



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas, Oceánicas y**

**Recursos Naturales**

**ESTIMACIÓN DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR  
DINÁMICOS EN UN TANQUERO DE 7440 DWT SOMETIDO A UN MAR  
IRREGULAR EXTREMO**

**TESIS DE GRADO**

Previa la obtención del Título de

**INGENIERO NAVAL**

**Presentado por**

Lisette Priscilla Salazar Loor

**Guayaquil – Ecuador**

**2014**

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres por ser un ejemplo a seguir, por enseñarme el valor del esfuerzo y la importancia de la educación, a mis hermanos por su constante apoyo. A mi director de tesis PhD. José Marín por compartir sus conocimientos durante mis años de estudio y durante la elaboración de este documento.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad por las ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, corresponden exclusivamente a su autor, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado corresponderá a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)

---

Lisette Priscilla Salazar Loor

## TRIBUNAL DE GRADO

---

Ing. Marco Velarde, M.Sc.

Presidente del Tribunal

---

José R. Marín L., PhD.

Director de Tesis

---

Ing. Cristóbal Mariscal, M.Sc.

Miembro Principal

## RESUMEN

En esta tesis se calculó la respuesta estructural en mar irregular de una embarcación tipo tanquero de 7440 DWT y 112 m de eslora entre perpendiculares. Para esto, se utilizó primero el programa SCORES, [6], con el cual se obtuvieron, en olas regulares, los Operadores de Amplitud de Respuesta (RAO) de la Fuerza Cortante Vertical y el Momento Flector. Dichos valores se calcularon para un rango de longitudes de ola entre 20 y 270 m, con ángulos de incidencia de ola desde  $90^\circ$  hasta  $180^\circ$ , y, para tres condiciones de carga: i) lastre con consumibles al 10%, ii) 78% de carga con consumibles al 10%, y, iii) consumibles y carga al 100%. Además, los cálculos de Fuerza Cortante se aplicaron a  $L/4$  y  $3L/4$  de la embarcación y, los de Momento Flector, en Sección Media. Se determinó que las máximas respuestas estructurales ocurren bajo la influencia de olas de proa ( $180^\circ$ ), en la primera condición de carga, y, con longitudes de ola de alrededor del 90% de la eslora entre perpendiculares.

Luego, se implementó el método de predicción de cargas a Corto Plazo para determinar los valores máximos de Fuerza Cortante y Momento Flector que se desarrollan en el casco de la embarcación al ser sometido, por un tiempo corto (una hora), a un mar irregular extremo. Se representó dicho fenómeno de manera probabilística empleando el concepto de Espectro de Estado de Mar, que se combinó con los resultados en olas regulares, para identificar los

siguientes parámetros: RMS y ancho de banda del proceso, los cuales se usan en el cálculo de las Funciones de Distribución Acumulada (CDF). Luego, asumiendo probabilidades de excedencia de  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$  se encontraron los valores de diseño de Fuerza Cortante y Momento Flector para cada probabilidad. Los cálculos mencionados se realizaron en tres Estados de Mar: 5, 6 y 7, y para las tres condiciones de carga ya descritas.

Se implementó también el método de predicción de cargas a Largo Plazo para determinar los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector que se desarrollarán en la embarcación con una probabilidad de  $10^{-8}$  en 20 años de Vida Útil, navegando en mar irregular. Para esto, se asumió una ruta de navegación, y, al igual que en los cálculos a Corto Plazo, se determinaron los parámetros RMS y ancho de banda para cada Estado de Mar que se presenta en dicha ruta. En este caso, se consideró como Función de Distribución de Probabilidad Acumulada la de Weibull. Además, se encontró la probabilidad de que se excedan límites determinados para Fuerza Cortante y Momento Flector. Estos cálculos se realizaron para las tres condiciones de carga ya mencionadas.

Finalmente, empleando el programa de cálculos hidrostáticos CHidrBuq, [7], se calcularon las Fuerzas Internas que se desarrollan en Aguas Tranquilas, y, en Olas por el método Cuasiestático. Además se calcularon dichos parámetros usando las fórmulas de la Sociedad de Clasificación DNV. Estos

resultados se compararon con los obtenidos en los cálculos probabilísticos a Corto y Largo Plazo obteniendo una diferencia de 6% para Fuerza Cortante y 9% para Momento Flector entre los de Largo Plazo y las formulaciones de DNV.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
INDICE DE ANEXOS.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL .....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
CAPÍTULO 1 .....	5
1.1 Características de la embarcación.....	5
1.2 Condiciones de carga. ....	10
1.3 Cálculo de Fuerza Cortante. ....	15
Condición 1: Llegada a Puerto sin carga.....	17
Condición 2: Llegada a Puerto con carga. ....	19
Condición 3: Salida de Puerto (Carga completa) .....	20
1.4 Cálculo de Momento Flector. ....	22
Condición 1: Llegada a Puerto sin carga.....	23
Condición 2: Llegada a Puerto con carga. ....	25
Condición 3: Salida de Puerto (Carga completa) .....	27
CAPÍTULO 2.....	30

2.1	Definición de Estados de Mar y sus respectivos Espectros.....	30
2.2	Proceso de cálculo de la respuesta de la embarcación en olas irregulares.....	36
2.3	Análisis de resultados a corto plazo. ....	46
(A)	Distribución del valor extremo de una secuencia de N picos o máximos.....	48
(B)	Distribución del valor extremo Asintótica Tipo I.....	50
(C)	Distribución del valor extremo basado en el análisis de intersecciones. ....	53
(D)	Distribución del valor extremo basado en una descripción de dos estados de un proceso aleatorio. ....	55
(E)	Distribución de Rayleigh.....	56
CAPÍTULO 3.....		60
3.1	Definición de la ruta de navegación, correspondientes Estados y Espectros de Mar.....	60
3.2	Proceso de cálculo de la respuesta de la embarcación en olas irregulares.....	66
3.3	Análisis de resultados a largo plazo. ....	71
CAPÍTULO 4.....		82
4.1	Cálculo de Fuerzas Internas en aguas tranquilas.....	82
4.2	Cálculo de fuerzas internas por método cuasiestático.....	87
4.3	Aplicación de formulaciones de sociedades de clasificación.....	92
4.4	Resumen y comparación de resultados.....	97
CONCLUSIONES .....		100
RECOMENDACIONES.....		104

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Plano de Líneas de Formas de la Embarcación. ....	8
<b>Figura 2:</b> Plano de Distribución General de un Tanquero de 7440 DWT .....	9
<b>Figura 3:</b> Distribución de Pesos en Tres Condiciones de Carga.....	12
<b>Figura 4:</b> Área Seccional a lo largo de la Eslora. ....	14
<b>Figura 5:</b> Dirección de la ola respecto a la embarcación. ....	16
<b>Figura 6:</b> RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 1. ....	17
<b>Figura 7:</b> RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 2. ....	19
<b>Figura 8:</b> RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 3. ....	20
<b>Figura 9:</b> RAO's de Momento Flector actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 1.....	23
<b>Figura 10:</b> RAO's de Momento Flector actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 2.....	25

<b>Figura 11:</b> RAO's de Momento Flector actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 3.....	27
<b>Figura 12:</b> Espectro 2-D del Estado de Mar 5.....	33
<b>Figura 13:</b> Espectro 2-D del Estado de Mar 6.....	34
<b>Figura 14:</b> Espectro 2-D del Estado de Mar 7.....	34
<b>Figura 15:</b> Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 1 y Estado de Mar 5.....	38
<b>Figura 16:</b> Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 1 y Estado de Mar 5.....	39
<b>Figura 17:</b> RMS de Fuerza Cortante y Momento Flector en Estados de Mar 5, 6 y 7 y condiciones de carga 1, 2 y 3.....	45
<b>Figura 18:</b> Ancho de banda de Fuerza Cortante y Momento Flector en Estados de Mar 5, 6 y 7 y condiciones de carga 1,2 y 3.....	45
<b>Figura 19:</b> Diagrama de flujo del proceso iterativo de distribución asintótica. .....	51
<b>Figura 20:</b> Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 1 y Estado de Mar 7.....	58

<b>Figura 21:</b> Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 1 y Estado de Mar 7.....	59
<b>Figura 22:</b> Ubicación en el mapa de las zonas geográficas cuya información es conocida por medio de [10]. .....	61
<b>Figura 23:</b> RMS de Fuerza Cortante en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3 .....	69
<b>Figura 24:</b> RMS de Momento Flector en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3.....	69
<b>Figura 25:</b> Ancho de Banda de Fuerza Cortante en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3.....	70
<b>Figura 26:</b> Ancho de Banda de Momento Flector en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3.....	71
<b>Figura 27:</b> Fuerza Cortante a diferentes parámetros de Weibull.....	76
<b>Figura 28:</b> Momento Flector a diferentes parámetros de Weibull.....	77
<b>Figura 29:</b> Equilibrio estático en Condición 1 de carga (Lastre).....	83
<b>Figura 30:</b> Convención de signos programa ChidrBuq. ....	85
<b>Figura 31:</b> Fuerza Cortante en Aguas Tranquilas en las tres condiciones de carga.....	86

<b>Figura 32:</b> Momento Flector en Aguas Tranquilas en las tres condiciones de carga.....	86
<b>Figura 33:</b> Fuerza Cortante en Arrufo en tres condiciones de carga.....	89
<b>Figura 34:</b> Momento Flector en Arrufo en tres condiciones de carga.....	89
<b>Figura 35:</b> Fuerza Cortante en Quebranto en tres condiciones de carga. ...	90
<b>Figura 36:</b> Momento Flector en Quebranto en tres condiciones de carga. ..	90
<b>Figura 37:</b> Valores de $k_{sq}$ de acuerdo con la posición longitudinal a lo largo de la eslora de la embarcación. ....	94

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I:</b> Características principales de la embarcación. ....	6
<b>Tabla II:</b> Porcentaje de llenado de los tanques.....	11
<b>Tabla III:</b> Características de la embarcación en cada condición de carga....	13
<b>Tabla IV:</b> Máximos valores de Fuerza Cortante en la Condición 1.....	18
<b>Tabla V:</b> Máximos valores de Fuerza Cortante en la Condición 2.....	19
<b>Tabla VI:</b> Máximos valores de Fuerza Cortante en la Condición 3.....	21
<b>Tabla VII:</b> Máximos valores de Momento Flector en la Condición 1.....	24
<b>Tabla VIII:</b> Máximos valores de Momento Flector en la Condición 2.....	26
<b>Tabla IX:</b> Máximos valores de Momento Flector en la Condición 3.....	28
<b>Tabla X:</b> Características de Estados de Mar seleccionados. ....	32
<b>Tabla XI:</b> Máximos valores de Espectro de Mar a diferentes ángulos de incidencia y Estados de Mar. ....	35
<b>Tabla XII:</b> Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar 5, 6 y 7. Condición 1.....	41
<b>Tabla XIII:</b> Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar 5, 6 y 7. Condición 2.....	41

<b>Tabla XIV:</b> Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar 5, 6 y 7. Condición 3.....	42
<b>Tabla XV:</b> RMS y ancho de banda para Fuerza Cortante y Momento Flector. Condición 1.....	43
<b>Tabla XVI:</b> RMS y ancho de banda para Fuerza Cortante y Momento Flector. Condición 2.....	43
<b>Tabla XVII:</b> RMS y ancho de banda para Fuerza Cortante y Momento Flector. Condición 3.....	44
<b>Tabla XVIII:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método A en la Condición 1.....	49
<b>Tabla XIX:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método B en la Condición 1.....	52
<b>Tabla XX:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método C en la Condición 1.....	54
<b>Tabla XXI:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método D en la Condición 1.....	56
<b>Tabla XXII:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método E en la condición 1.....	57

<b>Tabla XXIII:</b> Características de los Estados de Mar en las zonas 19, 25, 27 y 33.....	63
<b>Tabla XXIV:</b> Frecuencia Porcentual, tiempo de ocurrencia y número de máximos para cada Estado de Mar. ....	65
<b>Tabla XXV:</b> Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 1.....	67
<b>Tabla XXVI:</b> Valores de RMS y ancho de banda en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 1.....	68
<b>Tabla XXVII:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector para una probabilidad de excedencia de $4.7E-8$ con diferentes valores de parámetro de forma de Weibull. ....	75
<b>Tabla XXVIII:</b> Resultados de Fuerza Cortante empleando el método de predicción a largo plazo con distribución de probabilidades de Weibull. <b>Fuente:</b> Elaboración Propia.....	78
<b>Tabla XXIX:</b> Resultados de Momento Flector empleando el método de predicción a largo plazo con distribución de probabilidades de Weibull. ....	78
<b>Tabla XXX:</b> Probabilidad de excedencia de Fuerza Cortante correspondiente al valor límite de 1573 ton para dos parámetros de Weibull. Condición 1. ...	79

<b>Tabla XXXI:</b> Probabilidad de excedencia de Momento Flector correspondiente al valor límite de 44944 ton-m para dos parámetros de Weibull. Condición 1. ....	80
<b>Tabla XXXII:</b> Resumen de Probabilidades de Excedencia en Fuerza Cortante y Momento Flector para tres Condiciones de Carga y diferentes parámetros de Weibull. ....	81
<b>Tabla XXXIII:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas, Condición de carga 1. ....	84
<b>Tabla XXXIV:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas.....	87
<b>Tabla XXXVI:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector en situación de Arrufo para tres condiciones de carga. ....	91
<b>Tabla XXXVII:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector en situación de Quebranto para tres condiciones de carga. ....	91
<b>Tabla XXXVIII:</b> Cálculo de coeficiente de ola $C_w$ según DNV 2008.....	93
<b>Tabla XXXIX:</b> Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas y Olas, según DNV. ....	97
<b>Tabla XL:</b> Comparación de resultados de Fuerza Cortante empleando diferentes métodos. ....	98

<b>Tabla XLI:</b> Comparación de resultados de Momento Flector calculado empleando diferentes métodos.....	99
---	----

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO A.....	107
ANEXO B.....	111
ANEXO C.....	117
ANEXO D.....	124
ANEXO E.....	134
ANEXO F.....	137
ANEXO G.....	147
ANEXO H.....	159
ANEXO I.....	163
ANEXO J.....	167

## INTRODUCCIÓN

Un mar irregular es un fenómeno aleatorio que puede representarse como la combinación de olas regulares de diversas amplitudes y longitudes. Para estimar la distribución de energía de esta combinación se emplea el concepto de Espectro de Estado de Mar, [2]. El Estado de Mar resume las condiciones de oleaje en determinado momento en un espacio geográfico y se define básicamente por la altura de las olas, [1]. Durante su navegación, las embarcaciones sufren la incidencia de estas olas, por tanto, su respuesta estructural será de tipo dinámica y aleatoria.

Debido a su complejidad, normalmente el efecto dinámico producido por olas irregulares en el buque se maneja en forma simplificada. Se aplican diferentes métodos para el cálculo del Momento Flector y de la Fuerza Cortante en olas, los cuales consisten en formulaciones de las sociedades de clasificación, o, el método cuasiestático, que simula la acción de las olas variando la distribución de pesos. Un tercer método, que permite analizar de mejor manera el efecto del fenómeno aleatorio, es a través de la probabilidad de excedencia o de predicción de cargas extremas, que puede realizarse con estimaciones a corto o a largo plazo, considerando una respuesta lineal de la embarcación [3].

En los métodos de probabilidad de excedencia a corto o largo plazo se analiza el efecto aleatorio usando un modelo probabilístico, [3]. Para

conocer la probabilidad de falla en un período corto de navegación, por ejemplo durante una tormenta, se puede aplicar el método de corto plazo. Para realizar un diseño, la predicción de cargas a Corto Plazo no es suficiente, por lo tanto, se debe aplicar el método a Largo Plazo que estima las cargas que sufre la estructura de la embarcación a lo largo de su vida útil, [3]. Tal como se percibe, este cálculo es bastante largo y poco conocido, pero su aplicación es de gran importancia sobre todo en buques de eslora considerable.

## **OBJETIVO GENERAL**

Estimar la fuerza cortante y el momento flector que se producen en un buque tanquero de 7440 DWT sometido a olas irregulares extremas a lo largo de su vida útil, utilizando el método de probabilidad de excedencia.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Calcular la respuesta de un buque tanquero de 7440 DWT en olas regulares con diferentes condiciones de carga utilizando el programa SCORES que emplea el método de fajas.
2. Implementar el método de predicción de cargas a Corto Plazo para calcular Fuerza Cortante y Momento Flector en secciones críticas de la embarcación considerando varios estados de mar.
3. Implementar el método de predicción de cargas a Largo Plazo para calcular Fuerza Cortante y Momento Flector en secciones críticas de la embarcación en una ruta de navegación.
4. Comparar los resultados del método a Largo Plazo con los obtenidos al aplicar el método Cuasiestático y la formulación de la Sociedad Clasificadora DNV.

## **BENEFICIOS**

Con este trabajo se adquirirá la experiencia para analizar la respuesta estructural vertical de una embarcación de 7440 DWT en un medio real. De esta forma se podrá estudiar de mejor manera el fenómeno dinámico lo que nos permitirá ganar confianza en la aplicación de las formulaciones de las sociedades de clasificación.

## **HIPÓTESIS**

Los resultados de la estimación de la Fuerza Cortante y el Momento Flector utilizando el método probabilístico a Largo Plazo son consistentes con los valores obtenidos con formulaciones más simples.

## **CAPÍTULO 1**

### **CÁLCULO DE LA RESPUESTA DE LA EMBARCACIÓN EN OLAS REGULARES EN DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA.**

#### **1.1 Características de la embarcación.**

La embarcación a ser analizada en este trabajo es de tipo tanquero con 7440 DWT y 112 m de eslora entre perpendiculares. Sus líneas de formas, típicas de un tanquero, muestran una sección transversal con costados verticales, fondo plano y pantoque redondeado. Además, posee un bulbo de proa con una longitud de aproximadamente el 3% de la eslora entre perpendiculares. Los Coeficientes Bloque y de Sección Media son 0.772 y 0.979 respectivamente en la línea de agua de diseño. Cuenta con doble casco, 12 tanques de carga en dos filas y, debajo de ellos, los tanques de lastre.

En esta tesis, se va a analizar la respuesta en olas irregulares de un tanquero de operación local que tiene un peso muerto de 7440 DWT, sus características principales se presentan en la Tabla I.

<b>Característica</b>		<b>Unidades</b>
Eslora total	120.55	m
Eslora en línea de agua de diseño	114.56	m
Eslora entre perpendiculares	112.00	m
Manga moldeada	17.20	m
Puntal moldeado	8.90	m
Calado de diseño	6.70	m
Coefficiente Bloque	0.772	-
Coefficiente de Sección Media	0.979	-

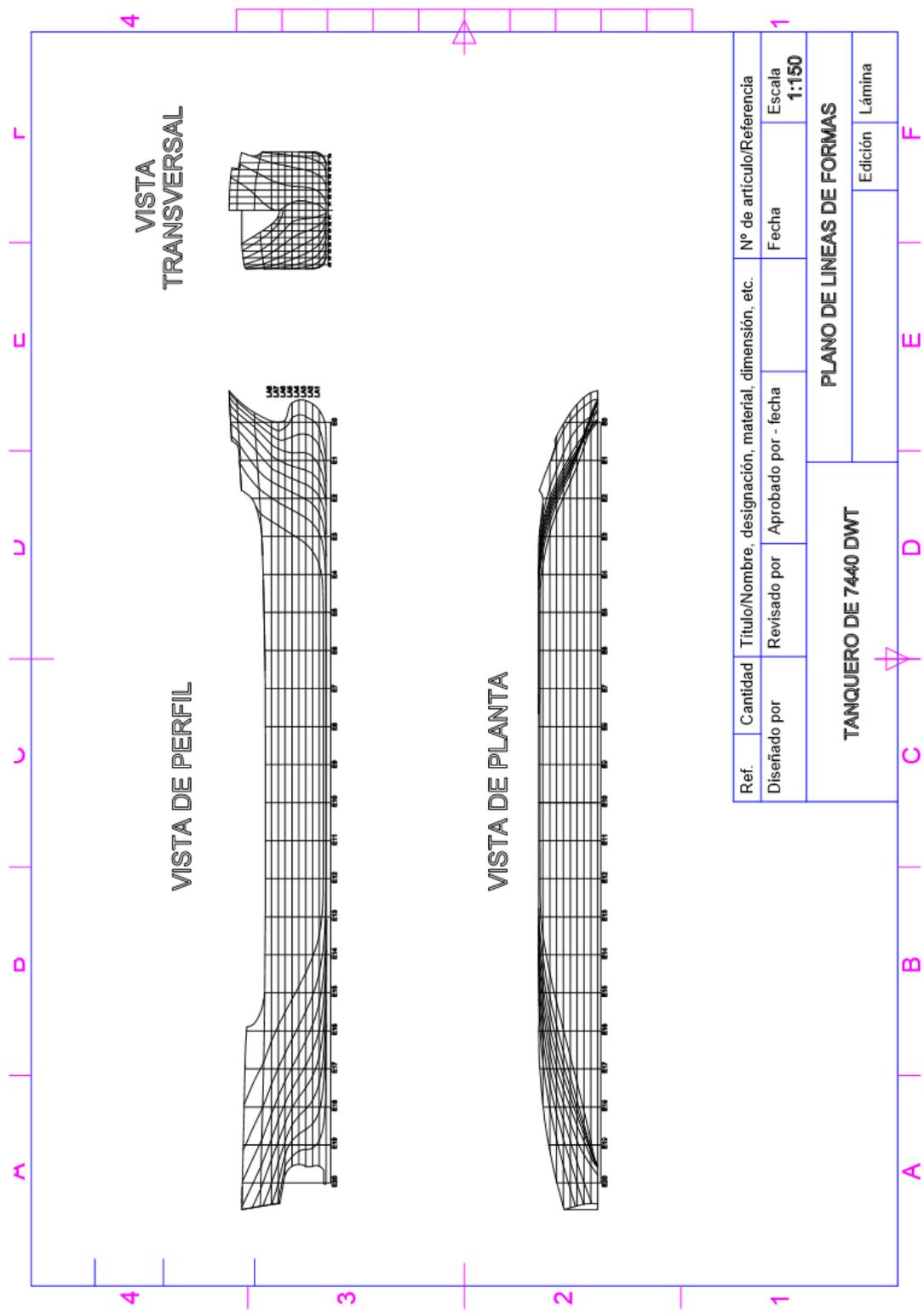
**Tabla I:** Características principales de la embarcación.

**Fuente:** [5]

En la Figura 1 se presenta el plano de líneas de formas y, en la Figura 2, el plano de distribución general del tanquero analizado.

En la popa de la embarcación se encuentra la superestructura de aproximadamente el 20% de la eslora; y en esta zona, bajo cubierta principal, se ubican tanques de combustible en la cubierta intermedia y, de aceite y sentina en el doble fondo. En la zona central del buque, que incluye un cuerpo medio paralelo, están ubicados los 12 tanques de carga y en el doble costado y fondo, los tanques de lastre. Hacia la zona de proa se encuentran

los tanques de agua dulce. La detallada ubicación de los tanques entre las cuadernas, se encuentra en el Anexo A de este trabajo [Tabla A I].



