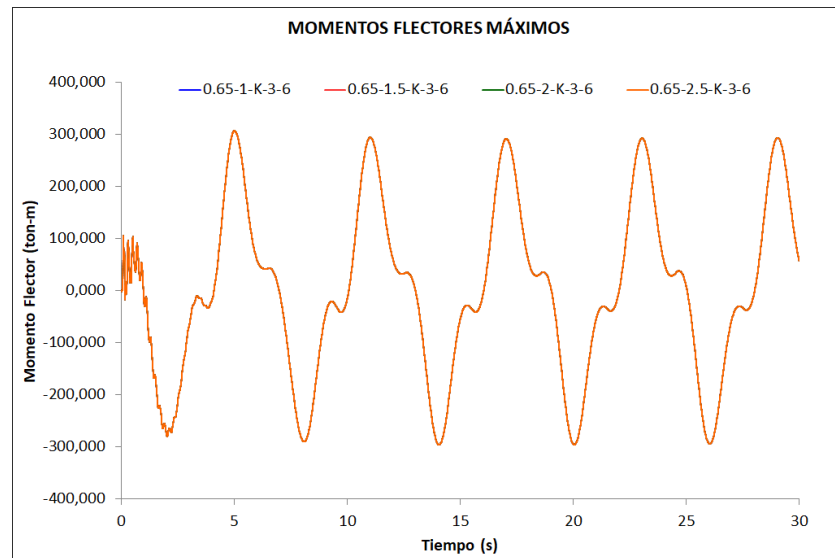


Figura N° 5.13: Momentos en elemento 1 para diferentes valores de  $\phi_P/\phi_S$ .

### 5.3.3 Modelos paramétricos – parámetro tipo de arriostre.

En este caso el tipo de arriostre (K o X) se hace variable, manteniendo los demás parámetros constantes. En la siguiente figura se muestra el



desplazamiento lateral del punto más elevado de la estructura (ver Figura N°5.1) para un arriostre tipo K.

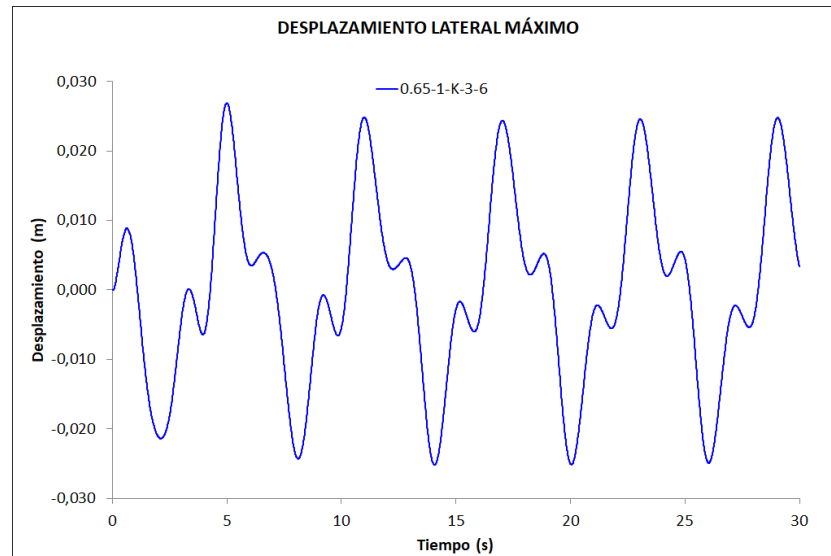


Figura N° 5.14: Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.

En la figura N° 5.15 se muestra la diferencia entre el desplazamiento lateral para una misma estructura considerando un arriostre tipo X primero y luego un arriostre tipo K.

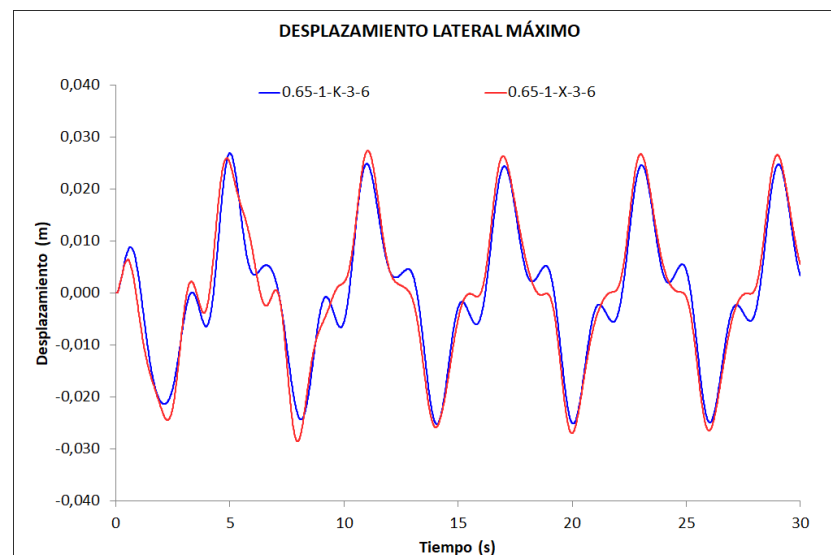


Figura N° 5.15: Desplazamientos laterales para diferentes tipos de arriostre.

La figura N° 5.16 muestra la fuerza axial y su variación en el tiempo sobre el elemento 1 (ver Figura N°5.1) para una estructura con arriostre tipo K. La estructura analizada está definida por los parámetros  $h/H=0.65$ ,

$\phi_P/\phi_S=1$ , arriostre tipo K, una Amplitud de ola  $A_w=3$  y periodo de ola  $T_w=6s$ .

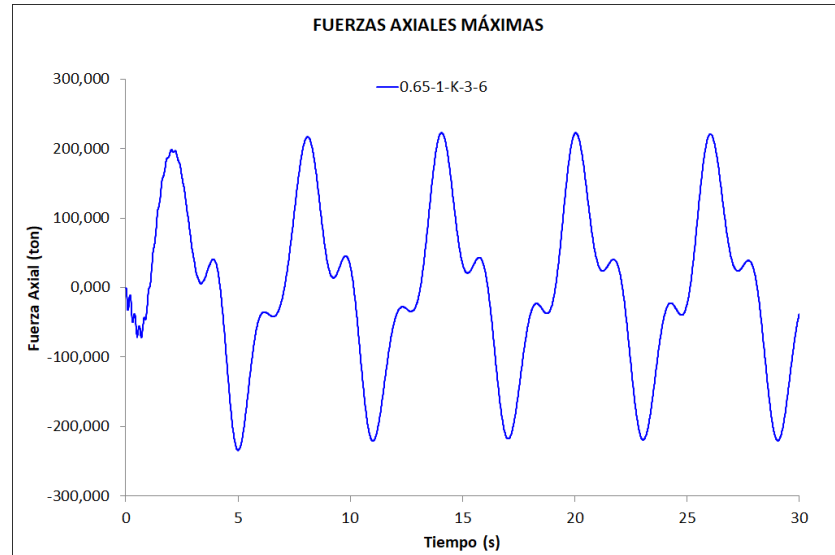


Figura N° 5.16: Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.17 muestra la diferencia entre las fuerzas axiales en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) obtenidas en un mismo modelo considerando en primer lugar un arriostre tipo X y luego un arriostre tipo K.

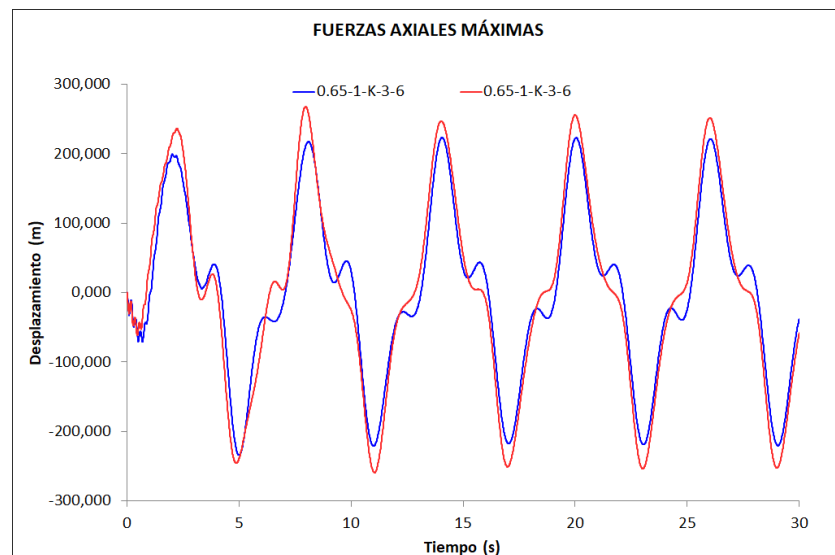


Figura N° 5.17: Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes tipos de arriostre.

La figura N° 5.18 muestra los momentos flectores en el elemento 1 de la estructura 0.65-1-K-3-6. Los momentos máximos se dan en el empotramiento del elemento 1 (ver Figura N°5.1).

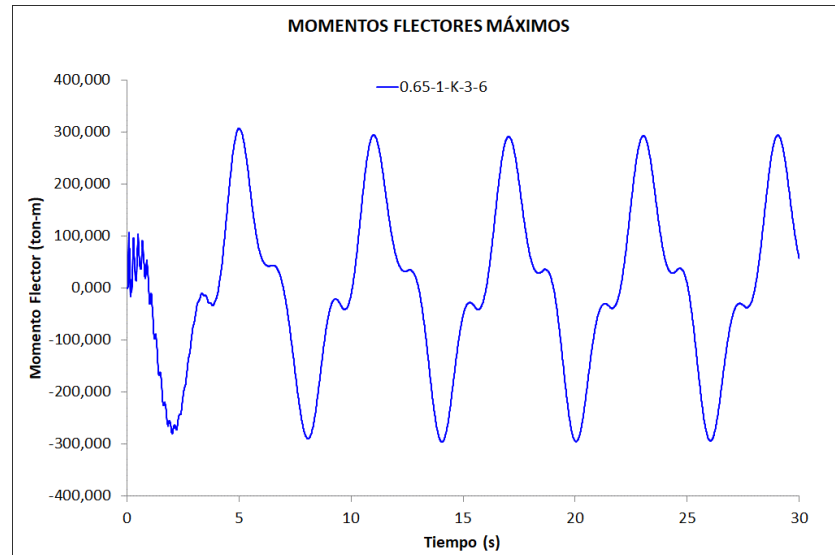


Figura N° 5.18: Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.19 muestra la variación de los momentos en una misma estructura considerando en primer lugar un arriostre tipo X y luego tipo K. Se aprecia que el tipo de arriostre influye en la respuesta de la estructura.

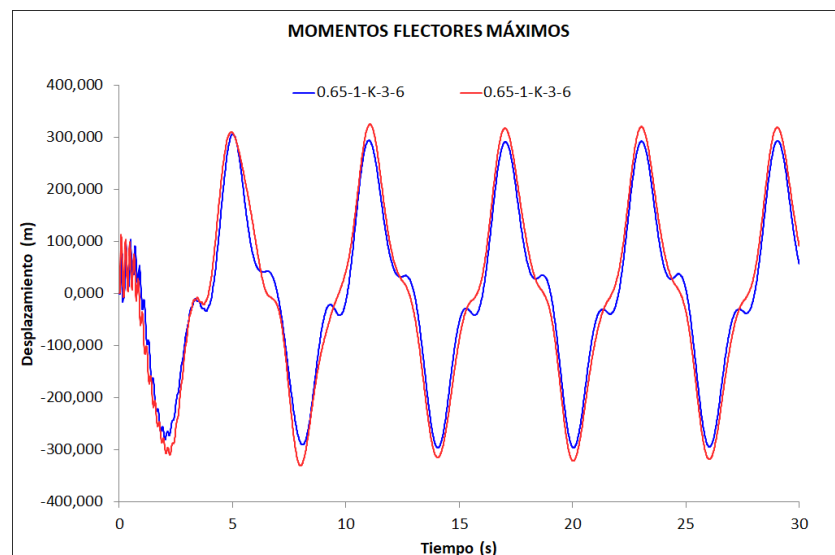


Figura N° 5.19: Momentos en elemento 1 para diferentes tipos de arriostre.

### 5.3.4 Modelos paramétricos – parámetro $A_w$ .

En este caso el parámetro  $A_w$  se hace variable, manteniendo los demás parámetros constantes o invariables. En la siguiente figura se muestra el desplazamiento lateral máximo de la estructura 0.65-1-K-3-6 en el punto más elevado de la estructura (ver Figura N°5.1) para un oleaje con 30s de duración con amplitud de ola  $A_w=6m$ .

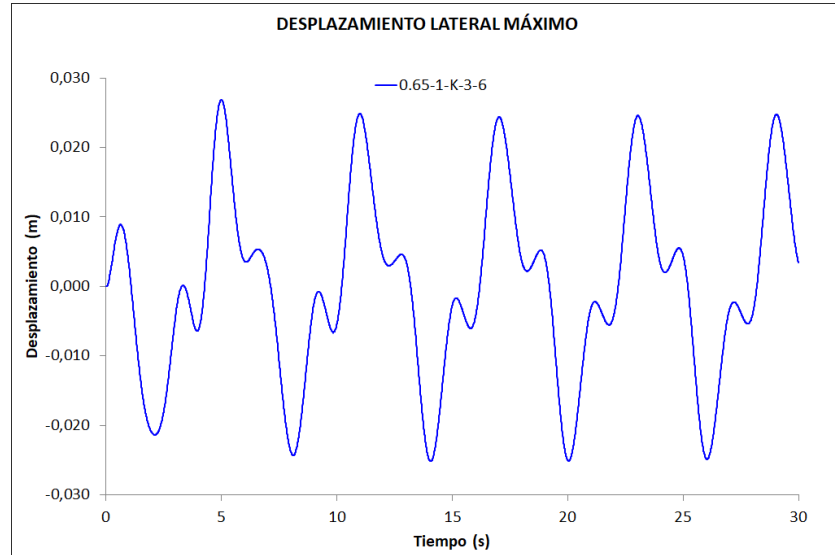


Figura N° 5.20: Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.21 muestra el efecto del parámetro  $A_w$  sobre los desplazamientos laterales de la estructura. La influencia que ejerce  $A_w$  sobre la estructura se da a través de la fuerza hidrodinámica que depende de  $A_w$ .

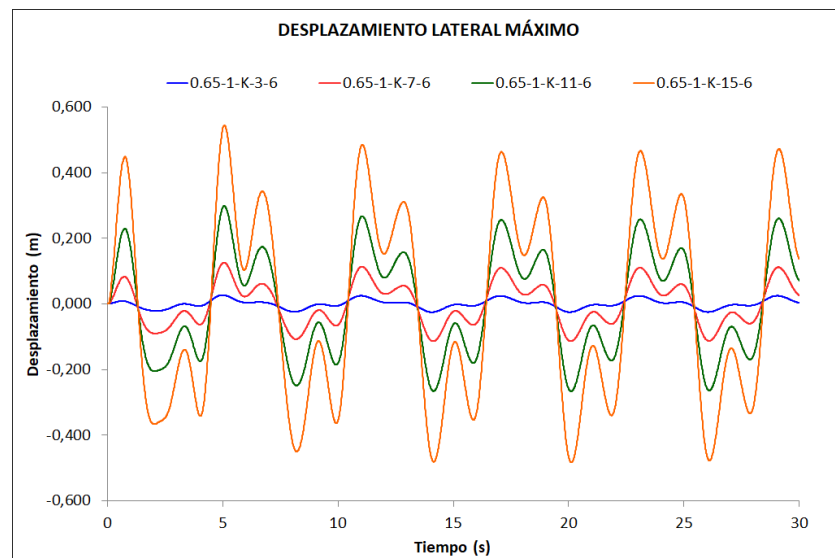


Figura N° 5.21: Desplazamientos laterales para diferentes valores de  $A_w$ .

A continuación, se muestra la fuerza axial para el elemento 1 (ver Figura N°5.1) de la estructura 0.65-1-K-3-6 y su variación en el tiempo ante un oleaje con amplitud de ola  $A_w=6m$ .

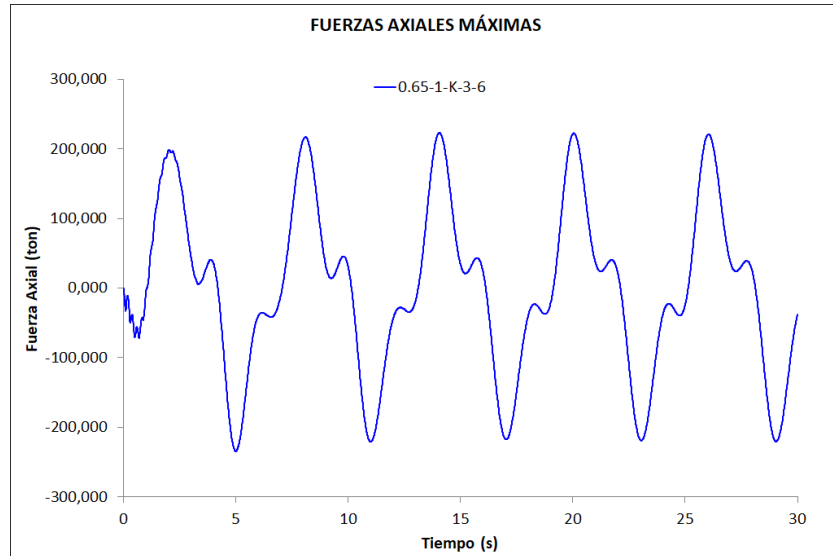


Figura N° 5.22: Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.23 muestra la variación de las fuerzas axiales en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) para diferentes valores de  $A_w$ . Se aprecia que las fuerzas axiales son directamente proporcionales al valor de  $A_w$ .

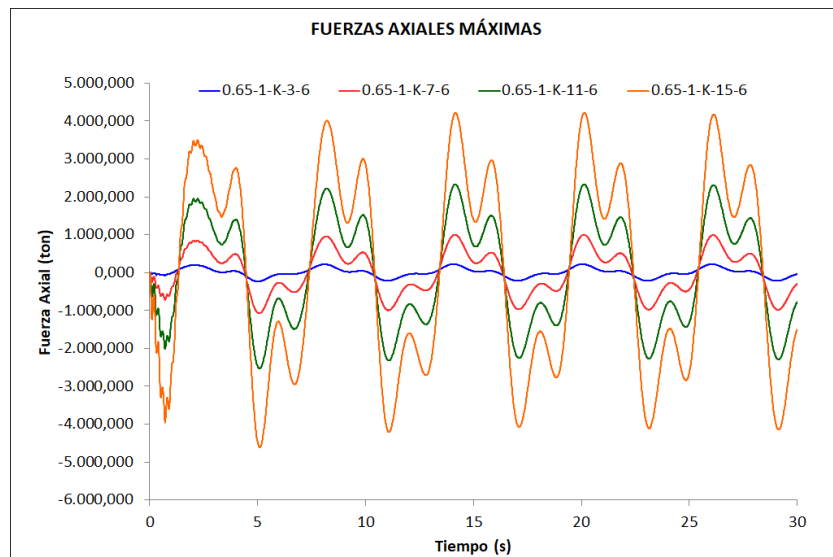


Figura N° 5.23: Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de  $A_w$ .

La figura N° 5.24 muestra los momentos flectores en el elemento 1 de la estructura ante un oleaje de amplitud de ola  $A_w=6m$ . Los momentos máximos se dan en el empotramiento del elemento 1 (ver Figura N°5.1).

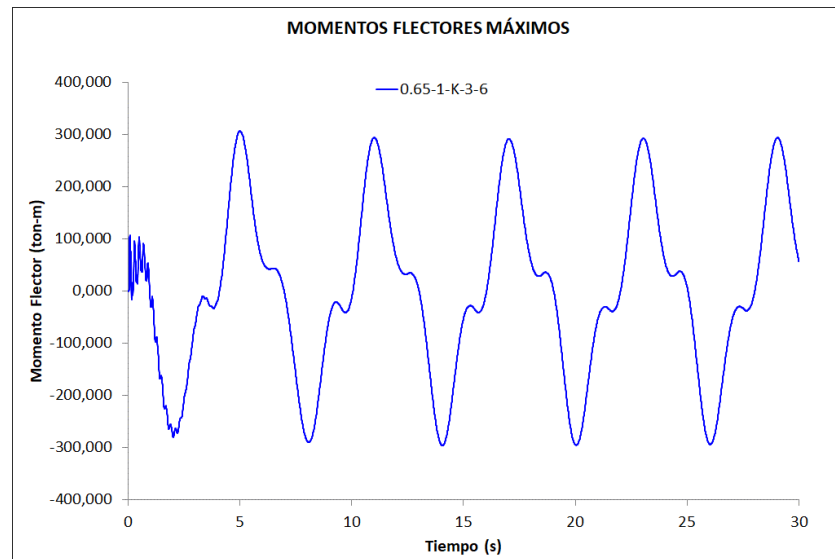


Figura N° 5.24: Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.25 muestra la variación de los momentos flectores máximos (ver Figura N°5.1) para distintos valores de  $A_w$ . El incremento de  $A_w$  genera un incremento en la respuesta de la estructura.

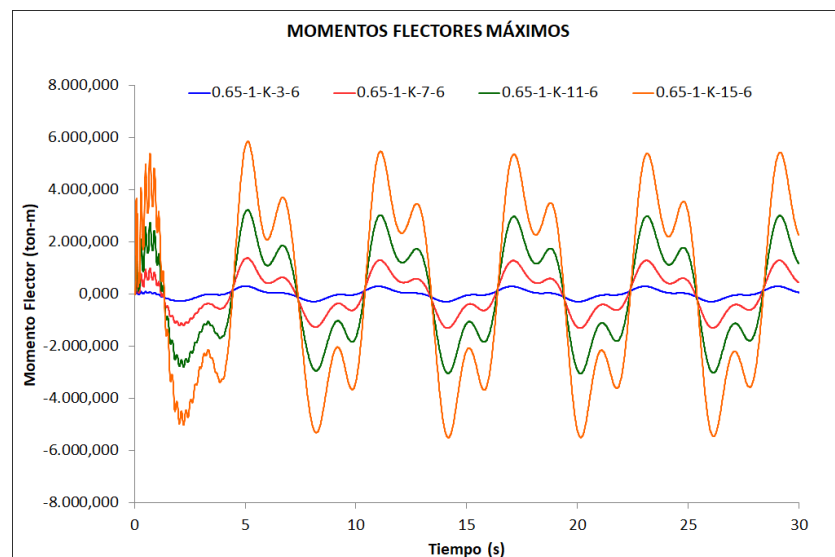


Figura N° 5.25: Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de  $A_w$ .

### 5.3.5 Modelos paramétricos – parámetro $T_w$ .

En este caso el parámetro  $T_w$  se hace variable, manteniendo los demás parámetros constantes. En la siguiente figura se muestra el desplazamiento lateral máximo en el punto más elevado de la estructura 0.65-1-K-3-6 para un oleaje con un periodo  $T_w= 6s$  con 30s de duración.

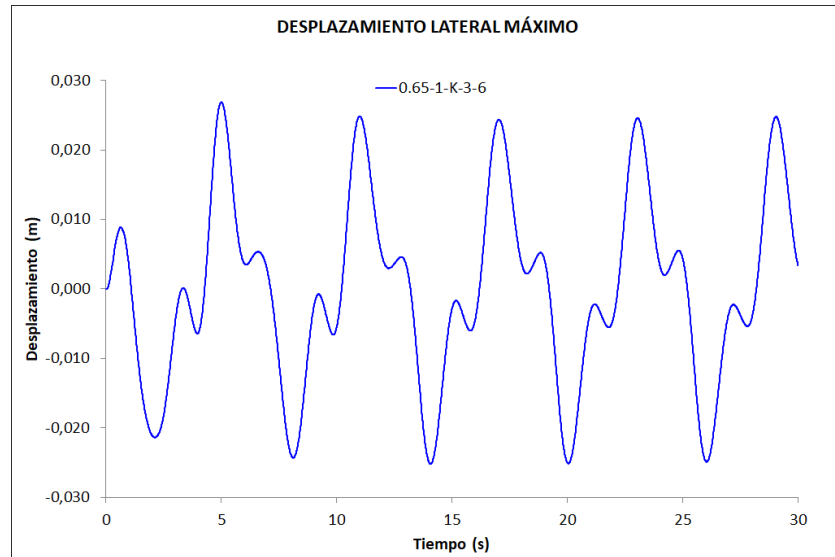


Figura N° 5.26: Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6.

La figura N° 5.27 muestra la variación del desplazamiento lateral máximo cuando varía el valor de  $T_w$ ; esta variación no solo es en cuanto a la magnitud, sino que también hay una variación en el periodo de la respuesta.

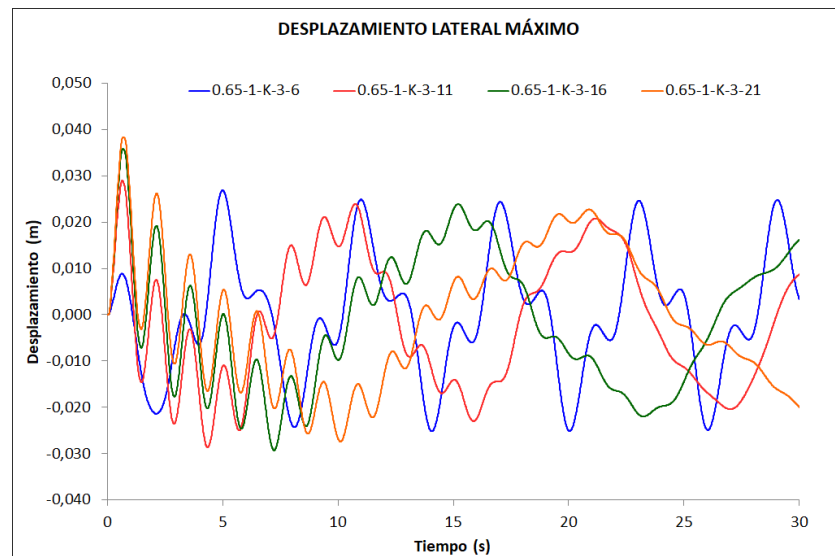


Figura N° 5.27: Desplazamientos laterales para diferentes valores de  $T_w$ .

La figura N° 5.28 muestra la fuerza axial máxima para el elemento 1 (ver Figura N°5.1) de la estructura 0.65-1-K-3-11 ante un oleaje con un periodo de ola  $T_w = 11s$ .

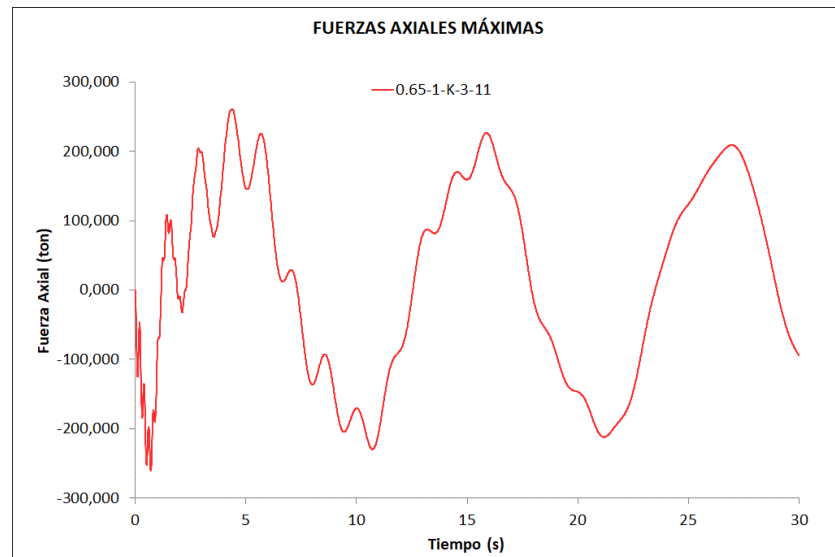


Figura N° 5.28: Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-11.

La figura N° 5.29 muestra la variación de las fuerzas axiales máximas en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) para diferentes valores de  $T_w$ . La variación de la fuerza axial no solo es en cuanto a la magnitud, sino que también en cuanto al periodo de la respuesta.

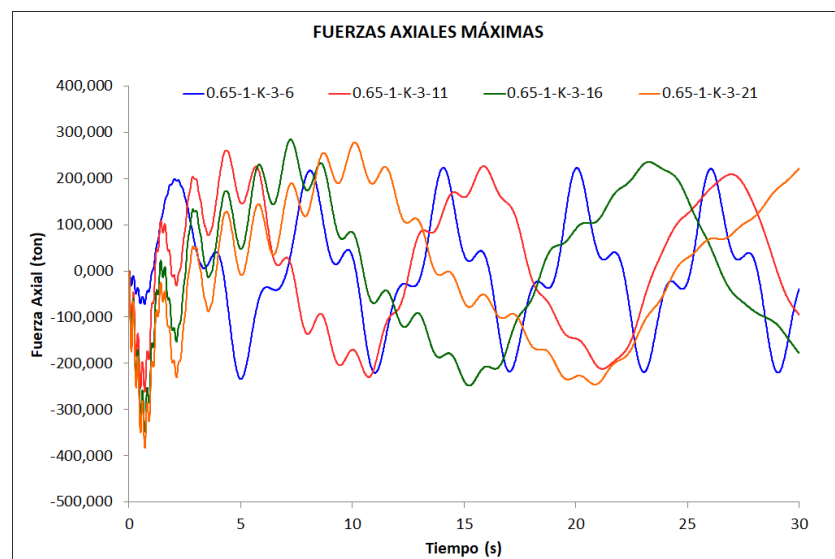


Figura N° 5.29: Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de  $T_w$ .



La figura N° 5.30 muestra los momentos flectores en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) de la estructura 0.65-1-K-3-16 ante un oleaje con un periodo de ola de  $T_w=16s$ .

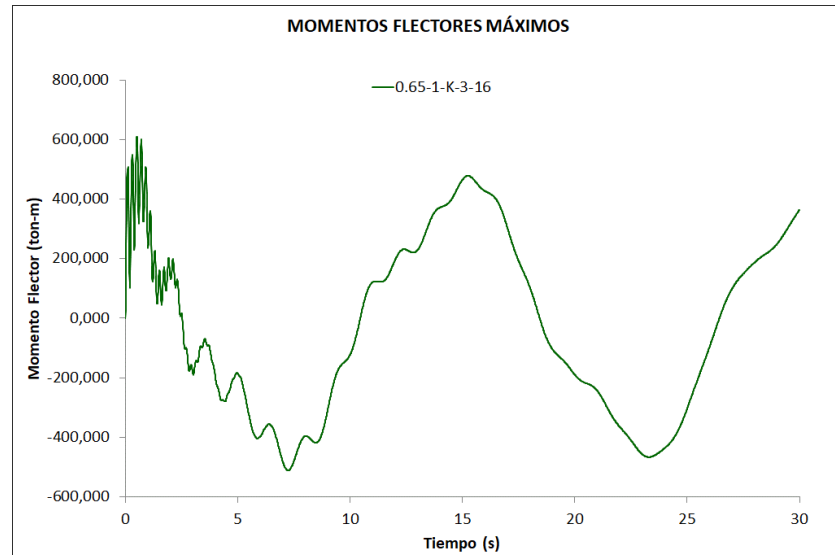


Figura N° 5.30: Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-16.

La figura N° 5.31 muestra la variación de los momentos flectores máximos en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) para distintos valores de la relación  $T_w$ . Se muestra un incremento de la respuesta con el incremento de  $T_w$ .

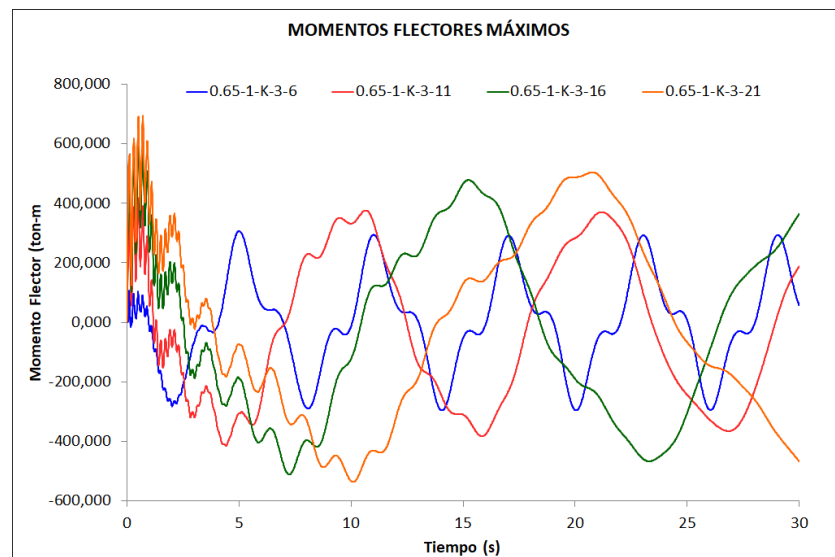


Figura N° 5.31: Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de  $T_w$ .

### 5.3.6 Modelos paramétricos – parámetro $N_0$ .

En este caso el parámetro  $N_0$  se hace variable, manteniendo los demás parámetros constantes. En la siguiente figura se muestra el desplazamiento lateral máximo en el punto más elevado de la estructura (ver Figura N°5.1) 0.65-1-K-3-6-24 cuando  $N_0=24$  ton/ft<sup>3</sup> para un oleaje con 30s de duración.