**Figura 1:** Plano de Líneas de Formas de la Embarcación.

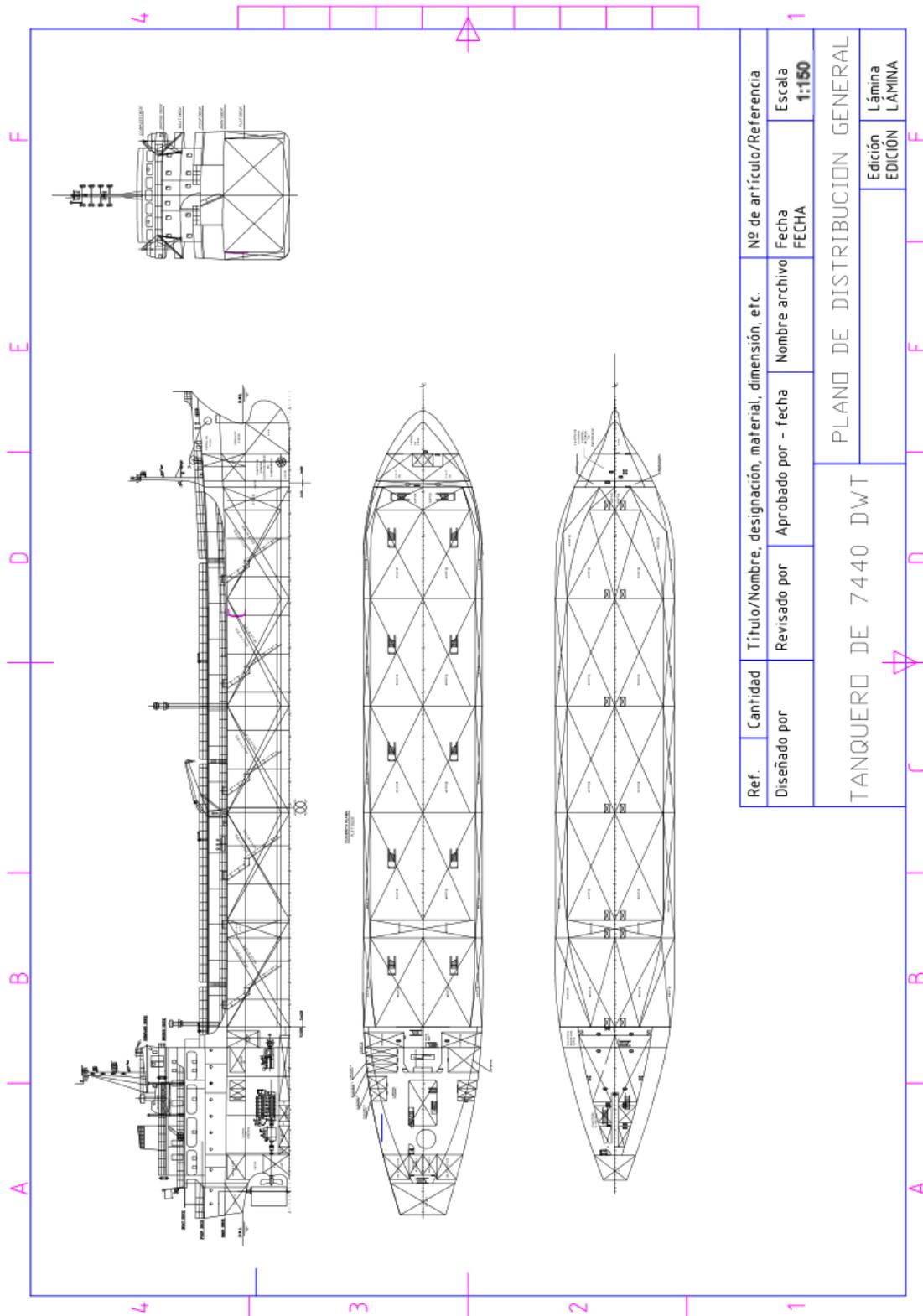


Figura 2: Plano de Distribución General de un Tanquero de 7440 DWT

## **1.2 Condiciones de carga.**

Las tres condiciones de carga consideradas en este trabajo son: i) lastre con consumibles al 10%, ii) 78% de carga con consumibles al 10%, y, iii) consumibles y carga al 100%. El desplazamiento de la embarcación respecto a la condición de carga completa es de 54% en la primera condición y 81% en la segunda. Existe una zona de concentración de carga entre 39 m a proa y 28 m a popa de sección media porque en esta región se encuentran los tanques de carga y lastre. Se observan cambios en el asiento en las tres condiciones de 2.17, 2.58, y 1.34 m respectivamente.

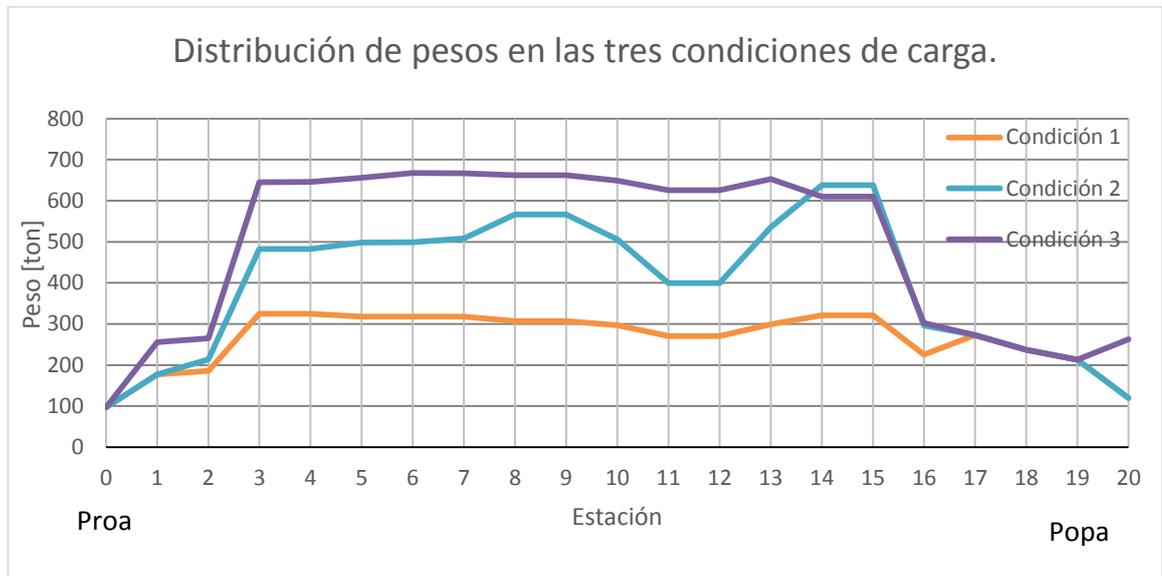
En este capítulo se va a analizar la respuesta estructural de la embarcación a estas tres condiciones de carga, las cuales fueron escogidas para cubrir un rango entre el menor y mayor desplazamiento posible durante la navegación. El porcentaje de llenado de los tanques en cada condición se presenta en la Tabla II.

Descripción del tanque	% Llenado		
	Condición 1	Condición 2	Condición 3
Desplazamiento Ligero	2843 [ton]		
Carga N°1	0%	80%	98%
Carga N°2	0%	80%	98%
Carga N°3	0%	82%	98%
Carga N°4	0%	60%	89%
Carga N°5	0%	100%	90%
Carga N°6	0%	100%	89.6%
Lastre	100%	0%	0%
Aceite	100%	100%	100%
Sentina	0%	0%	0%
Combustible	10%	10%	100%
Agua Dulce	10%	10%	100%
Peso Muerto [DWT]	2682	5505	7443

**Tabla II:** Porcentaje de llenado de los tanques.

**Fuente:** [5]

De acuerdo con la ubicación y llenado de los tanques y, considerando el peso ligero de la embarcación, la distribución de pesos por cada condición de carga a lo largo de la eslora se muestra en la Figura 3. Se han considerado segmentos de 5.6 m centrados en cada estación. La Estación 0 se ubica en la Perpendicular de Proa, y la Estación 20 en la Perpendicular de Popa. Esta información se muestra en detalle en el Anexo A de este informe [Tabla A-II].



**Figura 3:** Distribución de Pesos en Tres Condiciones de Carga.

**Fuente:** Elaboración Propia

El peso en las estaciones 17, 18 y 19 coincide en las tres condiciones de carga, debido a que en esta zona el mayor aporte de peso corresponde a la superestructura. En el espacio comprendido entre las estaciones 3 y 15, zona de tanques de carga y lastre, se nota gran diferencia entre las condiciones de carga ya que el llenado de los tanques difiere en cada condición.

Existen ciertas características hidrostáticas de la embarcación que varían de acuerdo con la condición de carga en la que se encuentre, algunas serán útiles para cálculos posteriores. En la Tabla III se presenta un resumen de las mismas.

	<b>Unidades</b>	<b>Condición 1</b>	<b>Condición 2</b>	<b>Condición 3</b>
Desplazamiento	ton	5525.01	8347.69	10286.45
Eslora en línea de agua	m	112.57	111.75	114.71
Carga	ton	0.00	5442.85	6955.48
Peso tq. de lastre	ton	2620.16	0.00	0.00
Peso tq. de combustible	ton	28.19	28.19	281.85
Peso tq. de agua dulce	ton	19.16	19.16	191.62
Peso tq. de sentina	ton	0.00	0.00	0.00
Peso tq. de aceite	ton	12.40	12.40	12.40
Peso muerto (DWT)	ton	2681.90	5504.60	7443.30
Posición vertical del CG	m	4.71	5.13	5.46
Corrección por Superficie Libre	m	0.04	0.41	0.39
Posición corregida del CG	m	4.74	5.54	5.85
Posición long. del CG (+proa)	m	0.15	0.68	2.30
Calado en perp. de proa	m	2.76	4.29	6.05
Calado medio	m	3.84	5.58	6.72
Calado en perp. de popa	m	4.92	6.87	7.39
Asiento	m	2.17	2.58	1.34

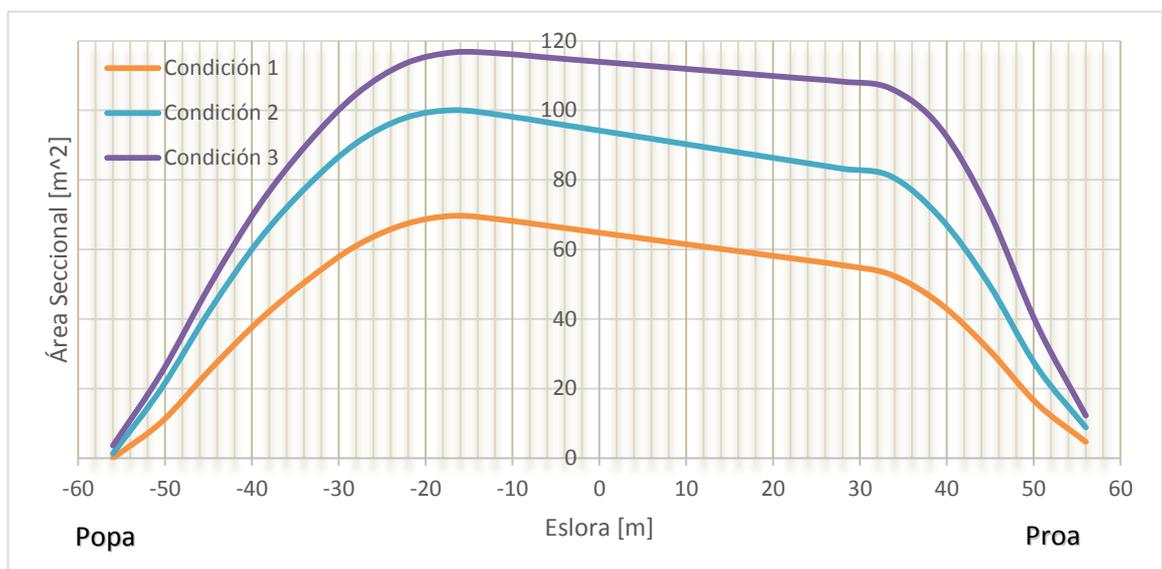
**Tabla III:** Características de la embarcación en cada condición de carga.

**Fuente:** [5]

Las características seccionales de la embarcación varían a lo largo de la eslora en cada condición de carga. En el Anexo A [Tabla A-III] se muestran

los datos de Manga, Calado, Coeficiente de Área Seccional y Área Seccional en cada estación y condición de carga.

A continuación, se presenta una gráfica con la variación de área seccional sumergida a lo largo de la eslora, con el origen en Sección Media y valores positivos hacia proa.



**Figura 4:** Área Seccional a lo largo de la Eslora.

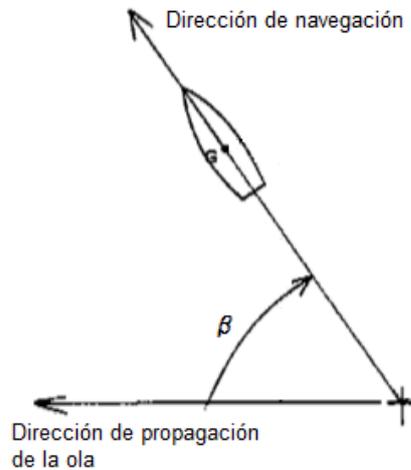
**Fuente:** Elaboración Propia.

En esta gráfica se puede apreciar claramente la zona del cuerpo medio paralelo de la embarcación que va, aproximadamente, desde 18 m hacia popa hasta 30 m hacia proa de la sección media. Debido al asiento, los valores de Área Seccional sumergida en la zona del cuerpo medio paralelo son mayores en popa.

### 1.3 Cálculo de Fuerza Cortante.

Considerando la embarcación como una viga rígida, y, asumiendo una respuesta lineal de la embarcación a la acción de las olas, se utiliza el programa SCORES, para calcular los Operadores de Amplitud de Respuesta (RAO por sus siglas en inglés) de la Fuerza Cortante en las secciones consideradas como críticas de la embarcación. La longitud de las olas incidentes varía desde 20 m (0.2L) hasta 360 m (3L) y el ángulo de incidencia va desde 90° (olas de costado) hasta 180° (olas de proa). El máximo valor de Fuerza Cortante en respuesta a una ola de 1 m de amplitud es de 198 ton y se presenta a 28 m hacia proa de la sección media, L/4. Este valor se produce cuando la embarcación está sometida a una ola incidente de proa ( $\beta=180^\circ$ ) y se encuentra en la Condición 1 que es la de menor desplazamiento.

La Figura 5 muestra un esquema de cómo se forma el ángulo  $\beta$  entre la dirección de propagación de la ola incidente y la dirección de navegación de la embarcación.



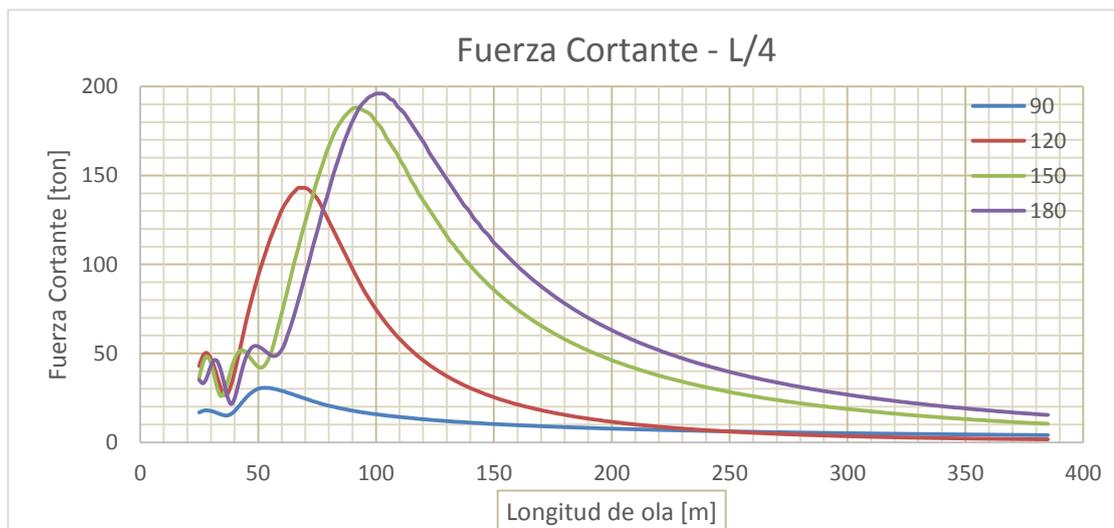
**Figura 5:** Dirección de la ola respecto a la embarcación.

**Fuente:** [6]

El programa SCORES, desarrollado en los 70's en lenguaje FORTRAN, emplea el Método de Fajas para calcular las Fuerzas Internas producidas por la combinación de fuerzas hidrostáticas, inerciales e hidrodinámicas en el plano vertical, [6]. Para la ejecución de este programa, se requiere la preparación de un archivo de datos con las características geométricas de la embarcación, distribución de pesos y características de la ola incidente. La preparación del archivo de datos se presenta en el Anexo B de este trabajo. Una vez que se ejecuta el programa para cada condición, se genera un archivo tipo texto con los resultados de la respuesta lineal de la embarcación para cada longitud de ola y ángulo de incidencia de ( $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  y  $180^\circ$ ). La velocidad del buque se asumió constante de 12 nudos.

El intervalo tomado entre longitudes de ola es de 1 m. Los cálculos se han realizado para tres estaciones: 5, 10 y 15 ubicadas a  $L_{pp}/4$ ,  $L_{pp}/2$  y  $3L_{pp}/4$  respectivamente. A continuación, se presentan los gráficos de Fuerza Cortante Vertical en las tres condiciones para la zona de la embarcación donde la respuesta de la embarcación es máxima, es decir,  $L/4$  (estación 5). Los resultados en las ubicaciones restantes se encuentran en el Anexo C de este trabajo.

**Condición 1: Llegada a Puerto sin carga.**



**Figura 6:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre  $L/4$  a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la Tabla IV se muestran los máximos valores de Fuerza Cortante en las tres zonas analizadas, calculados en la Condición 1 de carga.

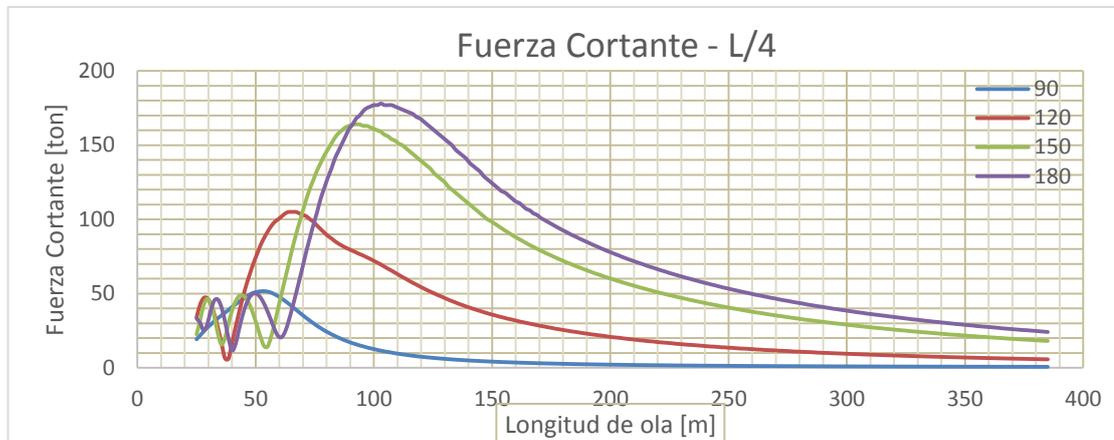
Ángulo de incidencia	90		120		150		180	
Estación	Máx. F.C [ton]	Long. Ola [m]						
5	31.2	54	145	69	190	93	198	101
10	15	51	42	10	90	71	106	79
15	41	50	114	65	145	89	151	98

**Tabla IV:** Máximos valores de Fuerza Cortante en la Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los máximos valores de Fuerza Cortante se producen cuando las olas son recibidas desde proa ( $180^\circ$ ) en las estaciones 5 y 15, y a longitudes de ola de alrededor del 90% de la eslora entre perpendiculares.

### Condición 2: Llegada a Puerto con carga.



**Figura 7:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la Tabla V se muestran los máximos valores de Fuerza Cortante calculados en la Condición 2 de carga.

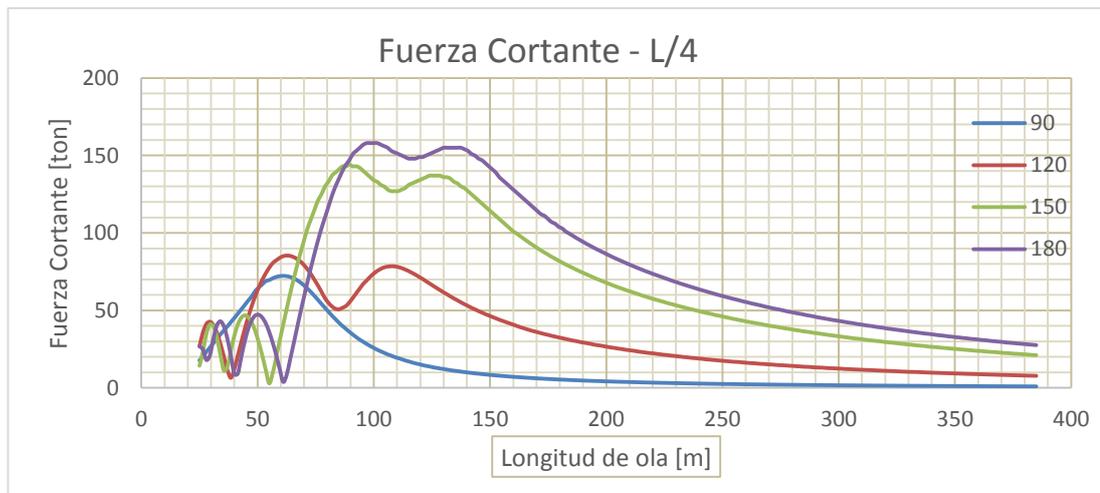
Ángulo de incidencia	90		120		150		180	
	Máx. F.C [ton]	Long. Ola [m]						
5	51.6	53	105	66	164	93	178	104
10	15.4	43	59	81	78	106	92	73
15	79	52	88.2	57	130	81	138	90

**Tabla V:** Máximos valores de Fuerza Cortante en la Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los máximos valores de Fuerza Cortante se producen cuando el ángulo de incidencia de la ola es de  $180^\circ$ , en las estaciones 5 y 15, y a longitudes de ola de alrededor del 93% y 80% de la eslora entre perpendiculares.

### Condición 3: Salida de Puerto (Carga completa)



**Figura 8:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la Tabla VI se muestran los máximos valores de Fuerza Cortante calculados en la Condición 3 de carga.

Ángulo de incidencia	90		120		150		180	
Estación	Máx. F.C [ton]	Long. Ola [m]						
5	72.3	61	85	63	144	90	158	100
10	14	45	61	83	76	112	82	70
15	97	59	84	58	125	82	136	89

**Tabla VI:** Máximos valores de Fuerza Cortante en la Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los máximos valores de Fuerza Cortante se producen cuando el ángulo de incidencia de la ola es de 180°, se presentan en las estaciones 5 y 15, y a longitudes de ola de alrededor del 90% y 80% de la eslora entre perpendiculares.

Los resultados de Fuerza Cortante obtenidos son respuesta a una ola de amplitud de 1 m, por lo tanto, representan un Operador de Amplitud de Respuesta, RAO (Response Amplitude Operator) para la correspondiente longitud de ola, ángulo de incidencia y estación, en las tres condiciones.

El máximo valor de Fuerza Cortante por unidad de amplitud de la ola incidente es 198 toneladas. Considerando estos resultados, la sección crítica para analizar la Fuerza Cortante en esta embarcación es a  $L_{pp}/4$ .

En algunas de las gráficas mostradas, se presenta la particularidad de un pico pronunciado a la derecha del valor máximo de Fuerza Cortante, cuando se esperaría que los valores disminuyan al aumentar la longitud de ola. Esto sucede principalmente en la Sección Media de la Condición 2 y en las tres estaciones de la Condición 3. Probablemente, este fenómeno sea causado por resonancia con los movimientos de levantamiento y cabeceo.

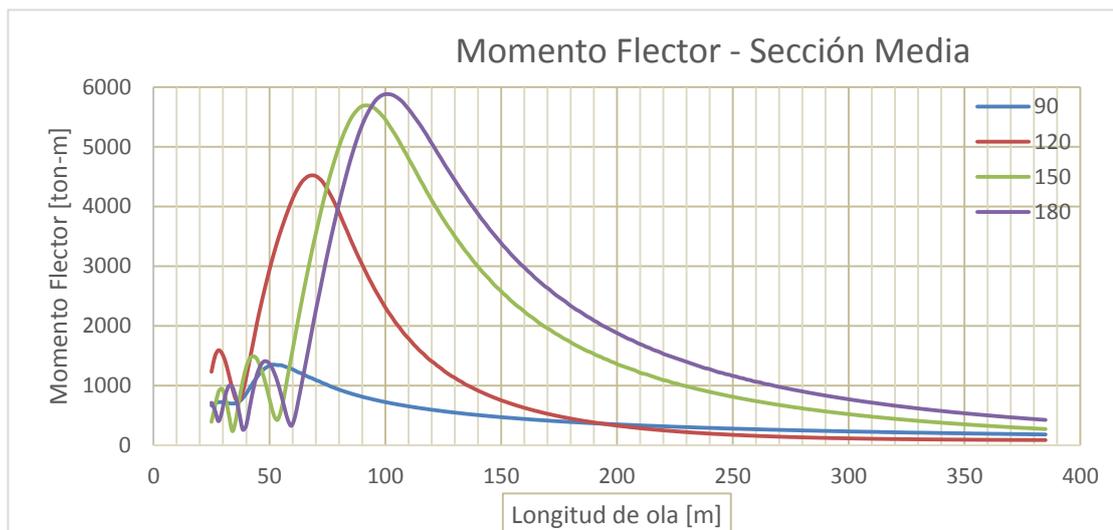
#### **1.4 Cálculo de Momento Flector.**

En forma similar que en el cálculo de la Fuerza Cortante, para el presente se asume una respuesta lineal de la embarcación y, utilizando el programa SCORES, se calculan los RAOs del Momento Flector en las secciones consideradas críticas de la embarcación. Para los cálculos, el rango de longitudes de olas es de 20 m (0.2L) hasta 360 m (3L) con intervalos de 1m. El ángulo de incidencia de ola varía desde 90° a 180°. El máximo valor de Momento Flector en respuesta a una ola de 1 m de amplitud es de 5910 [ton-m] y ocurre en la Sección Media. Este valor se produce cuando la embarcación está sometida a una ola incidente de proa (180°) y se encuentra en la Condición 1 que es la de menor carga. La velocidad del buque se asumió constante de 12 nudos.

Al igual que en el caso de Fuerza Cortante, los cálculos se han realizado para tres estaciones: 5, 10 y 15 ubicadas a  $L_{pp}/4$ ,  $L_{pp}/2$  y  $3L_{pp}/4$

respectivamente, en el rango de longitudes de ola ya especificado y con ángulos de incidencia de  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  y  $180^\circ$  en las tres condiciones. A continuación, se presentan las gráficas de Momento Flector en las tres condiciones de carga para la zona de la embarcación donde se produce la mayor respuesta, es decir, Sección Media (estación 10). Los resultados en las ubicaciones y condiciones de carga restantes se encuentran en el Anexo C de este trabajo.

### Condición 1: Llegada a Puerto sin carga.



**Figura 9:** RAO's de Momento Flector actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la Tabla VII se muestran los máximos valores de Momento Flector calculados en la Condición 1.

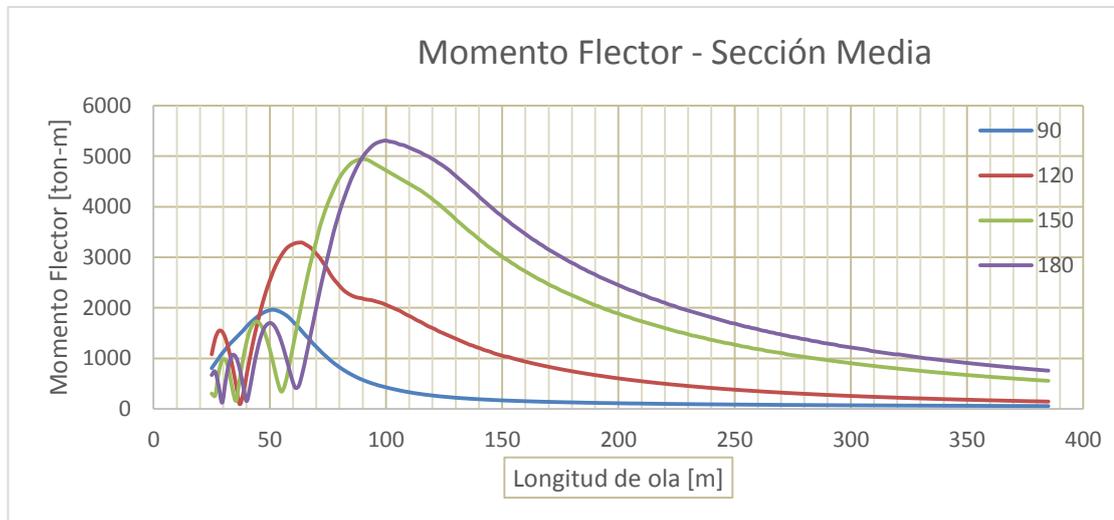
Ángulo de incidencia	90		120		150		180	
Estación	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]
5	629	54	2650	69	3350	94	3500	104
10	1400	54	4570	69	5730	93	5910	101
15	969	54	2140	71	2230	93	2230	103

**Tabla VII:** Máximos valores de Momento Flector en la Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

El mayor valor de Momento Flector se genera cuando el ángulo de incidencia de la ola es de proa (180°), en la estación 10 (Sección Media), y con una longitud de ola del 90% de la eslora entre perpendiculares.

**Condición 2: Llegada a Puerto con carga.**



**Figura 10:** RAO's de Momento Flector actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la Tabla VIII se muestran los máximos valores de Momento Flector calculados en la Condición 2.

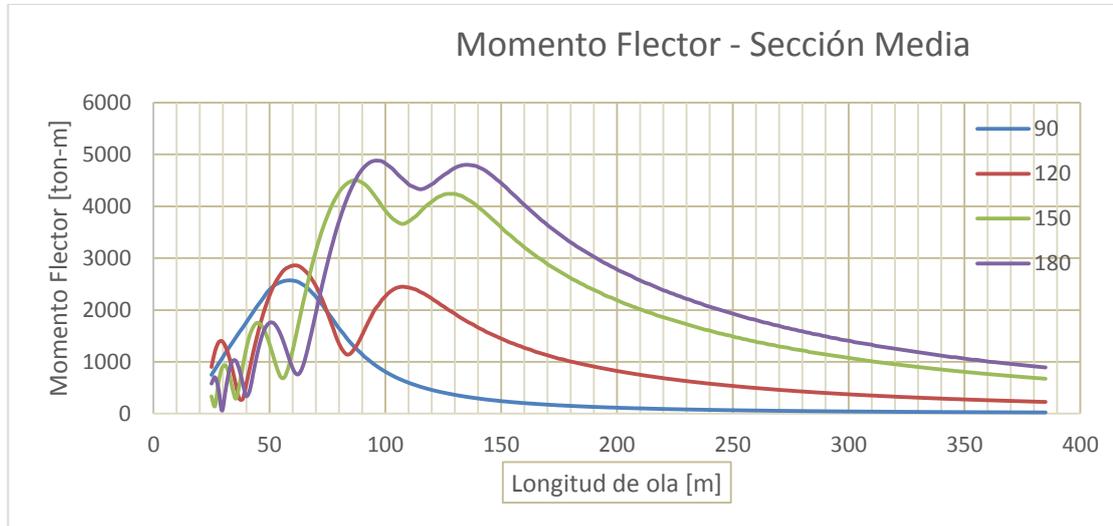
Ángulo de incidencia	90		120		150		180	
Estación	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]
5	922	54	2270	73	3280	102	3480	110
10	1960	52	3290	63	4940	90	5310	100
15	1240	50	1400	56	1820	81	1900	89

**Tabla VIII:** Máximos valores de Momento Flector en la Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los máximos valores de Momento Flector se generan cuando el ángulo de incidencia de la ola es de 180°, en la estación 10 (Sección Media), y a una longitud de ola del 90% de la eslora entre perpendiculares.

### Condición 3: Salida de Puerto (Carga completa)



**Figura 11:** RAO's de Momento Flector actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola. Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la Tabla IX se muestran los máximos valores de Momento Flector calculados en la Condición 3.

Ángulo de incidencia	90		120		150		180	
Estación	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]	Máximo. Momento Flector [ton-m]	Long. Ola [m]
5	1360	64	1790	71	2960	123	3290	131
10	2570	59	2860	60	4500	80	4880	96
15	1300	53	1380	57	1850	82	1970	92

**Tabla IX:** Máximos valores de Momento Flector en la Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los máximos valores de Momento Flector se generan cuando el ángulo de incidencia de la ola es de 180°, en la estación 10 (Sección Media), y a una longitud de ola del 86% de la eslora entre perpendiculares.

Estos resultados de Momento Flector en la estructura del casco, son respuesta a una ola de amplitud de 1 m, por lo tanto, cada uno de los puntos que forman las gráficas representa un Operador de Amplitud de Respuesta para la correspondiente longitud de ola, ángulo de incidencia y estación, en las tres condiciones. Considerando estos resultados, la sección crítica para analizar el Momento Flector es la Sección Media (estación 10).

Al igual que en el caso de Fuerza Cortante, se presenta la particularidad de un pico pronunciado a la derecha del valor máximo de Momento Flector,

cuando se esperaría que los valores disminuyan al aumentar la longitud de ola. Esto sucede principalmente en Sección Media en las Condiciones 2 y 3, y en 3L/4 en la Condición 2. Se presume que el fenómeno es causado por las mismas razones que en el caso anterior.

## **CAPÍTULO 2**

### **IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PREDICCIÓN A CORTO PLAZO PARA CÁLCULO DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN MAR IRREGULAR.**

#### **2.1 Definición de Estados de Mar y sus respectivos Espectros.**

El estudio de la respuesta de un buque en mar irregular debe considerar la característica aleatoria de las olas, por lo tanto, es necesaria una representación probabilística de este fenómeno para su estudio. Esto se logra a través del Espectro o Densidad Espectral, que muestra la distribución de energía de un Estado de Mar en función de la frecuencia de las olas que lo componen. Los Estados de Mar se definen de acuerdo con diferentes escalas y se identifican principalmente por la altura significativa y el periodo modal de las olas. En este trabajo se aplicará la formulación de

Bretschneider o ITTC (International Towing Tank Conference) para el Espectro de Mar, que emplea los parámetros mencionados. Los cálculos se han realizado en tres Estados de Mar considerados como críticos: 5, 6 y 7 de acuerdo con la escala de Beaufort, con alturas significativas de 2.2, 3.8 y 5.7 m respectivamente, [8].

Un mar irregular se considera como el resultado de la combinación de olas regulares de distintas longitudes y amplitudes, en consecuencia, la superficie del mar no sigue un patrón definido y además, nunca se repite. Por lo expresado, su representación se realiza como lo indica [4]: “En similitud a los procesos regulares que se definen por su frecuencia y amplitud, el fenómeno aleatorio puede ser representado por una descomposición de frecuencias (Densidad Espectral) y una amplitud promedio (RMS)”.

Generalmente, las olas pueden representarse como un proceso aleatorio estacionario si se consideran en un periodo “corto” de tiempo entre 30 y 120 minutos. Esto implica que la distribución de energía de dicho proceso será independiente del tiempo.

La función Densidad Espectral representa la distribución de energía de un proceso en función de la frecuencia del mismo. Existen varias formulaciones empíricas para representar la función de Densidad Espectral (conocida también como Espectro de Mar), considerando entre ellas, la formulación de Bretschneider o ITTC que es definida por dos parámetros: altura significativa,

$H_{1/3}$  y frecuencia modal (de máxima energía),  $\omega_m$ . Para el Sistema Internacional de unidades dicha formulación es:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-B/\omega^4} \quad [m^2/s] \quad (2.1)$$

$$A = \frac{5}{16} \omega_m^4 H_{1/3}^2$$

$$B = \frac{5}{4} \omega_m^4$$

Los Estados de Mar pueden definirse por diferentes escalas, entre ellas, la de Beaufort. A continuación, en la Tabla X se presentan los datos a utilizar para este trabajo en Estados de Mar 5, 6 y 7, [8].

Escala de Beaufort	Altura Promedio	Altura Significativa	Longitud Promedio	Periodo de máxima energía $T_m$	Periodo Promedio
	[m]			[s]	
<b>5</b>	1.40	2.22	33.84	7.5	5.4
<b>6</b>	2.35	3.75	57.31	9.8	7.0
<b>7</b>	3.54	5.67	86.89	12.1	8.6

**Tabla X:** Características de Estados de Mar seleccionados.

**Fuente:** [8], p. 104.

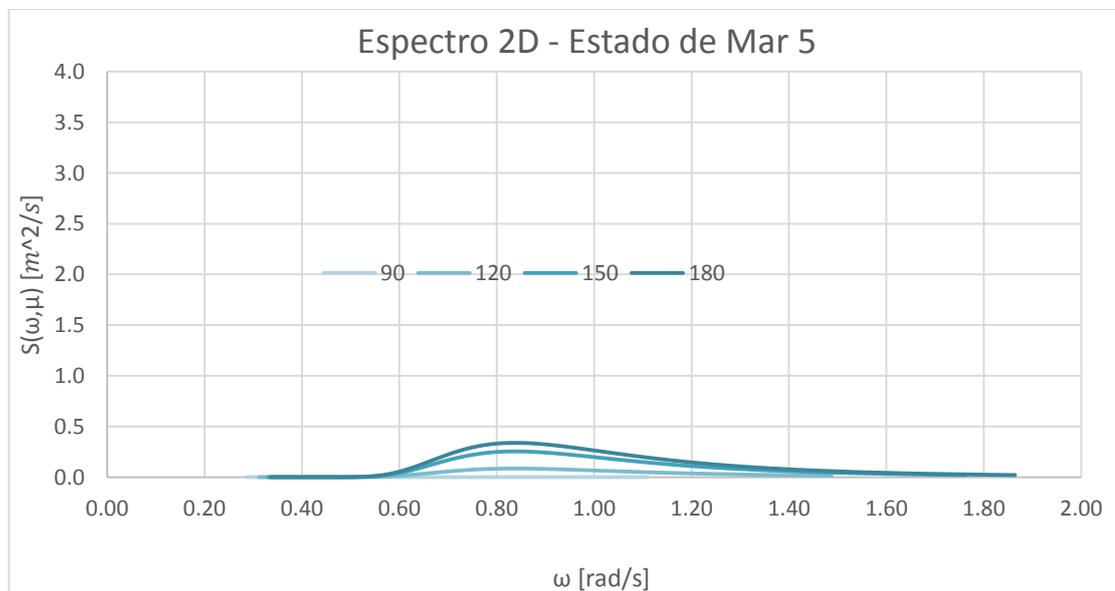
Para considerar el efecto de las olas incidentes en varias direcciones, se utiliza el concepto de Espectro de Mar con dos dimensiones, que puede ser expresado con la siguiente ecuación:

$$S(\omega, \mu) = S(\omega) * \frac{2}{\pi} \cos^2(\mu) [m^2/s] \quad (2.2)$$

$$S(\omega, \mu) = \frac{A}{\omega^5} e^{-B/\omega^4} * \frac{2}{\pi} \cos^2(\mu) \quad [m^2/s] \quad (2.3)$$

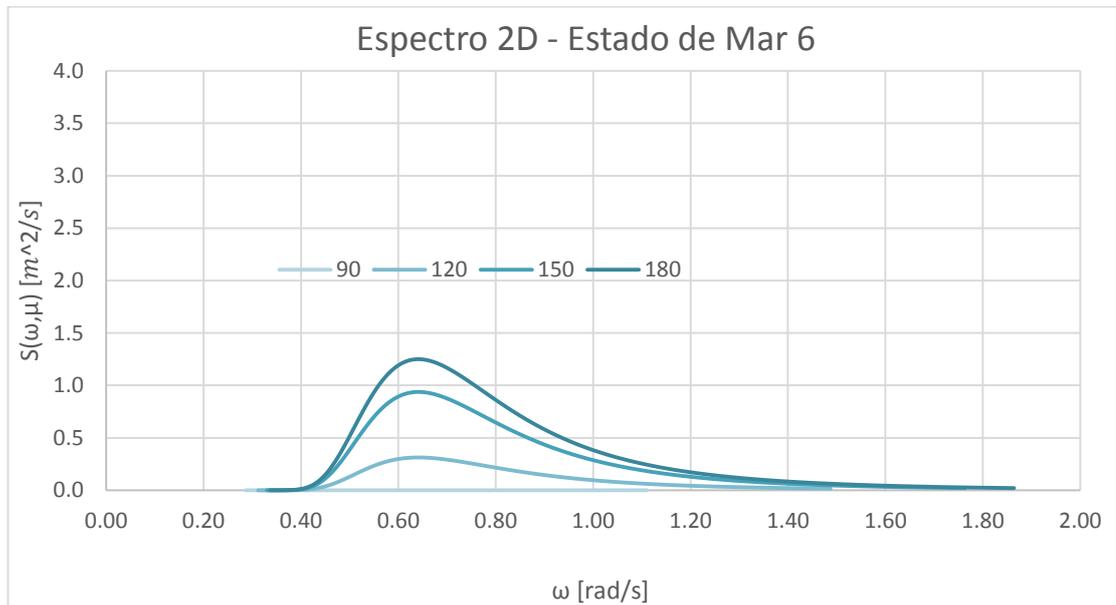
Donde  $\mu$  es el ángulo de incidencia de la ola respecto de la dirección de navegación indicado en la Figura 5 como  $\beta$ .

En las Figuras 12, 13 y 14 se presentan los Espectros de Mar en dos dimensiones para los tres Estados de Mar seleccionados.



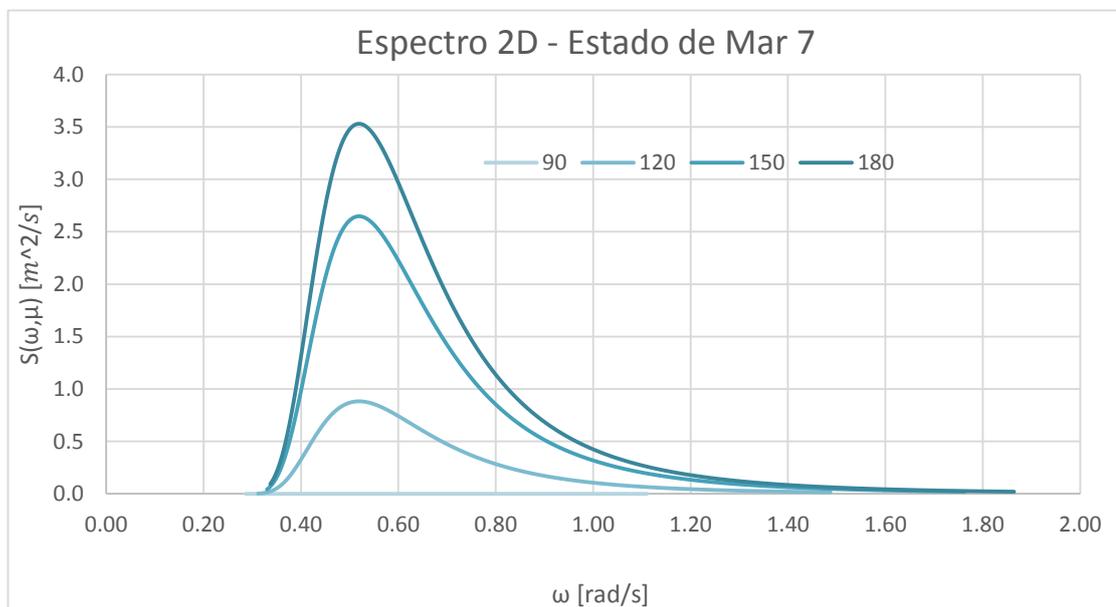
**Figura 12:** Espectro 2-D del Estado de Mar 5.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura 13:** Espectro 2-D del Estado de Mar 6.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura 14:** Espectro 2-D del Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En la Tabla XI se presentan los máximos valores de Espectro de Mar obtenidos a cada ángulo de incidencia y Estados de Mar seleccionados.

Estado de Mar	Ángulo de Incidencia					
	120°		150°		180°	
	$\omega_e$ [rad/s]	$S(\omega_e)$ [m <sup>2</sup> *s]	$\omega_e$ [rad/s]	$S(\omega_e)$ [m <sup>2</sup> *s]	$\omega_e$ [rad/s]	$S(\omega_e)$ [m <sup>2</sup> *s]
5	0.84	0.085	0.84	0.254	0.84	0.338
6	0.64	0.313	0.64	0.938	0.64	1.250
7	0.52	0.882	0.52	2.647	0.52	3.530

**Tabla XI:** Máximos valores de Espectro de Mar a diferentes ángulos de incidencia y Estados de Mar.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Se puede observar que la mayor energía se presenta cuando las olas vienen de proa (180°) y es nula cuando las olas vienen de costado (90°). Además, se comprueba que estos valores máximos ocurren a las frecuencias correspondientes a los períodos de máxima energía mencionados en la Tabla X.