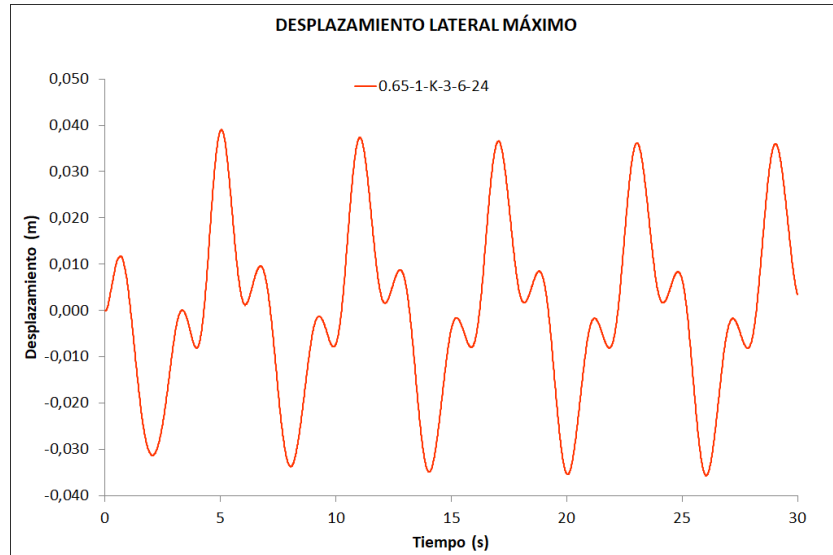


Figura N° 5.32: Desplazamiento lateral máximo del modelo 0.65-1-K-3-6-24.

La figura N° 5.33 muestra la variación de las respuesta desplazamiento para el caso empotrado (línea azul) y los casos de fundación flexible con diferentes valores de  $N_0$ .

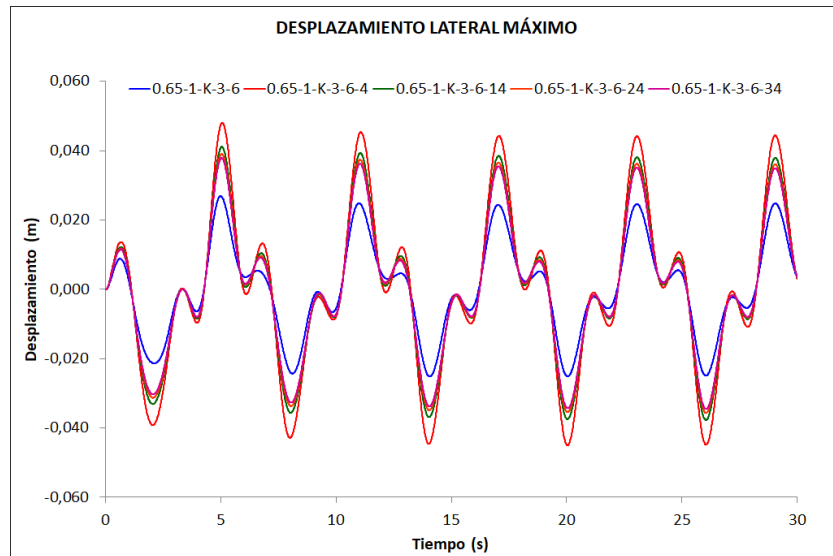


Figura N° 5.33: Desplazamientos laterales para diferentes valores de  $N_0$ .

A continuación se muestra la fuerza axial máxima en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) en la estructura 0.65-1-K-3-6-34 en un fundamento no tan flexible ( $N_0 = 34 \text{ ton/ft}^3$ ).

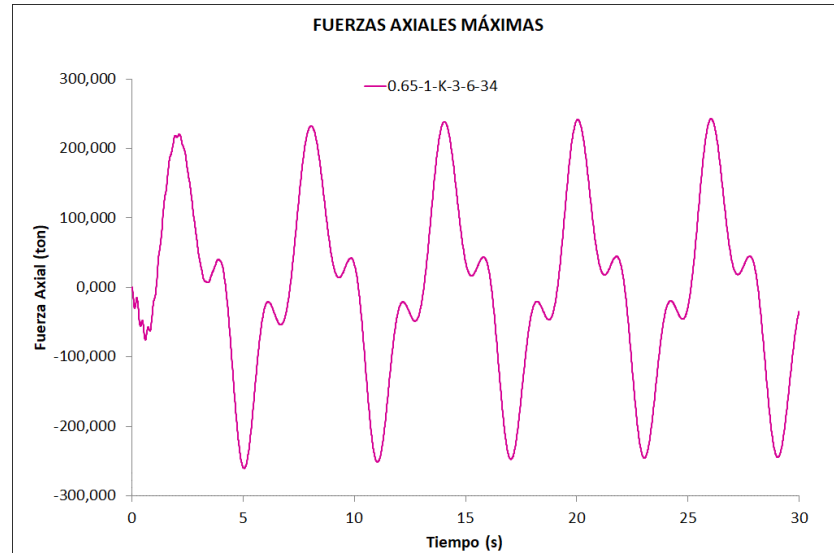


Figura N° 5.34: Fuerzas Axiales en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6-34.

La figura N° 5.35 muestra la variación de las fuerzas axiales en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) para diferentes valores de  $N_0$ . Existe una relación inversamente proporcional entre la respuesta y  $N_0$  ya que la fuerza axial disminuye conforme el valor de  $N_0$  aumenta.

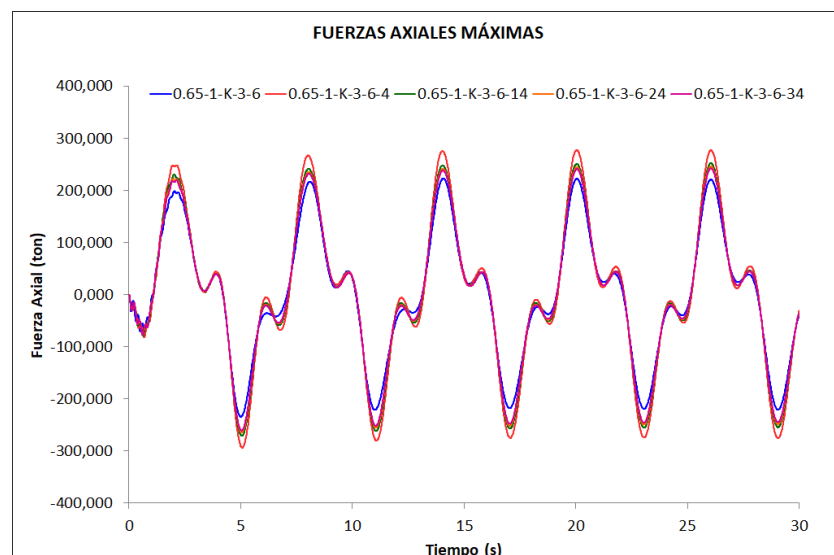


Figura N° 5.35: Fuerzas Axiales en elemento 1 para diferentes valores de  $N_0$ .

La figura N° 5.36 muestra los momentos flectores en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) de la estructura 0.65-1-K-3-6-24 en un suelo medianamente flexible ( $N_0 = 24 \text{ ton/ft}^3$ ).

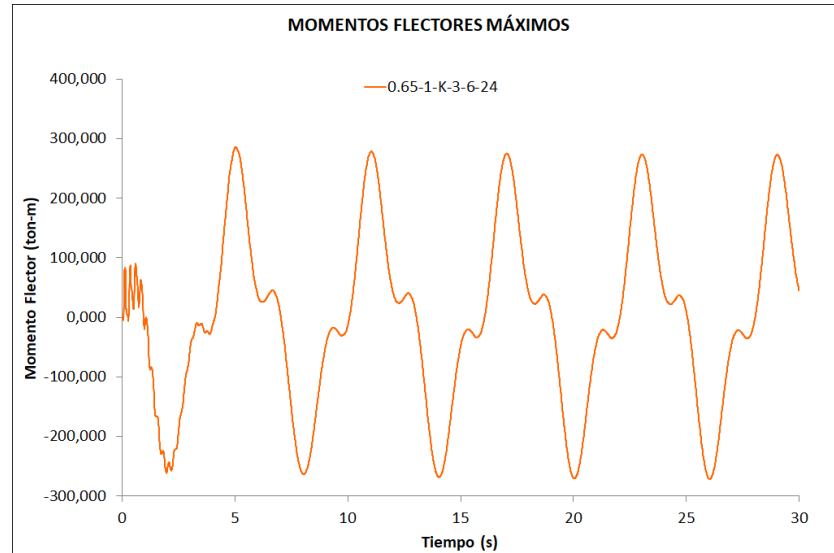


Figura N° 5.36: Momento Flector en el elemento 1 del modelo 0.65-1-K-3-6-24.

La figura N° 5.37 muestra la variación de los momentos flectores máximos en el elemento 1 (ver Figura N°5.1) para distintos valores  $N_0$ . El momento disminuye conforme aumenta el valor de  $N_0$ , ya que valores altos de  $N_0$  indican mayor rigidez del fundamento.

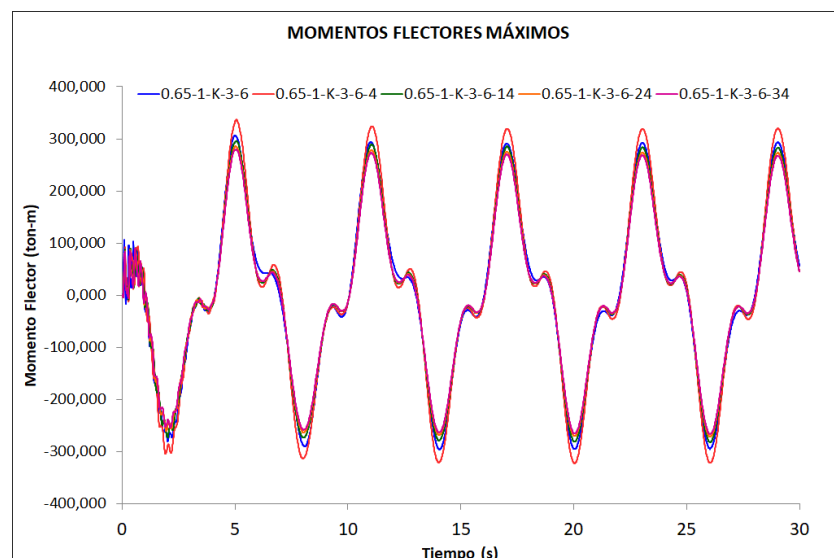


Figura N° 5.37: Momentos en el elemento 1 para diferentes valores de  $N_0$ .

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1 RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación corresponden al análisis de los modelos parametrizados. Los resultados están agrupados de acuerdo a la respuesta de interés, tales como periodo fundamental de vibración, desplazamiento lateral máximo, fuerza axial y momento flector, y dentro de cada uno de ellos se muestra el efecto de cada uno de los parámetros.

Se emplea la siguiente nomenclatura general para identificar a los modelos en análisis y los parámetros empleados:

$$h/H - \phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - A_w - T_w - N_0$$

Este formato muestra los valores de los parámetros en el siguiente orden: parámetro  $h/H$ , parámetro  $\phi_P/\phi_S$ , tipo de arriostre, altura de la ola  $A_w$ , periodo de la ola de diseño  $T_w$  y parámetro de sitio  $N_0$ .

Esta nomenclatura emplea los valores del Cuadro N°5.1. Por ejemplo el código **0.75-2-X-15-11-24** indica que el modelo posee una relación  $h/H=0.75$ , una relación de diámetros  $\phi_P/\phi_S=2$ , se analiza con una ola de altura  $A_w=15\text{m}$ , un periodo de oleaje  $T_w=11\text{s}$  y un parámetro de suelo  $N_0=24\text{ ton/pie}^3$  ( $848\text{ ton/m}^3$ ). Es necesario señalar que la nomenclatura se modifica de acuerdo al parámetro que se está analizando. Cuando se analiza un parámetro se suprime el valor de dicho parámetro en la nomenclatura. Además cuando la nomenclatura no posee un valor para el parámetro  $N_0$  se considera un suelo rígido con apoyos empotrados.

El siguiente cuadro muestra los códigos de los modelos paramétricos dependiendo el parámetro que se analiza.

Cuadro N°6.1: Cambios en la nomenclatura. (Elaboración propia).

Parámetro en análisis	Nomenclatura	Ejemplo
$h/H$	$\phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - Aw - Tw - N_0$ ó $\phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - Aw - Tw$	1.5-K-7-21-4 ó 1.5-K-7-21
$\phi_P/\phi_S$	$h/H - \text{Tipo de arriostre} - Aw - Tw - N_0$ ó $h/H - \text{Tipo de arriostre} - Aw - Tw$	0.65-X-11-6-34 ó 0.65-X-11-6
Tipo de arriostre	$h/H - \phi_P/\phi_S - Aw - Tw - N_0$ ó $h/H - \phi_P/\phi_S - Aw - Tw$	0.75-1-15-11-14 ó 0.75-1-15-11
$Aw$	$h/H - \phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - Tw - N_0$ ó $h/H - \phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - Tw$	0.85-1.5-X-16-24 ó 0.85-1.5-X-16
$Tw$	$h/H - \phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - Aw - N_0$ ó $h/H - \phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - Aw$	0.75-2-X-7-24 ó 0.75-2-X-7
$N_0$	$h/H - \phi_P/\phi_S - \text{Tipo de arriostre} - Aw - Tw$	0.95-2.5-K-11-16

## 6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se analizará los resultados obtenidos de las respuestas de los análisis realizados a las estructuras paramétricas en estudio.

### 6.2.1 Periodo fundamental de vibración

La figura N° 6.1 muestra la variación del periodo fundamental con la variación de la relación  $h/H$ .

Se aprecia en la figura que el periodo fundamental de vibración se incrementa cuando la razón  $h/H$  se incrementa; esto se debe a que el nivel del agua aumenta y la masa adicional de agua asociada a los extremos de los elementos se incrementa, lo que produce un incremento en la relación  $M/EI$ . Se observa que existe una variación proporcional entre el período fundamental de la estructura y la razón  $h/H$ .

La figura N° 6.2 muestra que el periodo fundamental de vibración es mayor en estructuras con arriostres tipo K que en aquellas con arriostre tipo X. Es decir, las estructuras con un arriostramiento tipo K presentan menor rigidez que las estructuras con arriostre tipo X. Los periodos fundamentales de vibración en estructuras tipo K pueden ser mayores a las de tipo X hasta en un 12.5%.

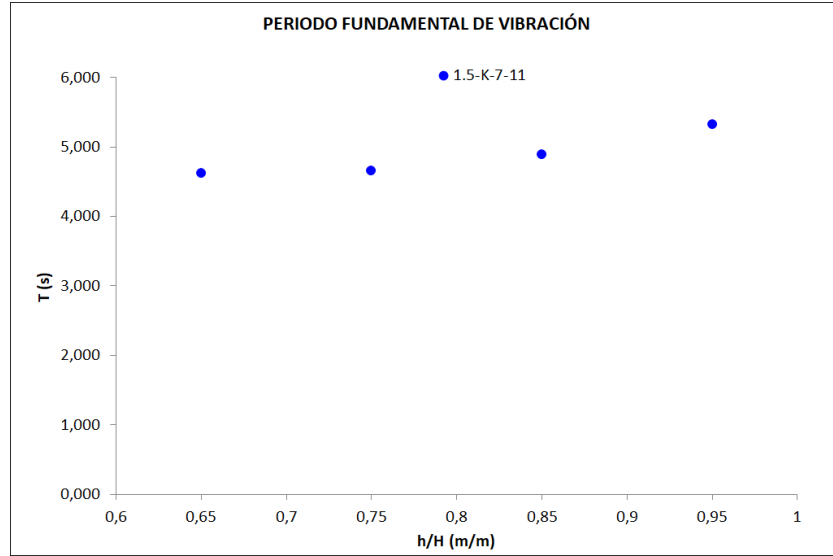


Figura N° 6.1: Periodos fundamentales de vibración para distintos valores de h/H.

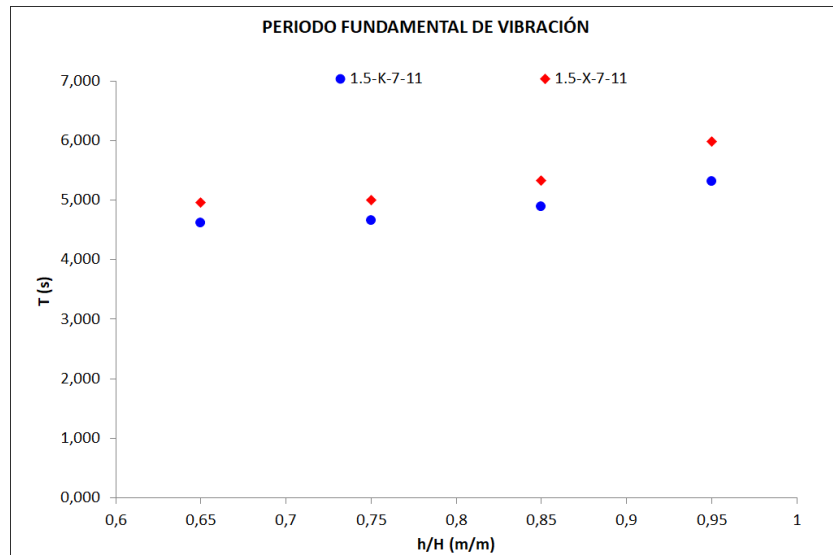


Figura N° 6.2: Periodos fundamentales de vibración para distintos tipos de arriostre.

La figura N° 6.3 muestra que el periodo fundamental de vibración disminuye conforme el valor de  $N_0$  aumenta. Existe una relación inversamente proporcional entre el periodo fundamental de vibración y el valor de  $N_0$ . Esto se debe a que cuanto más grande es el parámetro de suelo  $N_0$ , el suelo se rigidiza y la estructura actúa como si estuviera sobre un empotramiento, lo que reduce el periodo fundamental de vibración. En la figura N° 6.3 también se muestra una línea punteada la cual representa el periodo fundamental de vibración para una estructura empotrada en el fondo marino

Un escenario se presenta cuando el parámetro  $N_0$  es pequeño, es decir cuando el suelo no es muy rígido, debido a que la rigidez lateral de la estructura disminuye permaneciendo la masa invariable, resultando en un mayor valor del periodo fundamental de vibración.

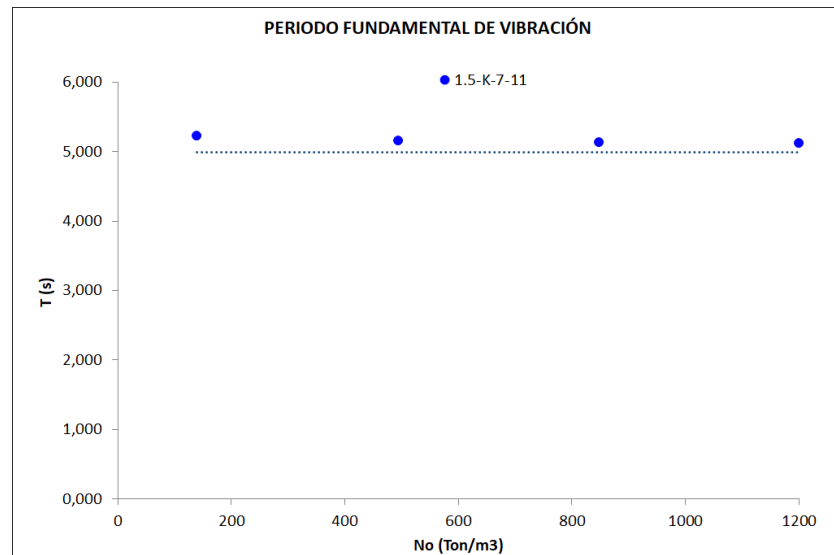


Figura N° 6.3: Periodos fundamentales de vibración para distintos valores de  $N_0$ .

Es necesario precisar que parámetros como la amplitud de la ola ( $A_w$ ) y el periodo de la ola ( $T_w$ ) no tienen afecto alguno sobre el periodo fundamental de vibración de la estructura. El efecto de estos parámetros es sobre la fuerza hidrodinámica mas no sobre la masa de la estructura o sobre su rigidez.

## 6.2.2 Desplazamiento lateral máximo

En las siguientes figuras se mostrará la manera en la que inciden los parámetros en estudio sobre los desplazamientos laterales obtenidos del análisis dinámico.

### 6.2.2.1 Parámetro $h/H$ .

El parámetro  $h/H$  es un parámetro de gran incidencia ya que define la parte sumergida bajo el agua que a su vez estará expuesta a la fuerza hidrodinámica.



En la figura N° 6.4 se muestra la variación del desplazamiento lateral máximo para el grupo de estructuras con parámetros h/H-1-K-3-6. Se observa que hay una relación entre el desplazamiento y la razón h/H.

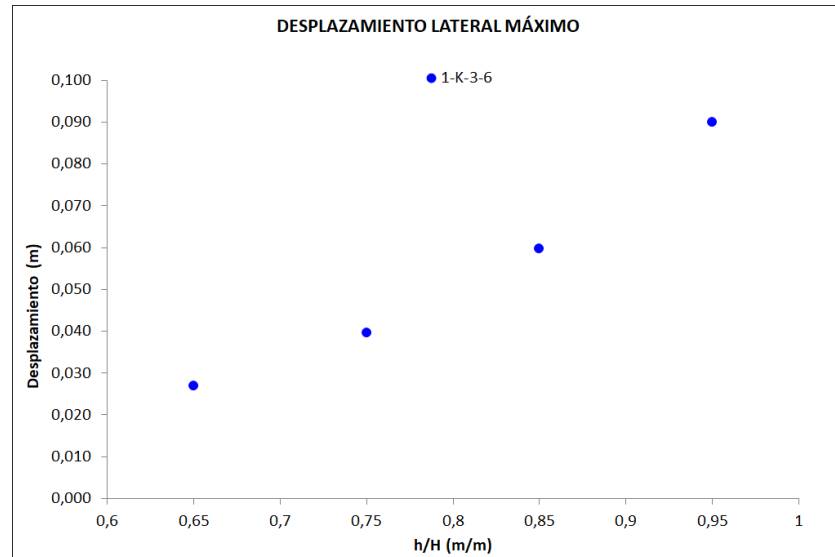


Figura N° 6.4: Desplazamientos laterales máximos para distintos valores de h/H.

Cuando la razón h/H aumenta significa que la profundidad sumergida de la estructura es mayor, es decir que la estructura se encuentra expuesta a una mayor cantidad de agua y por consiguiente a una mayor fuerza hidrodinámica. La tendencia se mantiene para otras estructuras con diferentes parámetros (Ver figura N° 6.5).

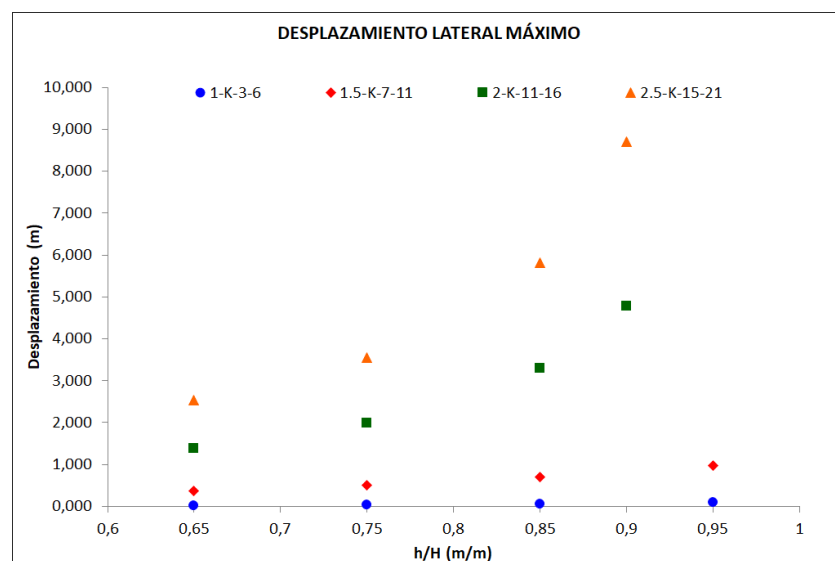


Figura N° 6.5: Desplazamiento lateral para distintas combinaciones de parámetros.

6.2.2.2 Parámetro  $\phi_P/\phi_S$ .

La relación  $\phi_P/\phi_S$  no es un parámetro importante en el cálculo de las respuestas, tal como se puede observar en la figura N° 6.6; el desplazamiento lateral máximo es igual sin importar el valor de  $\phi_P/\phi_S$ .

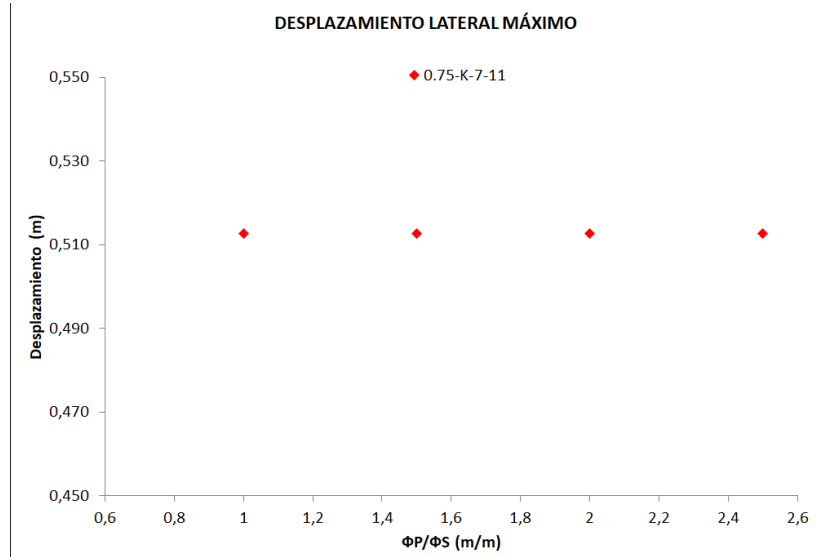


Figura N° 6.6: Desplazamiento lateral para distintos valores de  $\phi_P/\phi_S$ .

La tendencia se mantiene en los demás modelos (Ver figura N° 6.7); sin embargo, esto se podría haber deducido también desde el modelo simplificado, ya que la rigidez a la flexión de cada segmento de la estructura depende directamente de las dimensiones del elemento principal.

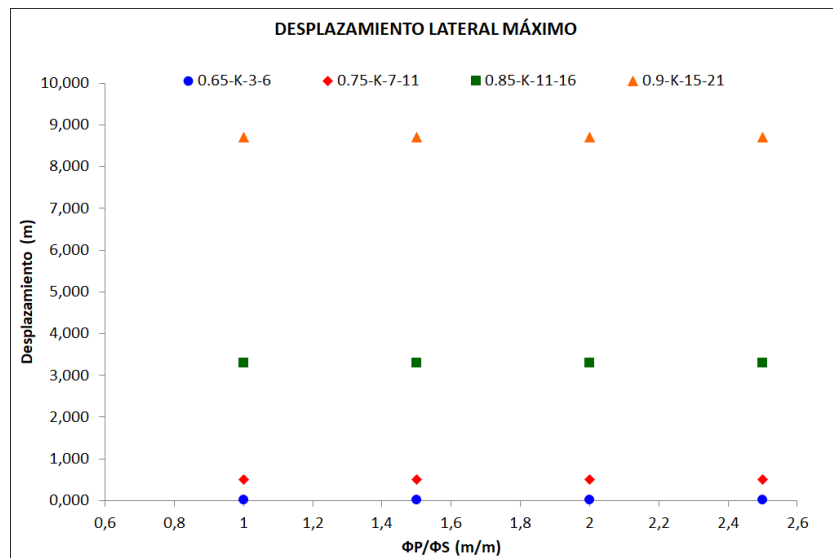


Figura N° 6.7: Desplazamiento lateral máximo para distintas combinaciones de parámetros.

### 6.2.2.3 Parámetro tipo de Arriostre.

El tipo de arriostre tiene influencia en la respuesta final de la estructura. Según la figura N° 6.8 los desplazamientos laterales máximos son mayores en una estructura con arriostre tipo K y la diferencia es de mayor relevancia cuando el valor de  $h/H$  crece.

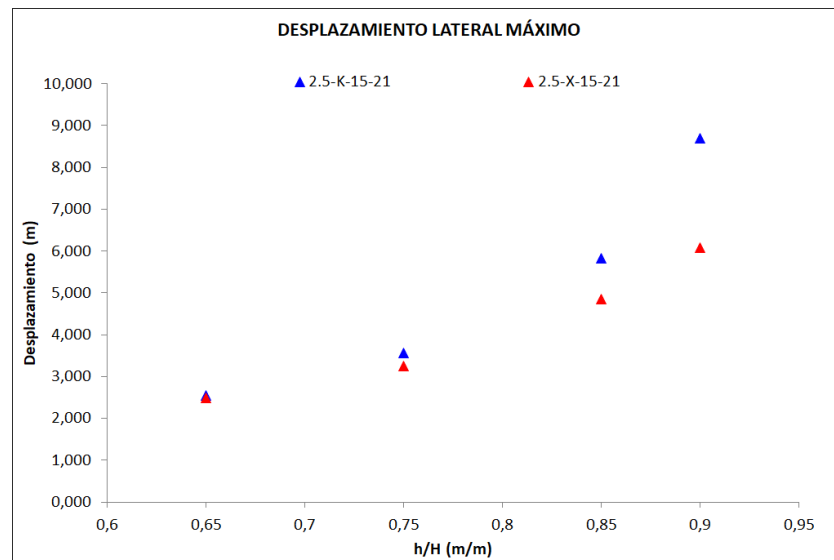


Figura N° 6.8: Desplazamiento lateral máximo de acuerdo al tipo de arriostre.

La figura N° 6.9 muestra lo que ocurre en otros modelos; la respuesta desplazamiento lateral es mayor en estructuras que tienen arriostre tipo K que en aquellas con tipo X aun cuando ambos tipos de arriostre tienen la misma rigidez equivalente a la flexión.

Esto se debe a que en las estructuras con arriostre tipo X las fuerzas laterales se distribuyen directamente los elementos y sus nudos mientras que en el caso de las estructuras con arriostre tipo K solo una parte de la fuerza lateral se distribuye a los nudos de los elementos y la otra parte causa deformaciones en los elementos causando un incremento en las respuestas de las estructuras.

Es por ello que las respuestas que se obtienen al analizar estructuras similares, pero con diferentes tipos de arriostre, son mayores para el caso de las que se analizan considerando el arriostre tipo K.

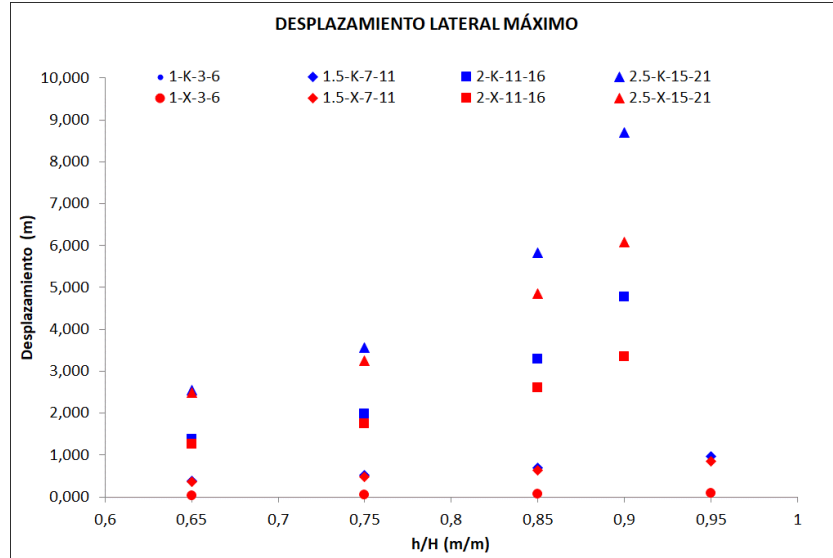


Figura N° 6.9: Desplazamiento lateral para arriostres tipo K y X.

#### 6.2.2.4 Parámetro Amplitud de la Ola Aw.

En la figura N° 6.10 se muestra la variación del parámetro Aw en el oleaje que actúa sobre la estructura 0.75-1.5-K-Aw-11, es necesario recalcar que el parámetro Aw incide indirectamente sobre la fuerza hidrodinámica actuante.

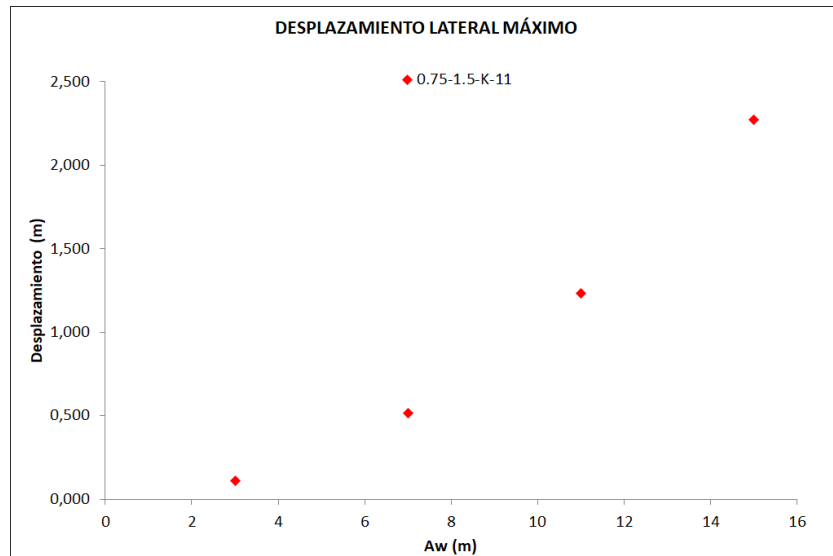


Figura N° 6.10: Desplazamientos laterales para diferentes valores de Aw.

La figura N°6.11 muestra la variación de la respuesta desplazamiento lateral en 4 grupos de modelos (0.65-1-K-Aw-6, 0.75-1.5-K-Aw-11, 0.85-2-K-Aw-16, 0.95-2.5-K-Aw-21) en los cuales se ha variado el valor Aw.

Los gráficos muestran que  $A_w$  incide directamente sobre la fuerza hidrodinámica y la fuerza hidrodinámica sobre el desplazamiento lateral.