## 2.2 Proceso de cálculo de la respuesta de la embarcación en olas irregulares.

La respuesta de un buque en mar irregular se determina a partir de la combinación de la respuesta en olas regulares calculada en el capítulo anterior (RAO) y el Espectro de los Estados de Mar seleccionados. En este trabajo se consideran cuatro ángulos de incidencia de ola (90, 120, 150 y 180°) respecto a la dirección de navegación del buque. Al espectro resultante se lo denomina de Respuesta y permite identificar los parámetros estadísticos necesarios en los cálculos de Fuerza Cortante y Momento Flector en olas irregulares; los parámetros de mayor relevancia son la raíz del promedio de los cuadrados o RMS (Root Mean Square) y el ancho de banda del proceso. Los valores de RMS del Espectro de Respuesta de Fuerza Cortante y Momento Flector en la Condición 1 y Estado de Mar 5 son 62 ton y 1868 ton-m; en Estado de Mar 6, 76 ton y 2286 ton-m, y en Estado de Mar 7, 83 ton y 2469 ton-m. El ancho de banda en ambos procesos está por debajo de 0.6 por lo que, de acuerdo con [4], podrían considerarse como procesos de banda angosta (*narrow-band*).

Asumiendo un comportamiento lineal de la embarcación, la combinación de la respuesta en olas regulares y el Espectro de Mar en dos dimensiones ( $S_X$ ), permite obtener el Espectro de Respuesta ( $S_y$ ) a partir de la siguiente ecuación, [3]:

$$S_y(\omega, \mu) = RAO^2 * S_x(\omega, \mu)$$

$$S_y(\omega, \mu) = RAO^2 * \left( \frac{A}{\omega^5} e^{-B/\omega^4} \right) * \left( \frac{2}{\pi} \cos^2(\mu) \right) \quad (2.4)$$

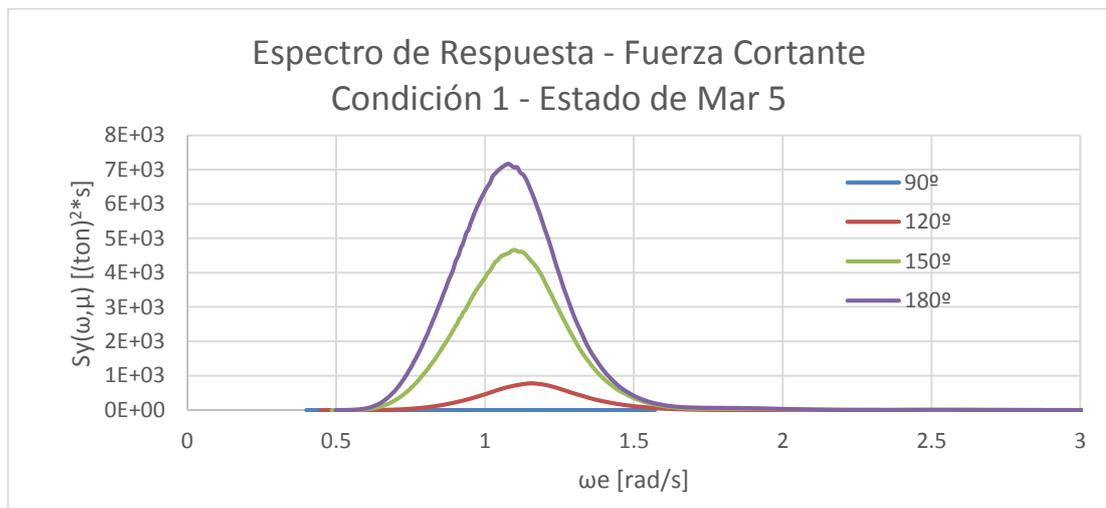
Además, la asunción de linealidad, implica lo siguiente, [4]:

- Si la ola excitadora (entrada) es un proceso aleatorio estacionario, la respuesta del buque a dicha ola (salida) será también un proceso aleatorio estacionario. (Propiedades estadísticas independientes del tiempo).
- Si el proceso de entrada es aleatorio con distribución normal, el proceso de salida será también aleatorio con distribución normal.
- Si la media del proceso de entrada es igual a cero, la media del proceso de salida será también igual a cero.

Con respecto al ancho de banda de los procesos, si el proceso de entrada es de banda angosta, el proceso de salida no necesariamente tendrá esta característica. De manera que habrá que calcular dicho parámetro con el Espectro de Respuesta.

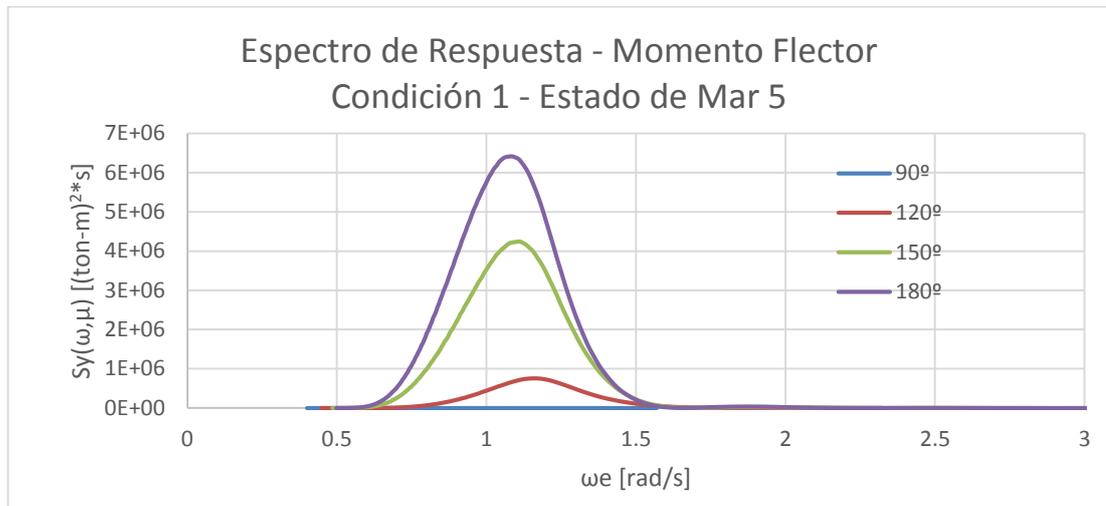
Se ha seleccionado un rango de frecuencias de ola para los cálculos presentes entre 0.4 y 1.6 rad/s correspondiente a longitudes de ola de 385 y 25 m respectivamente, recordando que fue el rango empleado en los cálculos en olas regulares. Se debe verificar que este rango cubra la mayor parte de

la energía del Espectro de Respuesta. Un ejemplo de esto se observa en las Figuras 15 y 16 que representan el Espectro de Respuesta en función de la frecuencia de encuentro de Fuerza Cortante y Momento Flector en Condición 1 (Lastre) y Estado de Mar 5. Se nota que la energía se concentra en un rango de 0.5 y 1.5 rad/s de frecuencia de encuentro.



**Figura 15:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 1 y Estado de Mar 5.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura 16:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 1 y Estado de Mar 5.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los Espectros de Respuesta de Fuerza Cortante y Momento Flector en las tres condiciones de carga y tres Estados de Mar seleccionados para Fuerza Cortante y Momento Flector se presentan el Anexo D de este trabajo.

El ancho de banda del proceso  $\varepsilon$  se determina a partir de la siguiente ecuación, [3]:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (2.5)$$

Donde,  $m_n$  es el n-ésimo momento de la función de Densidad Espectral, [3]:

$$m_n = \int_0^{+\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (2.6)$$

Por lo tanto, para el caso de Espectro de Respuesta que depende de la frecuencia de encuentro y el ángulo de incidencia de ola, la integración de momentos de orden  $n$  debe considerar el rango de  $\mu$  desde olas de popa ( $0^\circ$ ) hasta las olas de proa ( $180^\circ$ ). Aprovechando la simetría del ángulo de incidencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$m_n = 2 \int_{\pi/2}^{\pi} \int_0^{\infty} \omega^n S_y(\omega, \mu) d\omega d\mu \quad n = 0, 2, 4 \quad (2.7)$$

La primera integración, respecto a la frecuencia de encuentro se ha realizado por el método numérico de trapecios compuestos ya que la separación entre estos valores no es constante. Los resultados de esta integración para los momentos de orden 0, 2 y 4 a cada ángulo de incidencia, Estado de Mar y condición de carga se presentan en el Anexo E de este trabajo [Tablas EI, EII y EIII]. La segunda integración, respecto a los ángulos de incidencia, se ha realizado por la segunda regla de Simpson ya que la separación entre estos ángulos es constante ( $30^\circ$ ). En la Tabla XII, Tabla XIII y Tabla XIV se presentan los resultados de la doble integración para los momentos de orden 0, 2 y 4 de Fuerza Cortante y Momento Flector en los Estados de Mar 5, 6 y 7 para cada condición de carga.

Condición de Carga 1						
Estado de Mar	Fuerza Cortante			Momento Flector		
	m <sub>0</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>0</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>
	ton <sup>2</sup>			(ton-m) <sup>2</sup>		
5	3896	4902	7095	3490262	4312817	5977886
6	5834	6609	8830	5225845	5849959	7541216
7	6826	7313	9433	6094827	6478151	8086241

**Tabla XII:** Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar 5, 6 y 7.

Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Condición de Carga 2						
Estado de Mar	Fuerza Cortante			Momento Flector		
	m <sub>0</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>0</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>
	ton <sup>2</sup>			(ton-m) <sup>2</sup>		
5	3579	4160	5616	3265323	3802579	5120013
6	5982	6031	7321	5515835	5532119	6683087
7	7466	7179	7991	6931377	6381060	7304714

**Tabla XIII:** Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar 5, 6 y 7.

Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Condición de Carga 3						
Estado de Mar	Fuerza Cortante			Momento Flector		
	m <sub>0</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>0</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>4</sub>
	ton <sup>2</sup>			(ton-m) <sup>2</sup>		
5	3363	3655	4679	3239829	3545400	4599671
6	6137	5668	6372	5995550	5515545	6239230
7	7962	6717	7094	7844217	6562495	6947807

**Tabla XIV:** Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar 5, 6 y 7.

Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

De acuerdo con [3], el promedio de los cuadrados de los máximos locales del proceso aleatorio corresponde al área bajo la curva de los Espectros de Respuesta. Por tanto, la raíz de este valor (RMS) será la raíz del “momento de orden cero ( $m_0$ )” como se indica en la siguiente ecuación:

$$RMS = \sqrt{m_0}. \quad (2.8)$$

En las Tablas XV, XVI y XVII se presentan los resultados de ancho de banda y RMS.

Condición de Carga 1				
Estado de Mar	Fuerza Cortante		Momento Flector	
	RMS [ton]	$\epsilon$	RMS [ton-m]	$\epsilon$
5	62	0.36	1868	0.33
6	76	0.39	2286	0.36
7	83	0.41	2469	0.38

**Tabla XV:** RMS y ancho de banda para Fuerza Cortante y Momento Flector.

Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Condición de Carga 2				
Estado de Mar	Fuerza Cortante		Momento Flector	
	RMS [ton]	$\epsilon$	RMS [ton-m]	$\epsilon$
5	60	0.37	1807	0.37
6	77	0.41	2349	0.41
7	86	0.44	2633	0.44

**Tabla XVI:** RMS y ancho de banda para Fuerza Cortante y Momento Flector.

Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

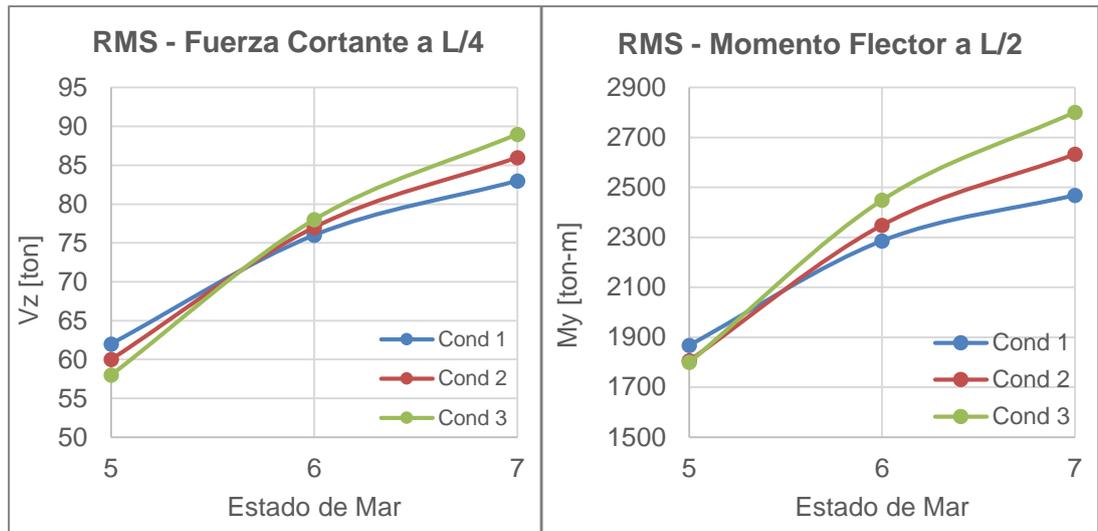
<b>Condición de Carga 3</b>				
<b>Estado de Mar</b>	<b>Fuerza Cortante</b>		<b>Momento Flector</b>	
	<b>RMS [ton]</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	<b>RMS [ton-m]</b>	<b><math>\epsilon</math></b>
5	58	0.39	1800	0.40
6	78	0.42	2449	0.43
7	89	0.45	2801	0.46

**Tabla XVII:** RMS y ancho de banda para Fuerza Cortante y Momento Flector.

Condición 3.

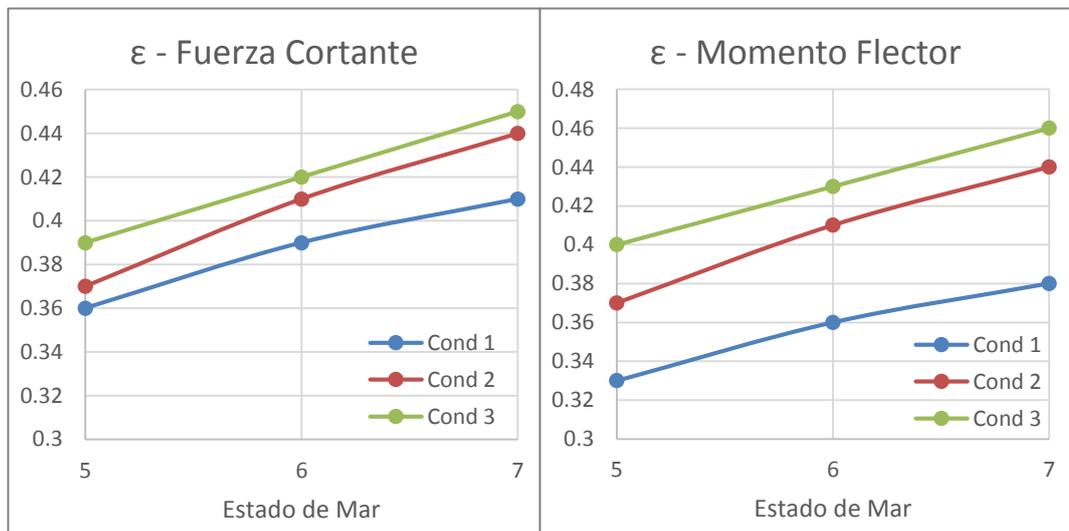
**Fuente:** Elaboración Propia.

A continuación, en la Figura 17, se puede observar que los valores de RMS aumentan junto con el Estado de Mar siendo en el 5, mayores en la condición de carga de menor desplazamiento (Condición 1), y, en el 6 y 7 dicha tendencia cambia, siendo mayores en la condición de máximo desplazamiento (Condición 3).



**Figura 17:** RMS de Fuerza Cortante y Momento Flector en Estados de Mar 5, 6 y 7 y condiciones de carga 1, 2 y 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura 18:** Ancho de banda de Fuerza Cortante y Momento Flector en Estados de Mar 5, 6 y 7 y condiciones de carga 1,2 y 3.

**Fuente:** Elaboración Propia

De acuerdo con la Figura 18, el ancho de banda  $\varepsilon$  aumenta junto con el Estado de Mar y el desplazamiento de la embarcación. Estos valores miden la cercanía del fenómeno hacia un proceso de banda angosta ( $\varepsilon=0$ ) o de banda ancha ( $\varepsilon=1$ ). En todos los casos el ancho de banda es menor a 0.6 por lo que se dice que son procesos de banda angosta, [4]. El hecho de que el proceso sea de banda angosta implica que la energía del mismo está concentrada en un rango relativamente angosto de frecuencias, en consecuencia, se podrían realizar ciertas simplificaciones en los cálculos de probabilidad de excedencia.

### **2.3 Análisis de resultados a corto plazo.**

En el análisis a corto plazo (una hora) de Fuerzas Internas en el casco, las cargas producidas por las olas actuando sobre la embarcación pueden representarse como un proceso Gaussiano estacionario, [4]. Con este considerando, en este trabajo se ha calculado la Función de Distribución Acumulada CDF (Cumulative Density Function) empleando cinco métodos. Cuatro de ellos, descritos en [3], pueden ser aplicados para cualquier ancho de banda, y, el quinto es aplicable únicamente en procesos aleatorios de banda angosta (*narrow-band*). Luego, por medio de los valores de CDF, se calcula Fuerza Cortante y Momento Flector empleando probabilidades de excedencia de  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$ . Se encuentra que para una probabilidad de

excedencia de  $10^{-8}$  en Condición 1, los máximos valores de Fuerza Cortante y Momento Flector se obtienen aplicando el segundo método (B) y son: 831 ton y 28119 ton-m en Estado de Mar 5; 955 ton y 31819 ton-m en Estado de Mar 6; y 1010 ton y 33440 ton-m en Estado de Mar 7.

Como se mencionó en el punto anterior, la elevación de la superficie del mar puede ser considerada como un proceso estacionario y además Gaussiano si se considera un periodo corto de tiempo. Esto quiere decir, que en cualquier espacio de tiempo, las variables tienen la misma función de distribución probabilística y esta será Normal y sigue la siguiente relación:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\bar{x}}{\sigma_x} \right)^2}, \quad (2.7)$$

donde  $\bar{x}$  y  $\sigma_x$  son la media y desviación estándar del proceso respectivamente.

Considerando estas características, a continuación se presenta una breve descripción de los cinco métodos disponibles para predecir la distribución de probabilidad de la máxima carga. Cuatro de ellos son aplicables en procesos de cualquier ancho de banda y el quinto, en procesos de banda angosta, [3].

**(A) Distribución del valor extremo de una secuencia de N picos o máximos.**

En este método, la distribución del valor extremo de una secuencia de N máximos ( $z_1, z_2, \dots, z_N$ ), puede ser determinada usando la Distribución de Rice considerando que el proceso tiene una media igual a cero. La variable aleatoria de esta distribución es  $x$  que, en este trabajo, representa Fuerza Cortante o Momento Flector. Entonces, la función acumulada de densidad probabilística tendrá la siguiente forma, [3]:

$$F(x) = \Phi \left[ \frac{x}{\varepsilon \sqrt{m_0}} \right] - \sqrt{1 - \varepsilon^2} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x}{\sqrt{m_0}} \right)^2} \Phi \left[ \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2}}{\varepsilon} * \frac{x}{\sqrt{m_0}} \right] \quad (2.8)$$

$$\Phi[u] = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(v)^2} dv \quad (2.9)$$

donde  $m_0$  es el momento de orden cero de la función Densidad Espectral calculado en el punto anterior y representa la varianza del proceso. Por lo tanto, la probabilidad de que cualquiera de estos N valores sea menor que  $x$  será igual a  $[F(x)]^N$ , donde  $N = T/T_m$ ,  $T$  y  $T_m$  son el tiempo total de duración y el periodo modal del proceso respectivamente.

Se seleccionan tres probabilidades de excedencia ( $1-F(x)$ ) de  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$  para aplicar la ecuación (2.8). En este caso a los resultados de  $x$  deben sumarse los correspondientes valores en aguas tranquilas que corresponden a la media del proceso. En la Tabla XVIII se muestran estos resultados en la

primera condición de carga, los resultados para las condiciones restantes se muestran en el Anexo F de este trabajo.

<b>Condición de Carga 1 – Método A</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		279	11598
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	339	10158
	$10^{-8}$	339	10158
	$10^{-9}$	339	10159
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	415	12425
	$10^{-8}$	415	12427
	$10^{-9}$	415	12429
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	449	13415
	$10^{-8}$	449	13417
	$10^{-9}$	449	13419

**Tabla XVIII:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método A en la Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### (B) Distribución del valor extremo Asintótica Tipo I.

Este segundo método, [3], desarrollado por Cramer y Gumbel, indica que a medida que el número  $N$  de máximos aumenta al infinito, se alcanza una forma asintótica de la distribución de valores extremos que converge a la siguiente relación:

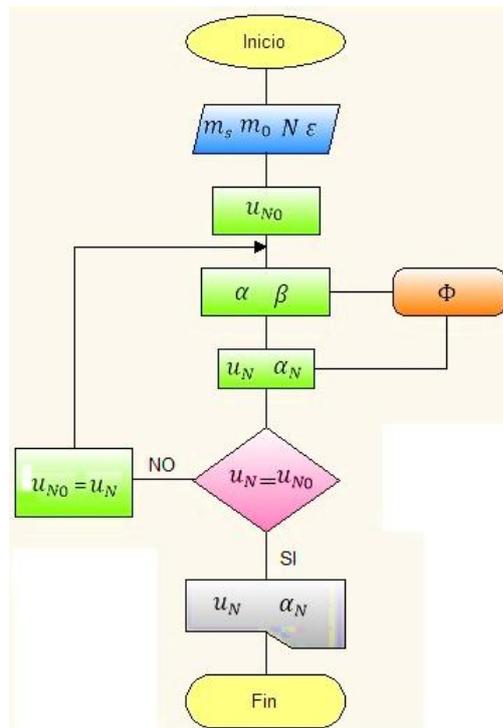
$$F(x) = \exp\{-e^{-\alpha_N(x-u_N)}\} \quad (2.10)$$

Los parámetros  $\alpha_N$  y  $u_N$  dependerán de la distribución inicial, que en este caso será la distribución de Rice descrita en el primer método, [3].

$$\alpha_N = \frac{N \varepsilon}{\sqrt{2\pi m_0}} e^{-\frac{\alpha^2}{2}} + \frac{N \varepsilon \beta}{\sqrt{m_0}} e^{-\frac{\alpha^2}{2} \varepsilon^2} * \Phi[\beta]$$

$$u_N = m_s \pm \sqrt{2 m_0 \ln \left( \frac{\sqrt{1 - \varepsilon^2} * \Phi[\beta]}{\frac{1}{N} - \Phi[-\alpha]} \right)}; \quad \alpha = \frac{u_N - m_s}{\varepsilon \sqrt{m_0}} \quad ; \quad \beta = \sqrt{1 - \varepsilon^2} * \alpha$$

Podemos notar que  $u_N$  contiene a  $\alpha$  y esta a su vez contiene a  $u_N$ , por lo que será necesario realizar un proceso iterativo. La Figura 19 muestra un diagrama de flujo del proceso iterativo.



**Figura 19:** Diagrama de flujo del proceso iterativo de distribución asintótica.

**Fuente:** Elaboración Propia.

El valor inicial para  $u_N$  será:  $u_{N0} = m_s + \sqrt{2 m_0 \ln(N)}$ , y,  $m_s$  es el valor medio de Fuerza Cortante o Momento Flector (en aguas tranquilas).