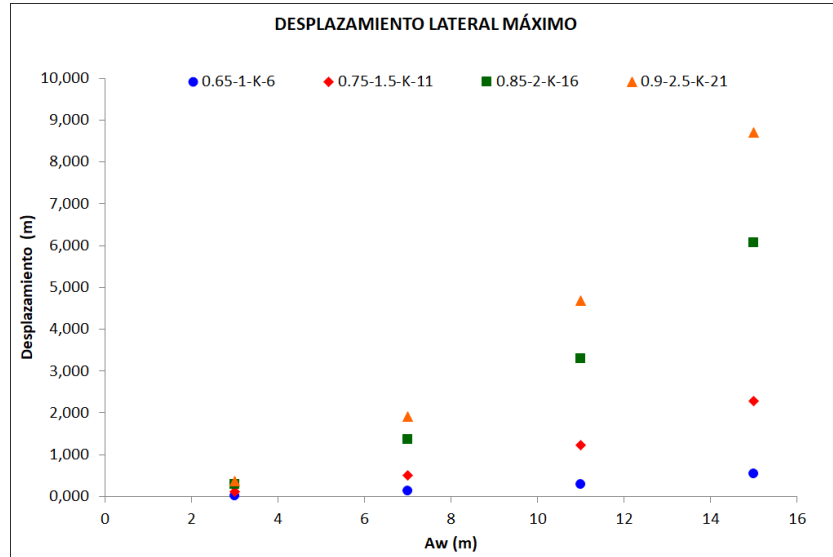


Figura N° 6.11: Desplazamientos laterales para  $A_w=3$ ,  $A_w=7$ ,  $A_w=11$  y  $A_w=15$ .

#### 6.2.2.5 Parámetro Periodo de la Ola $T_w$ .

En la figura N°6.12 muestra la curva de ajuste del desplazamiento lateral para la variación de  $T_w$  en el oleaje sobre el modelo 0.65-1-K-3- $T_w$ . Existe una relación directa entre el desplazamiento lateral y el periodo del oleaje.

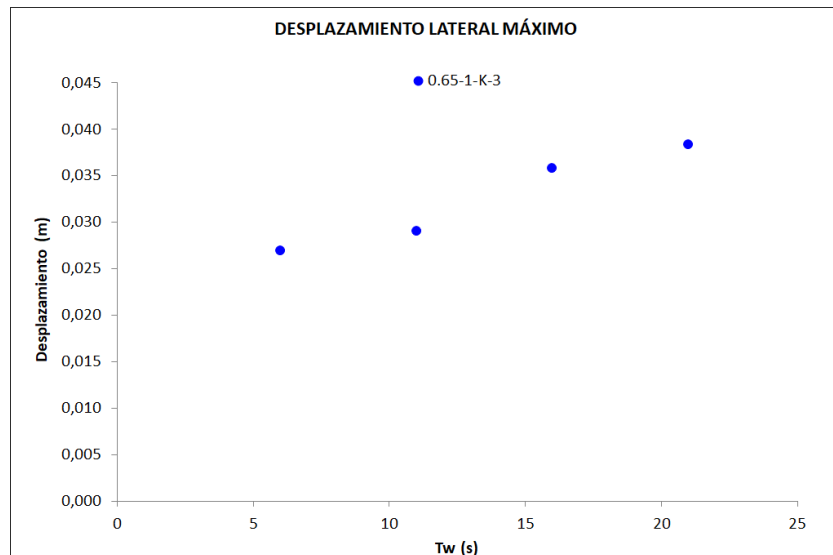


Figura N° 6.12: Desplazamiento lateral versus la variación de  $T_w$ .

La figura N°6.13 muestra la variación de la respuesta desplazamiento lateral. Es posible notar que hay algunos puntos que rompen el esquema

de la curva de la figura N°6.12; esto se debe a que el periodo fundamental de vibración de la estructura es similar a  $T_w$ , lo que motiva una mayor amplificación de la respuesta.

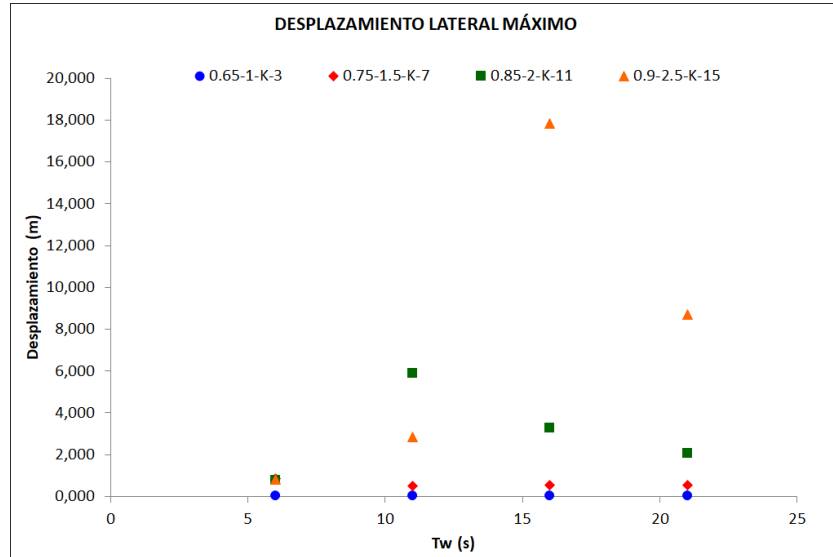


Figura N° 6.13: Desplazamientos laterales para  $T_w=6$ ,  $T_w=11$ ,  $T_w=16$  y  $T_w=21$ .

#### 6.2.2.6 Parámetro de Sitio $N_o$ .

El gráfico N° 6.14 muestra que en suelos flexibles (valores pequeños de  $N_o$ ) la respuesta se amplifica. Se aprecia además una línea inferior punteada; esta línea corresponde a la respuesta de la estructura si se considera que está ubicada en un suelo rígido, con apoyos que pueden considerarse como empotrados.

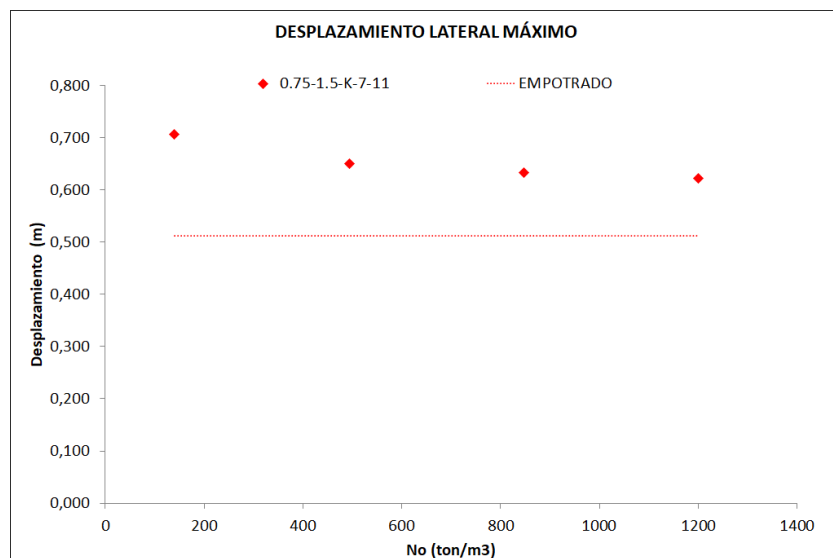


Figura N° 6.14: Desplazamiento lateral suelo flexible y rígido.

La figura 6.15 muestra que sucede lo mismo con otras estructuras. Conforme el suelo se hace o es más rígido, la respuesta desplazamiento lateral disminuye. Esto se debe a que suelos flexibles permiten giros en la zona de apoyos, causando mayores desplazamientos laterales.

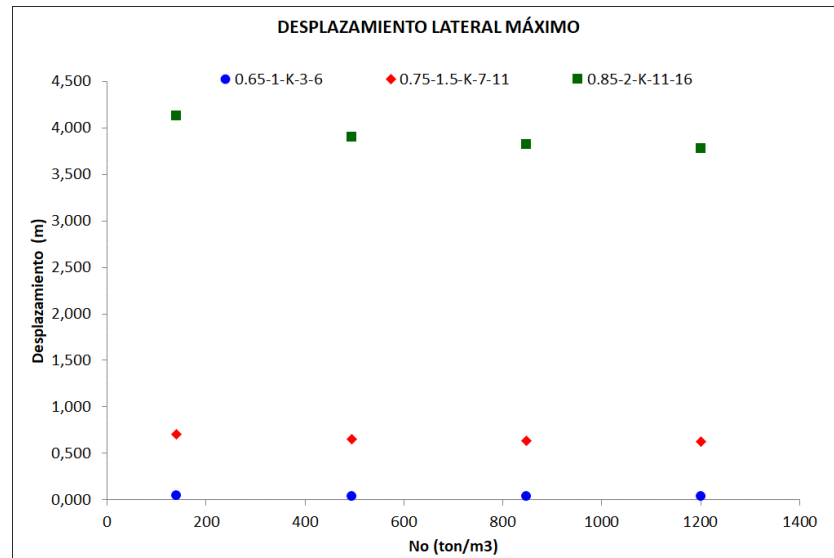


Figura N° 6.15: Desplazamiento lateral para  $N_o=4$ ,  $N_o=14$ ,  $N_o=24$ .

### 6.2.3 Fuerza Axial.

A continuación, se analizará la manera en que inciden los parámetros en estudio sobre la respuesta fuerza axial de los elementos de apoyo de las estructuras.

#### 6.2.3.1 Parámetro $h/H$ .

El parámetro geométrico  $h/H$  tiene gran incidencia en la respuesta fuerza axial de las estructuras, tal como se puede apreciar en la figura N° 6.16. La relación entre la fuerza axial y el parámetro  $h/H$  se puede expresar a por medio de una forma polinomial.

En la figura N° 6.17 se puede apreciar que la dependencia de la fuerza axial del parámetro  $h/H$  se mantiene en otros grupos de estructuras. También señala que la diferencia se hace más evidente conforme aumentan los valores de la amplitud  $A_w$  y del periodo del oleaje  $T_w$ .

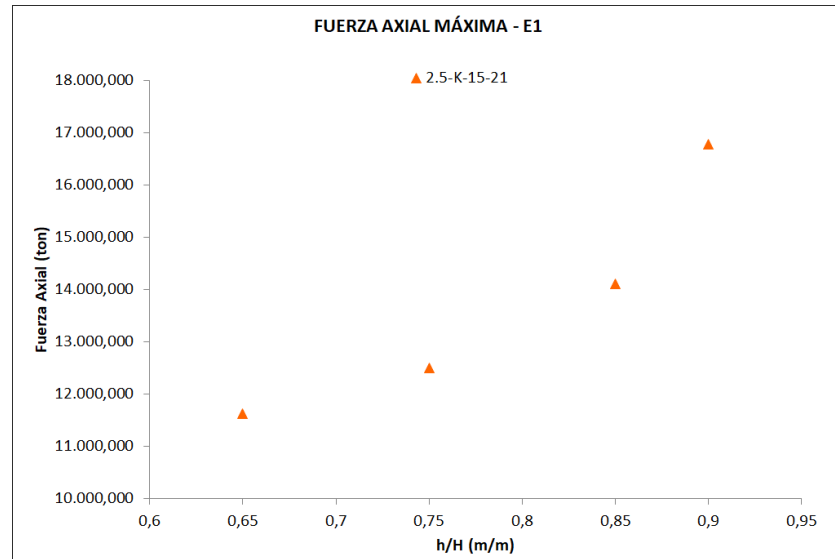


Figura N° 6.16: Variación de la fuerza axial para distintos valores de h/H.

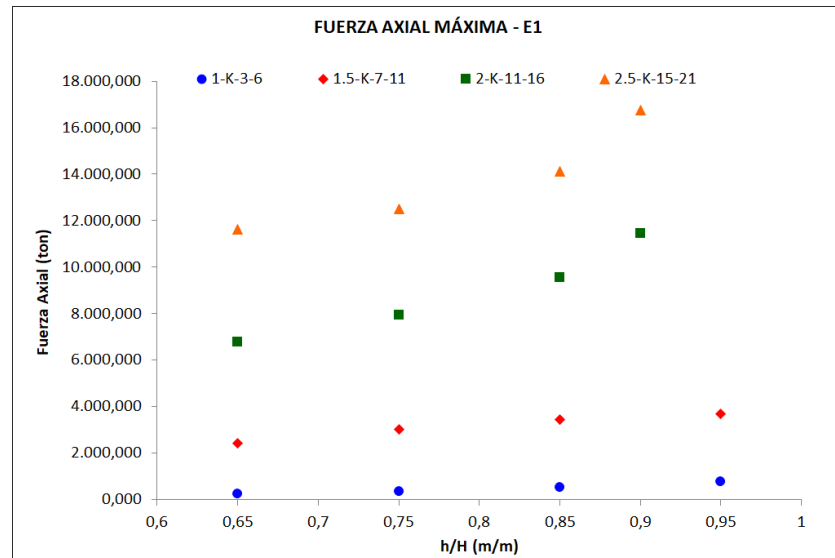


Figura N° 6.17: Variación de la fuerza axial en modelos paramétricos.

### 6.2.3.2 Parámetro Razón de Diámetros $\phi_P/\phi_S$ .

La razón de diámetros  $\phi_P/\phi_S$  no tiene efecto alguno sobre la respuesta fuerza axial (ver figura N° 6.18), es decir que la fuerza axial es independiente de dicho parámetro.

En la figura N° 6.19 se puede observar el mismo escenario, fuerzas axiales iguales en estructuras que poseen una relación de diámetros diferente. El diámetro de los elementos principales  $\phi_P$  es el único que



incide en las respuestas elásticas de las plataformas marinas (ver sección 4.3.1).

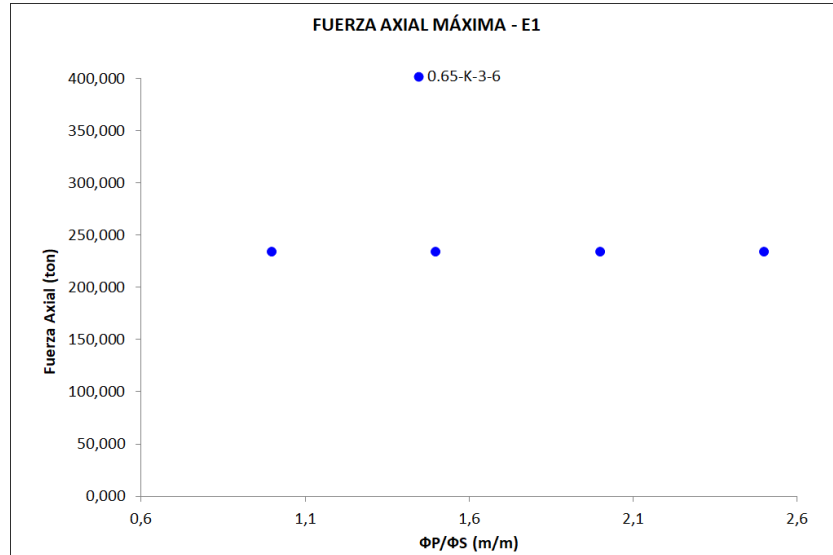


Figura N° 6.18: Fuerza axial en modelos con diferentes valores para  $\phi_P/\phi_S$ .

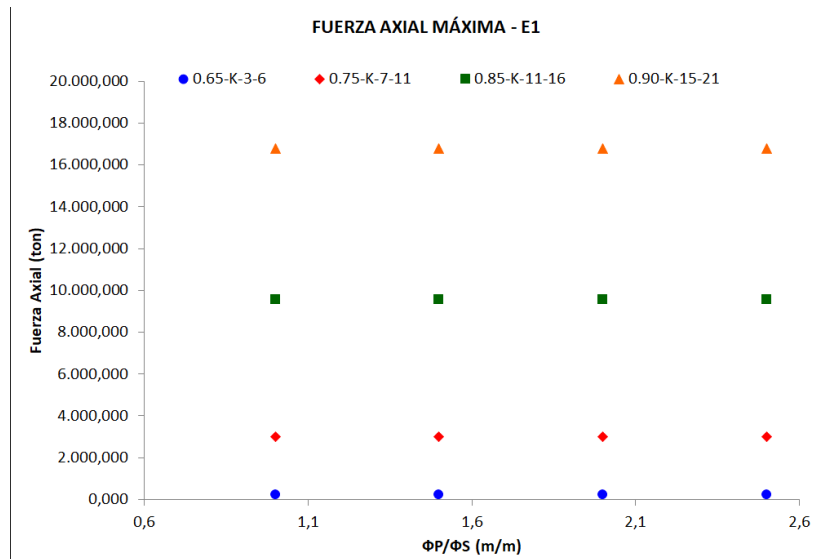


Figura N° 6.19: Fuerza axial variando  $\phi_P/\phi_S$  y los demás parámetros.

### 6.2.3.3 Parámetro Tipo de Arriostre.

El parámetro Tipo de Arriostre si demuestra ser de importancia, ya que dependiendo del tipo de arriostre que se considere en la estructura esta tendrá respuestas mayores o menores (ver figura N° 6.20). La figura muestra que para ambos casos las repuestas parecen ser proporcionales.

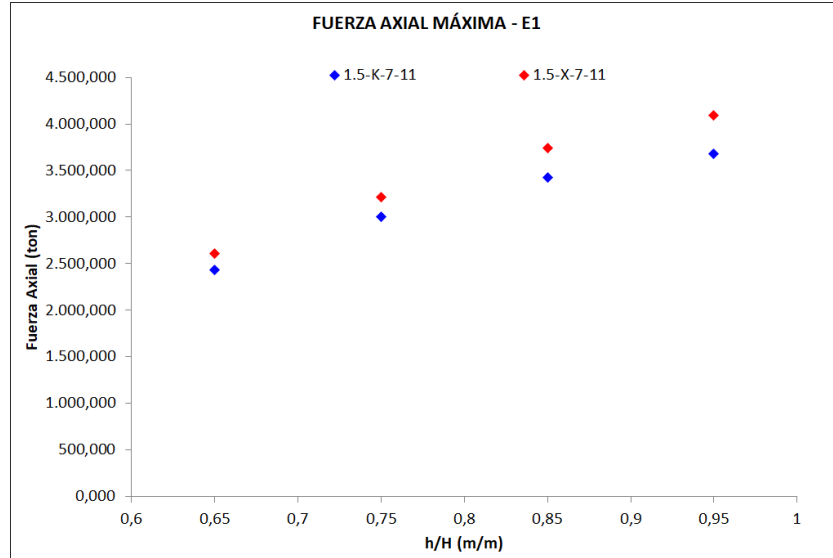


Figura N° 6.20: Fuerza axial según el tipo de arriostre.

Sin embargo, en la figura N° 6.21 se muestra que la dependencia de un tipo de arriostre a otro es variable. Otro punto a tener en cuenta es que las fuerzas axiales en los modelos con arriostre tipo X son mayores que en los modelos con arriostre tipo K. Esto último se debe a que en una estructura con arriostres tipo X, los elementos siempre están unidos a los elementos principales y es a los elementos principales a quienes trasladan sus cargas.

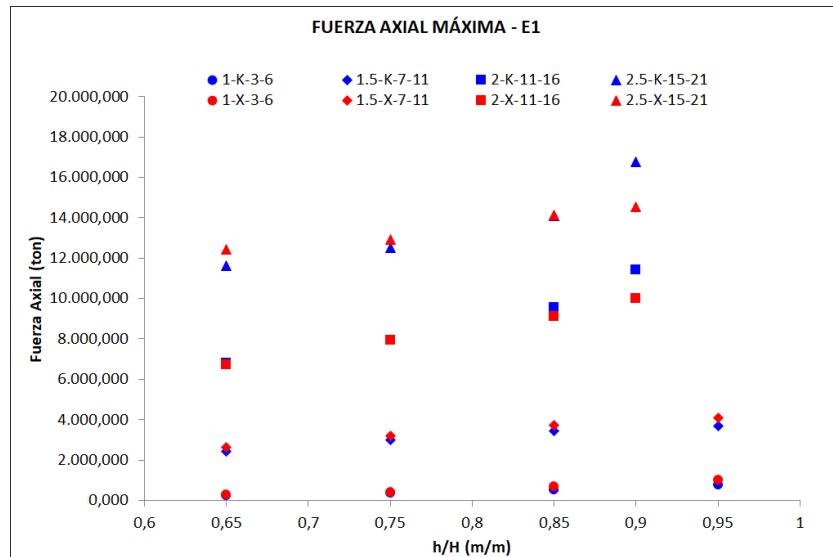


Figura N° 6.21: Variación de la fuerza axial en diferentes modelos paramétricos.

### 6.2.3.4 Parámetro Amplitud de Oleaje $A_w$ .

El parámetro  $A_w$ , denominado como parámetro dinámico en este trabajo, resulta ser de gran incidencia en el cálculo de la fuerza axial, si se tiene en cuenta cómo cambian los valores de esta en el eje de ordenadas para cada valor de  $A_w$  en el eje de las abscisas (ver figura N°6.22).

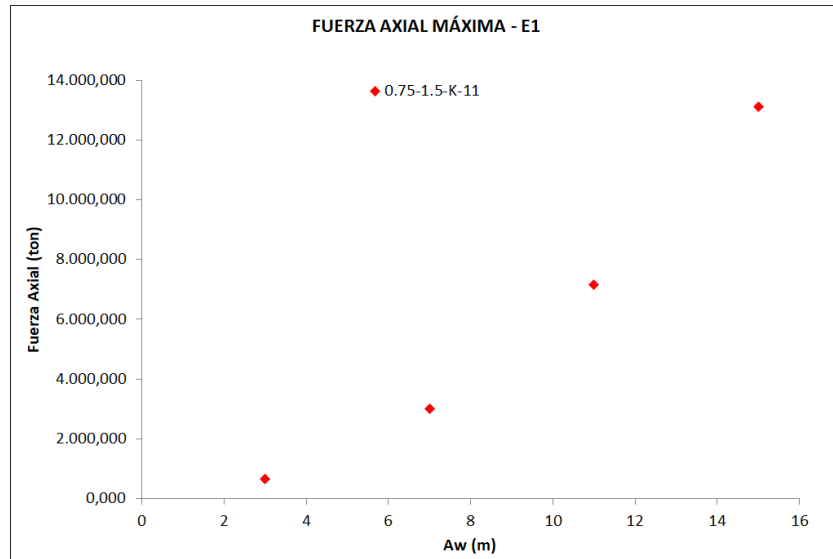


Figura N° 6.22: Fuerza axial según  $A_w$  en el modelo 0.75-1.5-K- $A_w$ -11.

Este incremento que se aprecia en la respuesta axial es debido a que la fuerza hidrodinámica depende directamente de la amplitud del oleaje y ante una mayor fuerza de oleaje la respuesta axial es mayor.

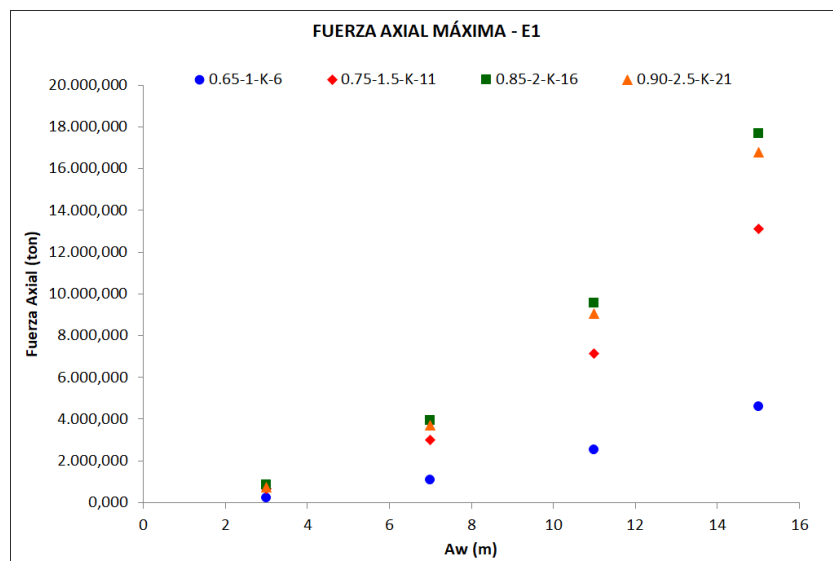


Figura N°6.23: Variación de la fuerza axial en otros grupos de modelos.

La figura N° 6.23 muestra que en otros grupos de estructuras (0.65-1-K-Aw-6, 0.75-1.5-K-Aw-11, 0.85-2-K-Aw-16 y 0.90-2.5-K-Aw-21) se tienen curvas similares a la figura N° 6.22. Es necesario señalar que conforme aumenta el valor de Aw la variación de la respuesta es más pronunciada.

6.2.3.5 Parámetro Periodo de Oleaje Tw.

De acuerdo con la figura N°6.24, la fuerza axial varia de manera directamente proporcional al valor de Tw. Es necesario destacar que el periodo de oleaje no ejerce una influencia directamente sobre la estructura, sino que su influencia sobre las respuestas elásticas de la estructura es a través de la fuerza hidrodinámica.

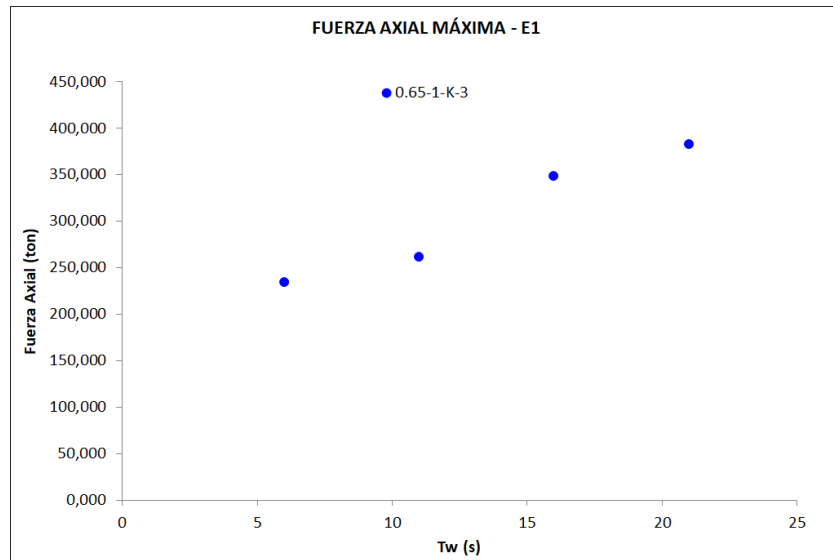


Figura N° 6.24: Fuerza axial para diferentes valores de Tw.

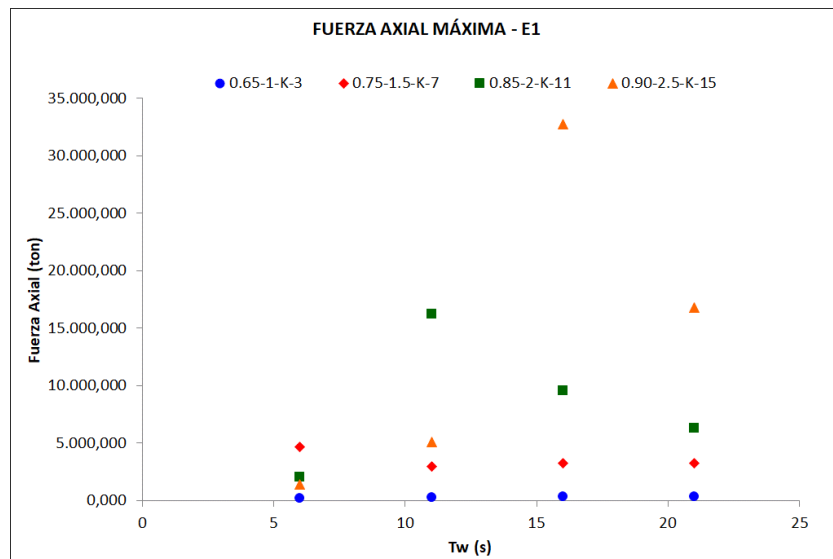


Figura N° 6.25: Variación de la fuerza axial en modelos paramétricos.

En la figura N° 6.25 se muestra que algunos grupos de estructuras presentan una variación de respuestas diferente a la presentada en la figura N° 6.24; esto se debería a que en algunos casos los periodos de las estructuras son parecidos al periodo del oleaje, lo que genera una amplificación de las respuestas elásticas, en este caso, el de la fuerza axial.

6.2.3.6 Parámetro de Sitio  $N_o$ .

Tal como sucede con los desplazamientos laterales, la fuerza axial depende del valor  $N_o$ , logrando respuestas mayores para valores de  $N_o$  que se aproximan al cero y obteniendo respuestas menores para valores de  $N_o$  que se alejan del cero. La línea punteada que se muestra en la siguiente figura representa la respuesta para un suelo rígido con apoyos empotrados.

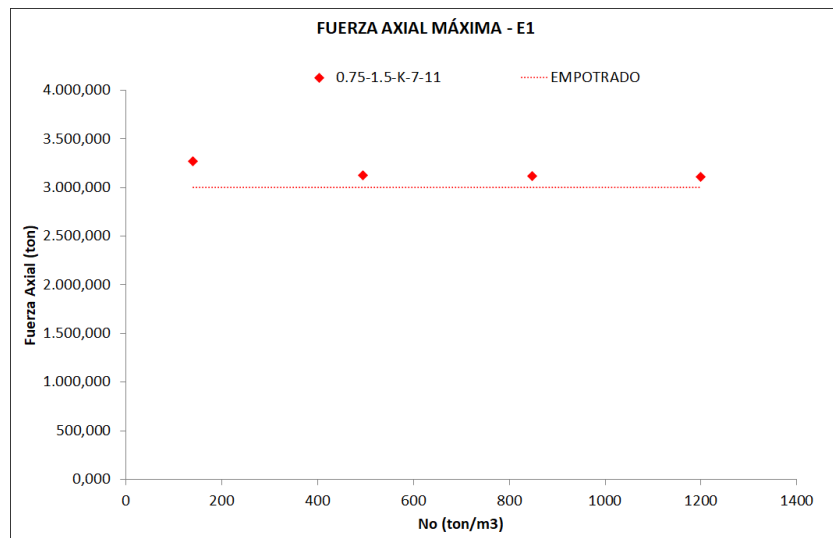


Figura N° 6.26: Fuerza axial y para distintos valores de  $N_o$ .

Es necesario señalar que tal efecto se presenta en los otros grupos de estructuras analizados (ver figura N°6.27).

Los valores de  $N_o$  están expresados en ton/m³, mientras que en otras secciones se indican en ton/pie³.

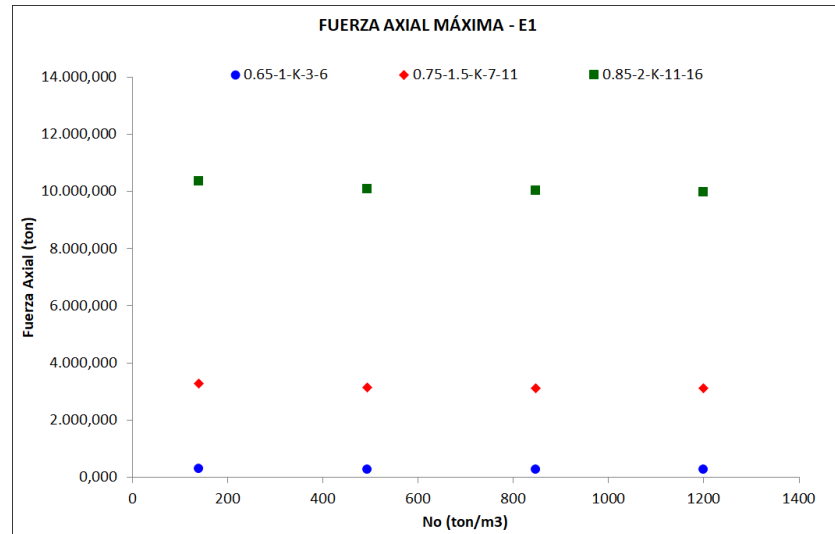


Figura N° 6.27: Variación de la fuerza axial debido a  $N_o$  en los modelos parametrizados.

#### 6.2.4 Momento Flector

A continuación, se analizará la manera en que inciden los parámetros en estudio sobre la respuesta Momento flector de los elementos de apoyo de las estructuras

##### 6.2.4.1 Parámetro Geométrico $h/H$ .

El parámetro  $h/H$  tiene incidencia en la respuesta Momento Flector de las estructuras, tal como se puede apreciar en la figura N° 6.28. La relación entre el momento flector y el parámetro  $h/H$  se puede expresar a través de una forma polinómica. Es preciso señalar que según el análisis los momentos flectores disminuyen conforme el valor de  $h/H$  aumenta, es decir, que existe una relación inversamente proporcional entre el momento flector en el apoyo y la razón  $h/H$ .

En la figura N° 6.29 se puede apreciar que la dependencia del momento flector del parámetro  $h/H$  se mantiene en otros grupos de estructuras. Se mantiene la tendencia donde los momentos flectores disminuyen ante un aumento del parámetro  $h/H$ . Sin embargo, hay casos en los cuales esta tendencia no se cumple. Esto sucede en casos donde el periodo fundamental vibración de la estructura y el periodo del oleaje son muy cercanos. En estos casos las respuestas varían a causa de la resonancia que se presenta en los modelos.

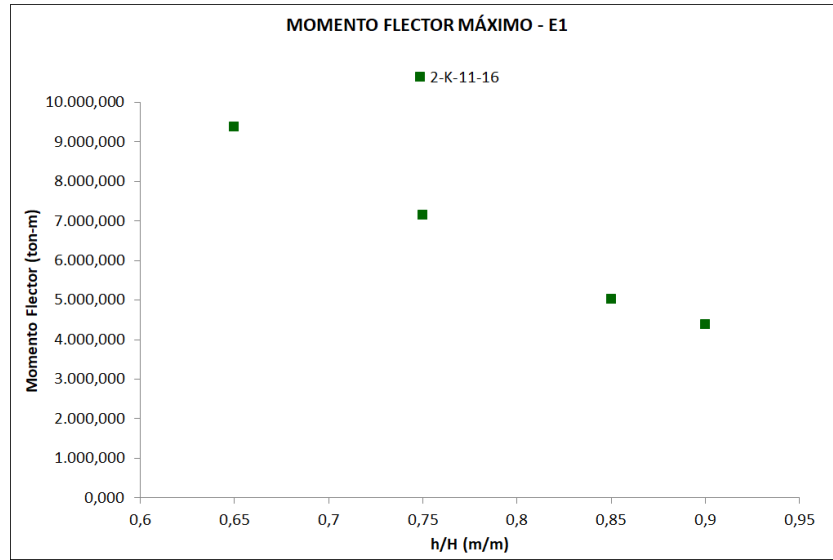


Figura N° 6.28: Momento para diferentes valores de h/H en modelo h/H-2-K-11-16.

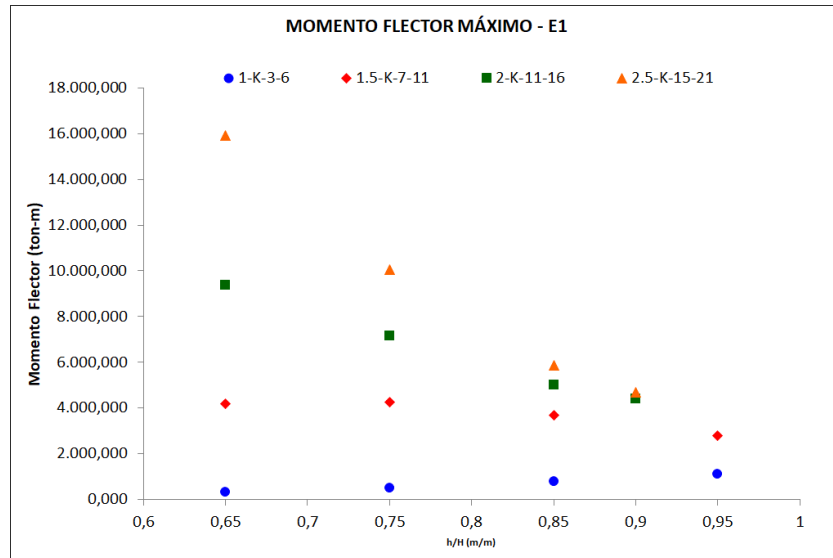


Figura N° 6.29: Momento Flector en diferentes modelos parametrizados.

#### 6.2.4.2 Parámetro razón de diámetros $\phi_P/\phi_S$ .

La razón de diámetros  $\phi_P/\phi_S$  no tiene efecto alguno sobre la respuesta momento flector (ver figura N° 6.30), es decir que el momento flector es independiente de dicha relación.

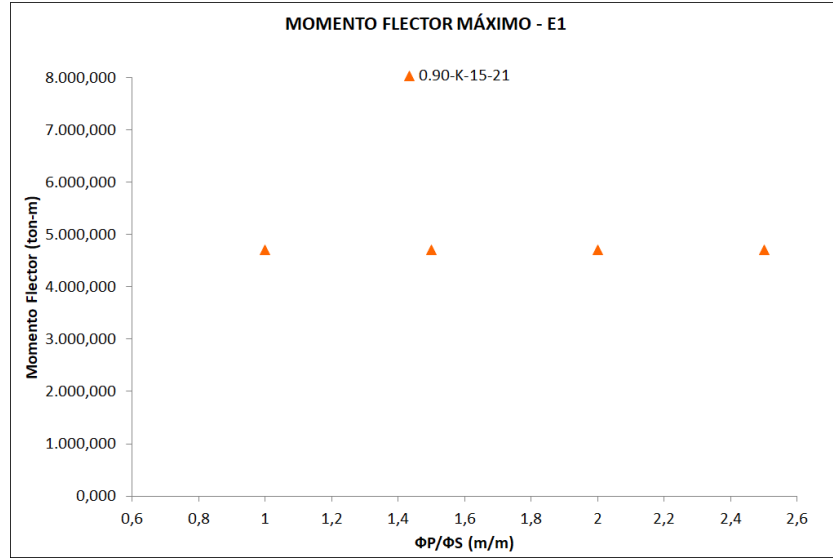


Figura N° 6.30: Momento Flector para diferentes valores de  $\Phi_P/\Phi_S$ .

En la figura N° 6.31 se puede observar el mismo escenario, momentos flectores iguales en estructuras que poseen una razón de diámetros diferente. Se puede concluir que la razón de diámetros no es un parámetro a tener en cuenta.

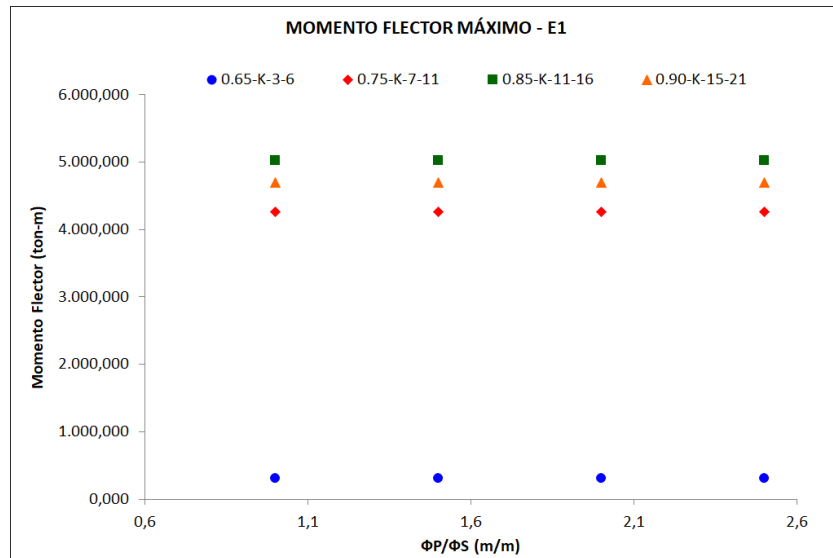


Figura N° 6.31: Variación del Momento flector en diferentes modelos parametrizados

Aunque la razón de diámetros no incide en las respuestas elásticas, esto no significa que la que las respuestas sean independientes de los diámetros que conforman dicha relación.



### 6.2.4.3 Parámetro Tipo de Arriostre.

El parámetro Arriostre si incide en la respuesta elástica de momento flector, ya que dependiendo del tipo de arriostre que se considere en la estructura esta tendrá respuestas elásticas mayores o menores (ver figura N° 6.32). Estos momentos flectores son en el elemento más cargado, al cual denominamos elemento 1 (E1).

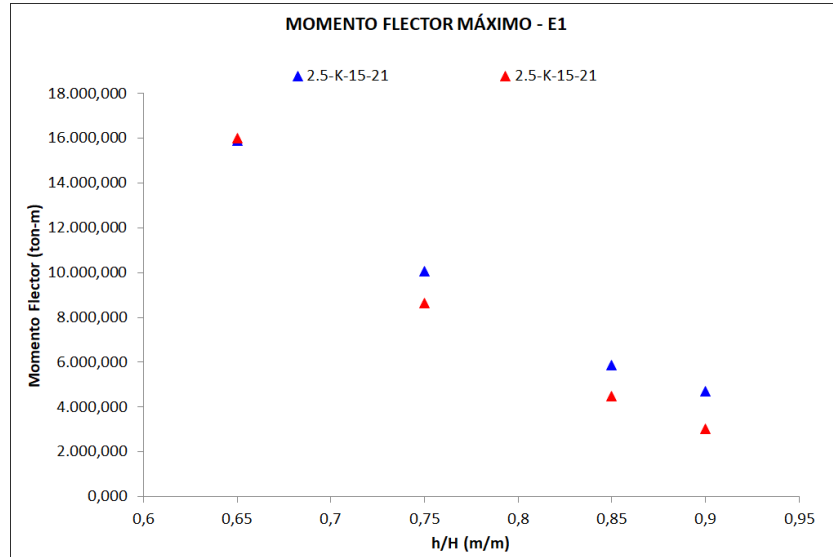


Figura N° 6.32: Momento según el tipo de arriostre en el modelo h/H-2.5-K-15-21.

En la figura N° 6.33 se muestra que la dependencia de un tipo de arriostre a otro es variable. Otro punto a tener en cuenta es que los momentos flectores en los modelos con arriostre tipo K son mayores que en los modelos con arriostre tipo X.

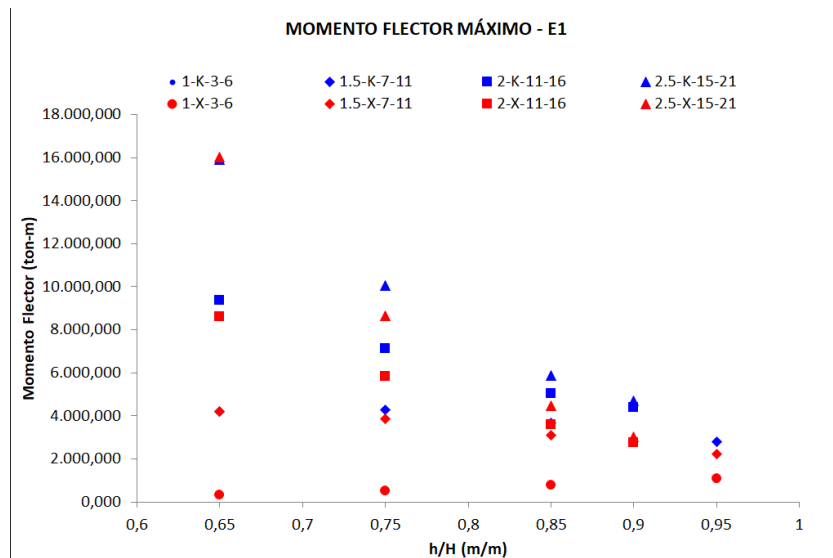


Figura N° 6.33: Variación del Momento de acuerdo al tipo de arriostre.

#### 6.2.4.4 Parámetro Amplitud de Oleaje $A_w$ .

El parámetro  $A_w$ , denominado dinámico en este trabajo, incide en el cálculo del momento flector si se tiene en cuenta cómo cambian los valores de este en el eje de ordenadas para cada valor de  $A_w$  en el eje de las abscisas (ver figura N° 6.34).

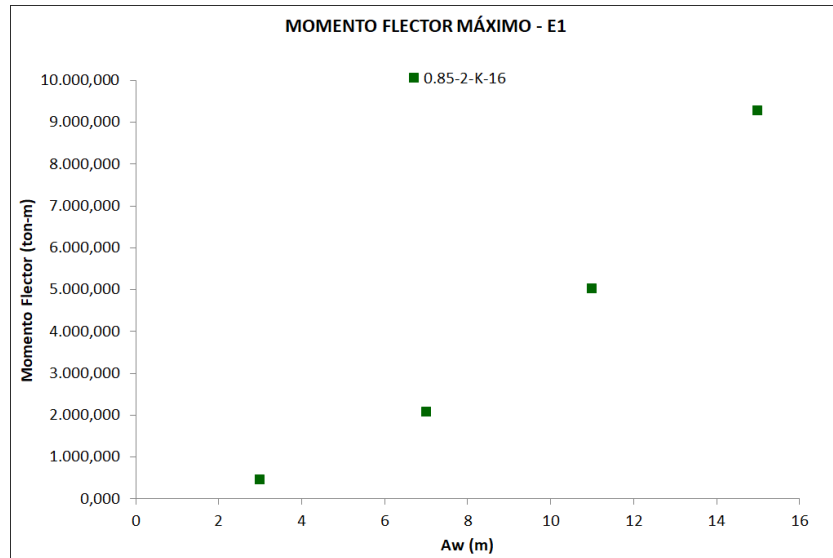


Figura N° 6.34: Momento Flector para  $A_w=3$ ,  $A_w=7$ ,  $A_w=11$  y  $A_w=15$ .

La figura N° 6.35 muestra que otros grupos de estructuras (0.65-1-K-Aw-6, 0.75-1.5-K-Aw-11, 0.85-2-K-Aw-16 y 0.90-2.5-K-Aw-21) tienen curvas similares a la figura N° 6.33. Es necesario señalar que para valores más altos de  $A_w$  las respuestas obtenidas son mucho más grandes.

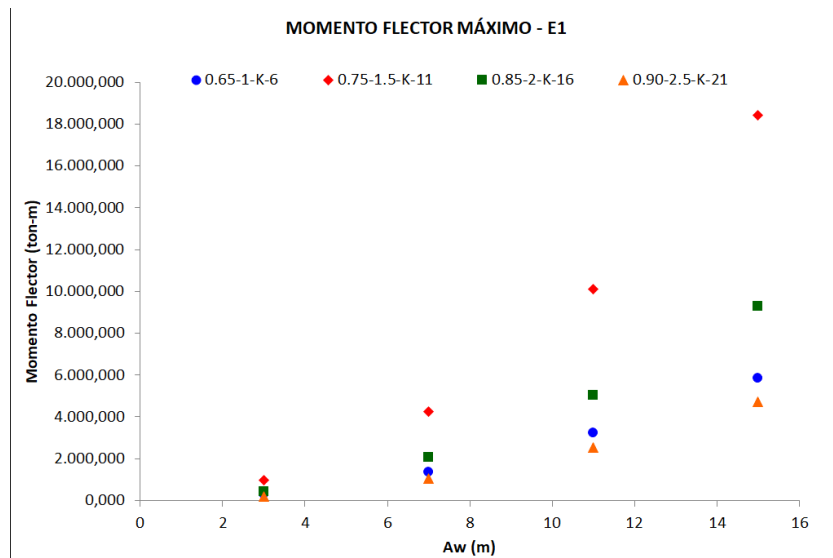


Figura N° 6.35: Momento Flector en diferentes modelos parametrizados.

#### 6.2.4.5 Parámetro Periodo de Oleaje $T_w$ .

De acuerdo con la figura N° 6.36, el momento flector varía de manera directamente proporcional al valor de  $T_w$ . El periodo de oleaje incide en un primer momento sobre la fuerza hidrodinámica, que a su vez incide sobre las respuestas elásticas de las estructuras.

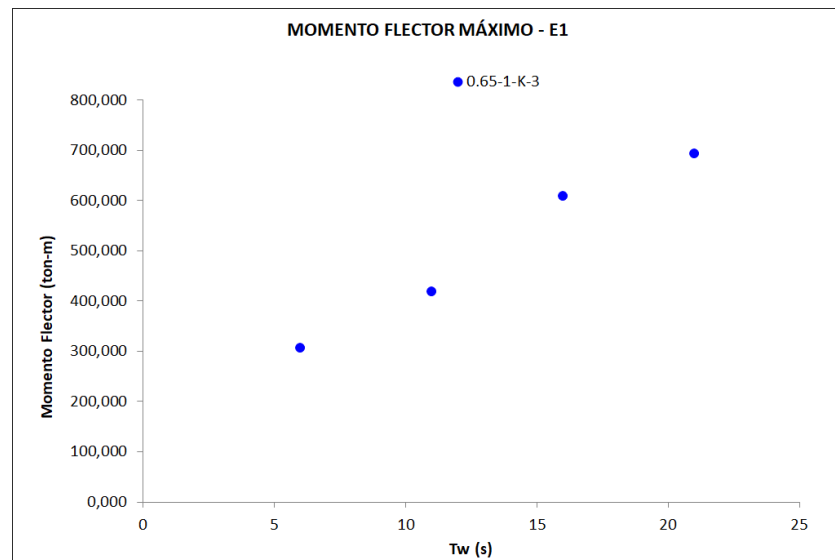


Figura N° 6.36: Momento Flector en el modelo 0.65-1-K-3-Tw.

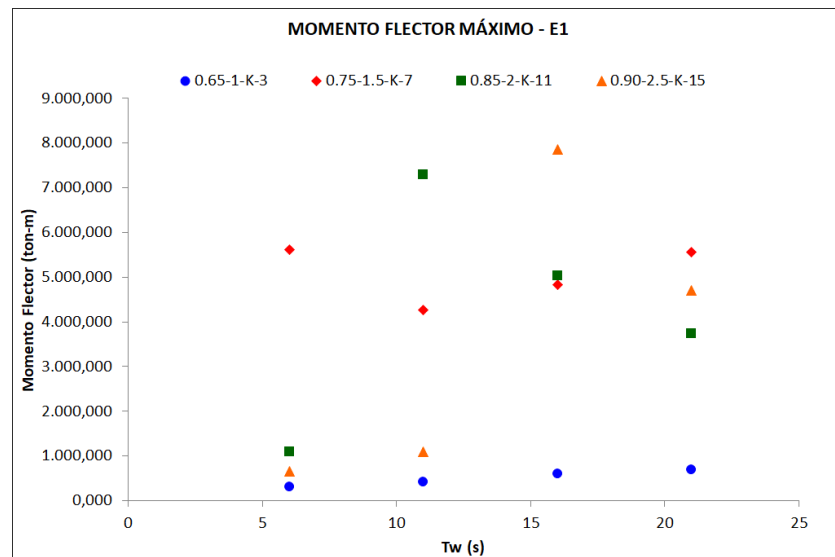


Figura N° 6.37: Variación del Momento en diferentes modelos parametrizados.

En la figura N° 6.37 se muestra que algunos grupos de estructuras presentan una variación de respuestas diferente a la presentada en la figura N° 6.36; esto se debe a que en algunos casos los periodos de las estructuras son aproximados a los valores del periodo del oleaje, lo que

genera una amplificación de las respuestas, en este caso el momento flector.

6.2.4.6 Parámetro de Sitio  $N_o$ .

Tal como sucede con los desplazamientos y fuerzas axiales, el valor de la respuesta depende del valor de  $N_o$ , logrando respuestas mayores para valores de  $N_o$  cercanos a cero y logrando valores menores para valores de  $N_o$  que se alejan del cero (ver figura N° 6.39). El gráfico muestra que cuando el suelo es muy flexible el momento flector sobre el elemento 1 es mayor que el que tomaría si el suelo es rígido y para el caso de suelos no muy flexibles el momento es menor que el de empotramiento (ver figura N° 6.38). La línea punteada corresponde a una estructura ubicada sobre un suelo rígido en el cual se considera una estructura empotrada en el suelo.

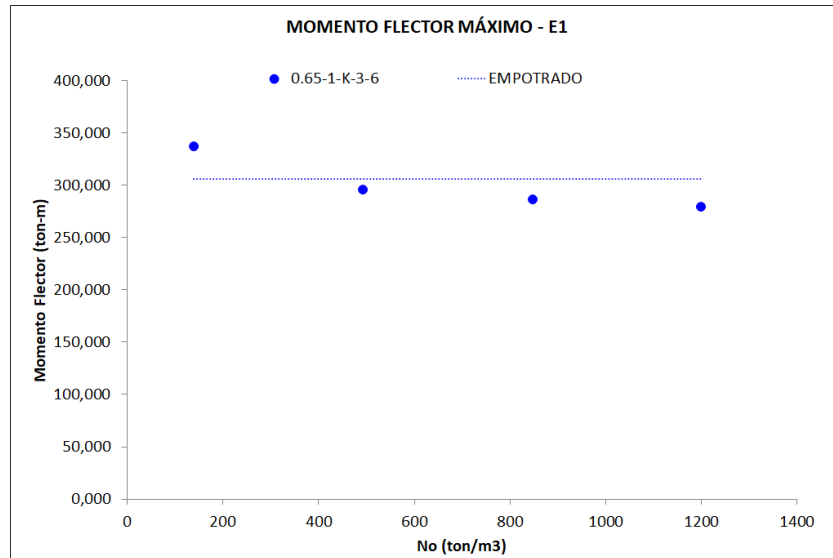


Figura N° 6.38: Momento Flector en el modelo 0.65-1-K-3-6- $N_o$ .

Es necesario señalar que los valores de  $N_o$  están expresados en  $\text{ton/m}^3$ , mientras que en otras secciones se indican en  $\text{ton}/\text{pie}^3$ .

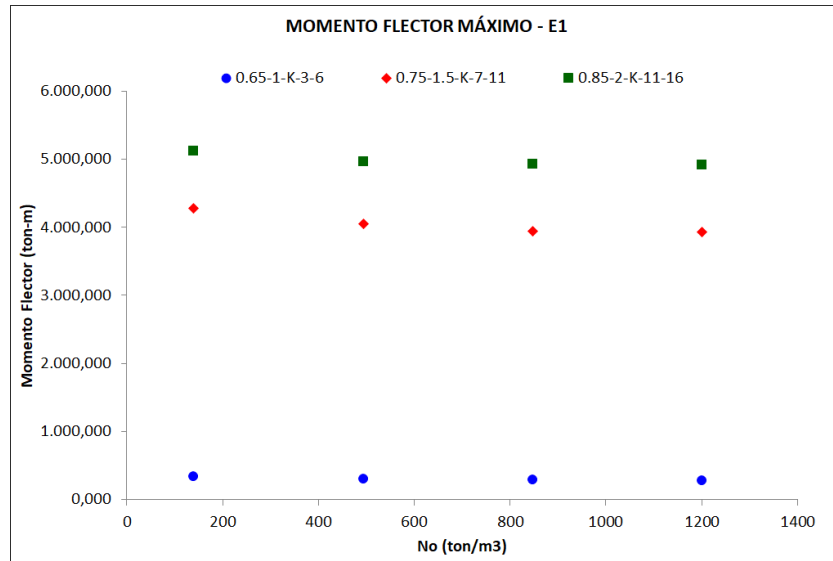


Figura N° 6.39: Momento Flector para diferentes modelos parametrizados.

## CAPÍTULO VII

### MÉTODO SIMPLIFICADO PARA EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS MARINAS

#### 7.1 OBJETIVO DEL MÉTODO SIMPLIFICADO.

El objetivo de elaborar un método simplificado es el de obtener una herramienta sencilla con la cual se puedan calcular respuestas básicas del comportamiento de la estructura de manera rápida. Este método facilitaría tareas como las evaluaciones de estructuras existentes, ya que otorgará una idea acerca de cómo es el comportamiento de la estructura y una perspectiva sobre algún posterior tratamiento como el caso de un reforzamiento o una ampliación. Otra tarea a facilitar es la de los predimensionamientos de estructuras nuevas, permitiendo estimar dimensiones de elementos que sean capaces de resistir las fuerzas y esfuerzos máximos a los que estaría sometida la estructura.

Las fórmulas que se presentarán han sido obtenidas de una manera deductiva; con la finalidad de conocer que factores y parámetros están involucrados en la estimación de las respuestas elásticas de las estructuras.

#### 7.2 ESTIMACIÓN DEL PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN.

El periodo fundamental de vibración de una estructura es una característica dinámica muy importante ya que una de las cosas que indica es cuan rígida o flexible es la estructura. Otra razón por la que es importante conocerlo, radica en la probabilidad de que ocurra resonancia en la estructura como consecuencia de una similitud entre los periodos de la estructura y el de la fuerza, en este caso el oleaje.

A partir de los modelos paramétricos analizados, se propone la Ec. (7.1) para estimar el periodo fundamental de vibración de las estructuras marinas.

$$T_{ms} = T_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a \quad (7.1)$$

La Ec. (7.1) depende de 5 factores tales como:

Nota: Se emplea el símbolo  $r$  en lugar de  $h/H$  para reducir el tamaño de las ecuaciones.

- Estimación inicial del periodo fundamental de vibración ( $T_0$ ): Esta estimación permite calcular el periodo fundamental de vibración de una manera general teniendo en cuenta la rigidez y el peso sobre la estructura.

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{2 \cdot H^3 \cdot [(1-r)^3 \cdot ((1-r) \cdot B + r \cdot b)^2 - b^2 \cdot (1-r)^3 + b^2] \cdot \left(\frac{P}{g}\right)}{3\pi \cdot b^2 \cdot E \cdot e(D-e) \cdot [(1-r) \cdot B + r \cdot b]^2}} \quad (7.2)$$

Esta estimación Inicial calculada ( $T_0$ ) debe ser corregida por otros factores para poder estimar correctamente el valor del periodo fundamental para una estructura dada.

- Factor de altura ( $f_h$ ): Este factor permite corregir la Estimación inicial del periodo fundamental de vibración considerando la altura total  $H$  (m) de una plataforma marina. Considerando los modelos paramétricos generados, el valor de este factor se ha ajustado a funciones polinómicas de la siguiente manera.

$$f_h = \frac{(m \cdot r^2 + n \cdot r + p)}{H^{0.21} r^{2.5}} \quad (7.3)$$

Donde:

$$m = (0.0006 \cdot H^2 - 0.1109 \cdot H + 6.18) \quad (7.4)$$

$$n = (-0.0007 \cdot H^2 + 0.1517 \cdot H - 9.18) \quad (7.5)$$

$$p = (0.0002 \cdot H^2 - 0.0518 \cdot H + 4.35) \quad (7.6)$$

- Factor de parámetro de Sitio  $N_o$  ( $f_{N_o}$ ): Este factor permite corregir la estimación inicial del periodo fundamental de vibración considerando la flexibilidad del suelo mediante el parámetro de sitio  $N_o$ . Cuando el valor de  $N_o$  se aleja del cero o cuando es un valor muy grande se considera un suelo rígido.

$$* \text{Empotrado} \quad N_o = 100 \quad f_{N_o} = 1 \quad (7.7)$$

$$* \text{No Empotrado} \quad f_{N_o} = f \cdot \ln N_o + g \quad (7.8)$$

$$f = 0.055 \cdot r - 0.0522 \quad (7.9)$$

$$g = -0.278 \cdot r + 1.2734 \quad (7.10)$$

- Factor relacionado al espesor ( $f_e$ ): Este factor permite corregir la estimación del periodo fundamental de vibración considerando el espesor de los elementos principales ( $e$ ) de la estructura.

$$f_e = (0.0254^3 \cdot (D - 0.0254) / (-1.378 \cdot e^2 + 0.341884 \cdot e + 0.00013))^2)^{0.5} \quad (7.11)$$

- Factor relacionado al tipo de arriostre ( $f_a$ ): Este factor permite corregir la estimación del periodo fundamental de vibración considerando el tipo de arriostramiento de los segmentos de la estructura.

$$* \text{Tipo K} \quad f_a = 1.08 \quad (7.12)$$

$$* \text{Tipo X} \quad f_a = 1.00 \quad (7.13)$$

Donde:

$T_{ms}$  = Periodo fundamental de vibración. (s)

$T_0$  = Estimación inicial del periodo fundamental de vibración. (s)

$P$  = Peso total sobre la cubierta proveniente del peso propio, carga muerta, carga de equipos y carga viva. (kg)

$E$  = Modulo de elasticidad del acero. ( $\text{ton} - \text{m}^2$ )

$k$  = Factor para la estimación del periodo fundamental de vibración.

$r$  = Razón h/H. ( $\text{m}/\text{m}$ )

$h/H$  = Parámetro geométrico que relaciona la profundidad sumergida de estructura (h) y la altura total (H) de la estructura. ( $\text{m}/\text{m}$ )

$fN_o$  = Factor relacionado al parámetro de Sitio  $N_o$ .

$N_o$  = Parámetro de sitio. ( $\text{ton}/\text{ft}^3$ )

$B$  = Base mayor. (m)

$b$  = Base menor. (m)

$f_e$  = Factor de transformación de acuerdo al espesor de los elementos.



$D$  = Diámetro externo del elemento principal. (m)

$e$  = espesor del elemento principal. (m)

$f_a$  = Factor relacionado al tipo de arriostre.

$g$  = aceleración de la gravedad. ( $m/s^2$ )

### 7.3 ESTIMACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO LATERAL MÁXIMO.

El desplazamiento lateral máximo, aquel que se da en la parte superior de la cubierta, es de particular importancia debido a su relación con la integridad de la estructura y su operación. Grandes desplazamientos laterales conllevan a grandes fuerzas y momentos sobre los elementos de la estructura, asimismo ponen en riesgo la normal operación de los equipos y comprometen la integridad de la estructura, lo que traería consecuencias ante una posible falla de la plataforma de acuerdo a su función.

Debido a la necesidad descrita, a partir de los modelos paramétricos analizados, se propone la Ec. (7.14) para estimar el desplazamiento lateral máximo en la parte superior de las plataformas marinas

$$D_{ms} = \Delta_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a \quad (7.14)$$

La Ec. (7.14) depende de 5 factores tales como:

- Estimación inicial del desplazamiento lateral ( $\Delta_0$ ): Esta estimación permite calcular el desplazamiento lateral máximo de una manera general teniendo en cuenta la rigidez lateral y la fuerza hidrodinámica del oleaje sobre la estructura.

$$\Delta_0 = \frac{r \cdot (3 - r) \cdot F}{3\pi \cdot E \cdot e(D - e) \cdot [(4 - r) \cdot B + r \cdot b]^2 \cdot H^{3.39} \cdot \beta^{0.91}} \quad (7.15)$$

Nota: Se emplea el símbolo  $r$  en lugar de  $h/H$  para reducir el tamaño de las ecuaciones.

Donde  $F$  es la fuerza de oleaje sobre los elementos principales y secundarios.

$$F = F_{Dp} + F_{Ds} \quad (7.16)$$

$$F_{Di} = D_i^{1.115} \cdot r^{0.574} \cdot H^{0.281} \cdot A_w^{0.928} \cdot T_w^{0.564} \quad (7.17)$$

- Factor de altura ( $f_h$ ): Este factor permite corregir la estimación inicial del desplazamiento máximo considerando la altura total H de una plataforma marina. Considerando los modelos paramétricos generados, el valor de este factor se ha ajustado a una función potencial de la siguiente manera.

$$f_h = 1390130.38 \cdot H^{4.235} \quad (7.18)$$

- Factor de parámetro de Sitio  $N_o$  ( $f_{No}$ ): Este factor permite corregir la estimación inicial del desplazamiento lateral máximo considerando la flexibilidad del suelo mediante el parámetro  $N_o$ . Cuando el valor de  $N_o$  se aleja del cero o cuando es un valor muy grande se considera un suelo rígido.

$$* \text{Empotrado } N_o = 100 \quad f_{No} = 1 \quad (7.19)$$

$$* \text{No Empotrado } f_{No} = f \cdot \ln N_o + g \quad (7.20)$$

$$f = 0.0014 \cdot H - 0.2806 \quad (7.21)$$

$$g = -0.0075 \cdot H + 2.5738 \quad (7.22)$$

- Factor relacionado al espesor ( $f_e$ ): Este factor permite corregir la estimación del desplazamiento lateral máximo considerando el espesor de los elementos principales de la estructura ( $e$ ).

$$f_e = 1.518 \cdot 10^{-3} \cdot B^{0.97} \cdot D^{-1.49} \cdot e^{-0.5639} \cdot l^{0.54} \quad (7.23)$$

- Factor relacionado al tipo de arriostre ( $f_a$ ): Este factor permite corregir la estimación del desplazamiento lateral máximo considerando el tipo de arriostramiento de los segmentos de la estructura.

$$* \text{Tipo K } f_a = 1.23 \quad (7.24)$$

$$* \text{Tipo X } f_a = 1.00 \quad (7.25)$$

Donde:

$D_{ms}$  = Desplazamiento lateral máximo. (m)

$\Delta_0$  = Estimación inicial del desplazamiento lateral máximo.  
(m)

$fh$  = Factor relacionado al parámetro h/H.

$r$  = Razón h/H. (m/m)

$h/H$  = Parámetro geométrico que relaciona la profundidad sumergida de estructura (h) y la altura total (H) de la estructura. (m/m)

$fN_o$  = Factor relacionado al parámetro de sitio  $N_o$ .

$N_o$  = Parámetro de sitio. (ton/ft<sup>3</sup>)

$\Delta_0$  = Factor para la estimación del desplazamiento lateral máximo.

$F$  = Fuerza total sobre los elementos principales y secundarios. (ton)

$F_{Dp}$  = Fuerza sobre elementos principales, piernas de apoyo. (ton)

$F_{Ds}$  = Fuerza sobre elementos secundarios, arriostres. (ton)

$D_i$  = Diámetro de un elemento estructural, principal o secundario. (m)

$A_w$  = Altura de la ola de diseño o de estudio. (m)

$T_w$  = Periodo de la ola de diseño o de estudio. (s)

$B$  = Base media de la estructura. (m)

$b$  = Base menor. (m)

$E$  = Modulo de elasticidad del acero. (ton/m<sup>2</sup>)

$l$  = Altura de una crujía. (ton/m<sup>2</sup>)

$D$  = Diámetro externo del elemento principal. (m)

$e$  = espesor del elemento principal. (m)

$fa$  = Factor relacionado al tipo de arriostre.

#### 7.4 ESTIMACIÓN DE LA FUERZA AXIAL MÁXIMA.

La fuerza axial sobre los elementos principales es necesaria para el diseño de los mismos.

De acuerdo a los modelos estudiados, se propone la Ec. (7.26) que permite estimar el valor de la fuerza axial máxima en los elementos de apoyo y está dada por:

$$N_{ms} = N_1 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a \quad (7.26)$$

La Ec. (7.26) depende de 5 factores tales como:

- Estimación inicial de la fuerza axial ( $N_1$ ): Esta estimación permite calcular la fuerza axial sobre el elemento principal más cargado de una manera general teniendo en cuenta el desplazamiento lateral del elemento y la rigidez lateral del elemento.

$$N_1 = \frac{r \cdot (3 - r) \cdot F}{3\pi \cdot E \cdot e \cdot (D - e) \cdot [(4 - r) \cdot B + r \cdot b]^2 \cdot H^{3.39} \cdot \beta^{-0.32}} \quad (7.27)$$

Nota: Se emplea el símbolo  $r$  en lugar de  $h/H$  para reducir el tamaño de las ecuaciones.