Se seleccionan tres probabilidades de excedencia ( $1-F(x)$ ) de  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$  para aplicar la ecuación (2.10). En la Tabla XIX se muestran estos resultados en la primera condición de carga, las restantes se encuentran en el Anexo F de este trabajo.

<b>Condición de Carga 1 – Método B</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		279	11598
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	911	26838
	$10^{-8}$	954	28921
	$10^{-9}$	997	30202
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	1025	30254
	$10^{-8}$	1078	32621
	$10^{-9}$	1131	34191
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	1076	31749
	$10^{-8}$	1133	34243
	$10^{-9}$	1190	35939

**Tabla XIX:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método B en la Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

**(C) Distribución del valor extremo basado en el análisis de intersecciones.**

En este caso, la distribución de probabilidad del valor extremo puede ser determinada analizando las intersecciones con el eje ubicado en la media del proceso. Entonces, se analiza al mayor de los picos durante un período T, y, la probabilidad de que este valor sea menor que un x dado se calcula de acuerdo con:

$$F(x) = e^{-v_x T} \quad ; \quad v_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-m_s}{\sqrt{m_0}} \right)^2}, \quad (2.11)$$

donde  $m_2$  y  $m_0$  son los momentos de orden 0 y 2 de los Espectros de Respuesta y  $m_s$  es el valor medio de Fuerza Cortante o Momento Flector (en aguas tranquilas).

Este método analiza el máximo valor durante todo el tiempo que dura el proceso. Los métodos A y B descritos anteriormente, analizan el máximo valor en varios intervalos de tiempo definidos por el periodo de máxima energía.

Se calculan los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector con tres probabilidades de excedencia ( $1-F(x)$ ) de  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$ . En la Tabla XX se muestran estos resultados en la primera condición de carga; las condiciones restantes se encuentran en el Anexo F de este trabajo.

<b>Condición de Carga 1 – Método C</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		279	11598
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	821	24952
	$10^{-8}$	842	25577
	$10^{-9}$	862	26173
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	915	27743
	$10^{-8}$	940	28508
	$10^{-9}$	965	29238
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	956	28960
	$10^{-8}$	984	29786
	$10^{-9}$	1010	30576

**Tabla XX:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método C en la Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

**(D) Distribución del valor extremo basado en una descripción de dos estados de un proceso aleatorio.**

“Vanmarcke (1975) estimó la distribución de probabilidad de excedencia de la barrera establecida para un proceso estacionario Gaussiano, considerando el efecto de agrupación de los picos de ola”, [3]. Basado en sus resultados, la distribución del valor extremo puede ser determinada con la siguiente expresión:

$$F(x) = \exp \left( -\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} T \left( \frac{1 - e^{-\sqrt{2\pi}q \left( \frac{x-m_s}{\sqrt{m_0}} \right)}}{1 - e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-m_s}{\sqrt{m_0}} \right)^2}} \right) e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-m_s}{\sqrt{m_0}} \right)^2} \right) \quad (2.12)$$

$$q = \sqrt{1 - \frac{m_1^2}{m_0 m_2}} \quad 0 \leq q \leq 1$$

*T: Tiempo total de duración del proceso.*

En la Tabla XXI se muestran los resultados de realizar los cálculos con probabilidades de excedencia de  $10^{-7}$ ,  $10^{-8}$  y  $10^{-9}$  en la primera condición de carga, las condiciones restantes se encuentran en el Anexo F de este trabajo.

<b>Condición de Carga 1 – Método D</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		279	11598
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	821	24934
	$10^{-8}$	842	25561
	$10^{-9}$	862	26160
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	914	27728
	$10^{-8}$	940	28496
	$10^{-9}$	964	29228
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	956	28948
	$10^{-8}$	984	29777
	$10^{-9}$	1010	30568

**Tabla XXI:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método D en la Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### **(E) Distribución de Rayleigh.**

A partir de la ecuación (2.8) que calcula la densidad de probabilidad acumulada empleando el método A empleando la formulación de Rice, se asume que el proceso es de banda angosta  $\epsilon=0$  y obtenemos la siguiente función conocida como Distribución de Rayleigh:

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sqrt{m_0}}\right)^2}$$

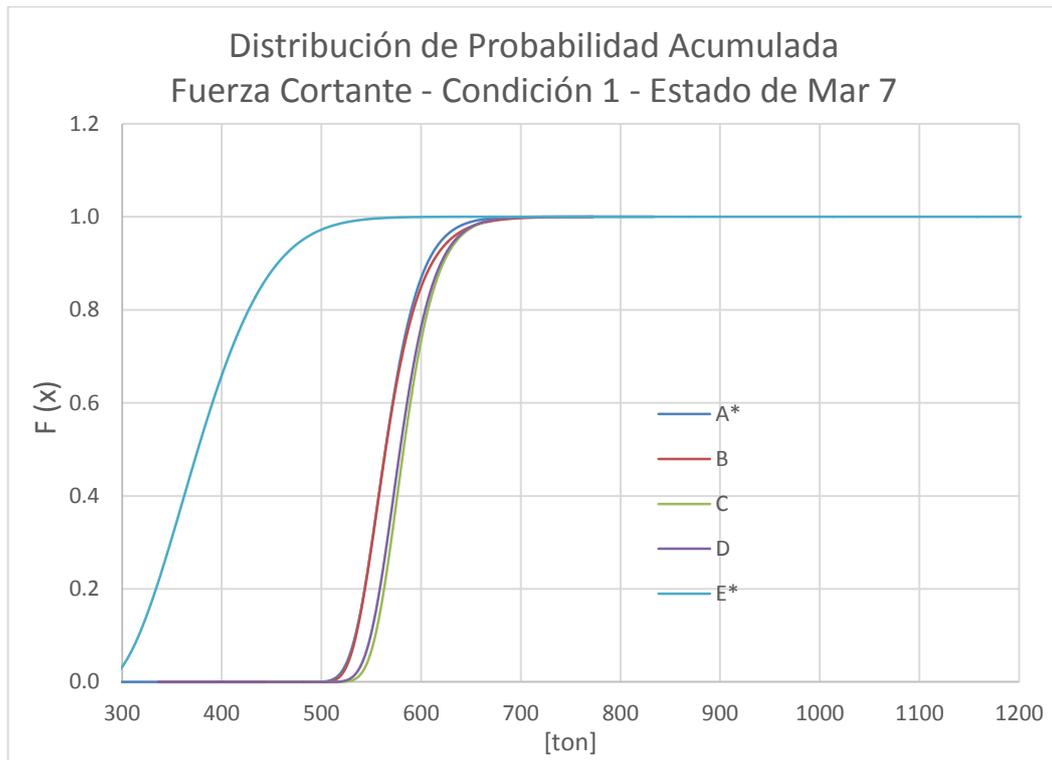
Es necesario recordar que en este caso se considera una media del proceso igual a cero y al igual que en el método A se debe sumar a estos resultados los correspondientes valores de Fuerza Cortante y Momento Flector en aguas tranquilas.

<b>Condición 1 – Método E</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		279	11598
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	354	10610
	$10^{-8}$	379	11340
	$10^{-9}$	401	12015
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	434	12981
	$10^{-8}$	464	13876
	$10^{-9}$	491	14701
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	469	14021
	$10^{-8}$	501	14986
	$10^{-9}$	531	15876

**Tabla XXII:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método E en la condición 1.

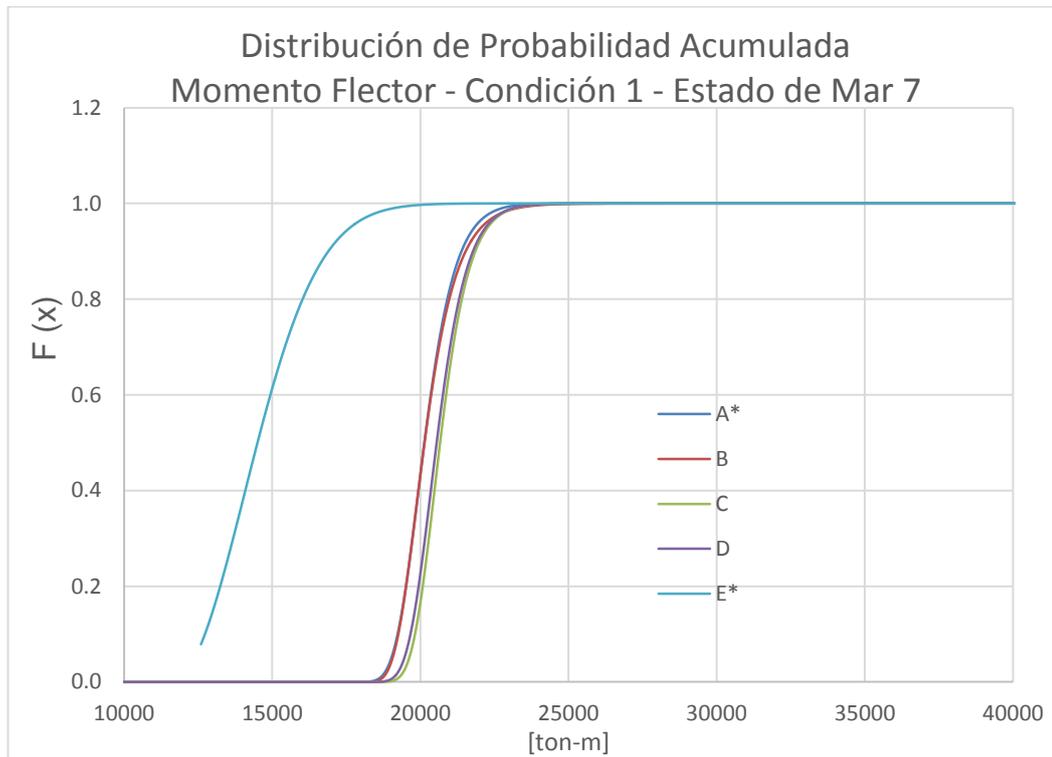
**Fuente:** Elaboración Propia.

A continuación se presenta una comparación de la Distribución de Probabilidad Acumulada resultante de cada método en la Condición 1 y el más alto Estado de Mar, 7. Los resultados para las dos condiciones de carga restantes se presentan en el Anexo G de este trabajo.



**Figura 20:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 1 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura 21:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 1 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

\*En los métodos A y E están incluidos los valores en aguas tranquilas sumados debido a que en ellos, se consideró una media del proceso igual a cero.

De acuerdo con las Figuras 20 y 21, los métodos A, B, C y D presentan resultados aparentemente cercanos entre ellos, mientras que el método E de Rayleigh, en el que se asume que el proceso es de banda angosta, se acerca a los otros métodos únicamente a probabilidades  $F(x)$  cercanas a 1.

## **CAPÍTULO 3**

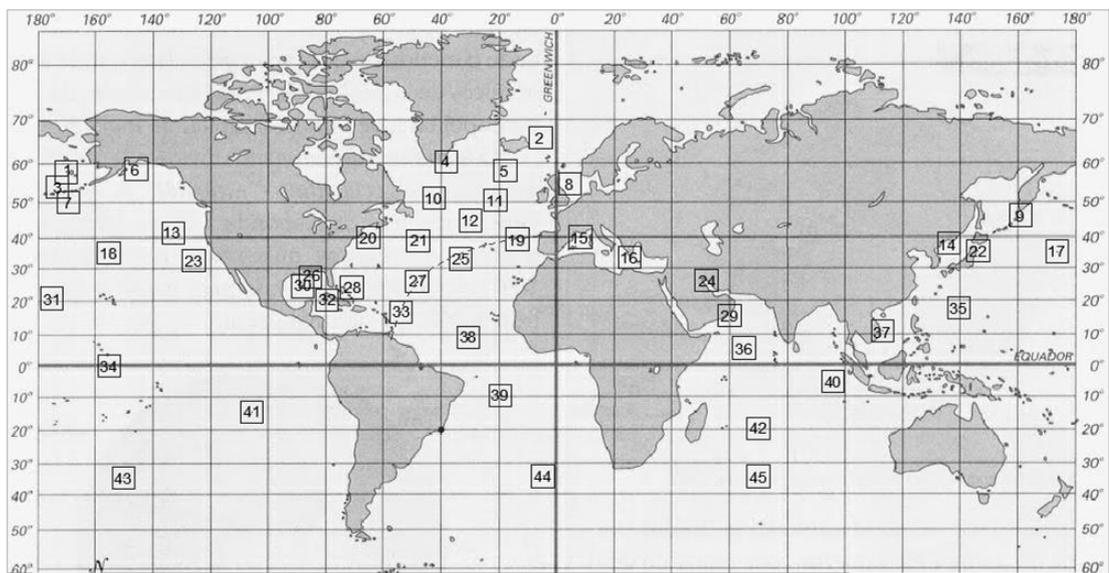
### **IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PREDICCIÓN A LARGO PLAZO PARA CÁLCULO DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN MAR IRREGULAR.**

#### **3.1 Definición de la ruta de navegación, correspondientes Estados y Espectros de Mar.**

Para los cálculos de la respuesta en mar irregular en este capítulo, se asume que existe una ruta fija por la cual el tanquero analizado navega durante toda su vida útil. Debido a la limitada disponibilidad de información en las zonas del Pacífico, se ha seleccionado esta ruta a través del Océano Atlántico, entre la parte norte de América del Sur y el oeste de Europa. Se ha considerado una vida útil de 20 años para la embarcación y, además, que opera aproximadamente 2000 horas al año. La ruta de navegación se divide

en varias zonas o espacios geográficos en las que se presentan diferentes Estados de Mar, cada uno con su respectiva frecuencia. La información obtenida para este trabajo sobre las zonas geográficas incluye 15 Estados de Mar con alturas significativas desde 0 hasta 15 metros con intervalos de 1 metro.

La ruta de navegación se debe seleccionar de acuerdo con las necesidades del armador, que en este caso, es el transporte de combustible desde América del Sur hacia Europa. En el mapa de la Figura 22 se han ubicado las zonas geográficas de las cuales se conoce la información oceanográfica necesaria para los cálculos a largo plazo, [10].



**Figura 22:** Ubicación en el mapa de las zonas geográficas cuya información es conocida por medio de [10].

**Fuente:** Elaboración Propia.

Aun cuando el interés era analizar la respuesta en nuestra zona de operación nacional, la limitación en información disponible obligó a tomar esta ruta para el análisis. Las zonas 33, 27, 25 y 19, en la Figura 22, pertenecen a la ruta de navegación entre la parte norte de América del Sur y la zona oeste de Europa atravesando el Océano Atlántico. Las características de los Estados de Mar y la frecuencia con que se presentan en estas zonas se muestran en la Tabla XXIII. Se puede observar que la máxima altura significativa registrada en la zona 19 es 13 m, en la zona 25, 9 m, y, en las zonas 27 y 33, 8 m.

Nº de zona	19		25		27		33	
Ubicación	39 N, 14 W		32 N, 34 W		27 N, 48 W		17 N, 54 W	
Altura Significativa [m]	Frecuencia Porcentual	Periodo Modal [s]						
0-1	22.16	6.0	41.61	6.0	41.51	6.0	11.15	6.0
1-2	25.45	6.0	29.43	6.0	38.34	6.0	38.5	6.0
2-3	19.31	7.5	15.2	7.5	13.55	7.5	32.83	8.0
3-4	13.44	9.0	7.16	9.0	4.16	9.0	12.92	9.5
4-5	9.24	11.0	3.8	11.0	1.52	11.0	3.68	10.5
5-6	4.92	11.5	1.64	12.0	0.66	11.5	0.66	12.5
6-7	2.70	12.5	0.75	12.5	0.21	12.5	0.21	13.5
7-8	1.34	12.5	0.32	14.0	0.05	14.0	0.05	14.0
8-9	0.64	14.0	0.09	14.0	0	-	0	-
9-10	0.44	15.5	0	-	0	-	0	-
10-11	0.23	16.0	0	-	0	-	0	-
11-12	0.11	16.0	0	-	0	-	0	-
12-13	0.02	17.0	0	-	0	-	0	-
13-14	0	-	0	-	0	-	0	-
14-15	0	-	0	-	0	-	0	-

**Tabla XXIII:** Características de los Estados de Mar en las zonas 19, 25, 27 y 33.

**Fuente:** [10].

Es necesario definir cada uno de los 15 Estados de Mar mostrados en la Tabla XXIII con su respectiva Altura Significativa y Periodo Modal. La Altura Significativa en cada Estado de Mar se reporta como el promedio de cada

rango, y, el Periodo Modal, es el promedio de los Periodos Modales de las cuatro zonas, excluyendo los casos en los que no ocurre el Estado de Mar; estos valores se muestran en la Tabla XXIV.

Se asume que la embarcación navega con velocidad uniforme y permanece el mismo tiempo en cada zona durante su navegación. Entonces, la frecuencia porcentual de cada Estado de Mar es igual al promedio de la frecuencia porcentual de las cuatro zonas.

Para futuros cálculos, se debe conocer el número de picos o máximos,  $N$ , que ocurren en cada estado de mar, donde  $N = T/T_m$ ,  $T$  es el tiempo total de ocurrencia de cada estado, y,  $T_m$  su correspondiente Periodo Modal. Para esta investigación a largo plazo, se considera una vida útil de 20 años. Además, por información proporcionada por [5], se conoce que el motor de una embarcación del tipo analizado ha trabajado 16000 horas en 8 años, es decir, 84 días al año. Entonces, el tiempo total de ocurrencia de cada Estado de Mar será:  $T = 20 * 84 * Frecuencia\ Porcentual / 100$ . A continuación, en la Tabla XXIV, se muestran los valores de frecuencia porcentual, tiempo de ocurrencia y número de máximos,  $N$ , para cada Estado de Mar.

<b>Estado de Mar (i)</b>	<b>Altura Significativa [m]</b>	<b>Periodo Modal [s]</b>	<b>Frecuencia Porcentual</b>	<b>Tiempo de ocurrencia [días]</b>	<b>N</b>
1	0.5	6.0	29.11	489.0	7041686
2	1.5	6.0	32.93	553.2	7966426
3	2.5	7.6	20.22	339.7	3849621
4	3.5	9.1	9.42	158.3	1498446
5	4.5	10.9	4.56	76.6	608637
6	5.5	11.9	1.97	33.1	240800
7	6.5	12.8	0.97	16.3	110145
8	7.5	13.6	0.44	7.4	46875
9	8.5	14.0	0.18	3.1	18922
10	9.5	15.5	0.11	1.8	10301
11	10.5	16.0	0.06	1.0	5216
12	11.5	16.0	0.03	0.5	2495
13	12.5	17.0	0.01	0.1	427

**Tabla XXIV:** Frecuencia Porcentual, tiempo de ocurrencia y número de máximos para cada Estado de Mar.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### **3.2 Proceso de cálculo de la respuesta de la embarcación en olas irregulares.**

Al igual que en el capítulo anterior, la respuesta del buque en mar irregular se determina a partir de la combinación del Operador de Amplitud de Respuesta RAO y el Espectro de los Estados de Mar encontrados a lo largo de la ruta de navegación; los ángulos de incidencia de las olas son  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  y  $180^\circ$ . De las curvas resultantes, los mayores valores RMS de Fuerza Cortante y Momento Flector se presentan en el Estado de Mar de Altura Significativa entre 11 y 12 m. Estos valores de RMS son: 101 ton y 3018 ton-m en la primera condición, 108 ton y 3309 ton-m en la segunda, y, en la tercera condición de carga, 113 ton y 3565 ton-m. El máximo ancho de banda obtenido es de 0.48, es decir, aún se puede clasificar al proceso analizado como de banda angosta (*"narrow band"*).

Se parte de los Espectros de Respuesta resultantes de la combinación de los RAO y el Espectro de Mar según la formulación de Bretschneider (Ecuación 2.4). Luego, se calculan los momentos de orden 0, 2 y 4 (Ecuación 2.7) de las distribuciones de Fuerza Cortante y Momento Flector. Los resultados de esta doble integración cuando la embarcación navega en la Condición de Carga 1 (Llegada a Puerto sin carga) se muestran en la Tabla XXV. Los resultados en las condiciones de carga restantes se encuentran en el Anexo H de este trabajo.

Estado de Mar (i)	Fuerza Cortante			Momento Flector		
	m0	m2	m4	m0	m2	m4
	ton <sup>2</sup>	ton <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	ton <sup>2</sup> / s <sup>4</sup>	(ton-m) <sup>2</sup>	(ton-m) <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	(ton-m) <sup>2</sup> / s <sup>4</sup>
1	248	353	573	220470	304985	467733
2	2235	3176	5160	1984230	2744868	4209595
3	4793	5984	8606	4294690	5268863	7260969
4	6204	7201	9784	5561202	6368792	8337357
5	6115	6719	8801	5469636	5950947	7533356
6	6845	7362	9519	6113448	6521927	8158598
7	7487	7941	10181	6680049	7034004	8732339
8	7876	8262	10527	7020366	7318295	9033145
9	9170	9582	12182	8171410	8487748	10455490
10	7867	8123	10259	7003078	7194695	8808595
11	8530	8782	11071	7590903	7777292	9507542
12	10232	10534	13281	9105646	9329226	11404743
13	9605	9840	12373	8543368	8714190	10626903

**Tabla XXV:** Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Esta información es necesaria para determinar los valores de RMS y ancho de banda  $\varepsilon$ , aplicando las siguientes ecuaciones del capítulo anterior:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (2.5)$$

$$RMS = \sqrt{m_0} \quad (2.8)$$

Los resultados de estas ecuaciones en la Condición de Carga 1 se muestran en la Tabla XXVI. Los resultados de las condiciones restantes se encuentran en el Apéndice H de este trabajo.