Donde  $F$  es la fuerza de oleaje sobre los elementos principales y secundarios.

$$F = F_{Dp} + F_{Ds} \quad (7.28)$$

$$F_{Di} = D_i^{1.115} \cdot r^{0.574} \cdot H^{0.281} \cdot A_w^{0.928} \cdot T_w^{0.564} \quad (7.29)$$

- Factor de altura ( $f_h$ ): Este factor permite corregir la estimación de la fuerza axial inicial considerando la altura total  $H$  de una plataforma marina. Considerando los modelos paramétricos generados, el valor de este factor se ha ajustado a una función potencial de la siguiente manera.

$$f_h = 367906.40 \cdot H^{6.0245} \quad (7.30)$$

- Factor de parámetro de Sitio  $N_o$  ( $f_{No}$ ): Este factor permite corregir la estimación inicial de la fuerza axial considerando la flexibilidad del suelo mediante el parámetro de Sitio  $N_o$ . Cuando el valor de  $N_o$  se aleja del cero o cuando es un valor muy grande se considera un suelo rígido.

$$* \text{Empotrado } N_o = 100 \quad f_{N_o} = 1 \quad (7.31)$$

$$* \text{No Empotrado } f_{N_o} = a \cdot \ln N_o + b \quad (7.32)$$

$$a = 0.0193 - \frac{6.4396}{H} \quad (7.33)$$

$$b = 0.9127 + \frac{31.494}{H} \quad (7.34)$$

- Factor relacionado al espesor ( $f_e$ ): Este factor permite corregir la estimación inicial de la fuerza axial considerando el espesor de los elementos principales de la estructura ( $e$ ).

$$f_e = 3.52 \cdot 10^{-2} \cdot B^{2.04} \cdot D^{-0.57} \cdot e^{-0.478} \cdot l^{-1.85} \quad (7.35)$$

- Factor relacionado al tipo de arriostre ( $f_a$ ): Este factor permite corregir la estimación de la fuerza axial considerando el tipo de arriostramiento de los segmentos de la estructura.

$$* \text{Tipo K } f_a = 0.98 \quad (7.36)$$

$$* \text{Tipo X } f_a = 1.00 \quad (7.37)$$

Donde:

$N_{ms}$  = Máxima fuerza Axial. (ton)

$N_1$  = Estimación inicial de la fuerza axial máxima. (ton)

$r$  = razón h/H. (m/m)

$fh$  = Factor relacionado al parámetro geométrico h/H.

$h/H$  = Parámetro geométrico que relaciona la profundidad sumergida de estructura (h) y la altura total (H) de la estructura. (m/m)

$f_{N_o}$  = Factor relacionado al parámetro de Sitio  $N_o$ .

$N_o$  = Parámetro de sitio. (ton/ft<sup>3</sup>)

$F$  = Fuerza total sobre los elementos principales y secundarios. (ton)

$F_{Dp}$  = Fuerza sobre elementos principales, piernas de apoyo. (ton)

$F_{Ds}$  = Fuerza sobre elementos secundarios, arriostres. (ton)

$D_i$  = Diámetro de un elemento estructural, principal o secundario. (m)

$A_w$  = Altura de la ola de diseño o de estudio. (m)

$T_w$  = Periodo de la ola de diseño o de estudio. (s)

$B$  = Base media de la estructura. (m)

$b$  = Base menor. (m)

$E$  = Modulo de elasticidad del acero. (ton/m<sup>2</sup>)

$D$  = Diámetro externo del elemento principal. (m)

$e$  = espesor del elemento principal. (m)

$f_a$  = Factor relacionado al tipo de arriostre.

## 7.5 ESTIMACIÓN DEL MOMENTO FLECTOR MÁXIMO.

El momento flector sobre los elementos principales es necesario para la evaluación de la capacidad de la plataforma marina.

De acuerdo a los modelos estudiados, se propone la Ec. (7.38) que permite estimar el valor del momento flector máximo en los elementos de apoyo está dada por:

$$M_{ms} = M_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a \quad (7.38)$$

La Ec. (7.38) depende de 5 factores tales como:

- Estimación inicial del momento flector ( $M_0$ ): Este factor permite estimar el momento flector sobre el elemento principal más cargado de una manera general teniendo en cuenta el desplazamiento lateral del elemento y la rigidez lateral del elemento.

$$M_0 = \frac{r^{-0.75} \cdot (D^{-2.39} + e^{-2.39}) \cdot F}{3\pi \cdot E \cdot e \cdot (D - e) \cdot [(4 - r) \cdot B + r \cdot b]^{2.78} \cdot \beta^{-2}} \quad (7.39)$$

Donde F es la fuerza de oleaje sobre los elementos principales y secundarios.

$$F = F_{Dp} + F_{Ds} \quad (7.40)$$

$$F_{Di} = D_i^{1.115} \cdot r^{0.574} \cdot H_i^{0.281} \cdot A_w^{0.928} \cdot T_w^{0.564} \quad (7.41)$$

- Factor de altura ( $f_h$ ): Este factor permite corregir la estimación del momento flector considerando la altura total H de una plataforma

marina. Considerando los modelos paramétricos generados, el valor de este factor se ha ajustado a una función potencial de la siguiente manera.

$$f_h = 10.7 \cdot H^{3.59} \quad (7.42)$$

- Factor de parámetro de Sitio  $N_o$  ( $f_{No}$ ): Este factor permite corregir la estimación del momento flector máximo considerando la flexibilidad del suelo mediante el parámetro de Sitio  $N_o$ . Cuando el valor de  $N_o$  se aleja del cero o cuando es un valor muy grande se considera un suelo rígido.

$$* \text{Empotrado} \quad N_o = 100 \quad f_{No} = 1 \quad (7.43)$$

$$* \text{No Empotrado} \quad f_{No} = a \cdot \ln N_o + b \cdot H^{0.5} \quad (7.44)$$

$$a = 0.0007 \cdot H - 0.1434 \quad (7.45)$$

$$b = -0.0007 \cdot H + 0.1878 \quad (7.46)$$

- Factor relacionado al espesor ( $f_e$ ): Este factor permite corregir la estimación inicial del momento flector considerando el espesor de los elementos principales de la estructura ( $e$ ).

$$f_e = 1.88 \cdot 10^{-8} \cdot B^{5.5} \cdot D^{-1.36} \cdot e^{-1.4993} \cdot l^{-2.72} \quad (7.47)$$

- Factor relacionado al tipo de arriostre ( $f_a$ ): Este factor permite corregir la estimación del momento flector considerando el tipo de arriostramiento de los segmentos de la estructura.

$$* \text{Tipo K} \quad f_a = 1.18 \quad (7.48)$$

$$* \text{Tipo X} \quad f_a = 1.00 \quad (7.49)$$

Donde:

$M_{ms}$  = Máximo Momento Flector. (ton – m)

$M_0$  = Estimación inicial del momento flector. (ton – m)

$r$  = razón h/H. (m/m)

$f_h$  = Factor relacionado al parámetro h/H.

$h/H$  = Parámetro que relaciona la profundidad sumergida de estructura (h) y la altura total (H) de la estructura. (m/m)

$f_{N_o}$  = Factor relacionado al parámetro  $N_o$ .

$N_o$  = Parámetro de sitio. ( $ton/ft^3$ )

$F$  = Fuerza total sobre los elementos principales y secundarios. ( $ton$ )

$F_{Dp}$  = Fuerza sobre elementos principales, piernas de apoyo. ( $ton$ )

$F_{Ds}$  = Fuerza sobre elementos secundarios, arriostres. ( $ton$ )

$D_i$  = Diámetro de un elemento estructural, principal o secundario. ( $m$ )

$A_w$  = Altura de la ola de diseño o de estudio. ( $m$ )

$T_w$  = Periodo de la ola de diseño o de estudio. ( $s$ )

$B$  = Base media de la estructura. ( $m$ )

$b$  = Base menor. ( $m$ )

$E$  = Modulo de elasticidad del acero. ( $ton/m^2$ )

$D$  = Diámetro externo del elemento principal. ( $m$ )

$e$  = espesor del elemento principal. ( $m$ )

$fa$  = Factor relacionado al tipo de arriostre.

## 7.6 EVALUACIÓN DEL MÉTODO SIMPLIFICADO

El método simplificado aquí propuesto debe ser evaluado para conocer su precisión y su confiabilidad; es por ello que es necesario realizar una comparación entre las respuestas de las estructuras que fueron consideradas como reales y las respuestas obtenidas de aplicar el método simplificado.

Se utiliza la Ec. (7.50) para calcular los errores relativos que se obtiene al aplicar el método simplificado.

$$\% \text{ error relativo} = \left( \frac{\text{Valor}_{real} - \text{Valor}_{ms}}{\text{Valor}_{real}} \right) \cdot 100 \quad (7.50)$$

Donde  $\text{Valor}_{real}$  es la respuesta que se considera como real, mientras que el  $\text{Valor}_{ms}$  es el valor estimado con el método simplificado.



A continuación, se muestran los errores que se obtienen al aplicar las ecuaciones del método simplificado sobre 30 casos de los modelos estudiados.

Donde los términos  $T_{real}$ ,  $D_{real}$ ,  $N_{real}$  y  $M_{real}$  corresponden a las respuestas reales de las estructuras, mientras que  $T_{ms}$ ,  $D_{ms}$ ,  $N_{ms}$  y  $M_{ms}$  son las estimaciones realizadas a través del método simplificado.

El Cuadro 7.1 muestra los errores relativos obtenidos en la estimación del periodo fundamental de vibración de las plataformas.

Tal como se puede observar en la estimación del periodo fundamental de la estructura se obtienen errores relativos de hasta 12.50%, un error admisible en términos de ingeniería.

El Cuadro 7.2 muestra los errores relativos obtenidos en la estimación del desplazamiento lateral máximo en la parte superior de las plataformas.

En la estimación del desplazamiento máximo de la estructura se obtienen errores relativos de hasta 30.24%. Esto debido a que la importancia de los modos de vibración varía de acuerdo a la distribución de masas.

El Cuadro 7.3 muestra los errores relativos obtenidos en la estimación de la fuerza axial máxima en el elemento principal más cargado.

En la estimación de la fuerza axial sobre los elementos verticales de la estructura se obtienen errores relativos de hasta 32.24%.

El Cuadro 7.4 muestra los errores relativos obtenidos en la estimación del momento flector sobre el elemento principal en el apoyo que se considera empotrado.

En la estimación del máximo momento flector sobre los elementos verticales de la estructura se obtienen errores relativos de hasta 29.02%.

Cuadro 7.1: Resumen de errores relativos en la estimación del periodo fundamental de vibración (Elaboración propia).

Identificación	$T_{\text{real}}$	$T_{\text{ms}}$	Error relativo %
Caso 1	1.91	1.85	3.14
Caso 2	1.86	1.80	3.23
Caso 3	1.83	1.78	2.73
Caso 4	1.81	1.76	2.76
Caso 5	1.81	1.75	3.31
Caso 6	1.63	1.54	5.52
Caso 7	0.75	0.79	5.33
Caso 8	0.73	0.77	5.48
Caso 9	0.72	0.76	5.56
Caso 10	0.71	0.75	5.63
Caso 11	0.71	0.74	4.23
Caso 12	0.64	0.67	4.69
Caso 13	1.10	0.97	11.82
Caso 14	1.07	0.94	12.15
Caso 15	1.05	0.92	12.38
Caso 16	1.05	0.92	12.38
Caso 17	1.04	0.91	12.50
Caso 18	0.92	0.87	5.43
Caso 19	3.94	4.37	10.91
Caso 20	3.86	4.29	11.14
Caso 21	3.82	4.25	11.26
Caso 22	3.80	4.23	11.32
Caso 23	3.80	4.21	10.79
Caso 24	3.80	4.00	5.26
Caso 25	3.05	3.13	2.62
Caso 26	3.00	3.09	3.00
Caso 27	2.99	3.07	2.68
Caso 28	2.98	3.05	2.35
Caso 29	2.97	3.04	2.36
Caso 30	2.82	2.92	3.55

Cuadro 7.2: Resumen de errores relativos en la estimación del desplazamiento máximo (Elaboración propia).

Identificación	$D_{real}$	$D_{ms}$	Error relativo %
Caso 1	0.092	0.114	23.80
Caso 2	0.083	0.100	21.11
Caso 3	0.079	0.094	18.49
Caso 4	0.077	0.090	16.02
Caso 5	0.076	0.086	13.94
Caso 6	0.056	0.059	5.54
Caso 7	0.021	0.024	10.73
Caso 8	0.019	0.021	7.30
Caso 9	0.019	0.020	3.90
Caso 10	0.018	0.019	1.63
Caso 11	0.018	0.018	0.60
Caso 12	0.013	0.012	5.71
Caso 13	0.093	0.121	30.24
Caso 14	0.087	0.108	24.18
Caso 15	0.084	0.101	19.98
Caso 16	0.083	0.097	16.93
Caso 17	0.082	0.094	14.51
Caso 18	0.066	0.067	1.49
Caso 19	0.243	0.313	28.83
Caso 20	0.226	0.289	28.06
Caso 21	0.219	0.278	26.76
Caso 22	0.215	0.270	25.63
Caso 23	0.215	0.264	22.98
Caso 24	0.215	0.208	3.07
Caso 25	0.328	0.266	18.85
Caso 26	0.314	0.274	12.66
Caso 27	0.308	0.278	9.81
Caso 28	0.305	0.280	7.98
Caso 29	0.302	0.282	6.55
Caso 30	0.271	0.277	2.12

Cuadro 7.3: Resumen de errores relativos en la estimación de la fuerza axial máxima (Elaboración propia).

Identificación	$N_{real}$	$N_{ms}$	Error relativo %
Caso 1	212.548	222.140	4.51
Caso 2	198.550	201.690	1.58
Caso 3	195.310	191.970	1.71
Caso 4	193.150	185.530	3.95
Caso 5	191.170	180.700	5.48
Caso 6	164.660	153.200	6.96
Caso 7	114.810	142.340	23.98
Caso 8	111.790	130.700	16.92
Caso 9	109.990	125.170	13.80
Caso 10	109.030	121.500	11.44
Caso 11	108.580	118.760	9.38
Caso 12	96.650	102.997	6.57
Caso 13	644.390	852.160	32.24
Caso 14	660.980	799.020	20.88
Caso 15	660.470	773.760	17.15
Caso 16	657.710	757.020	15.10
Caso 17	654.650	744.480	13.72
Caso 18	663.540	671.070	1.13
Caso 19	587.110	641.270	9.22
Caso 20	571.790	621.330	8.66
Caso 21	565.570	611.860	8.18
Caso 22	561.740	605.580	7.80
Caso 23	561.740	600.870	6.97
Caso 24	561.740	571.070	1.66
Caso 25	6596.520	7073.230	7.23
Caso 26	6645.330	7001.760	5.36
Caso 27	6691.980	6967.780	4.12
Caso 28	6715.230	6945.260	3.43
Caso 29	6729.110	6928.390	2.96
Caso 30	6919.770	6787.920	1.91

Cuadro 7.4: Resumen de errores relativos en la estimación del momento flector  
(Elaboración propia).

Identificación	$M_{real}$	$M_{ms}$	Error relativo %
Caso 1	97.350	85.220	12.46
Caso 2	91.200	73.810	19.07
Caso 3	89.090	68.390	23.23
Caso 4	88.250	64.790	26.58
Caso 5	87.470	62.090	29.02
Caso 6	85.200	96.090	12.78
Caso 7	102.380	99.320	2.99
Caso 8	99.340	87.270	12.15
Caso 9	95.450	81.530	14.58
Caso 10	94.600	77.730	17.83
Caso 11	94.390	74.890	20.66
Caso 12	84.000	106.010	26.20
Caso 13	844.230	1045.390	23.83
Caso 14	959.660	942.380	1.80
Caso 15	957.690	893.400	6.71
Caso 16	928.830	860.950	7.31
Caso 17	909.120	836.640	7.97
Caso 18	1087.390	1020.480	6.15
Caso 19	799.020	880.210	10.16
Caso 20	761.830	829.410	8.87
Caso 21	750.150	805.260	7.35
Caso 22	745.150	789.250	5.92
Caso 23	745.150	777.260	4.31
Caso 24	745.150	839.520	12.66
Caso 25	1538.880	1609.110	4.56
Caso 26	1658.910	1644.020	0.90
Caso 27	1717.980	1660.620	3.34
Caso 28	1746.560	1671.610	4.29
Caso 29	1764.080	1679.850	4.77
Caso 30	3343.600	3118.260	6.74

## 7.7 APLICACIONES DEL MÉTODO SIMPLIFICADO

Las ecuaciones obtenidas con el método simplificado permiten obtener las respuestas elásticas sobre una estructura real, por ello se aplican sobre las estructuras empleadas en la bibliografía.

A continuación, se muestran los cálculos sobre la estructura J2 de la bibliografía:

### Datos:

$$H= 51.0 \text{ m} \quad h=35.0 \text{ m} \quad \phi_P= 850 \text{ mm} \quad \phi_S= 600 \text{ mm}$$

$$e_P= 25 \text{ mm} \quad B= 18 \text{ m} \quad b= 7 \text{ m} \quad \text{Tipo de arriostre}= K$$

$$A_w= 3 \text{ m} \quad T_w= 9 \text{ m} \quad N_0 \gg 34 \text{ ton/pie}^3 \text{ (Empotrado)}$$

Peso= 180 ton

### Estimación del Periodo fundamental de vibración:

Aplicando la ecuación 7.2 se calcula el valor de  $T_0$ :

$$T_0= 0.685$$

A continuación se calculan los valores de modificación de la estimación inicial  $T_0$ :

Mediante la ecuación 7.3 se calcula el valor de  $f_h$ :

$$f_h= 1.718$$

La estructura se considera empotrada por lo que el factor  $f_{N_0}= 1$ .

El factor  $f_e$  se estima mediante la ecuación 7.11 obteniéndose:

$$f_e= 0.47$$

El efecto del tipo de arriostre se expresa a través del factor  $f_a$ :

$$f_a= 1.08$$

El periodo estimado mediante el método simplificado se obtiene multiplicando los valores obtenidos previamente:

$$T_{ms} = T_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a = 0.685 \times 1.718 \times 0.47 \times 1.08$$

$$T_{ms} = 0.60 \text{ s}$$

#### Estimación del Desplazamiento lateral máximo:

Aplicando la ecuación 7.15 se calcula el valor de  $\Delta_0$ :

$$\Delta_0 = 8.868 \times 10^{-16}$$

A continuación se calculan los valores de modificación de la estimación inicial  $\Delta_0$ :

$$\beta = \frac{T_w}{T_{ms}} = 9/0.60 = 15$$

Mediante las ecuaciones 7.16 y 7.17 se calculan el valor las fuerzas y la fuerza total:

$$F_{Dp} = 19.41 \text{ ton}$$

$$F_{Ds} = 13.17 \text{ ton}$$

$$F = F_{Dp} + F_{Ds}$$

$$F = 32.59 \text{ ton}$$

Mediante la ecuación 7.18 se calcula el valor de  $f_h$ :

$$f_h = 2.3693 \times 10^{13}$$

La estructura se considera empotrada por lo que el factor  $f_{No} = 1$ .

El factor  $f_e$  se estima mediante la ecuación 7.23 obteniéndose:

$$f_e = 0.886$$

El efecto del tipo de arriostre se expresa a través del factor  $f_a$ :

$$f_a = 1.23$$

El desplazamiento lateral máximo estimado mediante el método simplificado se obtiene multiplicando los valores obtenidos previamente:

$$D_{ms} = \Delta_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a$$

$$D_{ms} = 0.0114 \text{ m}$$

### Estimación de la Fuerza axial máxima:

Aplicando la ecuación 7.26 se calcula el valor de  $N_1$ :

$$N_1 = 2.48 \times 10^{-14}$$

A continuación se calculan los valores de modificación de la estimación inicial  $\Delta_0$ :

$$\beta = \frac{T_w}{T_{ms}} = 9/0.60 = 15$$

Mediante las ecuaciones 7.28 y 7.29 se calculan las fuerzas:

$$F_{Dp} = 19.41 \text{ ton}$$

$$F_{Ds} = 13.17 \text{ ton}$$

$$F = F_{Dp} + F_{Ds}$$

$$F = 32.59 \text{ ton}$$

Mediante la ecuación 7.30 se calcula el valor de  $f_h$ :

$$f_h = 7.13 \times 10^{15}$$

La estructura se considera empotrada por lo que el factor  $f_{No} = 1$ .

El factor  $f_e$  se estima mediante la ecuación 7.35 obteniéndose:

$$f_e = 1.157$$

El efecto del tipo de arriostre se expresa a través del factor  $f_a$ :

$$f_a = 0.98$$

La fuerza axial máxima sobre el elemento más cargado estimada mediante el método simplificado se obtiene multiplicando los valores obtenidos previamente:

$$N_{ms} = \Delta_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a$$

$$N_{ms} = 100 \text{ Ton}$$



Estimación del Momento Flector máximo:

Aplicando la ecuación 7.39 se calcula el valor de  $M_0$ :

$$M_0 = 3.15 \times 10^{-4}$$

A continuación se calculan los valores de modificación de la estimación inicial  $\Delta_0$ :

$$\beta = \frac{T_w}{T_{ms}} = 9/0.60 = 15$$

Mediante las ecuaciones 7.40 y 7.41 se calculan las fuerzas:

$$F_{Dp} = 19.41 \text{ ton}$$

$$F_{Ds} = 13.17 \text{ ton}$$

$$F = F_{Dp} + F_{Ds}$$

$$F = 32.59 \text{ ton}$$

Mediante la ecuación 7.42 se calcula el valor de  $f_h$ :

$$f_h = 1.44 \times 10^7$$

La estructura se considera empotrada por lo que el factor  $f_{No} = 1$ .

El factor  $f_e$  se estima mediante la ecuación 7.47 obteniéndose:

$$f_e = 0.036$$

El efecto del tipo de arriostre se expresa a través del factor  $f_a$ :

$$f_a = 1.18$$

El momento flector máximo sobre el elemento más cargado estimado mediante el método simplificado se obtiene multiplicando los valores obtenidos previamente:

$$M_{ms} = \Delta_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a$$

$$M_{ms} = 97.1 \text{ Ton-m}$$

Las respuestas reales obtenidas de un análisis completo de la estructura se pueden extraer del caso 12 de los cuadros 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4.

Cuadro 7.5: Resumen de errores relativos en las respuestas elásticas del modelo J2 (Elaboración propia).

Respuesta	Real	Método simplificado	Error relativo %
Periodo (s)	0.64	0.60	6.25
Desplazamiento lateral máximo (m)	0.0130	0.0114	12.3
Fuerza axial Máxima* (Ton)	96.65	100	3.47
Momento flector máximo* (Ton-m)	84	97.1	15.6

\*Respuestas en el elemento más cargado.

Al ser considerada la fuerza de oleaje la principal fuerza a la que estará sometida la estructura, el método simplificado resulta útil en el pre-dimensionamiento de una estructura ante fuerzas de oleaje, cuando la información que se maneja no es del todo confiable. A pesar de la dispersión que pueden tener sus estimaciones, los resultados resultan ser una guía en cuanto a lo que se espera de las respuestas de la estructura.

El método también es útil para realizar evaluaciones estructurales y propuestas de reforzamiento a estructuras ya existentes, necesarias cuando las condiciones de operación cambian, tal como una ampliación de la operación de la plataforma o un cambio de uso.

Actualmente muchas plataformas cambian de uso por diversas razones, como por ejemplo el fin de la producción, motivo por el cual las plataformas son empleadas para otros fines que podrían no estar relacionados con el fin inicial para el cual fueron construidas. Uno de esos fines puede ser el turístico o habitacional entre otros. Por lo tanto, es necesario analizar la estructura para su nuevo uso y las condiciones de operación, y es aquí donde el método resulta una forma rápida de conocer las respuestas dinámicas tales como el periodo y los desplazamientos entre otros.

## CONCLUSIONES

### De la fuerza de oleaje

- El uso de una fuerza equivalente polinomial en el modelo estructural permite que a través de una ligera variación de la fuerza de oleaje total se logre un análisis estructural eficaz, en comparación a los métodos tradicionales.

### Del modelo paramétrico

- El modelo paramétrico representa al armazón como una viga en voladizo con una masa concentrada en el extremo, sujeta a cargas puntuales de manera adecuada.
- La rigidez a la flexión del armazón permite obtener una buena aproximación para obtener las respuestas tal y como lo demuestran las ecuaciones derivadas en el capítulo 4.

### De las respuestas

- La profundidad sumergida de la plataforma y la masa de agua asociada a los elementos sumergidos ejercen influencia sobre el periodo fundamental de vibración de la estructura marina.
- A partir de las respuestas obtenidas en el análisis de las plataformas se observa que las plataformas marinas son susceptibles a la amplificación dinámica cuando el periodo del oleaje y el periodo de la estructura son similares.
- Los parámetros considerados en este estudio efectivamente ejercen una influencia en las respuestas de las estructuras; sin embargo, el parámetro de relación de diámetros entre elementos es un parámetro que no tiene mucha influencia en la estimación de las respuestas teniendo en cuenta los modelos considerados y las simplificaciones realizadas.

### Del método simplificado

- El método simplificado resulta ser directo en la estimación de las respuestas en estudio con una aproximación válida para los estudios previos de las plataformas marinas.
- De las ecuaciones propuestas en el método simplificado, el parámetro  $h/H$  y la altura total  $H$  son de gran relevancia en el cálculo de las respuestas elásticas de las plataformas.
- El método simplificado estima las respuestas de la estructura con una precisión aceptable en concordancia con su objetivo inicial.
- Los errores relativos al estimar el periodo fundamental de vibración alcanzan un valor máximo de 12.50%.
- Los errores relativos al estimar el desplazamiento lateral máximo alcanzan un valor máximo de 30.24%.
- Los errores relativos al estimar la fuerza axial máxima alcanzan un valor máximo de 32.24%.
- Los errores relativos al estimar el momento flector máximo alcanzan un valor máximo de 29.02%.

## RECOMENDACIONES

### Del modelo estructural

- Se recomienda analizar las estructuras mediante un modelo tridimensional con la finalidad de estudiar el efecto de la torsión sobre la estructura y el efecto del ángulo de incidencia de la fuerza de oleaje en el comportamiento de las plataformas.
- Se recomienda considerar un modelo que incluya la interacción suelo estructura para mejorar la precisión de las respuestas de las estructuras.

### Del modelo parametrizado

- Se recomienda ampliar el presente estudio considerando estructuras de más de 2 piernas en un mismo plano.
- Se recomienda considerar otros tipos de arriostres.

### De las respuestas

- Se recomienda analizar la influencia de otros parámetros como la longitud de anclaje de los elementos verticales en las repuestas de la estructura tales como periodo, desplazamiento, fuerza axial y momento flector.
- Se recomienda analizar las respuestas para la etapa de construcción y montaje de la superestructura en las cuales la distribución de la masa y rigidez sean diferentes.

## BIBLIOGRAFIA

1. *American Petroleum Institute (2000)* Recommended practice for planning designing and constructing fixed offshore platforms – Working stress design. API. Washington D.C.
2. Asgarian B., Mohebbnejad A., Soltani R.H. (2004) Simplified method to assess dynamic response of jacket type offshore platforms subjected to wave loading. Proceedings of 23<sup>rd</sup> offshore mechanics and arctic engineering. American society of mechanical engineers - ASME. New York.
3. *Beltrán, F. y Cerrolaza, M. (1989)* Análisis dinámico de estructuras sometidas a cargas no lineales. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol.5. Cataluña.
4. *Byrd R.C., Miller D.J., Wiese S.M. (2014)*. Cost estimating for offshore oil & gas facility decommissioning. American association of cost engineers - AACE. West Virginia.
5. *Chakrabarti, Subrata K. (2005)* Handbook offshore engineering. Elsevier. Illinois.
6. *Connor J. (1980)* Response of fixed offshore structure in random sea. Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 8. John Wiley & Sons. New York.
7. *Connor J. y Sunder (1981)* Sensivity analyses for steel jacket offshore platforms. Applied Ocean Research, Vol. 3. Elsevier. Massachusetts.
8. *Ghassemi S.M., Payambarnia P., Baghdar R. S. & Alikhani E.T. (2014)* Finite element analysis of offshore jacket affected by marine forces. Academy for environment and life sciences. Agra.
9. *Gerwick, B.C. (2007)* Construction of Marine and Offshore Structures. CRC Press Taylor y Francis Group. San Francisco.
10. *Harish N., Mandal S., Shanthala B., Subba R. (2010)* Analysis of offshore Jacket Platform. International conference on sustainable water resources management. Surathkal.
11. *Haritos N. (2007)* Introduction to the Analysis and Design of Offshore Structures– An Overview. Electronic Journal of Structural Engineering. Melbourne.

12. Hegde V. y Jadhav S., (2012) Modal analysis of Jacket Offshore structures software development. ISH Journal of Hydraulic Engineering. Karnataka.
13. ITEA (s.f.) Sistemas estructurales: Plataformas petrolíferas. Instituto técnico de la estructura en acero. Navarra.
14. Kharade A.S. y Kapadiya S.V. (2014) offshore engineering: An overview of types and loadings on structures. International Journal of structural and civil engineering research. Warananagar.
15. Mather, Angus (1995) Offshore Engineering - An Introduction. Whiterby & Company Limited. Londres.
16. Mohan P., Sidhaart A. y Kumar S. (2013) Modeling and analysis of offshore jacket platform. International Journal of Advances in engineering & technology. TamilNadu.
17. Morison J.R. O'Brien M.P., Johnson J.W. y Schaaf S.A. (1950) The force exerted by surface waves on piles. Petroleum transactions. American institute of mining engineers. California.
18. Nasser T., Shabakhty N. y Hadi A.M. (2014) Study of fixed jacket offshore platform in the optimization design process under environmental loads. International Journal of Maritime Technology.
19. Sarpakaya, T. (2010) Wave forces on offshore structures. Cambridge University Press. Cambridge.
20. Sunder S., and Connor J. J. (1981) Sensivity Analyses for Steel Jacket Offshore Platforms. MIT. Cambridge.
21. Turello D. F., Pinto F. y Sánchez J. Modelación de la interacción suelo-pilote en pilotes cargados lateralmente mediante elementos de viga embebidos en sólidos. Asociación argentina de mecánica computacional. Santa Fe.
22. Wilson, J.F. (2003) Dynamics of Offshore Structures. John Wiley & Sons, Inc. New York.
23. Zeinoddini M., Nikoo H. Matin, Estekanchi H. (2012) Endurance Wave Analysis (EWA) and its application for assessment of offshore structures under extreme waves. Applied Ocean Research. Elsevier. Tehran.

## ANEXO A MODELOS ESTRUCTURALES

### 1.1 Modelo J1 (Tomado de Sunder y Connor, 1981).

- Geometría:

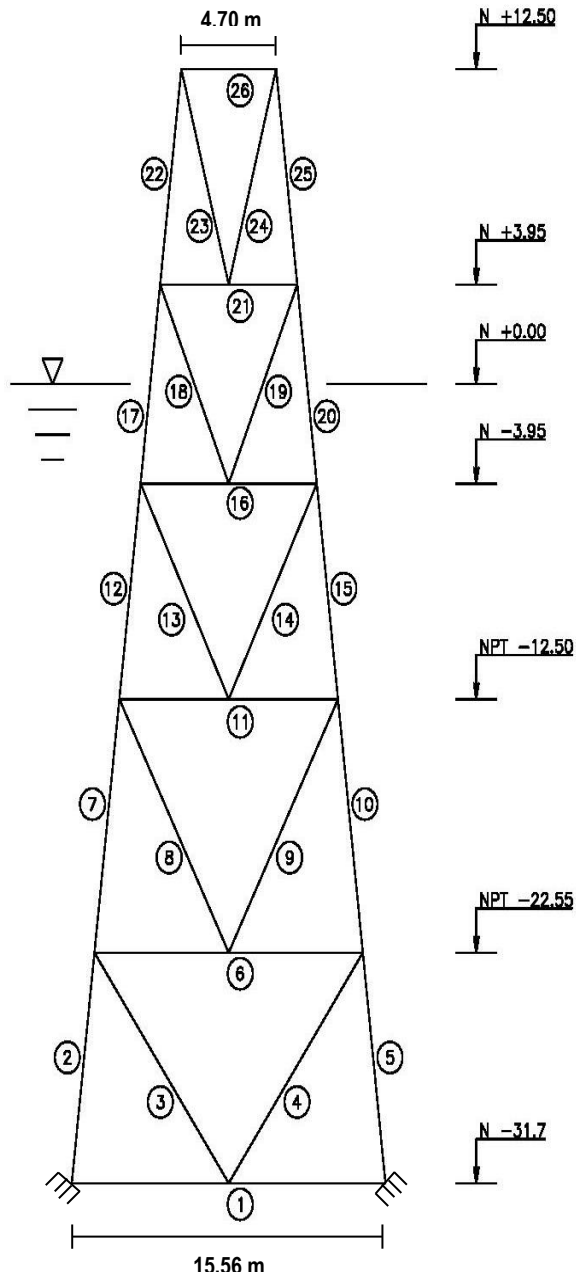


Fig. A.1: Esquema estructural modelo J1.



ID Elemento	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Tipo
1	405	9.50	Secundario
2,5,7,10,12,15,17,20,22,25	865	9.50	Principal
3,4,8,9	355	9.50	Secundario
13,14,18,19,23,24	325	9.50	Secundario
6,11,16,21,26	355	9.50	Secundario

- **Cargas:**

Ubicación	Carga
Peso de Cubierta Total	650 ton

- **Datos de oleaje:**

Parámetro	Valor
Aw=	3.65 m
Tw=	6.92 s
CM=	2.0
CD=	1.4

## 1.2 Modelo J2 (Tomado de Beltrán y Cerrolaza, 1989).

- Geometría:

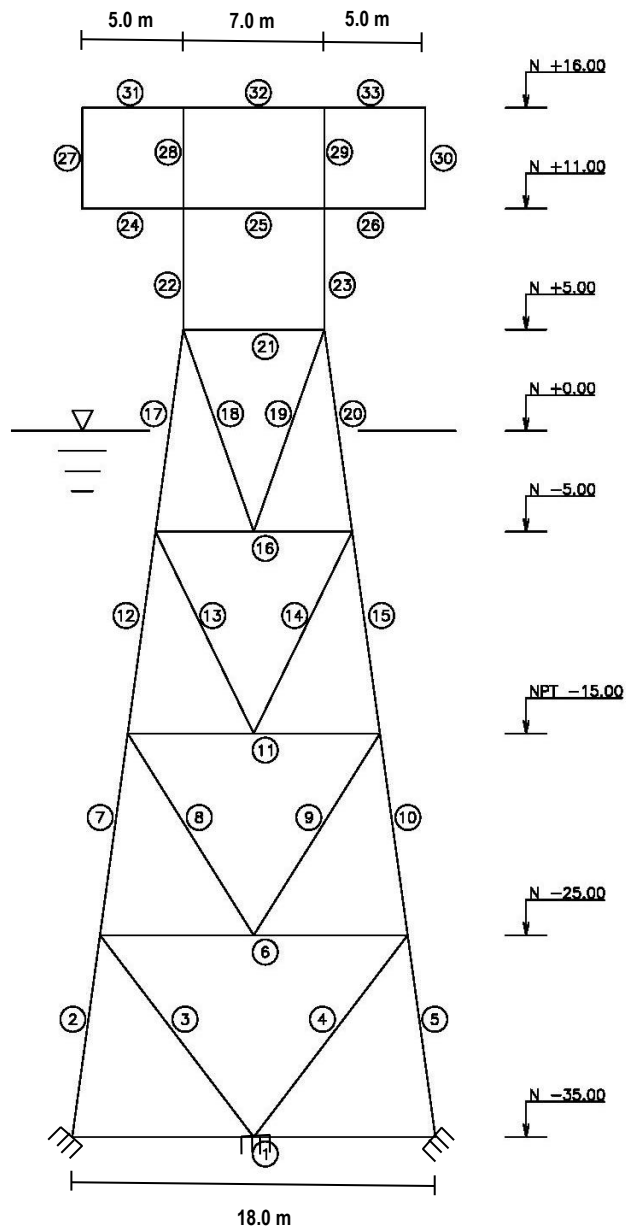


Fig. A.2 : Esquema estructural modelo J2.

ID Elemento	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Tipo
2,5,7,10,12,15,17,20,22,23	850	25	Principal
Resto	600	12.5	Secundario

- **Cargas:**

<b>Ubicación</b>	<b>Carga</b>
Peso de Cubierta (interiores)	60 ton
Peso de Cubierta (exteriores)	30 ton

- **Datos de oleaje:**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Aw=	3
Tw=	9
CM=	1.5
CD=	1.0

### 1.3 Modelo J3 (Tomado de Sunder y Connor, 1981).

- Geometría:

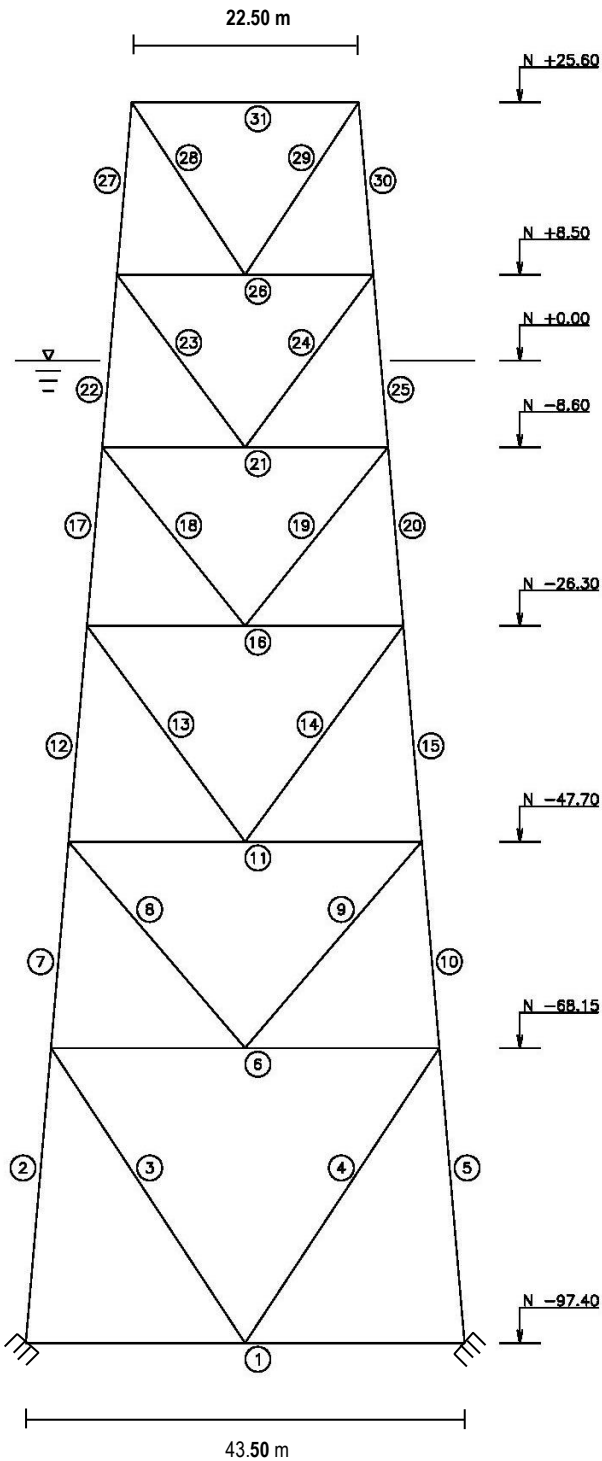


Fig. A.3: Esquema estructural modelo J3.

ID Elemento	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Tipo
1,6,11,16,21,26,31	915	9.50	Secundario
3,4,8,9,13,14,18,19,23,24,28,29	915	9.50	Secundario
2,5,7,10,12,15,17,20,22,25	1575	12.70	Principal
27,30	1220	9.50	Principal

- **Cargas:**

Ubicación	Carga
Peso de Cubierta Total	2890 ton

- **Datos de oleaje:**

Parámetro	Valor
Aw=	6
Tw=	9.20
CM=	2
CD=	1.4

### 1.4 Modelo J4 (Tomado de Harish et al., 2010).

- Geometría:

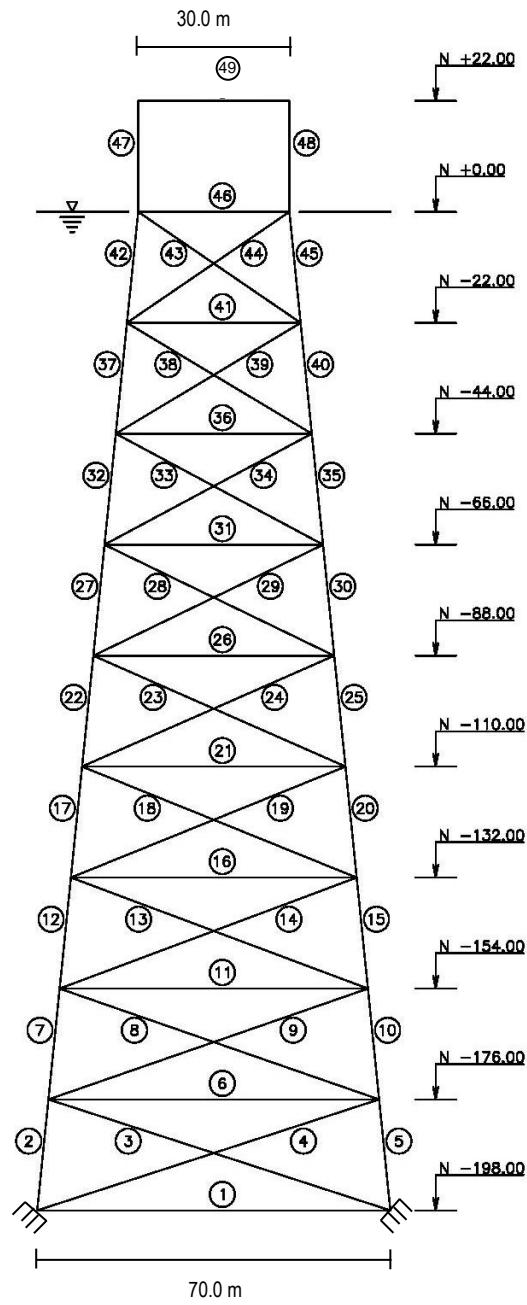


Fig. A.4: Esquema estructural modelo J4.

ID Elemento	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Tipo
1,6,11,16,21,26,31,36,41,46,49	1100	50	Secundario
2,5,7,10,12,15,17,20,22,25,27,30,32,35,37,40,42,45,47,48	1500	200	Principal
3,4,8,9,13,14,18,19,23,24,28,29,33,34,38,39,43,44	1250	150	Secundario

- **Cargas:**

Ubicación	Carga
Peso de Cubierta Total	10 000 Ton

- **Datos de oleaje:**

Parámetro	Valor
Aw=	14.86
Tw=	21.66
CM=	2
CD=	0.8

### 1.5 Modelo J5 (Tomado de Zeinoddini et al., 2012).

- Geometría:

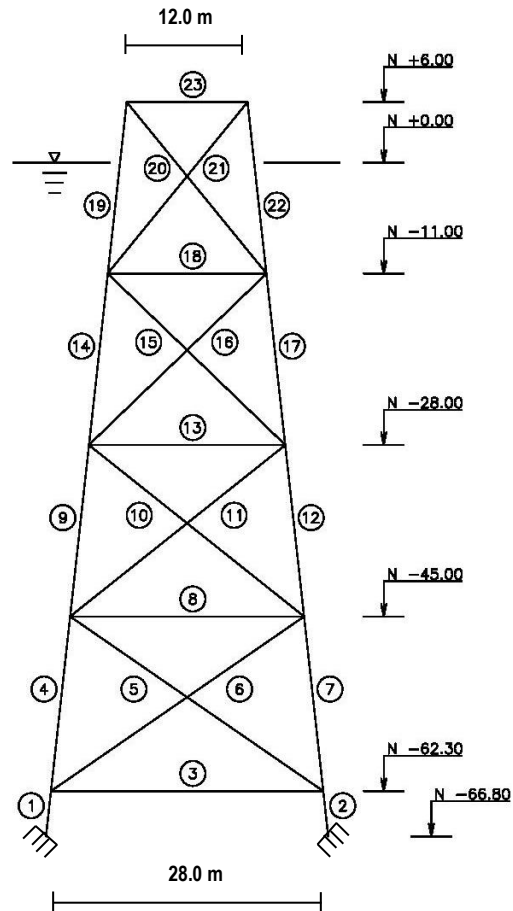


Fig. A.5: Esquema estructural modelo J3 (Zeinoddini et al).

ID Elemento	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Tipo
1,2,4,7,9,12,14,17	1656	20	Principal
19,22	1666	20	Principal
3	800	20	Secundario
8	600	30	Secundario
13,18	600	20	Secundario
23	457	13	Secundario
5,6,10,11	700	25	Secundario
15,16	508	13	Secundario
20,21	508	15	Secundario



- **Cargas:**

<b>Ubicación</b>	<b>Carga</b>
Peso de Cubierta Total	800 Ton.

- **Datos de oleaje:**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Aw=	10 m
Tw=	12.15 s
CM=	1.00
CD=	1.05

## ANEXO B

### DEDUCCIÓN DE FÓRMULAS

#### 1.1 DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DEL PERÍODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN PROPUESTA EN EL MÉTODO SIMPLIFICADO.

Las ecuaciones planteadas en el método simplificado se obtienen a partir de una deducción de expresiones empleando modelos simples de análisis.

Aquí se muestra como se obtienen las expresiones para el periodo fundamental de vibración:

$$T_{ms} = T_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a$$

En el caso de los factores de corrección ( $f_h, f_{No}, f_e, f_a$ ) se realiza un ajuste teniendo en cuenta los resultados obtenidos del análisis de cada modelo paramétrico, de esa manera se obtiene una ecuación válida para los valores de estudio.

##### 1.1.1 Deducción de la fórmula de estimación inicial del periodo fundamental de vibración $T_0$ .

El periodo fundamental de vibración de una estructura tipo péndulo invertido con masa  $M$  y rigidez  $K$  (ver Figura N°B.1) se estima mediante la siguiente fórmula general:

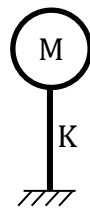


Figura N°B.1: Modelo Simplificado de una estructura tipo péndulo invertido.

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M}{K}}$$

Mediante un modelo sencillo se deducen las fórmulas empleadas:

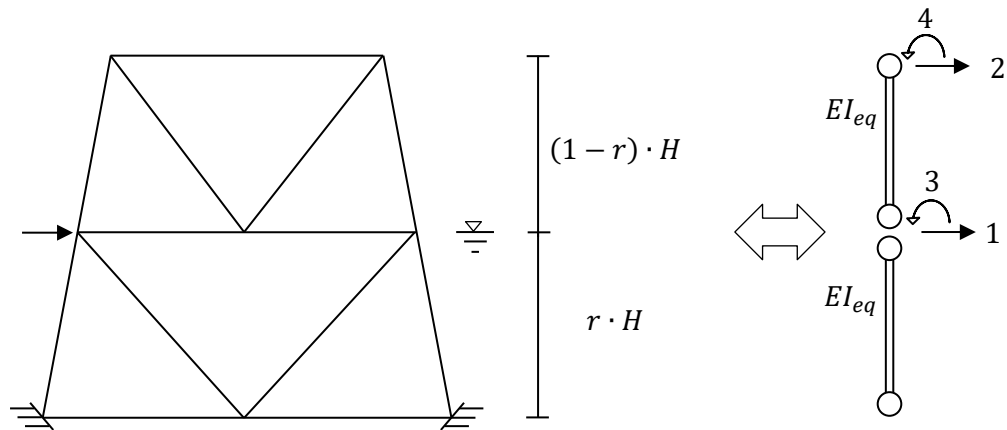


Figura N°B.2: Modelo simplificado con elementos discretos tipo barra.

La rigidez equivalente se calcula tal como muestran las figuras N°B.3 y N°B.4:

Arriostre tipo K:

$$EI_{eq} = \frac{B^2 \cdot A_c \cdot E_c}{2}$$

$$GA_{seq} = \frac{2 \cdot L \cdot B^2 \cdot A_d \cdot E_d}{(L \cdot D)^3}$$

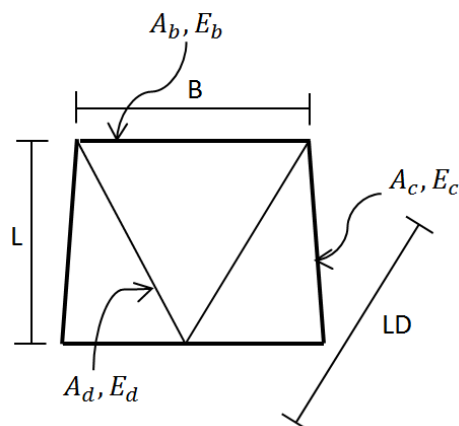


Figura N°B.3: Arriostre tipo K.

Arriostre tipo X:

$$EI_{eq} = \frac{B^2 \cdot A_c \cdot E_c}{2}$$

$$\frac{1}{GA_{seq}} = \frac{L^2}{2 \cdot B^2 \cdot A_c \cdot E_c} + \frac{B}{4 \cdot L \cdot B^2 \cdot A_b \cdot E_b} + \frac{2 \cdot L^3}{L \cdot B^2 \cdot A_d \cdot E_d}$$

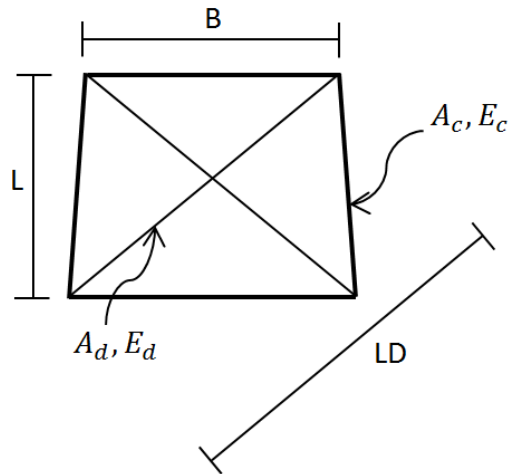


Figura N°B.4: Arriostre tipo X.

La matriz de rigidez para el elemento de la Figura N°B.5 se muestra a continuación:

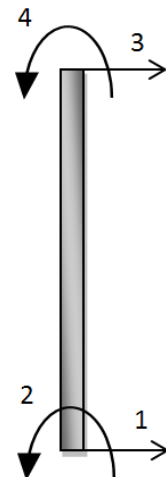


Figura N°B.5: Elemento tipo Barra.

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{(1+\phi)L^3} & -\frac{6EI}{(1+\phi)L^2} & -\frac{12EI}{(1+\phi)L^3} & -\frac{6EI}{(1+\phi)L^2} \\ -\frac{6EI}{(1+\phi)L^2} & \frac{(4-\phi)EI}{(1+\phi)L} & \frac{6EI}{(1+\phi)L^2} & \frac{(2-\phi)EI}{(1+\phi)L} \\ -\frac{12EI}{(1+\phi)L^3} & \frac{6EI}{(1+\phi)L^2} & \frac{12EI}{(1+\phi)L^3} & \frac{6EI}{(1+\phi)L^2} \\ -\frac{6EI}{(1+\phi)L^2} & \frac{(2-\phi)EI}{(1+\phi)L} & \frac{6EI}{(1+\phi)L^2} & \frac{(4-\phi)EI}{(1+\phi)L} \end{bmatrix}$$

Figura N°B.6: Matriz de rigidez para un elemento tipo barra con 4gdl.

Donde  $\phi$  puede despreciarse y suponer que predominan los efectos a flexión con la finalidad de deducir las fórmulas.

A partir del modelo sencillo se obtiene la matriz de rigidez global de la estructura.

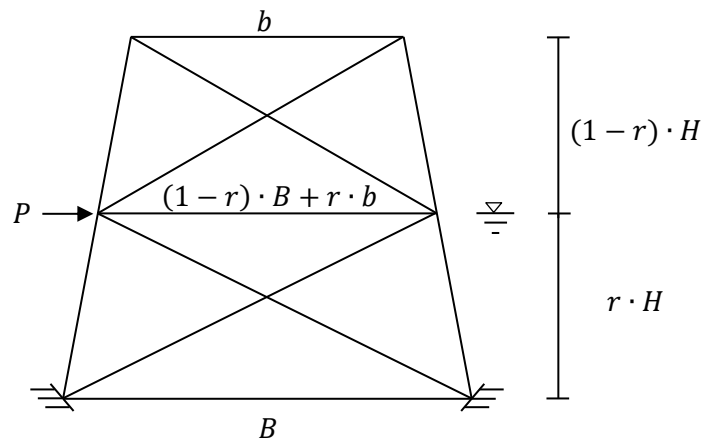


Figura N°B.7: Modelo sencillo de una plataforma

La matriz de rigidez global de la estructura anterior es:

$$\begin{bmatrix}
 \frac{12 \cdot EI_1}{(r \cdot H)^2} + \frac{12 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{-12 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{6 \cdot EI_1}{(r \cdot H)^2} - \frac{6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{-6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} \\
 \frac{-12 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{12 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} \\
 \frac{6 \cdot EI_1}{(r \cdot H)^2} - \frac{6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{4 \cdot EI_1}{(r \cdot H)} + \frac{4 \cdot EI_2}{((1-r) \cdot H)} & \frac{2 \cdot EI_1}{(r \cdot H)} \\
 \frac{-6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{6 \cdot EI_2}{[(1-r) \cdot H]^2} & \frac{2 \cdot EI_1}{(r \cdot H)} & \frac{4 \cdot EI_2}{((1-r) \cdot H)}
 \end{bmatrix}$$

Figura N°B.8: Matriz de rigidez global.

Donde:

$$EI_{eq} = \frac{B^2 \cdot A_c \cdot E_c}{2}$$

$$A_c = \pi \cdot (D - e) \cdot e$$

$$EI_1 = \frac{[(1-r) \cdot B + r \cdot b]^2 \cdot \pi \cdot (D - e) \cdot e \cdot E}{2}$$

$$EI_2 = \frac{[(1-r) \cdot B + r \cdot b]^2 \cdot \pi \cdot (D - e) \cdot e \cdot E}{2}$$

$(D - e)$  = Diámetro del elemento principal.

$e$  = Espesor del elemento principal.

Haciendo operaciones de condensación estática sobre la matriz de rigidez de 4x4, se reduce a una matriz de rigidez lateral de 2x2. Sobre esta última matriz de 2x2 se realiza el cálculo de los valores y vectores propios (ambas operaciones se pueden realizar de manera simbólica en programas como Matlab).

De esta manera se pueden obtener expresiones para la frecuencia y posteriormente del periodo fundamental de vibración:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{2 \cdot H^3 \cdot [(1-r)^3 \cdot ((1-r) \cdot B + r \cdot b)^2 - b^2 \cdot (1-r)^3 + b^2]}{3\pi \cdot b^2 \cdot E \cdot e \cdot (D - e) \cdot [(1-r) \cdot B + r \cdot b]^2}} \left(\frac{P}{g}\right)$$

Figura N°B.9: Expresiones en la fórmula del método simplificado.

Esta expresión tiene una fórmula similar a la ecuación general para calcular el periodo fundamental de vibración.

### 1.1.2 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_h$ para la estimación del período fundamental de vibración

La fórmula para el factor  $f_h$  se deduce a partir de los resultados obtenidos del análisis de los modelos paramétricos. En estos modelos se mantienen fijos los parámetros como el periodo de la ola, la altura de la ola, el factor  $N_0$  y se hace variable el parámetro  $h/H$  y la altura  $H$ .

A continuación se muestran los gráficos con resultados obtenidos que nos permiten deducir una fórmula para  $f_h$  mediante el ajuste de la distribución de los datos.

Estos gráficos contribuyen al proceso de la deducción de la forma de las ecuaciones.

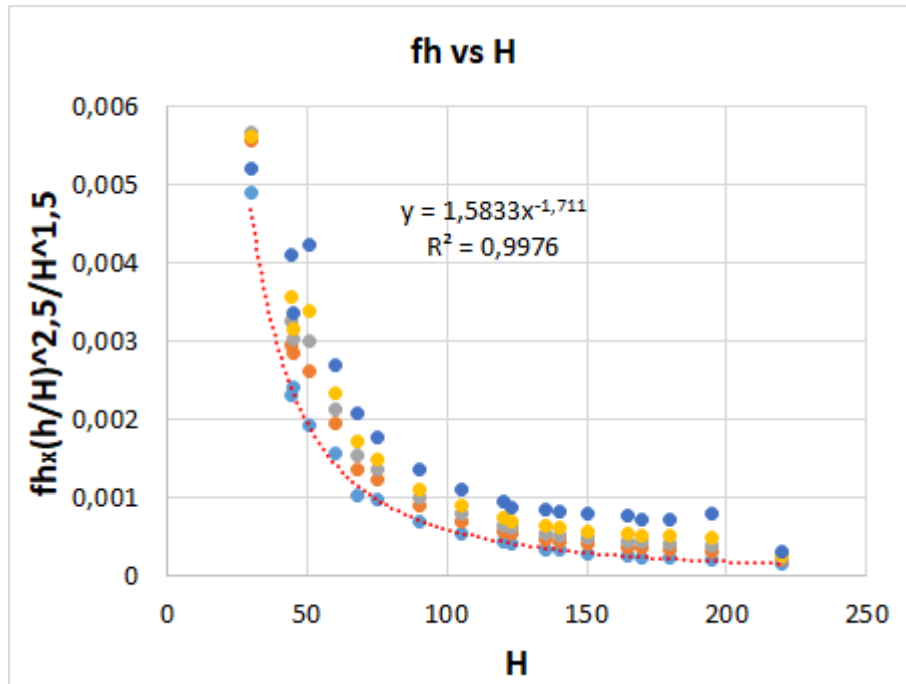


Figura N°B.10: Ajuste de datos para obtener la ecuación de  $f_h$ .

También se realizan operaciones manualmente de tal manera que se pueda intuir la forma y los exponentes de las variables que componen la formula

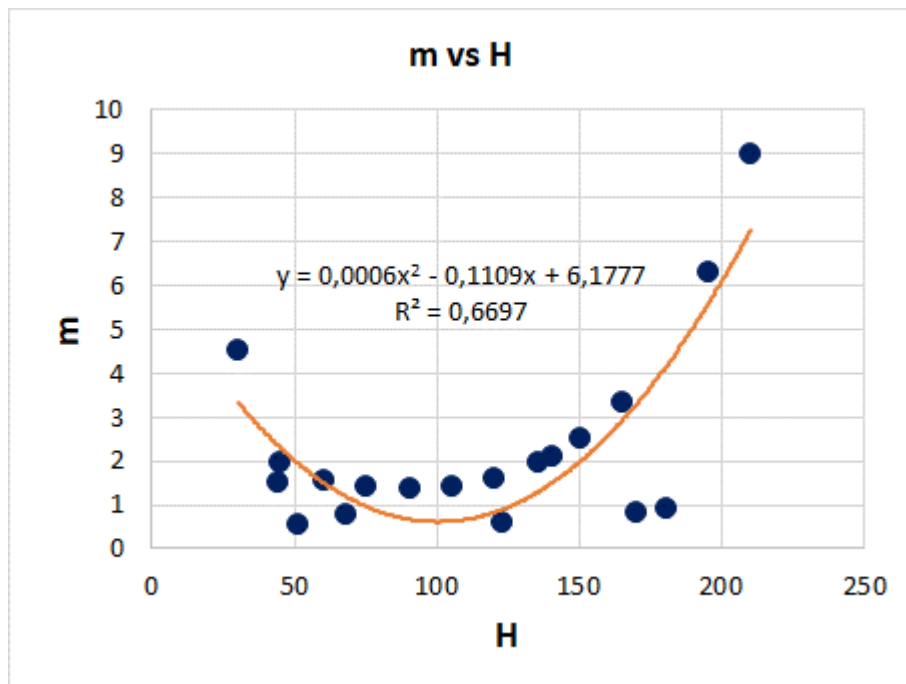


Figura N°B.11: Ajustes del primer coeficiente de la parte cuadrática de  $f_h$ .



La figura N°B.10 se asemeja a una curva potencia de la forma  $aH^b$ ; sin embargo, algunos grupos de datos forman curvas similares por lo que tanto es necesario realizar otros ajustes.

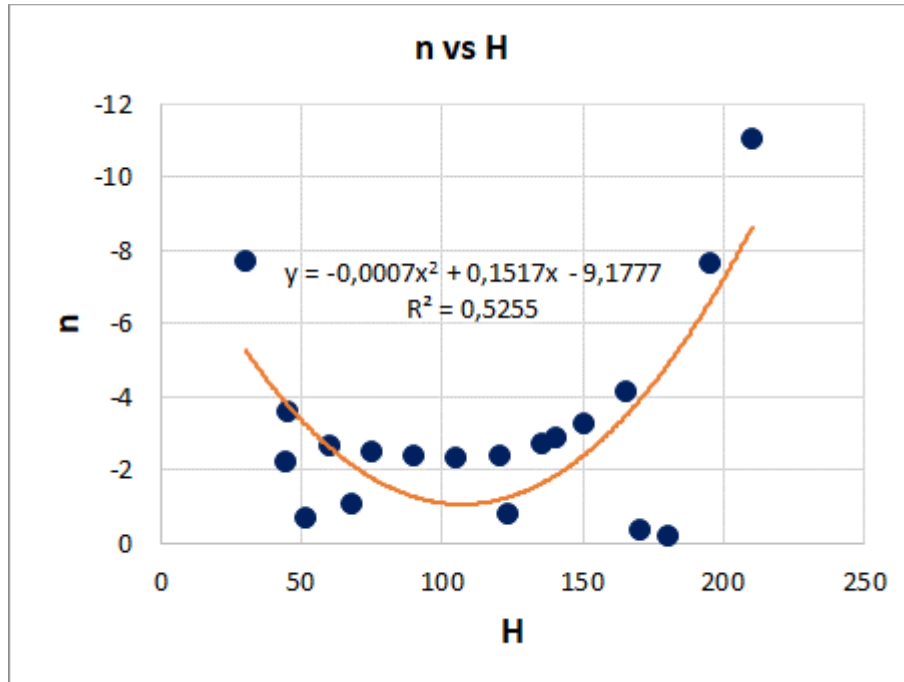


Figura N°B.12: Ajustes del segundo coeficiente de la parte cuadrática de  $f_h$ .

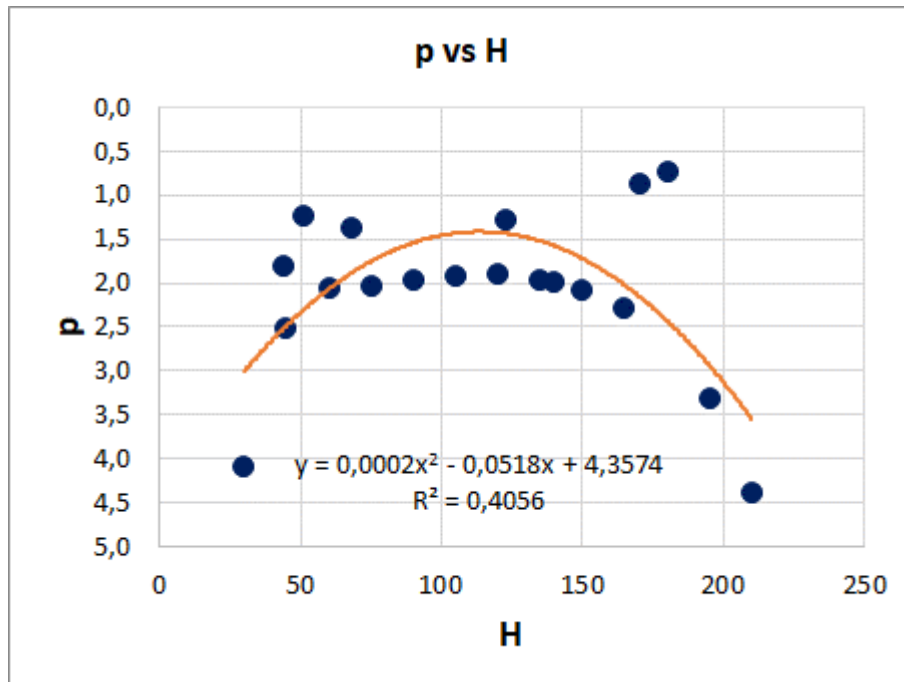


Figura N°B.13: Ajustes del tercer coeficiente de la parte cuadrática de  $f_h$ .

Las figuras N° 11, 12 y 13 muestran el ajusta de los coeficientes de una curva cuadrática. De esta manera se obtiene la ecuación propuesta:

$$f_h = \frac{(m \cdot r^2 + n \cdot r + p)}{H^{0.21} r^{2.5}}$$

Donde:

$$m = (0.0006 \cdot H^2 - 0.1109 \cdot H + 6.18)$$

$$n = (-0.0007 \cdot H^2 + 0.1517 \cdot H - 9.18)$$

$$p = (0.0002 \cdot H^2 - 0.0518 \cdot H + 4.35)$$

### 1.1.3 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_{N_0}$ para la estimación del período fundamental de vibración.

Aquí se emplean los resultados obtenidos del análisis de un grupo de estructuras. Los resultados obtenidos que han sido graficados muestran que la influencia de  $N_0$  es posible representarla mediante una curva logarítmica.

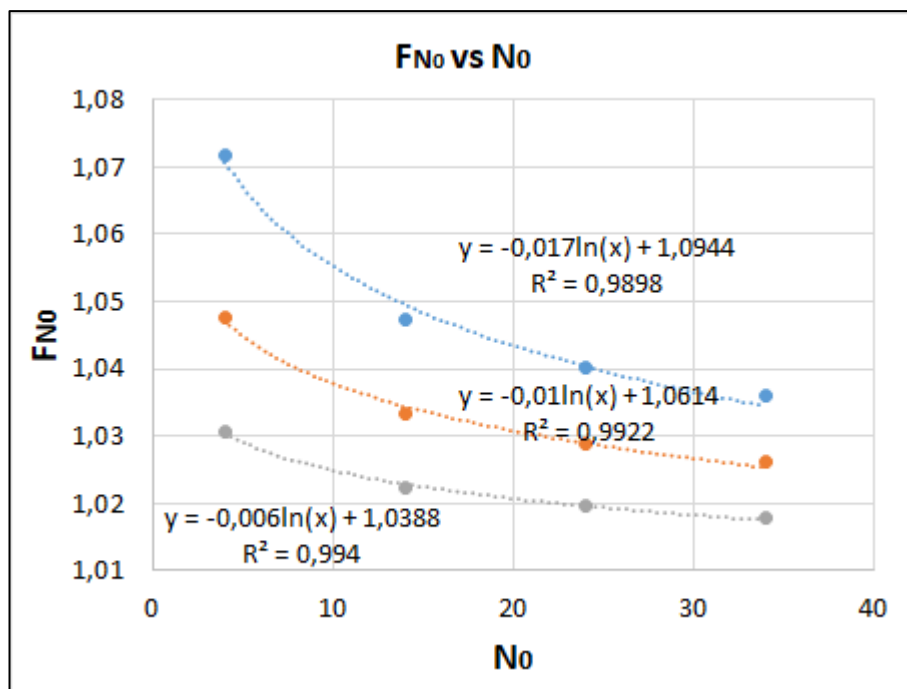


Figura N°B.14: Comparación de resultados para grupos de estructuras con diferentes alturas.