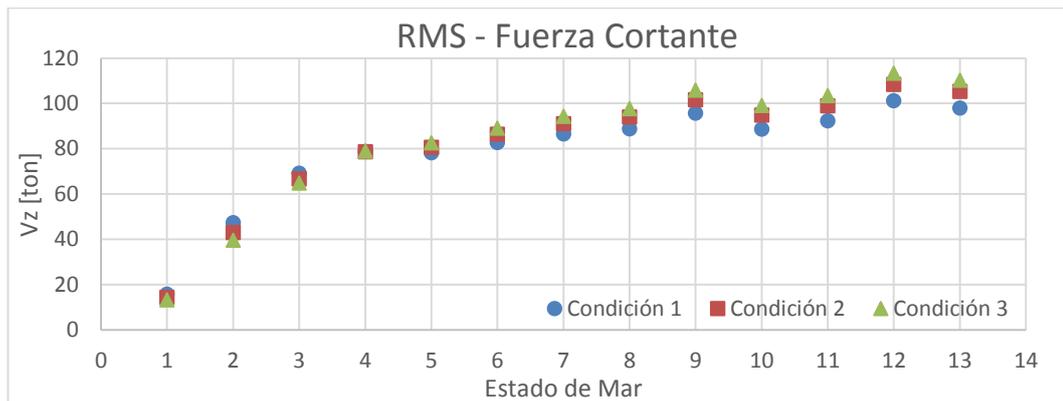
Estado de Mar (i)	Fuerza Cortante		Momento Flector	
	RMS	$\epsilon$	RMS	$\epsilon$
	[ton]		[ton-m]	
1	15.8	0.354	469.5	0.313
2	47.3	0.354	1408.6	0.313
3	69.2	0.363	2072.4	0.331
4	78.8	0.382	2358.2	0.354
5	78.2	0.402	2338.7	0.375
6	82.7	0.410	2472.5	0.384
7	86.5	0.416	2584.6	0.390
8	88.7	0.420	2649.6	0.394
9	95.8	0.422	2858.6	0.396
10	88.7	0.427	2646.3	0.401
11	92.4	0.428	2755.2	0.402
12	101.2	0.428	3017.6	0.402
13	98.0	0.430	2922.9	0.405

**Tabla XXVI:** Valores de RMS y ancho de banda en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

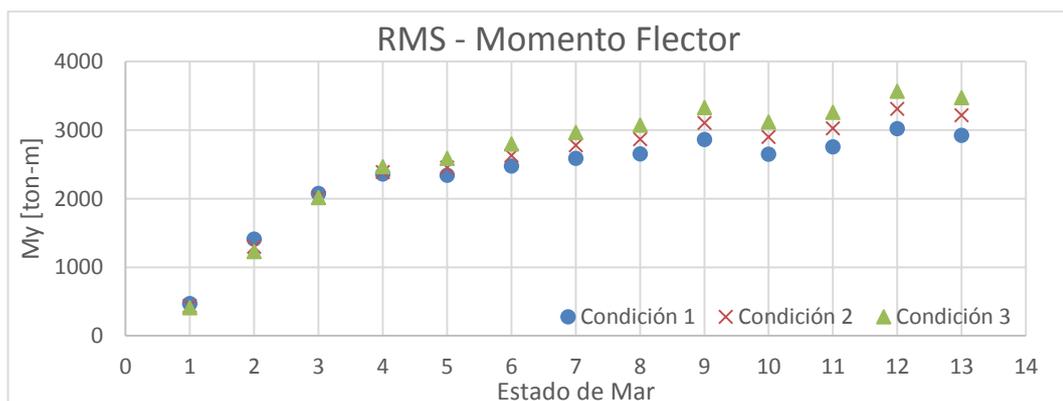
A continuación, en las Figuras 23 y 24 se muestra la variación de RMS para Fuerza Cortante y Momento Flector respectivamente en función de los Estados de Mar. En los Estados de Altura Significativa menor a 3 m, los

mayores valores de RMS se presentan en la condición de menor carga (Condición 1), y en los de Altura Significativa mayor a 3 m, en la condición de mayor carga (Condición 3).



**Figura 23:** RMS de Fuerza Cortante en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3

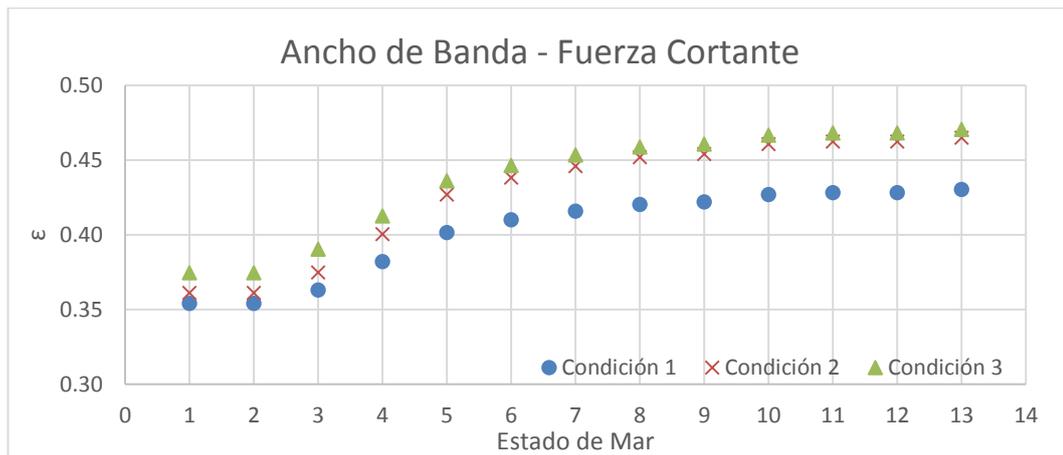
**Fuente:** Elaboración Propia



**Figura 24:** RMS de Momento Flector en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3.

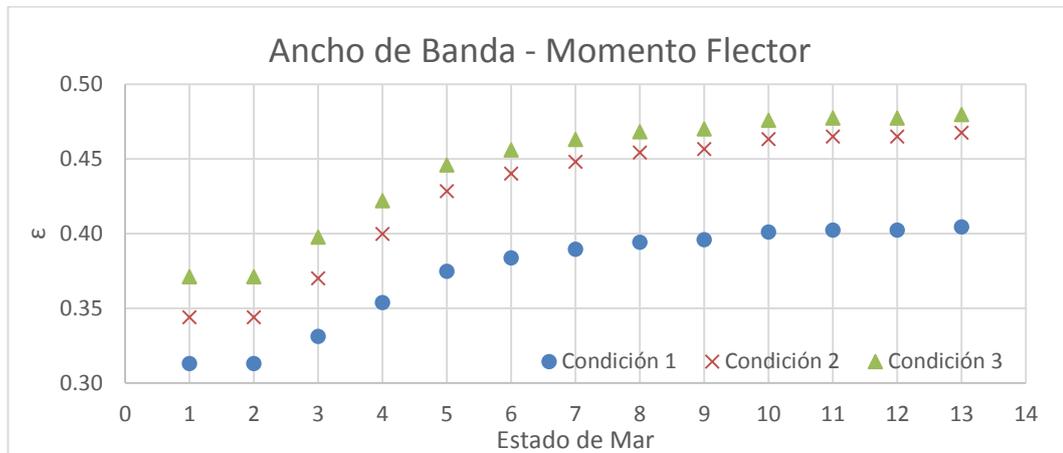
**Fuente:** Elaboración Propia.

En las Figuras 25 y 26 se observa que el ancho de banda  $\varepsilon$  aumenta junto con el Estado de Mar; estos valores se encuentran entre 0.3 y 0.5, por lo que se puede decir que los procesos son de banda angosta “*narrow-band*”.



**Figura 25:** Ancho de Banda de Fuerza Cortante en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura 26:** Ancho de Banda de Momento Flector en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condiciones de Carga 1, 2 y 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### 3.3 Análisis de resultados a largo plazo.

Para fines de análisis estructural de un buque, considerar periodos cortos de tiempo sometido a un Estado de Mar extremo no es suficiente, ya que a lo largo de su vida útil, la embarcación podría encontrarse con varios Estados de Mar críticos, o, que la combinación de Estados de Mar causen situaciones estructurales críticas. Por ello, es importante realizar cálculos de Fuerza Cortante y Momento Flector en largos períodos de tiempo. Se conoce que la distribución probabilística de Fuerza Cortante y Momento Flector en largos períodos de tiempo puede ser descrita de manera confiable por la Distribución de Probabilidad de Weibull. En este trabajo se realizan dos tipos

de cálculo: el primero, en caso de que se quiera hacer diseño, se selecciona una probabilidad de excedencia muy baja y se encuentran los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector que satisfagan dicha probabilidad. En el segundo, se calcula la probabilidad de que se excedan límites determinados para Fuerza Cortante y Momento Flector.

Para desarrollar un análisis estructural en mar irregular se debe conocer la Distribución de Probabilidad de las Fuerzas Internas que se desarrollan en la embarcación. De acuerdo con [3], [4], y [12], la Distribución de Weibull (Ecuaciones 3.1 y 3.2) con parámetros  $l$  y  $k$ , describe acertadamente la distribución de Momento Flector en embarcaciones durante largos períodos de tiempo. En este trabajo, se aplica también esta distribución probabilística para la Fuerza Cortante.

$$f(x) = \frac{l}{k} \left(\frac{x}{k}\right)^{l-1} e^{-(x/k)^l} \quad (3.1)$$

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-m_s}{k}\right)^l} \quad (3.2)$$

En las ecuaciones 3.1 y 3.2,  $x$  representa el valor de Fuerza Cortante o Momento Flector (Aguas Tranquilas + Olas) que no deberá ser excedido, y,  $m_s$  los respectivos valores en Aguas Tranquilas.

Si en la expresión anterior se fija el valor de  $l = 2$ , se recupera la formulación de Rayleigh, para procesos de banda angosta. En el presente caso, se

calculan los valores de  $l$  y  $k$  asumiendo una condición climática crítica empleando los siguientes pasos:

1. Se selecciona un rango de valores de  $l$  entre 0.5 y 2.0, [12].
2. Se calcula el valor de  $k$  empleando las siguientes ecuaciones:

$$\mu_x = k * \Gamma(1 + 1/l) \quad (3.3)$$

$$\sigma_x^2 = k^2 * [\Gamma(1 + 2/l) - \Gamma^2(1 + 1/l)] \quad (3.4)$$

donde  $\mu_x$  y  $\sigma_x$  son la media y desviación estándar del proceso respectivamente y  $\Gamma(t)$  es la función Gamma definida como:

$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} y^{t-1} e^{-y} dy$$

De acuerdo con [11], existe una relación entre la media cuadrática, la media aritmética y la desviación estándar:

$$\overline{x^2} = (\bar{x})^2 + \sigma^2$$

$$RMS^2 = \mu_x^2 + \sigma_x^2 \quad (3.5)$$

Combinando las tres ecuaciones descritas, (3.3), (3.4) y (3.5) se encuentra el valor de  $k$ .

3. Se selecciona una probabilidad total de excedencia como referencia, asociándola con el número total de ocurrencias,  $N_T$ . El valor de  $N_T$  es igual a la suma de los máximos,  $N$ , de todos los Estados de Mar ocurrentes. Estos valores ya fueron calculados y se encuentran en la Tabla XXIV.

$$P_{eT(REF)} = \frac{1}{N_T} = \frac{1}{21399996} = 4.67E - 08 \quad (3.6)$$

4. Se calculan los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector correspondientes a la probabilidad de excedencia de referencia. Este cálculo se realiza aplicando el método numérico de Bisección a la Ecuación (3.7):

$$P_{eT} = \sum_{i=1}^{13} P_{e(i)} * f_{(i)} \quad (3.7)$$

donde  $P_{eT} = P_{eT(REF)}$ ,  $f_{(i)}$  es la frecuencia porcentual de encuentro de cada Estado de Mar descrita en la Tabla XXIV.  $P_{e(i)}$  es la probabilidad de excedencia de cada Estado de Mar calculada empleando la distribución de Weibull con cada combinación de parámetros  $l$  y  $k$  descritos en los puntos 1 y 2, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_{e(i)} = 1 - \left[ 1 - e^{-\left(\frac{x-m_s}{k}\right)^l} \right]^{N_{(i)}} \quad (3.8)$$

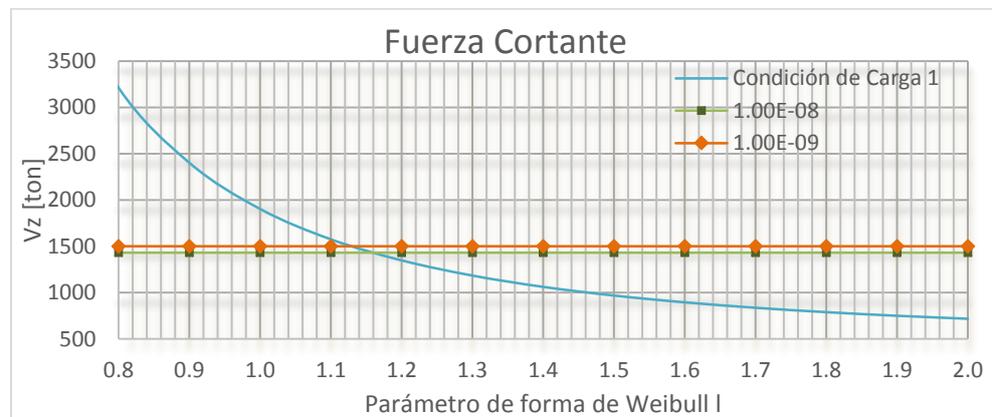
En la Tabla XXVII se muestran los resultados del proceso descrito:

	Fuerza Cortante [ton]			Momento Flector [ton-m]		
$m_s$	279	96	29	11598	5191	2707
$l$	C1	C2	C3	C1	C2	C3
0.5	14233	-	-	429248	425937	-
0.6	7504	7318	-	227835	224365	230620
0.7	4647	4484	-	142326	138436	141833
0.8	3213	3056	2965	99405	95148	96983
0.9	2403	2248	2225	75166	70631	71529
1.0	1904	1750	1722	60237	55501	55796
1.1	1576	1421	1390	50415	45539	45418
1.2	1349	1194	1160	43615	38639	38218
1.3	1185	1030	994	38710	33662	33012
1.4	1063	908	869	35052	29953	29118
1.5	970	814	774	32251	27109	26122
1.6	896	741	698	30057	24875	23761
1.7	838	682	638	28306	23084	21862
1.8	790	634	589	26885	21622	20309
1.9	751	594	547	25715	20410	19020
2.0	719	561	513	24740	19392	17935

**Tabla XXVII:** Fuerza Cortante y Momento Flector para una probabilidad de excedencia de  $4.7E-8$  con diferentes valores de parámetro de forma de Weibull.

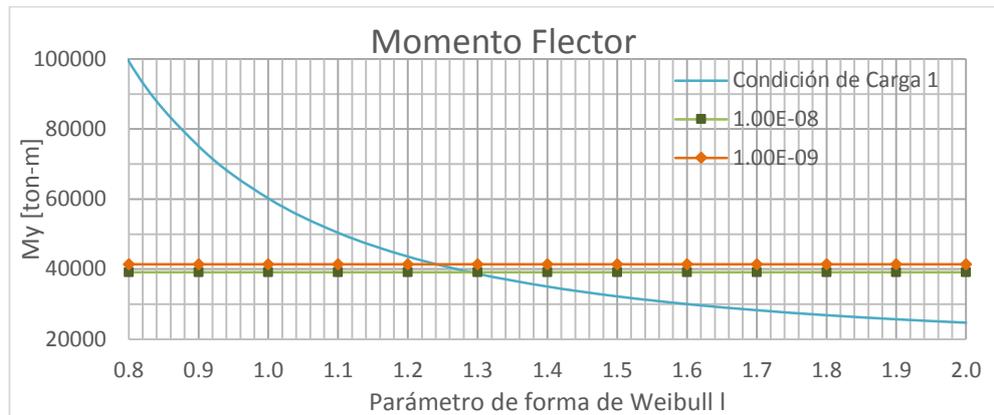
**Fuente:** Elaboración Propia.

5. Se grafican los resultados de la Tabla XXVII en la condición de carga más exigente (Condición 1: Llegada a Puerto sin Carga) y se comparan con un valor crítico de referencia de Fuerza Cortante y Momento Flector. Esta comparación se muestra en las Figuras 27 y 28. En este trabajo, se calcula el valor crítico aplicando el proceso a corto plazo a la peor de las condiciones climáticas de la Escala de Beaufort: un Estado de Mar extremo de huracán con la mayor altura significativa de dicha escala, 22.7 m y 24.1 segundos de Periodo Modal. Se emplean dos probabilidades de excedencia que encierren la probabilidad calculada en el punto 3: 1.0E-8 y 1.0E-9.



**Figura 27:** Fuerza Cortante a diferentes parámetros de Weibull.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura 28:** Momento Flector a diferentes parámetros de Weibull.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Como se observa en las Figuras 27 y 28, el parámetro de forma de Weibull,  $l$ , se encuentra entre 1.14 y 1.16 para Fuerza Cortante y entre 1.25 y 1.30 para Momento Flector.

Para el primer caso, en el que se quiere aplicar a un proceso de diseño, se selecciona una probabilidad de excedencia muy baja y se calculan los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector. En este caso, se toma la probabilidad de excedencia de referencia calculada en el paso 3 para la determinación de los parámetros de Weibull:  $4.7 \text{ E-}08$ . Como se mencionó anteriormente, este cálculo se realiza aplicando el método numérico de Bisección a la ecuación 3.2 y los resultados se muestran en las Tablas XXVIII y XXIX.

	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>		
<b>I</b>	<b>Condición 1</b>	<b>Condición 2</b>	<b>Condición 3</b>
1.14	1476	1321	1288
1.16	1431	1276	1243

**Tabla XXVIII:** Resultados de Fuerza Cortante empleando el método de predicción a largo plazo con distribución de probabilidades de Weibull.

**Fuente:** Elaboración Propia.

	<b>Momento Flector [ton-m]</b>		
<b>I</b>	<b>Condición 1</b>	<b>Condición 2</b>	<b>Condición 3</b>
1.25	40974	35959	35417
1.30	38710	33663	33013

**Tabla XXIX:** Resultados de Momento Flector empleando el método de predicción a largo plazo con distribución de probabilidades de Weibull.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Para el segundo caso, se seleccionan valores límite de Fuerza Cortante y Momento Flector y se calcula la probabilidad de que sean excedidos. En las Tablas XXX y XXXI se muestran los resultados de estos cálculos para la primera condición de carga (Llegada a Puerto con Carga) con valores límites de Fuerza Cortante y Momento Flector de 1573 ton y 44944 ton-m, [9]. Las condiciones restantes se presentan en el Anexo I de este trabajo.

<b>Condición 1</b>				
<b>Estado de Mar (i)</b>	<b>Fuerza Cortante [ton] ms=279 ton</b>			
	<b>l = 1.14</b>		<b>l = 1.16</b>	
	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>
1	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
2	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
3	4.27E-10	8.6E-11	0.00E+00	0.0E+00
4	1.95E-08	1.8E-09	4.16E-09	3.9E-10
5	6.08E-09	2.8E-10	1.28E-09	5.9E-11
6	1.78E-08	3.5E-10	4.36E-09	8.6E-11
7	3.68E-08	3.6E-10	9.89E-09	9.6E-11
8	3.54E-08	1.6E-10	1.00E-08	4.4E-11
9	1.45E-07	2.7E-10	4.76E-08	8.7E-11
10	7.65E-09	8.4E-12	2.17E-09	2.4E-12
11	1.36E-08	7.8E-12	4.18E-09	2.4E-12
12	9.02E-08	2.5E-11	3.25E-08	8.9E-12
13	6.37E-09	3.2E-13	2.18E-09	1.1E-13
<b>Probabilidad Total</b>		<b>3.4E-09</b>		<b>7.8E-10</b>

**Tabla XXX:** Probabilidad de excedencia de Fuerza Cortante correspondiente al valor límite de 1573 ton para dos parámetros de Weibull. Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 1</b>				
<b>Estado de Mar (i)</b>	<b>Momento Flector [ton-m] ms=11598 ton-m</b>			
	<b>I = 1.25</b>		<b>I = 1.30</b>	
	<b>p<sub>e(i)</sub></b>	<b>p<sub>e(i)</sub>*f<sub>(i)</sub></b>	<b>p<sub>e(i)</sub></b>	<b>p<sub>e(i)</sub>*f<sub>(i)</sub></b>
1	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
4	1.83E-09	1.7E-10	0.00E+00	0.00E+00
5	5.41E-10	2.5E-11	0.00E+00	0.00E+00
6	2.11E-09	4.2E-11	5.35E-11	1.05E-12
7	5.55E-09	5.4E-11	1.71E-10	1.66E-12
8	6.02E-09	2.6E-11	2.13E-10	9.39E-13
9	3.57E-08	6.5E-11	1.94E-09	3.54E-12
10	1.26E-09	1.4E-12	4.46E-11	4.91E-14
11	2.76E-09	1.6E-12	1.23E-10	7.09E-14
12	2.75E-08	7.6E-12	1.95E-09	5.36E-13
13	1.69E-09	8.4E-14	1.02E-10	5.12E-15
<b>Probabilidad Total</b>		<b>3.9E-10</b>		<b>7.8E-12</b>

**Tabla XXXI:** Probabilidad de excedencia de Momento Flector correspondiente al valor límite de 44944 ton-m para dos parámetros de Weibull. Condición 1.

**Fuente:** Elaboración Propia.

En el análisis estructural a largo plazo de una embarcación, se debe realizar una combinación de todos los Estados de Mar ocurrientes en la ruta de navegación seleccionada. A continuación, en la Tabla XXXII se muestra un

resumen de las Probabilidades de Excedencia para las tres condiciones de carga analizadas.

Condición de Carga	Fuerza Cortante		Momento Flector	
	I = 1.14	I = 1.16	I = 1.25	I = 1.30
1. Llegada a Puerto sin Carga ( $\Delta=5525$ ton)	3.4E-09	7.8E-10	3.9E-10	7.8E-12
2. Llegada a Puerto con Carga ( $\Delta= 8347$ ton)	1.0E-10	2.1E-11	4.6E-12	9.8E-14
3. Salida de Puerto Carga Completa ( $\Delta= 10286$ ton)	6.9E-11	1.7E-11	6.5E-12	1.7E-13

**Tabla XXXII:** Resumen de Probabilidades de Excedencia en Fuerza Cortante y Momento Flector para tres Condiciones de Carga y diferentes parámetros de Weibull.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Como se observa en la Tabla XXXII, la mayor probabilidad de exceder la Fuerza Cortante límite de 1573 ton es 3.4E-09 y la de exceder el Momento Flector límite de 44944 ton-m es 3.9E-10. Estas probabilidades ocurren en la condición de carga de menor desplazamiento (Condición 1) y al utilizar el parámetro de Weibull más cercano a 1. Por esto, no se asume que la formulación de Rayleigh se emplea para cualquier proceso de banda angosta, a pesar de que el ancho de banda es menor que 0.60. Como se indica en el Capítulo 2 de este trabajo, 0.60 es el límite de ancho de banda para considerar un proceso como proceso de banda angosta “*narrow band*”.

## **CAPÍTULO 4**

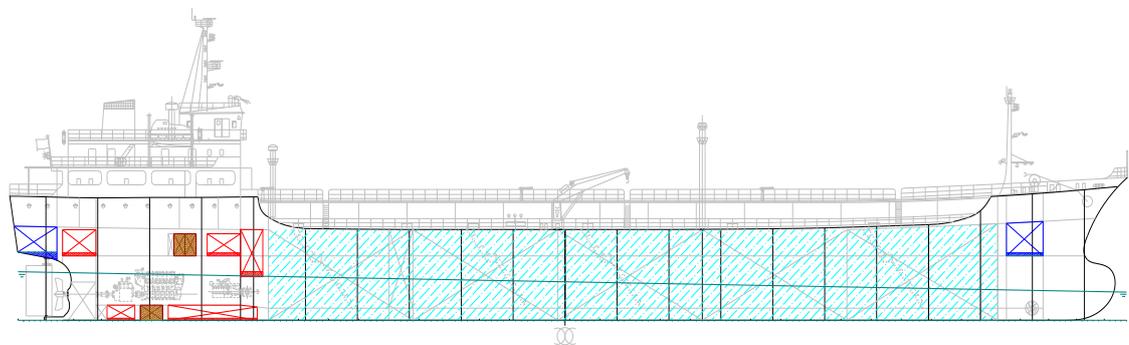
### **COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE MÉTODOS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA CON MÉTODO CUASIESTÁTICO Y SOCIEDAD DE CLASIFICACIÓN DNV.**

#### **4.1 Cálculo de Fuerzas Internas en aguas tranquilas.**

Al igual que en los cálculos de la respuesta dinámica en olas, el buque se modela como una viga de sección transversal no uniforme, con carga distribuida a lo largo de la eslora, y, con extremos libres. La carga incluye el peso ligero y la carga que transporta, de acuerdo con el llenado de los tanques, en la condición de carga analizada. Partiendo del equilibrio estático del buque, se calculan las Fuerzas Internas en cada segmento de la viga-buque, centrado en cada estación tomando la diferencia entre boyantez y peso. Para esto, se utiliza el programa de cálculos hidrostáticos CHidrBuq,

[7], que emplea el Método de Secciones para cálculo de Fuerza Cortante y Momento Flector a lo largo de la eslora de la viga-buque.