Este ajuste funciona para un grupo de estructuras que tienen igual parámetro  $h/H$ . Para obtener una ecuación general que sea útil para cualquier estructura se realizan ajustes de los coeficientes de la curva de la figura N°B.14 tal como se muestra a continuación:

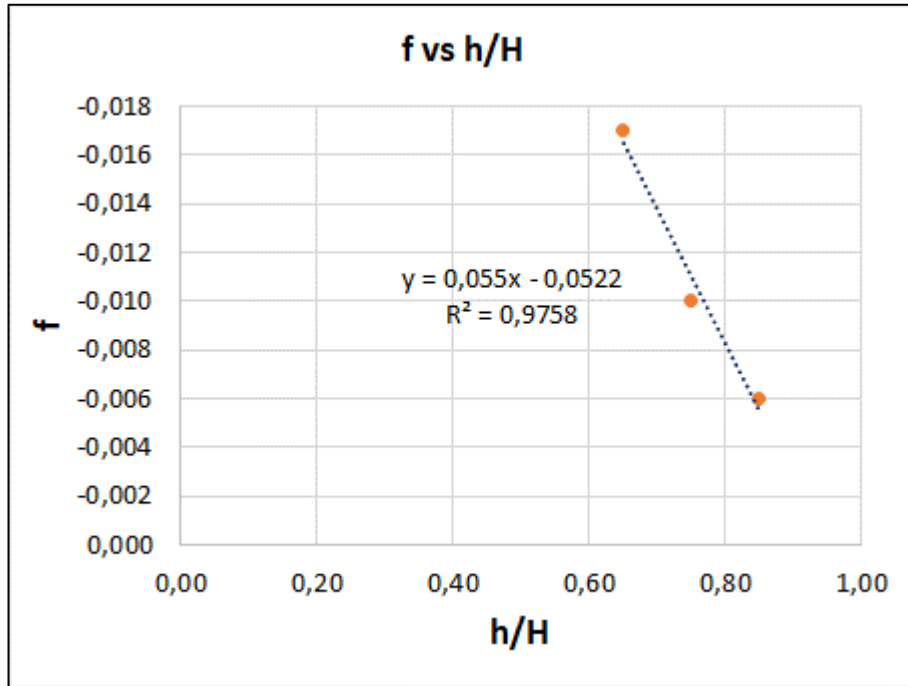


Figura N°B.15: Ajuste del primer coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .

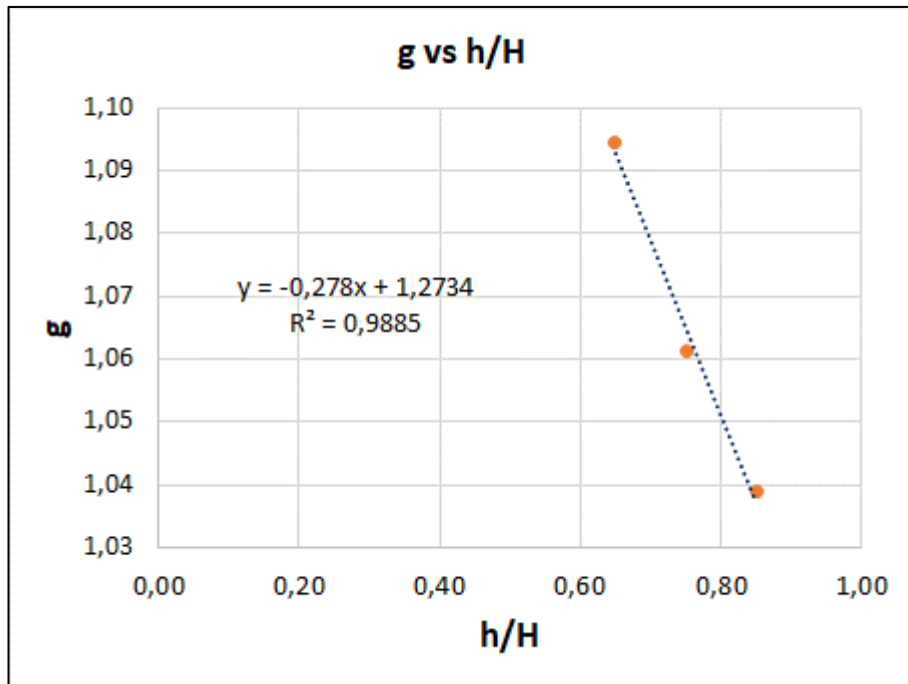


Figura N°B.16: Ajuste del segundo coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .

Las figuras N°15 y 16 muestran los coeficientes correlacionados con el factor  $h/H$ .

Así se obtiene la ecuación propuesta para el cálculo de  $f_{No}$ :

$$f_{No} = f \cdot \ln N_0 + g$$

Donde:

$$f = 0.055 \cdot r - 0.0522$$

$$g = -0.278 \cdot r + 1.2734$$

Para el caso empotrado se considera:

$$f_{No} = 1$$

#### 1.1.4 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_e$ para la estimación del período fundamental de vibración.

Se realiza un ajuste teniendo en cuenta los diferentes espesores que pueden tener los elementos principales de la estructura.

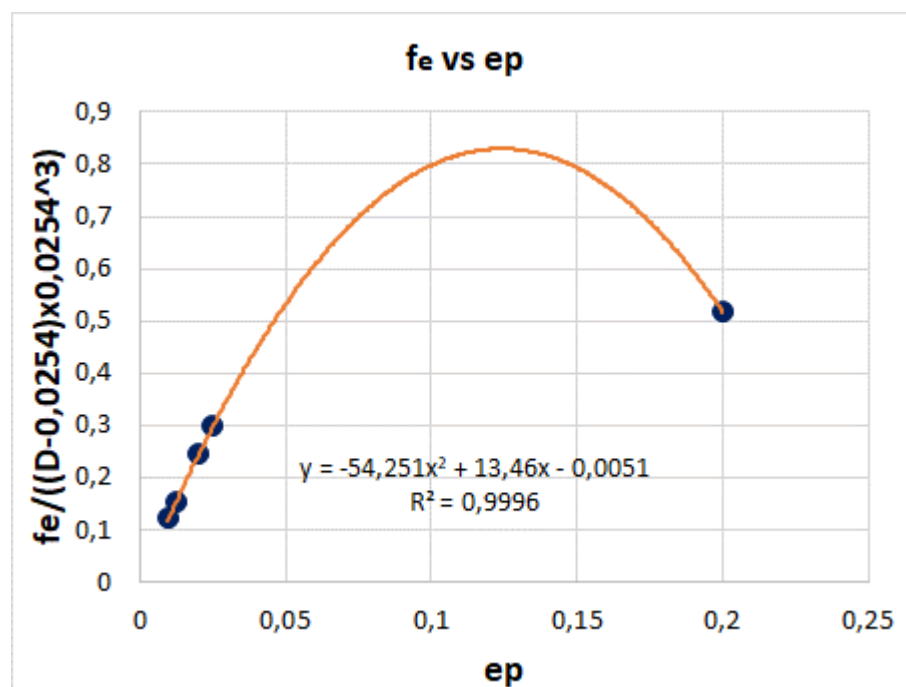


Figura N°B.17: Curva de ajuste para obtener  $f_e$ .

La curva se ajusta a una curva cuadrática. Mediante operaciones con los parámetros involucrados se despeja la fórmula propuesta:

$$f_e = (0.0254^3 \cdot (D - 0.0254) / (-1.378 \cdot e^2 + 0.341884 \cdot e + 0.00013)^2)^{0.5}$$

### 1.1.5 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_a$ para la estimación del período fundamental de vibración.

El análisis de los resultados muestra que las respuestas que se obtienen al analizar las estructuras paramétricas con arrioste tipo K y tipo X son casi proporcionales tal como muestra la siguiente figura.

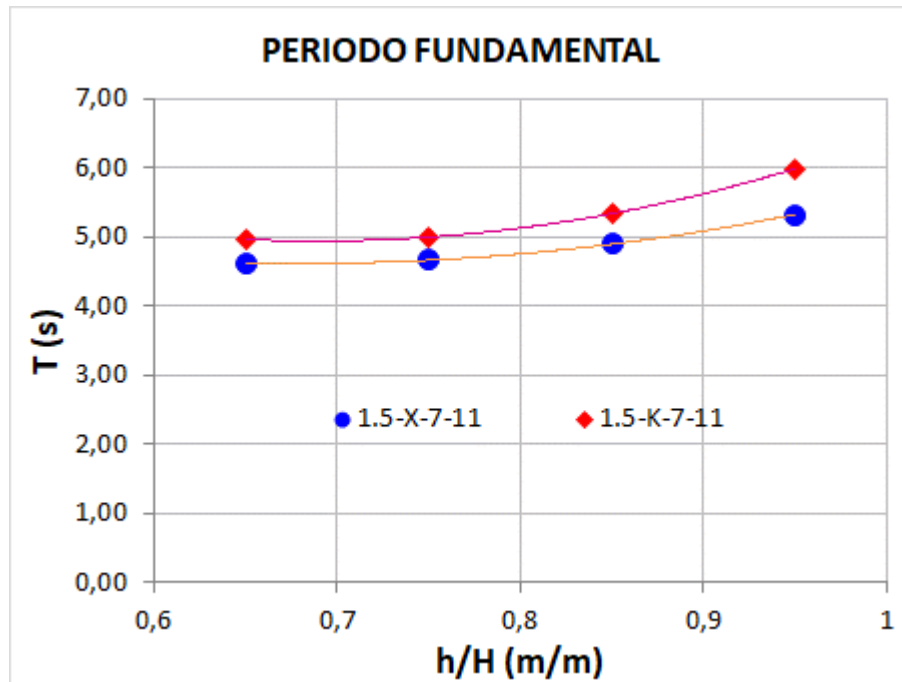


Figura N°B.18: Comparación de resultados de acuerdo al tipo de arrioste.

Por ello se propone una ecuación de tal manera que la respuesta esperada de la estructura con arrioste K sea el producto de la respuesta de una estructura con arrioste X por una constante.

Sobre la base una mayor cantidad de resultados, se propone lo siguiente:

$$* \text{Tipo K} \quad f_a = 1.08$$

$$* \text{Tipo X} \quad f_a = 1.00$$

## 1.2 DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DEL DESPLAZAMIENTO LATERAL MÁXIMO PROPUESTA EN EL MÉTODO SIMPLIFICADO.

En esta sección se muestra como se deduce la fórmula propuesta por el método simplificado:

$$D_{ms} = \Delta_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a$$

### 1.2.1 Deducción de la fórmula de estimación inicial del Desplazamiento lateral máximo $\Delta_0$ .

Se emplea un modelo simple a partir del cual se deducen las fórmulas mediante operaciones en un modelo simplificado.

Se supone una viga en voladizo (Ver Figura N°B.19) con una carga lateral  $P$  en su extremo superior, el desplazamiento lateral se define como:

$$\Delta = \frac{P \cdot L^3}{3EI}$$

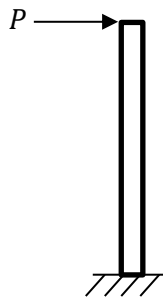


Figura N°B.19: Modelo de viga en voladizo.

A partir de la condensación estática se puede obtener expresiones para el desplazamiento lateral, expresiones que se ajustan como se muestra en el siguiente gráfico.

Las operaciones que empleadas para deducir la formula, corresponden al trabajo de matrices más pequeñas de estructuras similares. Por ejemplo: El modelo paramétrico divide la estructura en 6 segmentos, mientras tanto para la deducción de las ecuaciones la estructura es dividida en 2 o 3 tramos. Esto permite obtener matrices de rigidez lateral más pequeñas y un manejo de las variables involucradas.

$$\Delta_0 = \frac{r \cdot (3 - r) \cdot F}{3\pi \cdot E \cdot e(D - e) [(4 - r) \cdot B + r \cdot b]^2 \cdot H^{3.39} \cdot \beta^{0.91}}$$

Diagram illustrating the formula for  $\Delta_0$  with annotations:

- Expresiones deducidas de las operaciones.** (Annotations pointing to the numerator and denominator terms).
- Expresión de Fuerza** (Annotation pointing to  $r \cdot (3 - r) \cdot F$ ).
- Expresiones de la matriz de Rigidez** (Annotation pointing to  $3\pi \cdot E \cdot e(D - e)$ ).
- Expresiones deducidas de las operaciones.** (Annotation pointing to the denominator terms).

Figura N°B.20: Modelo de viga en voladizo.

### 1.2.2 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_h$ para la estimación del desplazamiento lateral máximo.

Los resultados obtenidos para un grupo de estructuras se evalúan para identificar la influencia del parámetro  $h/H$ .

Los valores  $f_h$  se obtienen de dividir los resultados obtenidos con el valor de la estimación inicial del desplazamiento lateral máximo. Así es posible hacer un ajuste sobre la base de los resultados y proponer una ecuación que permita hallar el valor de  $f_h$ .

En este caso no es necesario realizar muchos ajustes a los datos obtenidos ya que los datos muestran una tendencia clara, tal como se muestra a continuación:

$$f_h = 1390130.38 \cdot H^{4.235}$$

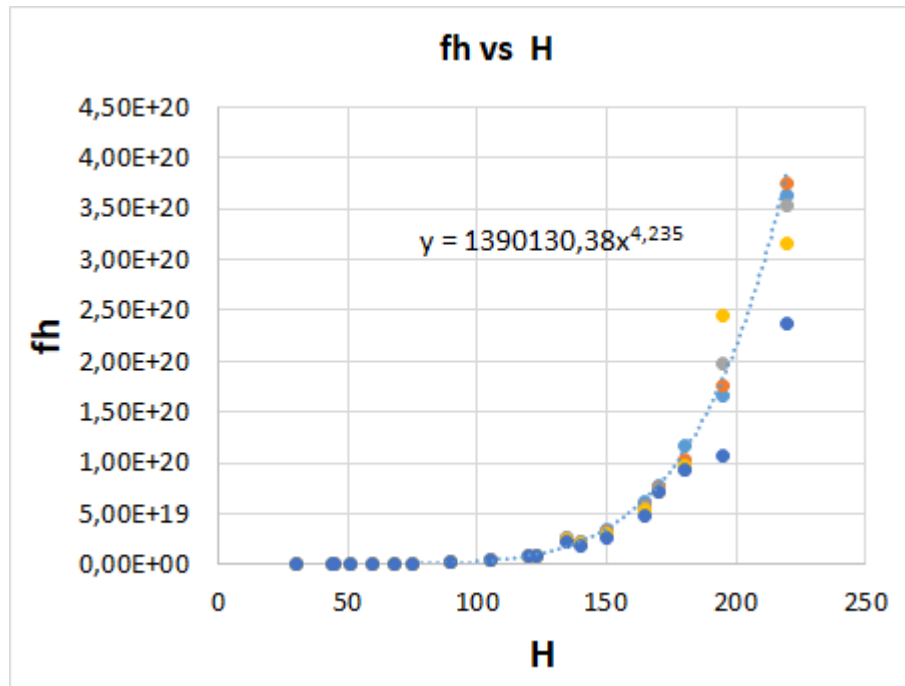


Figura N°B.21: Ajuste de datos para obtener la ecuación de  $f_h$ .

### 1.2.3 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_{N_0}$ para la estimación del desplazamiento lateral máximo.

Los resultados obtenidos son analizados teniendo en cuenta la altura de la estructura, la relación  $h/H$  y con un énfasis en el parámetro de suelo  $N_0$ .

Los valores de  $f_{N_0}$  que sirven como datos para el ajuste, se obtienen de la división de los resultados obtenidos para los modelos con los resultados obtenidos de la estimación inicial y los resultados obtenidos para  $f_h$ .



Así obtenemos datos ordenados como se muestra en la siguiente figura:

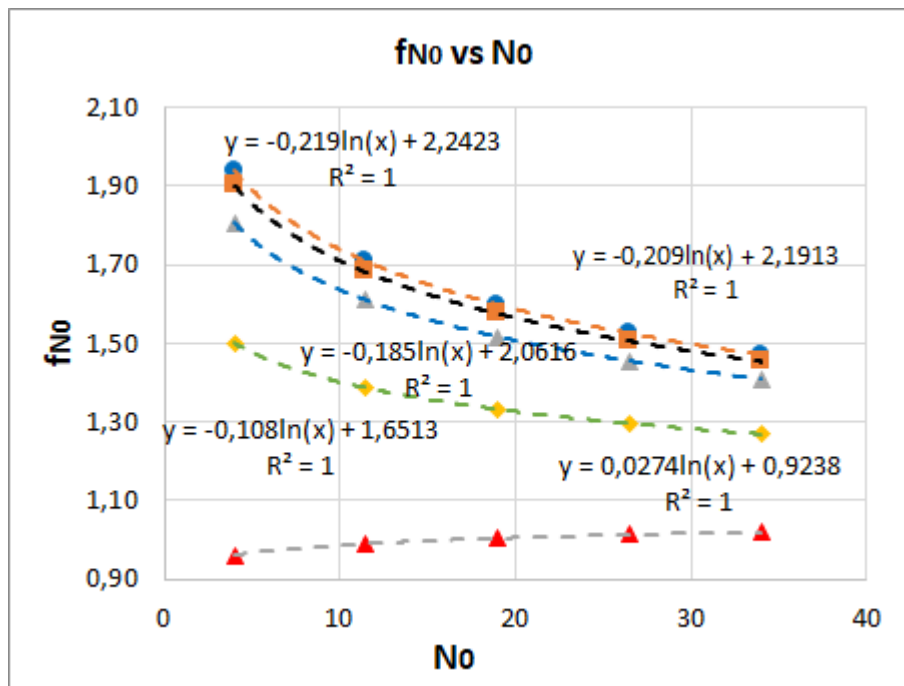


Figura N°B.22: Comparación de resultados para grupos de estructuras con diferentes alturas.

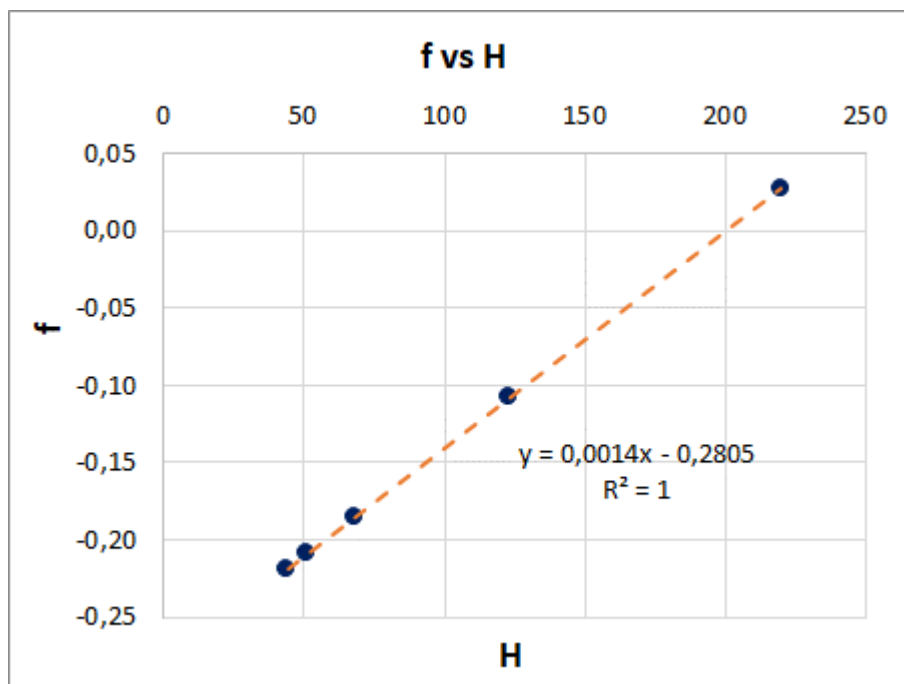


Figura N°B.23: Ajuste del primer coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .

La figura N°B.22 muestra que los datos se ajustan por grupos. Esto nos indica que el factor  $f_{No}$  depende de otra variable como la altura de la estructura.

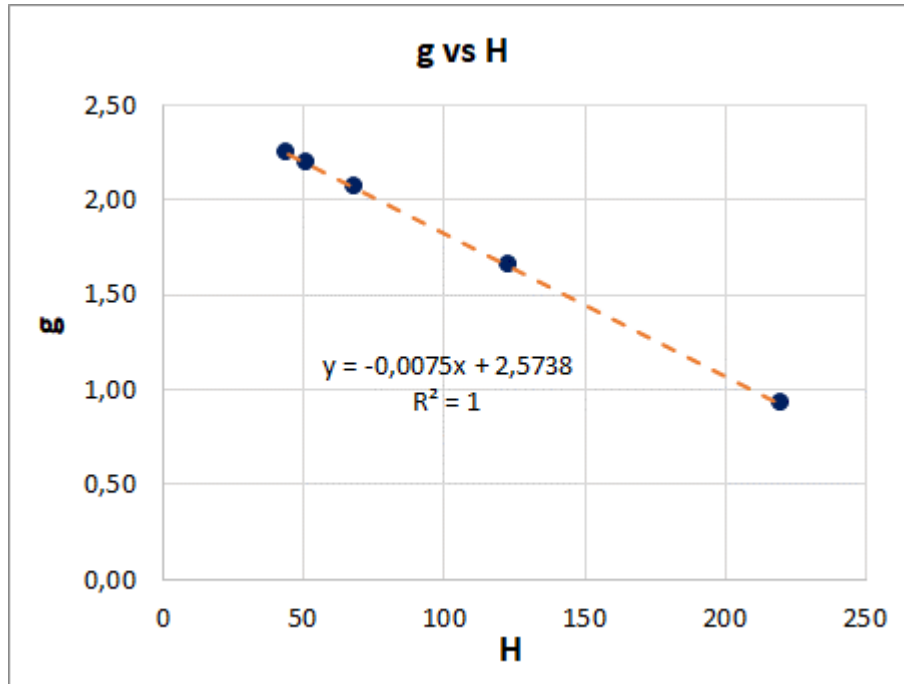


Figura N°B.24: Ajuste del segundo coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .

Las figuras N°B.23 y N°B.24 muestran la correlaciones que se realizan sobre los coeficientes de las ecuaciones de la figura N°B.22 para obtener la ecuación propuesta para  $f_{No}$ :

$$f_{No} = f \cdot \ln N_o + g$$

Donde:

$$f = 0.0014 \cdot H - 0.2806$$

$$g = -0.0075 \cdot H + 2.5738$$

Para el caso empotrado se considera:

$$f_{No} = 1$$

#### 1.2.4 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_e$ para la estimación del desplazamiento lateral máximo.

Los resultados obtenidos del análisis para un grupo de estructuras son comparados con los resultados reales a fin de identificar la variación que ocurre debido al cambio de espesores de los elementos principales.

Los valores se obtienen a través del cociente entre los resultados reales y los resultados de los modelos paramétricos en los cuales el espesor de los elementos varia.

Los valores obtenidos se ajustan tal como lo muestra la siguiente figura:

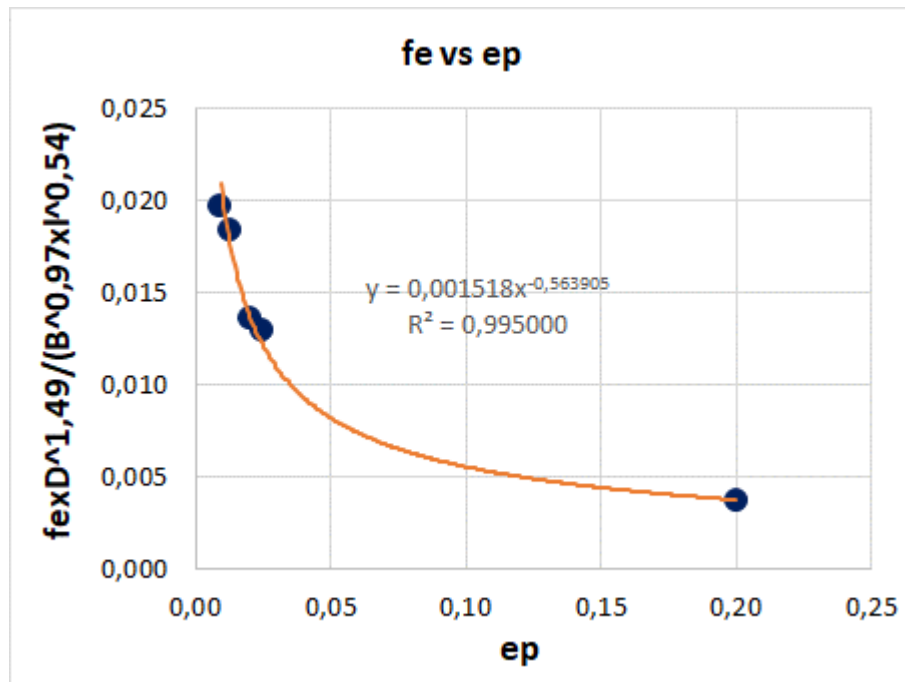


Figura N°B.25: Curva de ajuste para obtener  $f_e$ .

La curva se ajusta a una curva inversa y mediante operaciones con los parámetros involucrados podemos ordenar las ecuaciones y obtener la fórmula propuesta:

$$f_e = 1.518 \cdot 10^{-3} \cdot B^{0.97} \cdot D^{-1.49} \cdot e^{-0.5639} \cdot l^{0.54}$$

### 1.2.5 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_a$ para la estimación del desplazamiento lateral máximo.

Del análisis de resultados se observa que los resultados para estructuras con arrioste tipo K y X son muy similares. Aquí se propone considerar que los resultados son proporcionales:

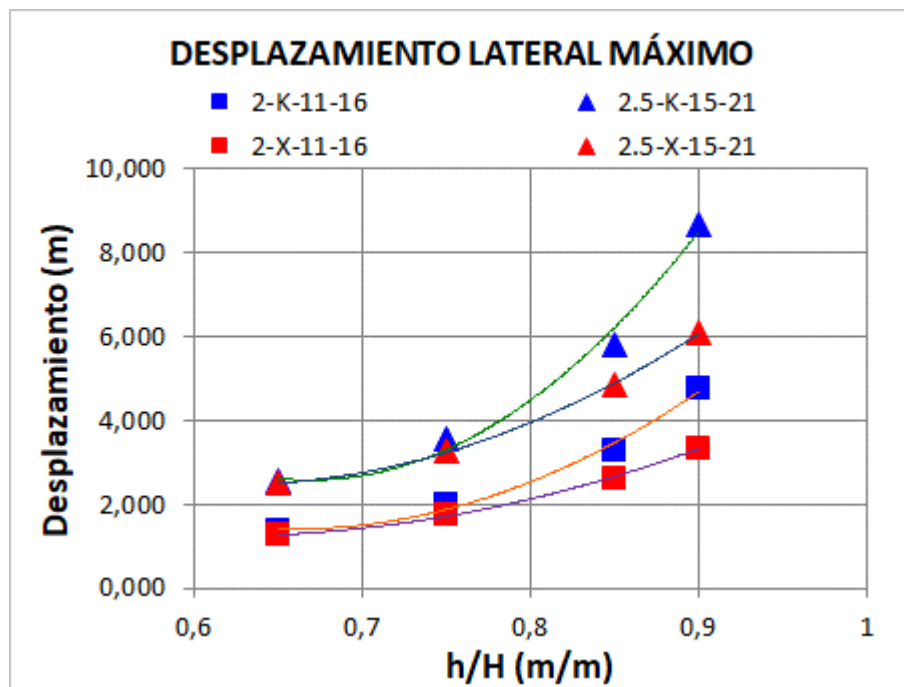


Figura N°B.26: Comparación de resultados de acuerdo al tipo de arrioste.

Teniendo en cuenta la figura anterior, se propone considerar que los resultados obtenidos para las estructuras con arrioste tipo K son iguales a los resultados de las estructuras con arrioste tipo X multiplicados por un coeficiente.

Considerando los datos de otros grupos de estructuras se obtienen los factores propuestos:

$$\text{Tipo X} \quad f_a = 1.00$$

$$\text{Tipo K} \quad f_a = 1.23$$

### 1.3 DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DE LA FUERZA AXIAL MÁXIMA SOBRE EL ELEMENTO MÁS CARGADO PROPUESTA EN EL MÉTODO SIMPLIFICADO.

En esta sección se muestra como se deduce la fórmula propuesta por el método simplificado:

$$N_{ms} = N_1 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a$$

#### 1.3.1 Dedución de la fórmula de estimación inicial de la fuerza axial máxima en el elemento más cargado $N_1$ .

Para deducir la fórmula de estimación de  $N_1$  se parte de un elemento inclinado con 6 GDL.

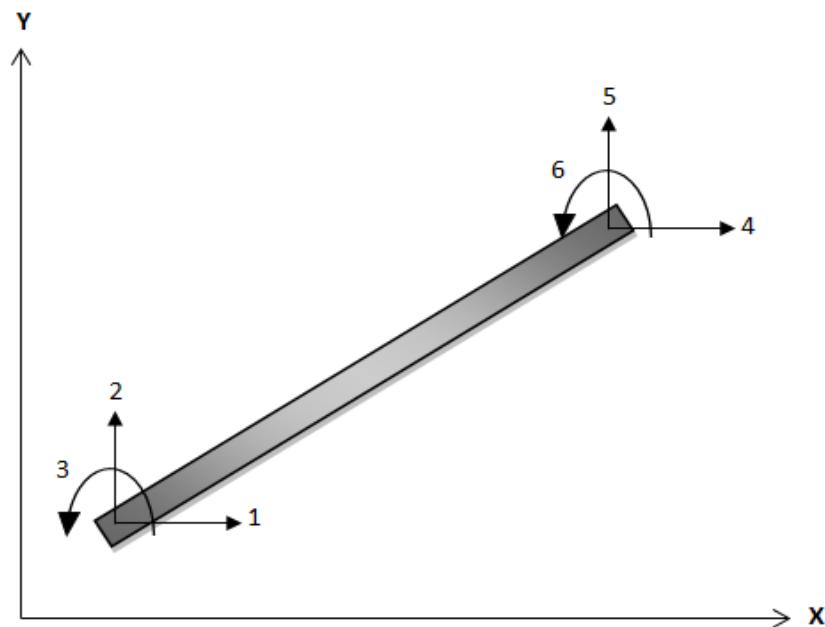


Figura N°B.27: Modelo de elemento inclinado con 6 GDL.

La matriz de rigidez de este elemento es una matriz de 6x6 y se muestra a continuación.

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{L}Cx^2 + \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{EA}{L}Cx^2 - \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{6EI}{L^2}Cy \\ \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{EA}{L}Cy^2 + \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & \frac{6EI}{L^2}Cx & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{EA}{L}Cy^2 - \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & \frac{6EI}{L^2}Cx \\ -\frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{4EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L}Cx^2 - \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{EA}{L}Cx^2 + \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{6EI}{L^2}Cy \\ \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{EA}{L}Cy^2 - \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{EA}{L}Cy^2 + \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & -\frac{6EI}{L^2}Cx \\ -\frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{2EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Figura N°B.28: Matriz de rigidez del elemento inclinado con 6 GDL.

Si se considera el elemento más cargado del modelo simple aquí empleado, se puede deducir esta fórmula de una manera más directa.

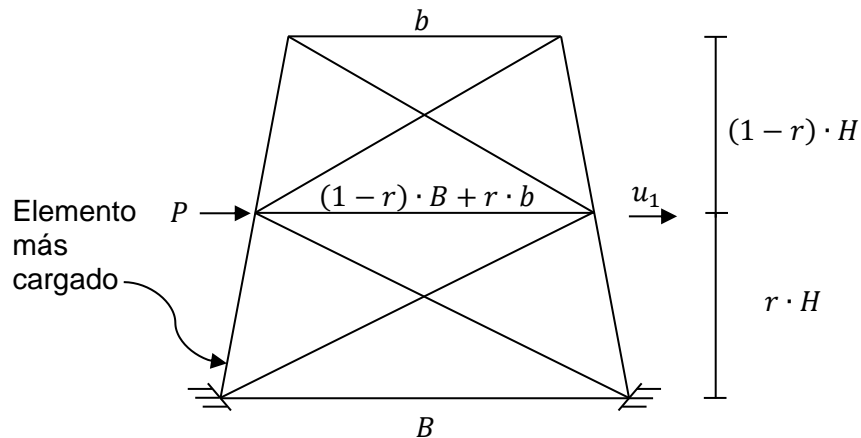


Figura N°B.29: Elemento más cargado sobre una estructura.

Las condiciones de elemento más cargado son de un extremo empotrado y del otro conectado al resto de la estructura. De aquí se desprende que los desplazamientos son 0 para el extremo empotrado.

El vector de desplazamientos para el elemento más cargado sería de la forma

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

Se calcula la fuerza axial sobre ese elemento multiplicando una parte de la matriz de rigidez del elemento con la matriz de desplazamientos:

Figura N°B.30: Matrices de rigidez y desplazamiento del elemento más cargado.

De lo anterior se deduce que la fuerza axial depende de  $u_1, v_1, \theta_1$ . Sin embargo, al trabajar con una matriz condensada, los valores de  $v_1, \theta_1$  dependen de  $u_1$  por ello la ecuación tendría la forma:

$$N_1 = f(u_1)$$

Es por ello que la fórmula de  $N_1$  tiene un parecido a la fórmula del desplazamiento lateral máximo.

$$N_1 = \frac{r \cdot (3 - r) \cdot F}{3\pi \cdot E \cdot e \cdot (D - e) \cdot [(4 - r) \cdot B + r \cdot b]^2 \cdot H^{3.39} \cdot \beta^{-0.32}}$$

Ecuación de la forma de  $u_1$ .
Expresión deducida

Figura N°B.31: Expresiones de la fórmula de estimación del método simplificado.

Es necesario indicar que esta ecuación por sí sola no tiene significado, sino que debe ser multiplicada por los otros factores para que alcance un sentido.

### 1.3.2 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_h$ para la estimación de la fuerza axial máxima.

Los resultados obtenidos para un grupo de estructuras se evalúan para identificar la influencia del parámetro  $h/H$  en la estimación de la fuerza lateral máxima.

Los valores  $f_h$  se obtienen de dividir los resultados obtenidos en el análisis dinámico con el valor de la estimación inicial del desplazamiento lateral máximo. Así es posible hacer un ajuste sobre la base de los resultados y proponer una ecuación que permita hallar el valor de  $f_h$ .

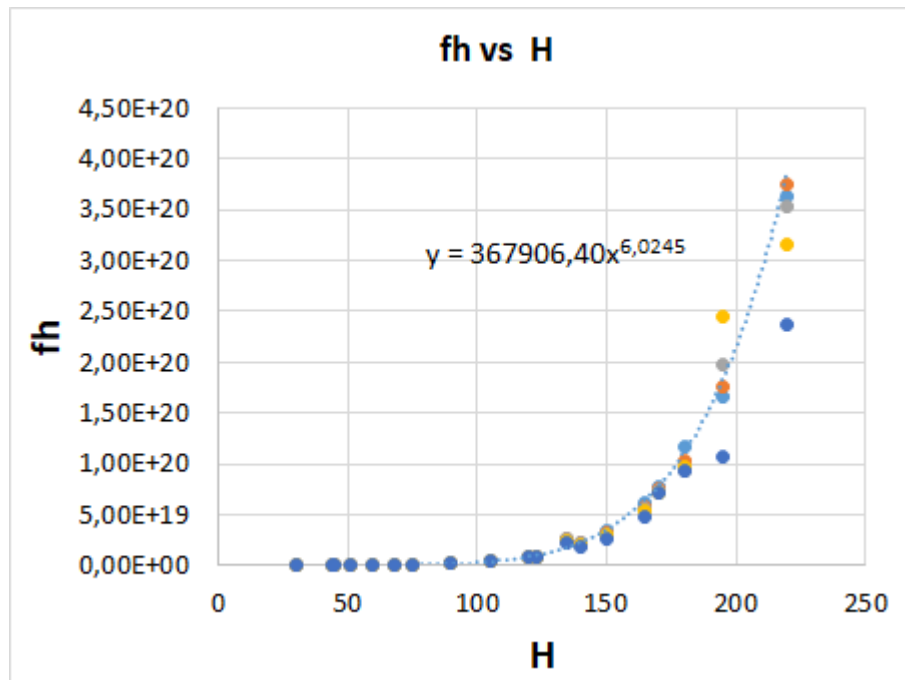


Figura N°B.32: Ajuste de datos para obtener la ecuación de  $f_h$ .



Tal como se aprecia en la figura anterior, los datos se pueden ajustar empleando una curva de la forma  $aH^b$ . El uso de esta curva brinda un buen ajuste para los datos empleados. Este ajuste nos permite encontrar la ecuación propuesta para  $f_h$ .

$$f_h = 367906.40 \cdot H^{6.0245}$$

### 1.3.3 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_{N_0}$ para la estimación de la fuerza axial máxima.

Los resultados obtenidos son analizados teniendo en cuenta la altura de la estructura, la relación  $h/H$  y de sobremanera el parámetro de suelo  $N_0$ .

Los valores de  $f_{N_0}$  que sirven como datos para el ajuste, se obtienen de la división de los resultados obtenidos para los modelos reales con los resultados de los modelos paramétricos. Así obtenemos la siguiente figura:

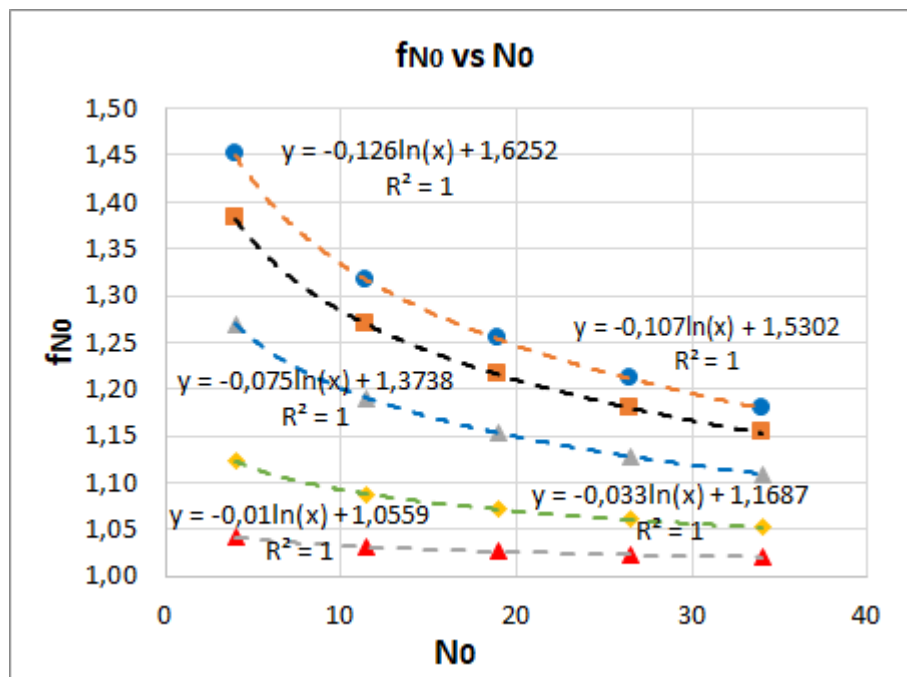


Figura N°B.33: Comparación de resultados para grupos de estructuras con diferentes alturas.

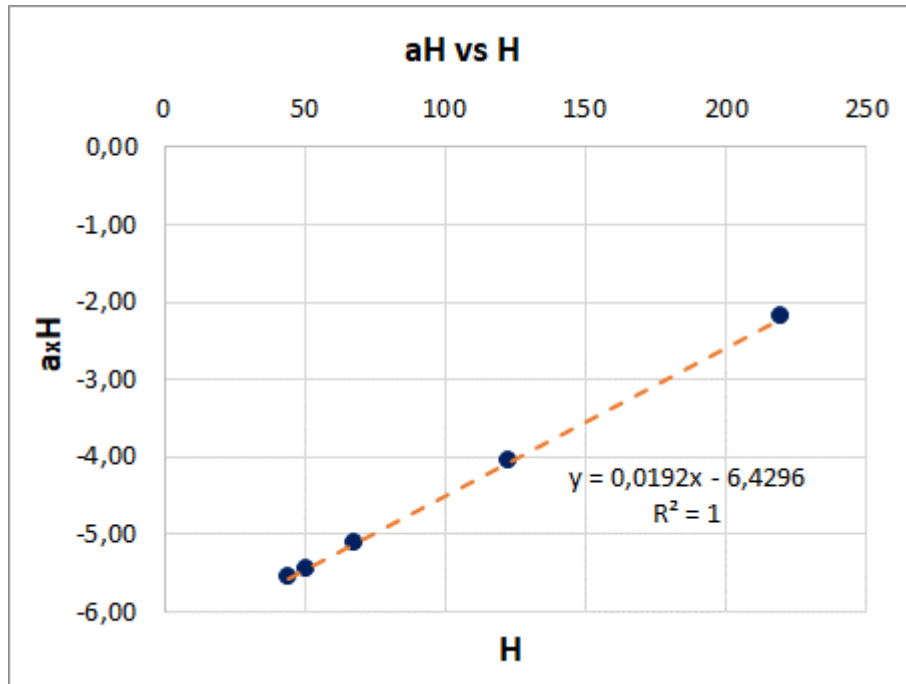


Figura N°B.34: Ajuste del primer coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .

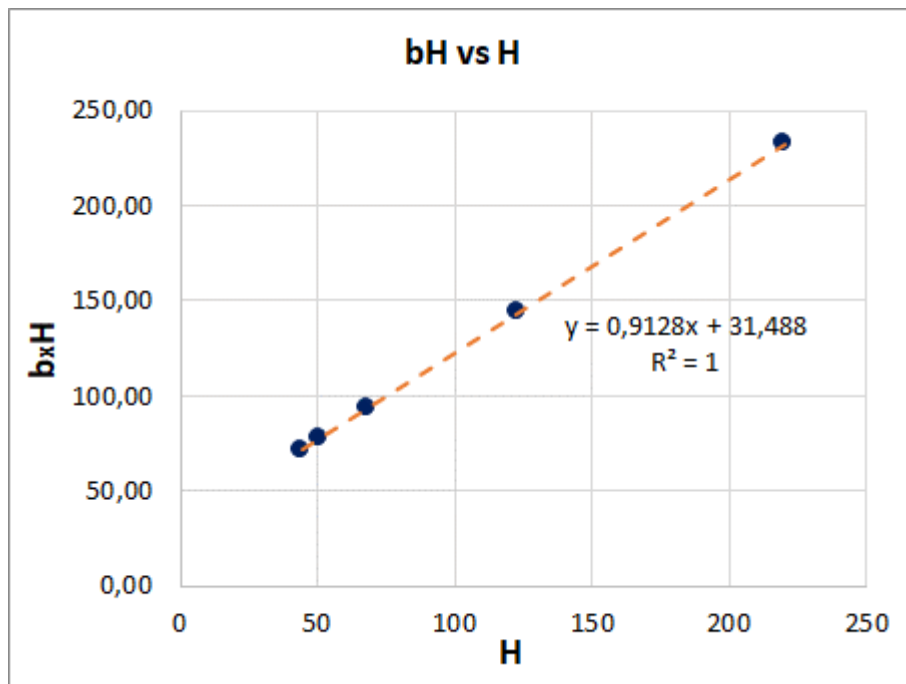


Figura N°B.35: Ajuste del segundo coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .

La figura N°B.33 muestra que los datos se ajustan por grupos. Esto nos indica que el factor  $f_{No}$  depende de otra variable como la altura como la altura de la estructura.

Por ello se procede a realizar otros ajustes teniendo en cuenta los coeficientes de las ecuaciones de la figura N°B.33. De esta manera se obtiene la fórmula propuesta para la estimación de  $f_{No}$ .

Las figuras N°B.34 y N°B.35 muestran la correlaciones que se realizan sobre los coeficientes de las ecuaciones de la figura N°B.33 para obtener la ecuación propuesta para  $f_{No}$ :

$$f_{No} = a \cdot \ln N_o + b$$

Donde:

$$a = 0.0193 - \frac{6.4396}{H}$$

$$b = 0.9127 + \frac{31.494}{H}$$

Para el caso empotrado se considera:

$$f_{No} = 1$$

#### 1.3.4 Dedución de la fórmula del factor de modificación $f_e$ para la estimación de la fuerza axial máxima.

Para deducir la ecuación del factor  $f_e$  se trabaja considerando la variación de que existe dentro de un mismo grupo de estructuras con parámetros similares. Las respuestas reales son comparadas con las obtenidas con el análisis paramétrico. La diferencia entre ellos se traduce en el efecto del espesor en la dinámica de la estructura.

La figura N°B.36 permite correlacionar la variación que existe con la altura y establecer la fórmula propuesta:

$$f_e = 3.52 \cdot 10^{-2} \cdot B^{2.04} \cdot D^{-0.57} \cdot e^{-0.478} \cdot l^{-1.85}$$

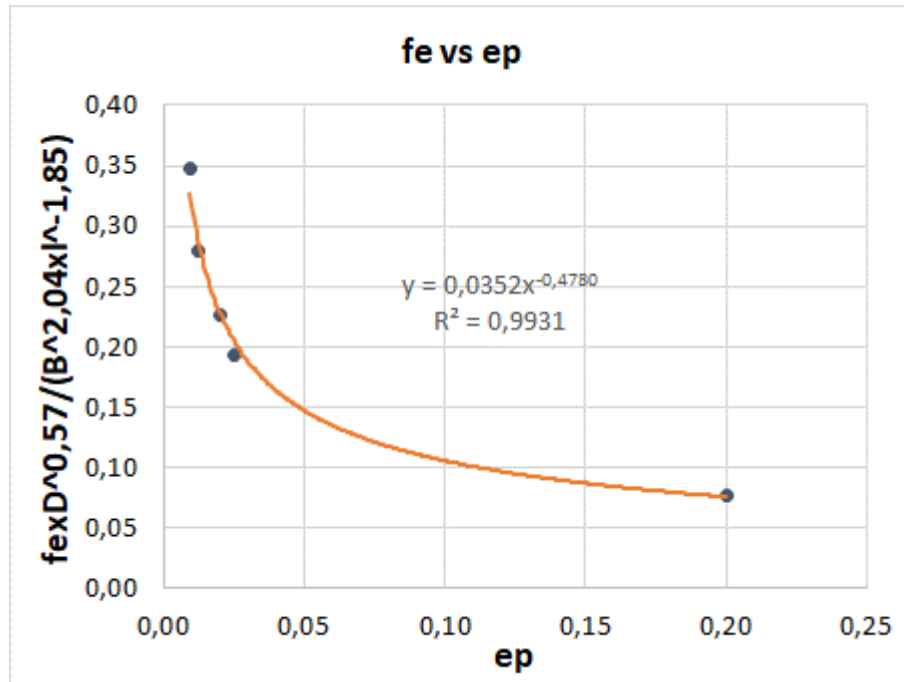


Figura N°B.36: Curva de ajuste para obtener  $f_e$ .

### 1.3.5 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_a$ para la estimación de la fuerza axial máxima.

Según el análisis de los resultados se observó que las respuestas de estructuras similares y diferentes arriostres presentan una pequeña variación en los resultados.

Esta variación de las respuestas para una estructura con arriostre tipo X y tipo K se puede considerar proporcionales. Es decir que las respuestas para estructuras con arriostre tipo K es igual a la respuesta para estructura con arriostre tipo X multiplicada por una constante.

Considerando los datos de otros grupos de estructuras se obtienen los factores propuestos:

$$\text{Tipo K} \quad f_a = 0.98$$

$$\text{Tipo X} \quad f_a = 1.00$$

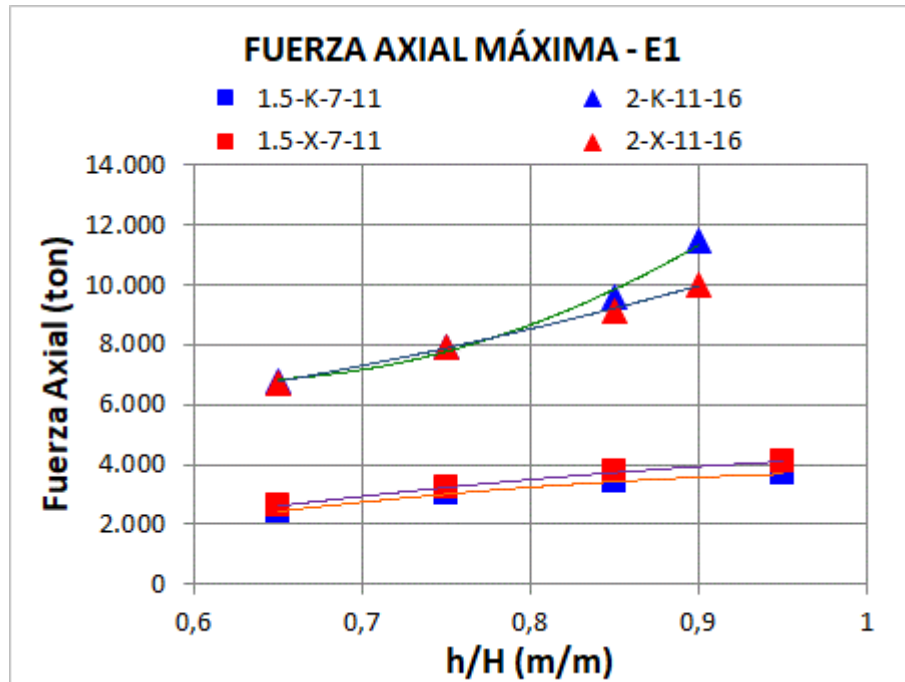


Figura N°B.37: Comparación de resultados de acuerdo al tipo de arriostre.

#### 1.4 DEDUCCIÓN DE LA FÓRMULA DEL MOMENTO FLECTOR MÁXIMO SOBRE EL ELEMENTO MÁS CARGADO PROPUESTA EN EL MÉTODO SIMPLIFICADO.

En esta sección se muestra como se deduce la fórmula propuesta por el método simplificado:

$$M_{ms} = M_0 \cdot f_h \cdot f_{No} \cdot f_e \cdot f_a$$

##### 1.4.1 Deducción de la fórmula de estimación inicial del momento flector máximo en el elemento más cargado $M_0$ .

Se emplea el mismo modelo simple de la estructura (ver Figura N°B.18) y el mismo elemento más cargado.

El Momento flector se puede obtener multiplicando las matrices de rigidez y la matriz de desplazamiento.

$$\begin{bmatrix}
 \frac{EA}{L}Cx^2 + \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{EA}{L}Cx^2 - \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{6EI}{L^2}Cy \\
 \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{EA}{L}Cy^2 + \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & \frac{6EI}{L^2}Cx & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{EA}{L}Cy^2 - \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & \frac{6EI}{L^2}Cx \\
 -\frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{4EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{2EI}{L} \\
 -\frac{EA}{L}Cx^2 - \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{EA}{L}Cx^2 + \frac{12EI}{L^3}Cy^2 & \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{6EI}{L^2}Cy \\
 \left(-\frac{EA}{L} + \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & -\frac{EA}{L}Cy^2 - \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \left(\frac{EA}{L} - \frac{12EI}{L^3}\right)CxCy & \frac{EA}{L}Cy^2 + \frac{12EI}{L^3}Cx^2 & -\frac{6EI}{L^2}Cx \\
 -\frac{6EI}{L^2}Cy & \frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{2EI}{L} & \frac{6EI}{L^2}Cy & -\frac{6EI}{L^2}Cx & \frac{4EI}{L}
 \end{bmatrix} \mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}$$

Figura N°B.38: Matrices de rigidez y desplazamiento del elemento más cargado.

De lo anterior se deduce que el momento flector depende  $u_1, v_1, \theta_1$ ; sin embargo, al trabajar con una matriz condensada, los valores de  $v_1, \theta_1$  dependen de  $u_1$  por ello la ecuación tendría la forma:

$$M_0 = f(u_1)$$

Es por ello que la fórmula de  $M_0$  tiene un parecido a la fórmula del desplazamiento lateral máximo.

$$M_0 = \frac{r^{-0.75} \cdot (D^{-2.39} + e^{-2.39}) \cdot F}{3\pi \cdot E \cdot e \cdot (D - e) \cdot [(4 - r) \cdot B + r \cdot D]^{12.78} \cdot \beta^{-2}}$$

Expresión deducida

Ecuación de la forma de  $u_1$ .

Expresión deducida

Figura N°B.39: Expresiones de la fórmula de estimación del método simplificado.

#### 1.4.2 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_h$ para la estimación del momento flector máximo.

Los resultados obtenidos para un grupo de estructuras se evalúan para identificar la influencia del parámetro  $h/H$  en la estimación del momento flector máximo.

Los valores de  $f_h$  se obtienen de dividir la respuesta real entre la estimación del momento flector. Estos valores se ajustan a una curva para obtener una ecuación para  $f_h$ .

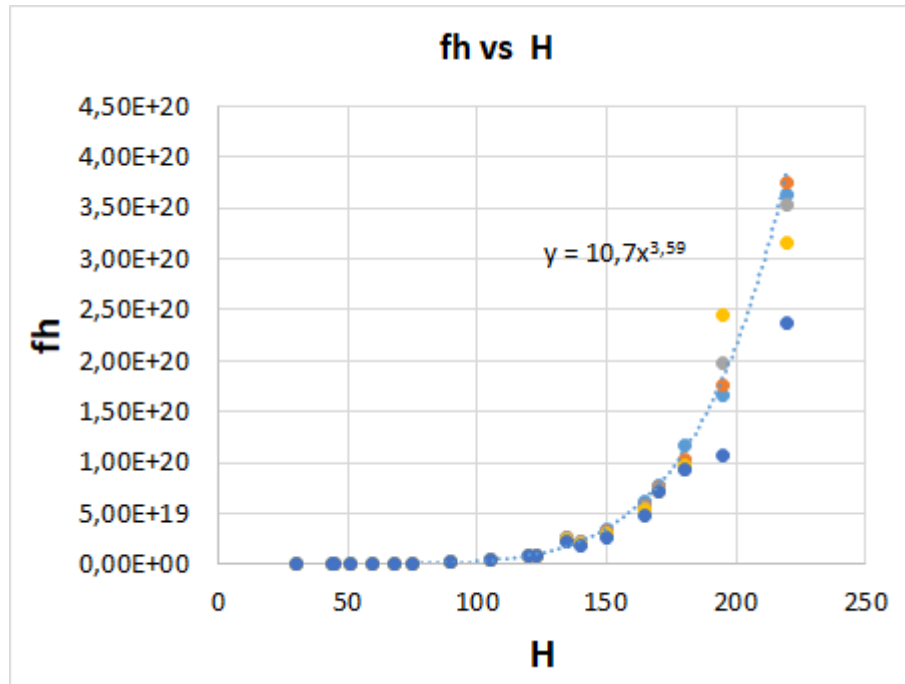


Figura N°B.40: Ajuste de datos para obtener la ecuación de  $f_h$ .

La figura anterior muestra que los datos se pueden ajustar empleando una curva de la forma  $aH^b$ . Este ajuste nos permite encontrar la ecuación propuesta para  $f_h$ .

$$f_h = 10.7 \cdot H^{3.59}$$

#### 1.4.3 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_{N_0}$ para la estimación del momento flector máximo.

Los resultados obtenidos del análisis de los modelos paramétricos son analizados teniendo en cuenta la altura de la estructura, la relación h/H y de sobremanera el parámetro de suelo  $N_0$ .

Los valores de  $f_{No}$  sirven como datos para el ajuste, se obtienen de la división de los resultados obtenidos para los modelos con los resultados obtenidos de la estimación inicial y los resultados obtenidos para  $f_h$ . Así obtenemos la siguiente figura:

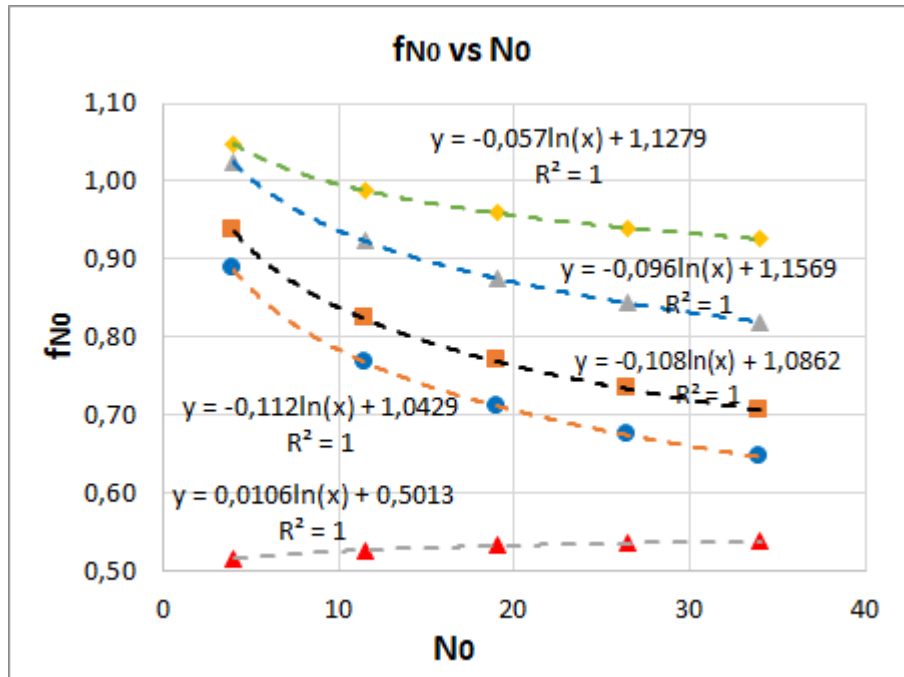


Figura N°B.41: Comparación de resultados para grupos de estructuras con diferentes alturas.

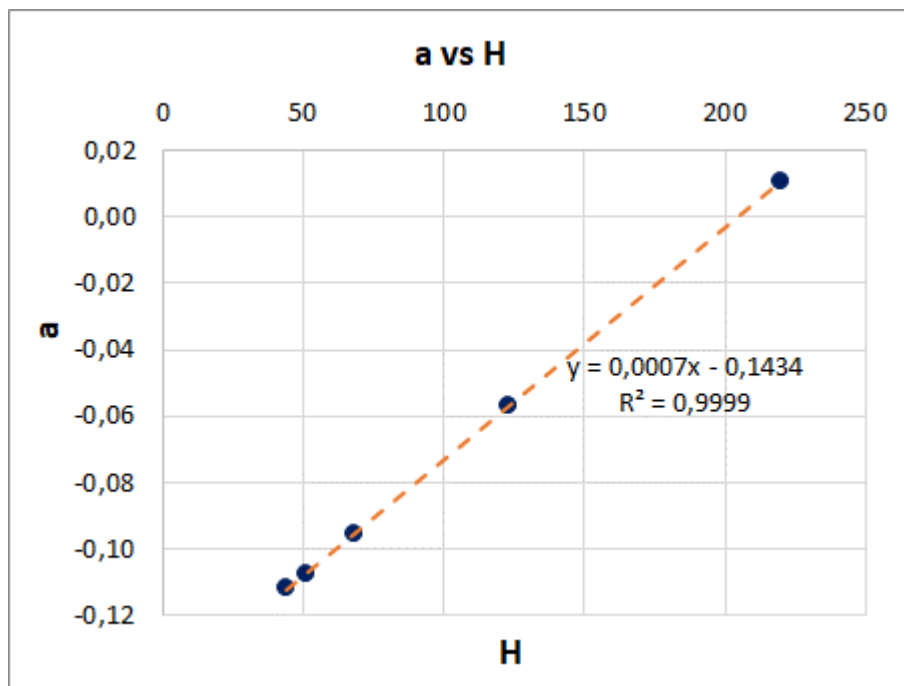


Figura N°B.42: Ajuste del primer coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .



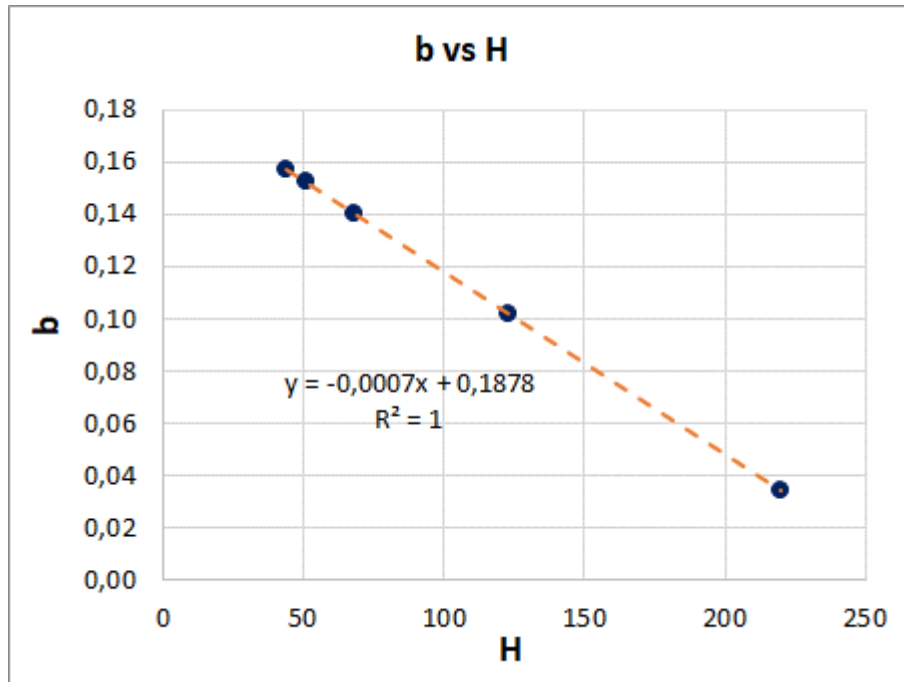


Figura N°B.43: Ajuste del segundo coeficiente de la ecuación de  $f_{No}$ .

Las figuras N°B.42 y N°B.43 muestran la correlaciones que se realizan sobre los coeficientes de las ecuaciones de la figura N°B.41 para obtener la ecuación propuesta para  $f_{No}$ :

$$f_{No} = a \cdot \ln N_o + b \cdot H^{0.5}$$

Donde:

$$a = 0.0007 \cdot H - 0.1434$$

$$b = -0.0007 \cdot H + 0.1878$$

$$f_{No} = 1$$

Para el caso empotrado se considera:

$$f_{No} = 1$$

#### 1.4.4 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_e$ para la estimación del momento flector máximo.

Para deducir la ecuación del factor  $f_e$  se trabaja considerando la variación de que existe dentro de un mismo grupo de estructuras con parámetros similares. Las respuestas reales son comparadas con las obtenidas con el análisis paramétrico. La diferencia entre ellos se traduce en el efecto del espesor en la dinámica de la estructura.

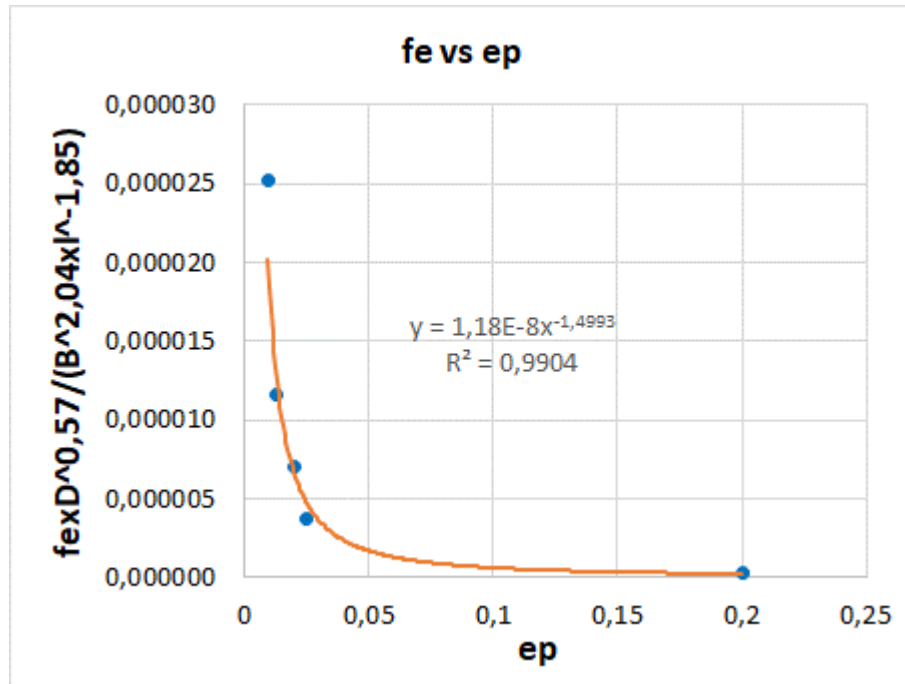


Figura N°B.44: Curva de ajuste para obtener  $f_e$ .

La figura N°B.44 permite correlacionar la variación que existe con la altura y establecer la fórmula propuesta:

$$f_e = 1.88 \cdot 10^{-8} \cdot B^{5.5} \cdot D^{-1.36} \cdot e^{-1.4993} \cdot l^{-2.72}$$

#### 1.4.5 Deducción de la fórmula del factor de modificación $f_a$ para la estimación del momento flector máximo.

Según el análisis de resultados, la variación de las respuestas para una estructura con arriostre tipo X y tipo K se puede considerar proporcionales. Es decir que las respuestas para estructuras con

arriostre tipo K es igual a la respuesta para estructura con arriostre tipo X multiplicada por una constante.

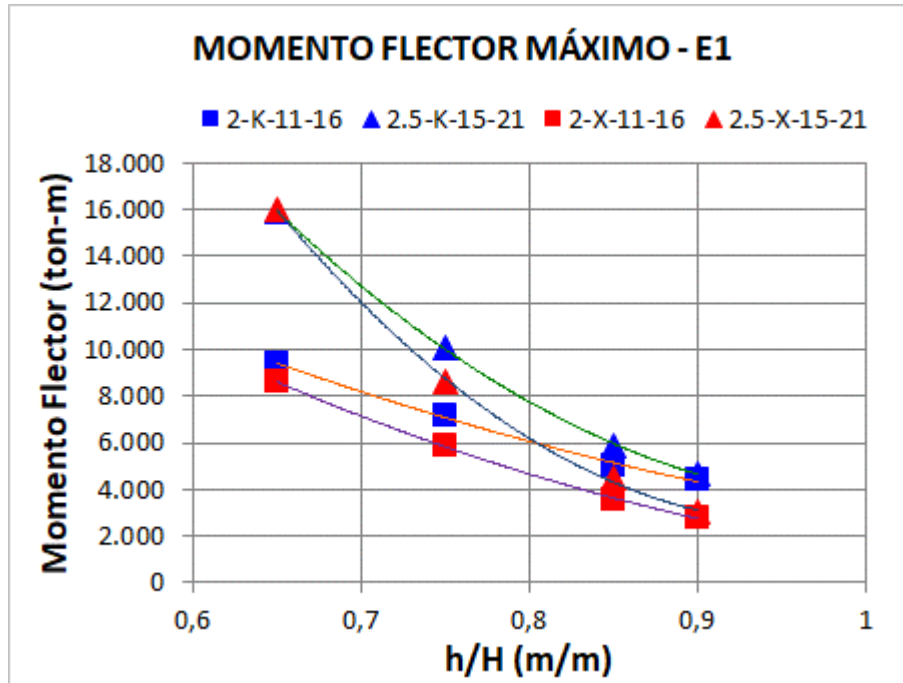


Figura N°B.45: Comparación de resultados de acuerdo al tipo de arriostre.

Considerando los datos de otros grupos de estructuras se obtienen los factores propuestos:

$$\text{Tipo K} \quad f_a = 1.18$$

$$\text{Tipo X} \quad f_a = 1.00$$