En la Figura 29 se muestra el perfil de la embarcación en equilibrio estático en la condición de Llegada a Puerto sin Carga. El desplazamiento es de 2682 ton, el calado medio de 3.84 m y, el asiento de 2.17 m.



**Figura 29:** Equilibrio estático en Condición 1 de carga (Lastre).

**Fuente:** Elaboración Propia.

Los cálculos de Fuerza Cortante y Momento Flector en aguas tranquilas se han aplicado a la embarcación en las tres condiciones de carga descritas en los capítulos anteriores:

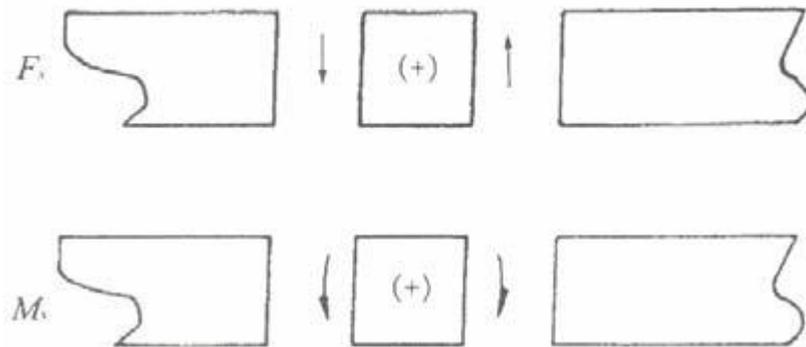
- i) condición de llegada a puerto sin carga (lastre)
- ii) condición de llegada a puerto con carga, y,
- iii) condición de salida de puerto con carga (carga completa).

<b>Condición 1: Llegada a puerto sin carga en Aguas Tranquilas</b>			
<b>Estación</b>	<b>Posición [m]</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
PROA-0	-1.1	0.0	0.0
0-1	5.6	70.9	222.2
1-2	11.2	158.2	899.2
2-3	16.8	170.4	1859.6
3-4	22.4	246.0	3054.1
4-5	28	276.7	4529.8
5-6	33.6	283.5	6105.1
6-7	39.2	276.6	7679.2
7-8	44.8	257.3	9179.4
8-9	50.4	215.4	10508.9
9-10	56	159.6	11565.0
10-11	61.6	82.6	12247.6
11-12	67.2	-29.8	12398.6
12-13	72.8	-147.2	11904.6
13-14	78.4	-237.9	10826.5
14-15	84	-301.7	9307.1
15-16	89.6	-331.6	7513.4
16-17	95.2	-401.9	5430.4
17-18	100.8	-357.9	3269.2
18-19	106.4	-270.8	1469.4
19-20	112	-119.3	334.1
20-POPA	118.6	0.0	0.0

**Tabla XXXIII:** Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas, Condición de carga 1.

**Fuente:** Elaboración Propia

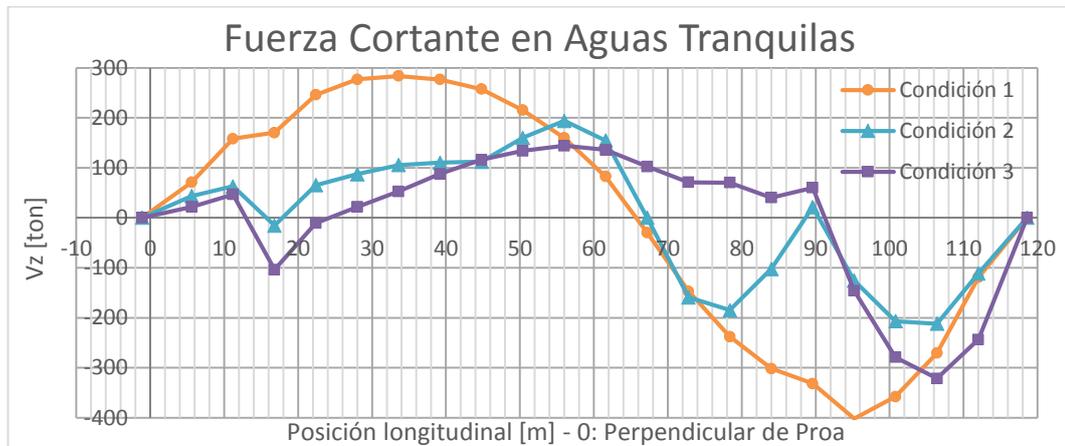
En la Tabla XXXIII se muestran los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector para la primera condición de carga, las tablas de resultados para las condiciones restantes se encuentran en el Anexo J de este trabajo. La convención de signos del programa ChidrBuq es tal como indica la Figura 30.



**Figura 30:** Convención de signos programa ChidrBuq.

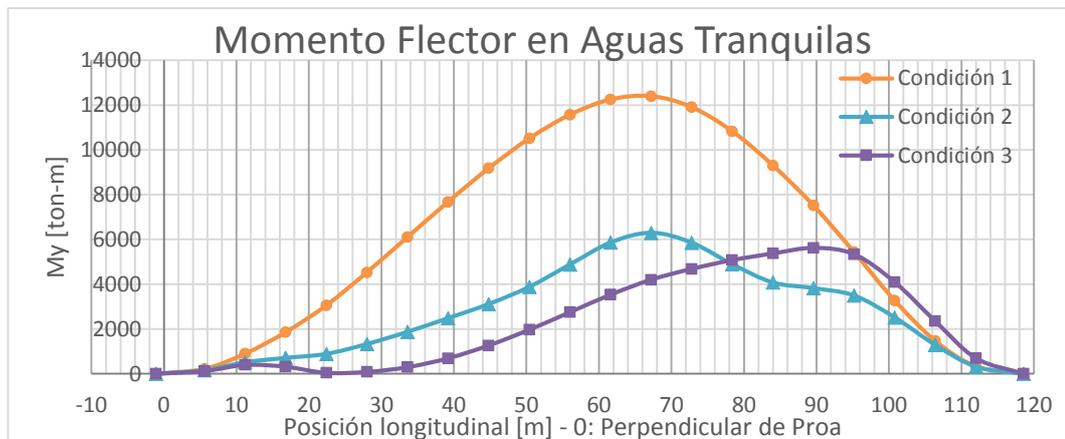
**Fuente:** [7]

En las Figuras 31 y 32, se muestran gráficamente estos resultados para las tres condiciones de carga analizadas.



**Figura 31:** Fuerza Cortante en Aguas Tranquilas en las tres condiciones de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia



**Figura 32:** Momento Flector en Aguas Tranquilas en las tres condiciones de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia

Los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector que se presentan en las zonas analizadas (L/4 y Sección Media respectivamente) y en las tres condiciones de carga se muestran en la Tabla XXXIV :

<b>Aguas Tranquilas</b>		
<b>Condición de Carga</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
1. Llegada a Puerto sin Carga ( $\Delta=5525$ ton)	279	11598
2. Llegada a Puerto con Carga ( $\Delta= 8347$ ton)	96	5191
3. Salida de Puerto Carga Completa ( $\Delta= 10286$ ton)	29	2707

**Tabla XXXIV:** Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas.

**Fuente:** Elaboración Propia

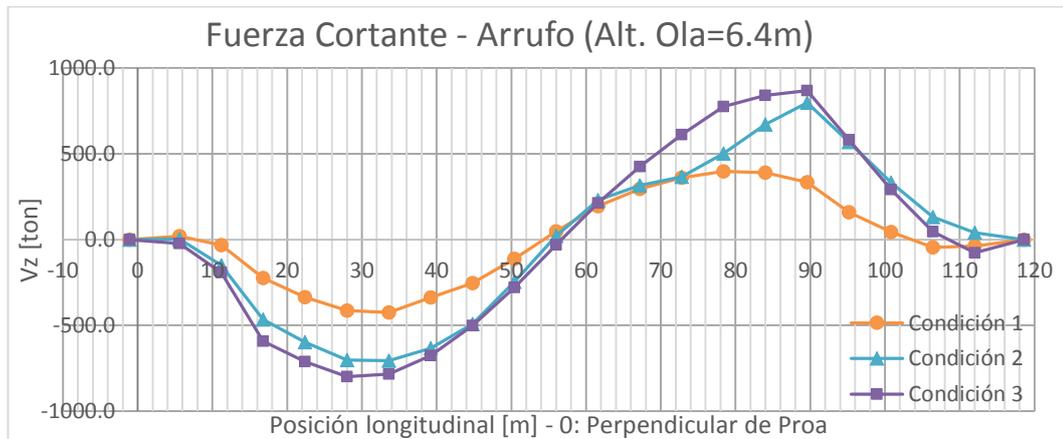
#### **4.2 Cálculo de fuerzas internas por método cuasiestático.**

El método cuasiestático calcula, de manera simplificada, las Fuerzas Internas que se producen en una embarcación por acción de olas “estáticas”. Para esto, el buque es sometido a dos situaciones, respecto de una ola, que producen alta exigencia estructural: i) Arrufo, con crestas en proa y popa, y, ii) Quebranto, con una cresta en Sección Media. En este trabajo, se emplea una ola de longitud igual a la eslora entre perpendiculares de la embarcación y altura igual a  $1.1\sqrt{L[\text{pies}]}$ . Para los cálculos, se utiliza el programa

ChidrBuq, [7], que, a través de un proceso iterativo, prueba diferentes valores de calado y asiento hasta llegar al equilibrio de la embarcación en la ola. Conociendo además la distribución de peso, el programa procede a calcular la Fuerza Cortante y Momento Flector en las situaciones de Arrufo y Quebranto aplicando el Método de Secciones.

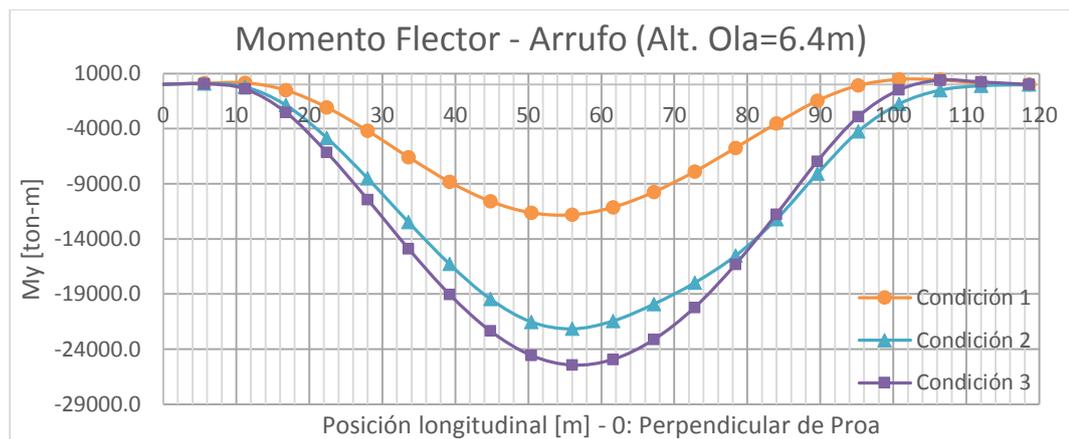
Al igual que en casos anteriores, se aplica el cálculo de Fuerzas Internas en forma Cuasiestática a las tres condiciones de carga mencionadas. La longitud de la ola se toma igual a la eslora entre perpendiculares, 112 m. Además, según lo sugiere [12], la altura de ola se toma como  $1.1 \sqrt{L[\text{pies}]}$ , que resulta en 6.4 m. Tanto en arrufo como en quebranto, el centro de la ola se ubica en Sección Media.

Como podemos observar en las Figuras 33 y 34, que muestran los resultados de Fuerza Cortante y Momento Flector en situación de Arrufo, los mayores valores se presentan en las condiciones de mayor desplazamiento (Condiciones 2 y 3).



**Figura 33:** Fuerza Cortante en Arrufo en tres condiciones de carga.

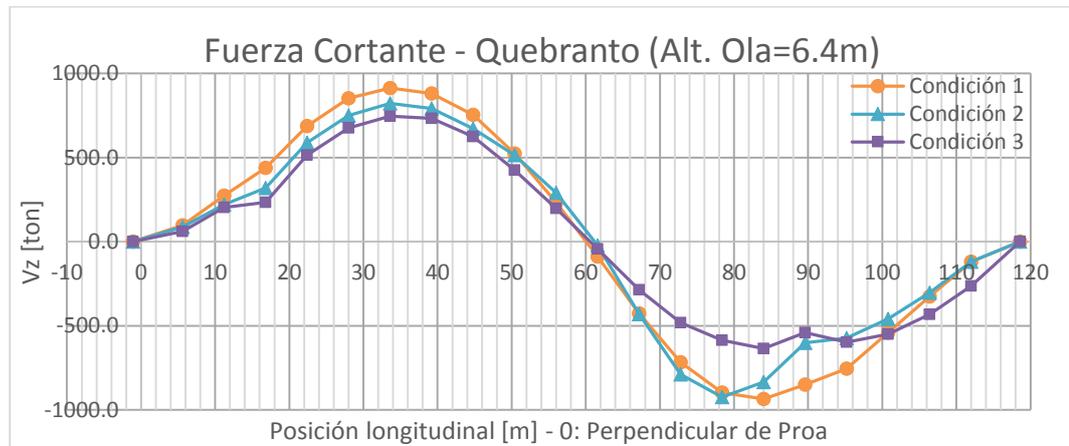
**Fuente:** Elaboración Propia



**Figura 34:** Momento Flector en Arrufo en tres condiciones de carga.

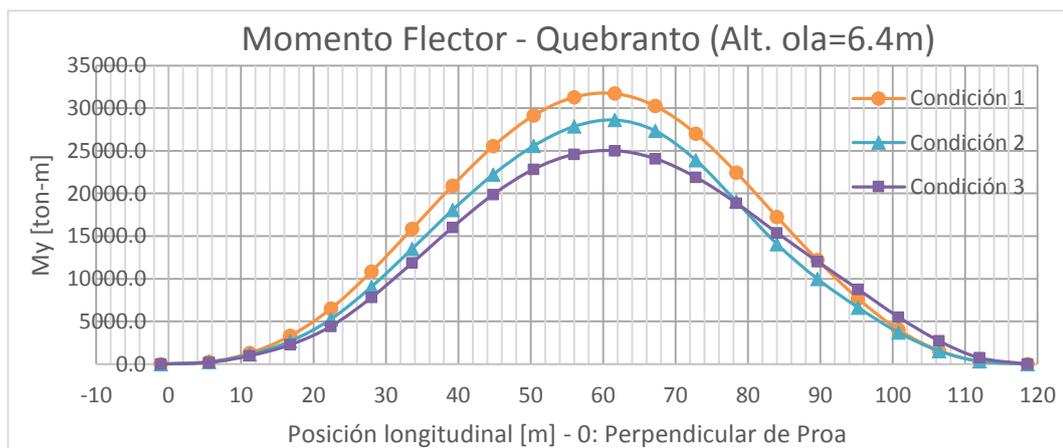
**Fuente:** Elaboración Propia

En las Figuras 35 y 36 se muestran los resultados de Fuerza Cortante y Momento Flector en situación de Quebranto. A diferencia de la condición anterior, los mayores valores se presentan en la condición de menor desplazamiento (Condición 1).



**Figura 35:** Fuerza Cortante en Quebranto en tres condiciones de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia



**Figura 36:** Momento Flector en Quebranto en tres condiciones de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia

En las Tablas XXXVI y XXXVII se encuentran los valores de las Fuerzas Internas en Arrufo y Quebranto respectivamente, en las zonas de analizadas de la embarcación.

<b>Arrufo</b>		
<b>Condición de Carga</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
1. Llegada a Puerto sin Carga ( $\Delta=5525$ ton)	-420	-11478
1. Llegada a Puerto con Carga ( $\Delta= 8347$ ton)	-704	-21801
3. Salida de Puerto Carga Completa ( $\Delta= 10286$ ton)	-791	-25215

**Tabla XXXV:** Fuerza Cortante y Momento Flector en situación de Arrufo para tres condiciones de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia

<b>Quebranto</b>		
<b>Condición de Carga</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
1. Llegada a Puerto sin Carga ( $\Delta=5525$ ton)	884	31507
2. Llegada a Puerto con Carga ( $\Delta= 8347$ ton)	785	28253
3. Salida de Puerto Carga Completa ( $\Delta= 10286$ ton)	712	24800

**Tabla XXXVI:** Fuerza Cortante y Momento Flector en situación de Quebranto para tres condiciones de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia

Los valores más altos de Fuerza Cortante y Momento Flector se presentan en Quebranto, excepto en la Condición 3 de carga, en la que la Fuerza Cortante y el Momento Flector en Arrufo son mayores.

#### 4.3 Aplicación de formulaciones de sociedades de clasificación.

Las sociedades de clasificación de buques, han desarrollado una serie de formulaciones semi-empíricas para la estimación de Fuerzas Internas en Aguas Tranquilas y en Olas para las situaciones de Arrufo y Quebranto. Las fórmulas incluyen algunas dimensiones principales de la embarcación (Eslora, Manga, Coeficiente Bloque) y otros parámetros relacionados al medio en el que se encuentra, y, posiblemente, han considerado las peores situaciones de carga.

De acuerdo con las reglas de DNV (Enero de 2008, Capítulo 1, Parte 3, Sección 5 “Resistencia Longitudinal”), [9], el valor de diseño del Momento Flector (MS) en Aguas Tranquilas, en la Sección Media de la embarcación, no deberá ser menor a:

$$M_S(\text{arrufo}) = -0.065 C_W * L^2 * B * (C_B + 0.7) \text{ [kNm]}$$

$$M_S(\text{quebranto}) = C_W * L^2 * B * (0.1225 - 0.015C_B) \text{ [kNm]}$$

donde L es la eslora de la embarcación en la línea de agua de verano medida desde la roda hasta el eje del timón en la popa. Este valor no debe

ser menor al 96% ni necesita ser mayor al 97% de la máxima eslora en la línea de agua de verano (114.6 m), por lo tanto, la eslora que se considera en estos cálculos es 111 m.

B, es la mayor manga moldeada en la línea de agua de verano (17.2 m),  $C_B$ , el coeficiente bloque (0.772) y,  $C_w$ , el coeficiente de ola (8.14) que se ha calculado como se presenta en la siguiente tabla:

L [m]	$C_w$
$L \leq 100$	$0.0792 L$
$100 < L < 300$	$10.75 - [(300 - L)/100]^{3/2}$
$300 \leq L \leq 350$	10.75
$L > 350$	$10.75 - [(L - 350)/150]^{3/2}$

**Tabla XXXVII:** Cálculo de coeficiente de ola  $C_w$  según DNV 2008.

**Fuente:** [9].

Además, el valor de diseño de Fuerza Cortante ( $Q_s$ ) a lo largo de la eslora de la embarcación, no deberá ser menor a:

$$Q_s = 5 * k_{sq} * \frac{M_s}{L} \text{ [kN]}$$

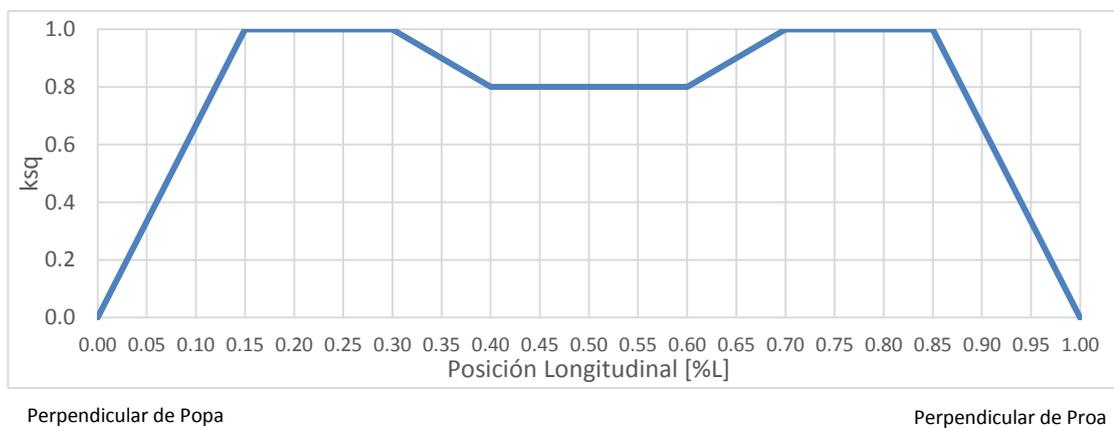
Donde  $M_s$  es el Momento Flector de diseño, ya calculado, en Aguas Tranquilas y  $k_{sq}$  puede tomar los siguientes valores de acuerdo con la posición en la que se desea calcular la Fuerza Cortante: [9]

0: en Perpendicular de Proa y Perpendicular de Popa

1.0: entre 0.15L y 0.3L desde la Perpendicular de Popa

0.8: entre 0.4L y 0.6L desde la Perpendicular de Popa

1.0: entre 0.7L y 0.85L desde la Perpendicular de Popa



Perpendicular de Popa

Perpendicular de Proa

**Figura 37:** Valores de  $k_{sq}$  de acuerdo con la posición longitudinal a lo largo de la eslora de la embarcación.

**Fuente:** [9].

Como se mencionó en el capítulo 1, los máximos valores de Fuerza Cortante se presentan típicamente en la posición de  $L/4$ , lo cual se refleja en que  $k_{sq} = 1.0$  en dicha posición.

Los valores de Fuerza Cortante resultantes al aplicar estas fórmulas de DNV, [9], para Aguas Tranquilas son: -755 ton en Arrufo y 876 ton en Quebranto, y, los de Momento Flector, -16693 ton-m en Arrufo y 19352 ton-m en Quebranto.

A continuación se realizan los cálculos de Fuerzas Internas desarrolladas en olas, aplicando las formulaciones de DNV, las cuales son generadas como valores de diseño con una probabilidad de excedencia de  $10^{-8}$ . De acuerdo con la referencia mencionada, el valor de diseño reglamentario del Momento Flector en olas ( $M_W$ ), en la Sección Media de la embarcación no debe ser menor que:

$$M_W(\text{arrufo}) = -0.11 k_{wm} \alpha C_W L^2 B (C_B + 0.7) \text{ [kNm]}$$

$$M_W(\text{quebranto}) = 0.19 k_{wm} \alpha C_W L^2 B C_B \text{ [kNm]}$$

De acuerdo con [9], los valores de  $\alpha$  pueden ser:

1.0: para condiciones en mar abierto

0.5: para puerto y condiciones de agua protegidas (fiordos cerrados, lagos, ríos).

Y, los de  $k_{wm}$  :

1.0: entre 0.40L y 0.65L desde la Perpendicular de Popa

0.0 en la Perpendicular de Popa y Perpendicular de Proa

Para el caso de esta embarcación,  $\alpha$  y  $k_{wm}$  son iguales a 1

De la misma manera, se calculan los valores de Fuerza Cortante positiva,  $Q_{WP}$ , (cuando la Fuerza Cortante en Aguas Tranquilas es positiva) y negativa,

$Q_{WN}$ , (cuando la Fuerza Cortante en Aguas Tranquilas es negativa) con las siguientes ecuaciones, [9]:

$$Q_{WP} = 0.3 \beta k_{wqp} C_W L B (C_B + 0.7) \text{ [kN]}$$

$$Q_{WN} = -0.3 \beta k_{wqn} C_W L B (C_B + 0.7) \text{ [kN]}$$

De acuerdo con [9], los valores de  $\beta$  pueden ser:

1.0: para condiciones en mar abierto

0.5: para puerto y condiciones de agua protegidas (fiordos cerrados, lagos, ríos).

Los valores de  $k_{wqp}$ ,

0.0: en la Perpendicular de Popa y Perpendicular de Proa

1.59  $C_B / (C_B + 0.7)$ : entre 0.2 L y 0.3 L desde la Perpendicular de Popa

0.7: entre 0.4 L y 0.6 L desde la Perpendicular de Popa.

1.0: entre 0.7 L y 0.85 L desde la Perpendicular de Popa.

Y, los de  $k_{wqn}$ ,

0.0: en la Perpendicular de Popa y Perpendicular de Proa

0.92: entre 0.2 L y 0.3 L desde la Perpendicular de Popa.

0.7: entre 0.4 L y 0.6 L desde la Perpendicular de Popa.

1.73  $C_B / (C_B + 0.7)$  entre 0.7 L y 0.85 L desde la Perpendicular de Popa.

Para el caso de esta embarcación y las zonas de análisis de Fuerza Cortante,  $\beta$  y  $k_{wqp}$  son iguales a 1, y,  $k_{wqn}$  es 1.73.

Los valores de Fuerza Cortante por acción de las olas, resultantes al aplicar estas fórmulas son: -633 ton en Arrufo y 697 ton en Quebranto, y, los de Momento Flector, -28250 ton-m en Arrufo y 25591 ton-m en Quebranto.

En la Tabla XXXVIII se presenta un resumen de los resultados de Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas y en Olas.

	Aguas Tranquilas		Olas	
	Arrufo	Quebranto	Arrufo	Quebranto
<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	-755	876	-633	697
<b>Momento Flector [ton-m]</b>	-16693	19352	-28250	25591

**Tabla XXXVIII:** Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas y Olas, según DNV.

**Fuente:** Elaboración Propia

#### 4.4 Resumen y comparación de resultados

La comparación de los resultados de las Fuerzas Internas aplicando métodos probabilísticos, a corto y a largo plazo, con los resultados de los métodos tradicionales, (Cuasiestático y de la sociedad de clasificación DNV), se ha realizado con porcentajes de diferencia. En el modelo a corto plazo se ha seleccionado uno de los cuatro métodos, el de Distribución Asintótica Tipo I (B), y uno de los Estados de Mar, el más exigente de los analizados, que es

el Estado de Mar 7; se usó una probabilidad de excedencia de  $10^{-8}$ . En el modelo estadístico a largo plazo se han seleccionado los resultados al emplear los valores de parámetro de Weibull ( $l$ ), de 1.14 para Fuerza Cortante y de 1.25 para Momento Flector. Se han seleccionado los resultados de la situación de Quebranto para la comparación con el método Cuasiestático y con las formulaciones de DNV; para esta última, se han sumado los valores de Momento Flector y Fuerza Cortante en Olas y en Aguas Tranquilas para realizar la comparación con los valores totales.

En las Tablas XL y XLI se presenta un resumen de los resultados de Fuerza Cortante y Momento Flector calculados empleando los cuatro métodos descritos en este trabajo.

	<b>Fuerza Cortante Total [ton]</b>			
	<b>Modelo Estadístico a Corto Plazo</b>	<b>Modelo Estadístico a Largo Plazo</b>	<b>Método Cuasiestático</b>	<b>Fórmula de DNV</b>
<b>Condición 1</b>	1133	1476	884	1573
<b>Condición 2</b>	977	1321	785	
<b>Condición 3</b>	1111	1288	712	

**Tabla XXXIX:** Comparación de resultados de Fuerza Cortante empleando diferentes métodos.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Momento Flector total [ton-m]</b>				
	<b>Modelo Estadístico a Corto Plazo</b>	<b>Modelo Estadístico a Largo Plazo</b>	<b>Método cuasiestático</b>	<b>Fórmula de DNV</b>
<b>Condición 1</b>	34243	40974	31507	44944
<b>Condición 2</b>	26607	35959	28253	
<b>Condición 3</b>	30425	35417	24800	

**Tabla XL:** Comparación de resultados de Momento Flector calculado empleando diferentes métodos.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## **CONCLUSIONES**

En este trabajo se calcula, en primer lugar, la Fuerza Cortante y el Momento Flector en olas regulares empleando el programa SCORES, para la estructura de una embarcación tipo tanquero de 7440 DWT. El cálculo se realiza en las secciones consideradas como críticas a lo largo de la embarcación, L/4 y 3L/4 para la Fuerza Cortante, y, Sección Media, para el Momento Flector. Luego, se obtienen los valores de Fuerzas Internas en Mar Irregular, y para esto, se emplean dos métodos probabilísticos de cálculo: a corto y largo plazo. Finalmente, se comparan estos resultados con los obtenidos por el método Cuasiestático y las formulaciones de la Sociedad de Clasificación DNV. Luego de este proceso se concluye que:

1. Las Fuerzas Internas desarrolladas, por acción de olas regulares en el buque analizado, dan como resultado que los mayores valores de

Fuerza Cortante se desarrollan a un cuarto de la eslora desde la perpendicular de proa en las tres condiciones de carga analizadas; el Momento Flector, presenta valores extremos alrededor de Sección Media y se producen cuando la incidencia de la ola es de  $180^{\circ}$ , olas de proa, debido a que la excitación es máxima por los movimientos verticales de Levantamiento y Cabeceo. A medida que el ángulo de incidencia se acerca a  $90^{\circ}$ , olas de costado, la energía de la ola se dispersa para producir, además, el movimiento lateral de Balance.

2. La longitud de ola a la cual los valores de Fuerza Cortante y Momento Flector son máximos, es aproximadamente el 90% del total de la eslora entre perpendiculares. Las crestas de la ola actúan como apoyos de la Viga-Buque y, en esta situación, la embarcación tiene uno o dos apoyos (Quebranto o Arrufo). A medida que la longitud de ola disminuye, los “apoyos” de la Viga-Buque aumentan y las Fuerzas Internas desarrolladas son menores. Cuando la longitud de ola aumenta, la embarcación se eleva junto con ella, disminuyendo su efecto dinámico, lo cual causa la reducción de las Fuerzas Internas.
3. La implementación del método de predicción de cargas a Corto plazo se realizó para tres condiciones de carga, tres Estados de Mar, y, tres probabilidades de excedencia, mostrando que las Fuerzas Internas

desarrolladas son mayores en los Estados de Mar de mayor Altura Significativa, en la condición de carga de menor desplazamiento, y, con la menor probabilidad de excedencia. Se emplearon cinco diferentes métodos de cálculo obteniendo resultados similares en cuatro de ellos, de estos, se ha considerado como idóneo el Método B: Distribución Asintótica Tipo I del valor extremo porque resulta en los valores más altos para bajas probabilidades de excedencia. Por lo contrario, para medianas y altas probabilidades de excedencia, los mayores valores de Fuerzas Internas resultan de la aplicación del Método C: Distribución del valor extremo basado en el análisis de intersecciones. Los resultados obtenidos mediante el empleo del quinto método, Distribución de Rayleigh, se alejan de los otros métodos, por lo tanto, no se tiene la certeza de que los procesos (Fuerzas Internas Dinámicas a Corto Plazo) sean de banda angosta, y, no se recomienda aplicar las simplificaciones que esto implica.

4. De la implementación del método de predicción de cargas a largo plazo, realizado para tres condiciones de carga, se concluye que, a pesar de que los procesos tienen un ancho de banda menor a 0.6, no deben tomarse como procesos de banda angosta, debido a que en ese caso, se asumiría un parámetro de forma igual a 2 en la Distribución de Weibull, que resulta en una Distribución de Rayleigh, la misma que no se ajusta a

la representación del proceso. Por lo tanto, el parámetro de forma de Weibull debe ser calculado para cada proceso. Las mayores probabilidades de excedencia ocurren en la condición de menor desplazamiento.

5. La aplicación de los cálculos de Fuerza Cortante y Momento Flector empleando el método probabilístico a largo plazo, son consistentes con los cálculos obtenidos con las fórmulas de la sociedad clasificadora Det Norske Veritas.

## **RECOMENDACIONES**

1. En vista de que un análisis a largo plazo estima las Fuerzas Internas que se producen en la embarcación a lo largo de su vida útil, se debería complementar este trabajo con un análisis de fatiga de la estructura en olas irregulares. Esto permitirá estimar de una manera más directa a la probabilidad de falla de la embarcación.
2. En este trabajo se ha considerado que la embarcación es una viga rígida y su comportamiento en olas como lineal. Considerando que la respuesta en estos Estados de Mar es elevada, se recomienda analizar la embarcación de manera no lineal para determinar en forma más exacta la respuesta estructural del buque.

3. Se recomienda investigar las características del mar (altura significativa y periodo modal) de las zonas cercanas a América del Sur, con ello, se podrá aplicar estos cálculos considerando las rutas reales de navegación de las embarcaciones de nuestro país.
  
4. Se recomienda aplicar alguna técnica de simulación, experimental o computacional, para obtener la respuesta estructural de la embarcación en olas irregulares, y, comparar esta predicción de cargas con la obtenida mediante los métodos empleados en este trabajo.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

### TABLAS DE UBICACIÓN Y LLENADO DE TANQUES, DISTRIBUCIÓN DE PESOS Y CARACTERÍSTICAS SECCIONALES.

En la Tabla A I se muestra la ubicación exacta de los tanques de carga, combustible, lastre, aceite y sentina.

	Cuaderna	Descripción del Tanque	% Llenado		
			COND. 1	COND. 2	COND. 3
<b>TQ. DE CARGA</b>	156-161	Slop Tank (P&S)	0	0	0
	136-156	Nº1 C.O.T (P&S)	0	80	98
	112-136	Nº2 C.O.T (P&S)	0	80	98
	88-112	Nº3 C.O.T (P&S)	0	81.5	98
	64-88	Nº4 C.O.T (P&S)	0	60	89
	60-64	Nº5 C.O.T (P&S)	0	100	90
	40-60	Nº6 C.O.T (P&S)	0	100	89.6
<b>LASTRE</b>	136-161	Nº1 W.B.T (P&S)	100	0	0
	112-136	Nº2 W.B.T (P&S)	100	0	0
	88-112	Nº3 W.B.T (P&S)	100	0	0
	64-88	Nº4 W.B.T (P&S)	100	0	0
	40-64	Nº5 W.B.T (P&S)	100	0	0
<b>ACEITE</b>	23-27	L.O. STORE (S)	100	100	100
	17-21	L.O. Circulation Tank (S)	100	100	100
<b>SENTINA</b>	11 - 17	Sewage Tank (P)	0	0	0
	17 - 21	SLUDGE Tank (P)	0	0	0
<b>COMBUSTIBLE CONSUMIBLE</b>	25-28	Nº1 D.O. Daily Tank (P)	10	10	100
	22-25	Nº2 D.O. Daily Tank (P)	10	10	100
	22-38	Nº1 D.O.T (P&S)	10	10	100
	4 - 9	Boiler F.O. Daily Tank (P)	10	10	100
	31-33	Nº1 F.O. Daily Tank (P)	10	10	100

	29-31	N°2 F.O. Daily Tank (P)	10	10	100
	33-35	F.O. Settling Tank (P)	10	10	100
	35-38.44	N°1 F.O.T (P&S)	10	10	100
	3 - 9	N°2 F.O.T (P&S)	10	10	100
	4 - 9	N°3 F.O.T (S)	10	10	100
	29-35	N°4 F.O.T (S)	10	10	100
	11-16	F.O. LIQUID Tank (S)	10	10	100
<b>AGUA DULCE</b>	Aft end - 2	AFT Water Tank	10	10	100
	162.3-169	FOWARD Water Tank(P)	10	10	100
	162.3-169	FOWARD Water Tank(S)	10	10	100

**Tabla A I:** Ubicación y llenado de los tanques de acuerdo con las cuadernas señaladas en el plano de Distribución General.

**Fuente:** [5].

En la Tabla A II se muestra la distribución de pesos de acuerdo con el llenado de los tanques en las tres condiciones de carga analizada en este trabajo.

Estación	Peso [ton]		
	Condición 1	Condición 2	Condición 3
0-Proa	97.4	97.4	97.4
1	177.3	177.2	255.4
2	185.9	213.4	264.7
3	324.6	483.0	645.0
4	324.7	483.0	645.8
5	318.2	497.9	656.4
6	318.3	498.8	668.0
7	318.1	508.5	667.1
8	307.0	566.6	662.0
9	307.0	566.6	662.0
10	297.3	505.7	648.9
11	270.3	399.4	626.0
12	270.3	399.4	626.0
13	299.1	535.7	652.7
14	320.7	637.8	610.6
15	320.7	637.8	610.6
16	225.4	296.5	302.0
17	273.1	273.1	273.1
18	237.3	237.3	237.3
19	212.9	212.9	212.9
20-Popa	119.3	119.3	260.5

**Tabla A II:** Distribución de Pesos en segmentos de 5.6 m centrados en cada estación en las tres condiciones de carga.

**Fuente:** [5].

**Tabla A III:** Características seccionales de la embarcación en cada estación y condición de carga.

Estación	Manga [m]	Coef. área secc.	Condición 1			Condición 2			Condición 3			
			Calado [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Manga [m]	Coef. de área secc.	Calado [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Manga [m]	Coef. área secc.	Calado [m]	Área [m <sup>2</sup> ]
0	-	-	-	-	3.65	0.583	0.62	1.32	4.98	0.634	1.14	3.60
1	3.29	0.658	4.81	10.43	7.02	0.425	6.74	20.13	8.18	0.411	7.32	24.60
2	7.70	0.704	4.70	25.5	10.55	0.612	6.61	42.70	11.52	0.597	7.26	49.88
3	11.42	0.753	4.59	39.53	13.44	0.719	6.48	62.68	14.26	0.708	7.19	72.57
4	14.09	0.810	4.49	51.22	15.25	0.808	6.35	78.31	15.96	0.796	7.12	90.46
5	15.92	0.876	4.38	61.07	16.58	0.878	6.22	90.56	17.00	0.873	7.06	104.65
6	16.96	0.928	4.27	67.22	17.20	0.933	6.10	97.81	17.20	0.944	6.99	113.41
7	17.20	0.973	4.16	69.68	17.20	0.975	5.98	100.05	17.20	0.980	6.92	116.68
8	17.20	0.983	4.06	68.56	17.20	0.982	5.84	98.59	17.20	0.987	6.85	116.33
9	17.20	0.982	3.95	66.69	17.20	0.982	5.71	96.39	17.20	0.986	6.79	115.12
10	17.20	0.982	3.84	64.83	17.20	0.981	5.58	94.20	17.20	0.986	6.72	113.98
11	17.20	0.981	3.73	62.96	17.20	0.981	5.45	92.00	17.20	0.986	6.65	112.84
12	17.20	0.980	3.62	61.1	17.20	0.981	5.32	89.80	17.20	0.986	6.59	111.69
13	17.20	0.979	3.52	59.23	17.20	0.981	5.19	87.61	17.20	0.986	6.52	110.55
14	17.20	0.979	3.41	57.36	17.20	0.981	5.06	85.41	17.20	0.986	6.45	109.41
15	17.20	0.977	3.30	55.45	17.20	0.980	4.94	83.21	17.20	0.986	6.39	108.26
16	17.20	0.960	3.19	52.71	17.20	0.980	4.81	81.02	17.20	0.977	6.32	106.22
17	15.65	0.922	3.08	44.5	16.00	0.926	4.68	69.29	16.64	0.914	6.25	95.10
18	11.95	0.880	2.98	31.3	12.46	0.886	4.55	50.21	13.25	0.871	6.18	71.32
19	6.69	0.813	2.87	15.6	6.96	0.848	4.42	26.09	7.44	0.841	6.12	38.25
20	2.60	0.689	2.61	4.676	2.74	0.777	4.14	8.82	2.77	0.749	5.90	12.23

## **ANEXO B**

### **EJECUCIÓN DEL PROGRAMA SCORES.**

#### **B.1 Descripción del programa**

Este programa calcula los movimientos en el plano lateral y vertical así como las cargas aplicadas a una embarcación en olas. Se aplica la “teoría de fajas” y se asume que cada sección transversal del casco cumple con la forma de Lewis para el cálculo de fuerzas hidrodinámicas. La embarcación puede tener cualquier dirección de navegación respecto a la dirección de la ola. Pueden obtenerse resultados para olas regulares e irregulares incluyendo espectros de ola direccionales. Se calculan las tres cargas principales que se producen en el casco, esto es, momento flector vertical, momento flector lateral y momento torsional, [6].

En este trabajo se ha hecho una pequeña modificación de los códigos de SCORES para que los resultados de Fuerza Cortante se incluyan en el archivo de respuesta.

## B.2 Preparación del archivo de datos.

El archivo de datos es de tipo texto y debe contener:

Línea	Descripción	
1	Nombre de la embarcación	
2	Integración	0: Suma simple 1: Regla trapezoidal
	Momento	0: Cálculo de movimientos usando propiedades de la masa. 1: Cálculo de movimientos usando distribución de masa. 2: Cálculo de movimientos y momentos usando distribución de masa.
	Distribución de masa	0: Se ingresa masa. 1: Se ingresa peso.
	Espectro de ola.	0: Olas regulares. 1: Espectro de Neumann. 2: Espectro de Pierson-Moskowitz. 3: Espectro de dos parámetros.
	Grados de libertad	0: Únicamente plano vertical. 1: Plano vertical y lateral. 2: Únicamente plano lateral.
	Direccionalidad	0: Olas uni-direccionales. 1: Ola "spreading".
	Archivo TDP	0 *no se usa
	Cierre de momentos	0: No calcular error de cierre de resultados.

		1: Calcular e imprimir erros de cierre de resultados.
	Salida de datos	0: Dimensional. 1: No dimensional.
	Eje de torsión	0: Centro de gravedad. 1: Línea de agua.
	Número de segmentos	*Máximo 20
3	Eslora	
	Densidad del agua	
	Gravedad	
	Desplazamiento	
4	Manga en línea de agua de la sección	*Una línea por cada sección.
	Coefficiente de Área Seccional de la sección	
	Calado de la sección	
	Centroide de la sección	
5	Centro de gravedad vertical	*Sólo se usa esta línea si los si la opción de grados de libertad es 1 ó 2
	Radio de giro en rolo	
6	Radio de giro longitudinal	*Sólo se usa esta línea si la opción de momento es 0.
	Centro de gravedad longitudinal	
7	Peso o masa del segmento	*Sólo se usa esta línea si la opción de momento es 1 ó 2.
	Centro de gravedad vertical del segmento	
	Radio de giro en rolo del segmento	

8	Primera estación para cálculos	
	Última estación para cálculos	
	Incremento entre estaciones	
9	Amplitud de ola	
	Longitud inicial de ola	
	Longitud final de ola	
	Incremento en longitud de ola	
	Velocidad inicial del buque	
	Velocidad final del buque	
	Incremento en la velocidad del buque	

**Tabla B 1:** Descripción de los datos que deben incluirse en el archivo de entrada al programa.

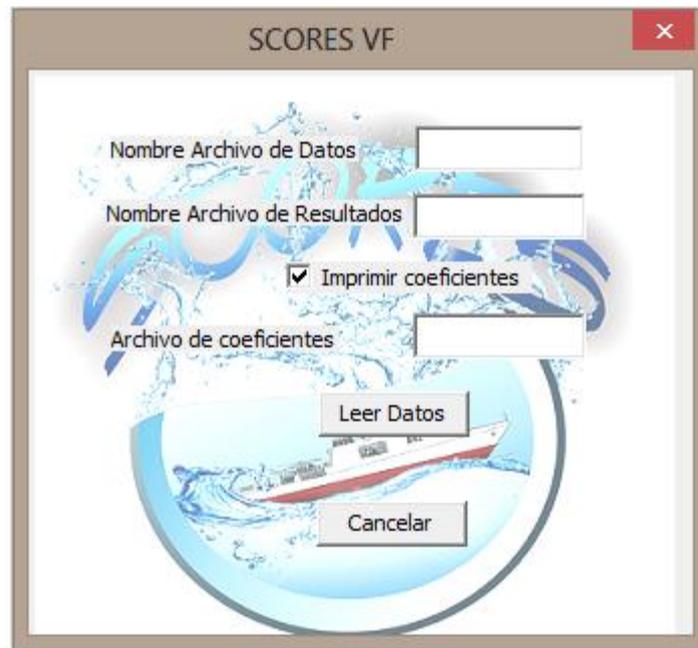
**Fuente:** [6]

A continuación, en la Figura B 1 se muestra un ejemplo del archivo de datos usado para los cálculos de Fuerza cortante y Momento Flector en L/4 (estac. 5), Sección Media (estac. 10) y 3L/4 (estac. 15) en condición de carga 3 o carga completa. Luego, en la Figura B 2 se presenta el cuadro de diálogo que aparece al ejecutar el programa SCORES en el que se debe ingresar el nombre y extensión del archivo de datos creado por el usuario y del archivo de resultados que creará el programa.

TANQUERO/CONDICION3/CARGA COMPLETA									
1	2	1	0	0	0	0	0	0	20
114.71	1.025	9.81	10286.45						3)lwl, rho, g, desplaz
2.77	0.749	5.90	0.000						4) B,Csecc,T,ZG E0_PROA
7.44	0.841	6.12	0.000						E1
13.25	0.871	6.18	0.000						E2
16.64	0.914	6.25	0.000						E3
17.20	0.977	6.32	0.000						E4
17.20	0.986	6.39	0.000						E5
17.20	0.986	6.45	0.000						E6
17.20	0.986	6.52	0.000						E7
17.20	0.986	6.59	0.000						E8
17.20	0.986	6.65	0.000						E9
17.20	0.986	6.72	0.000						E10
17.20	0.986	6.79	0.000						E11
17.20	0.987	6.85	0.000						E12
17.20	0.980	6.92	0.000						E13
17.20	0.944	6.99	0.000						E14
17.00	0.873	7.06	0.000						E15
15.96	0.796	7.12	0.000						E16
14.26	0.708	7.19	0.000						E17
11.52	0.597	7.26	0.000						E18
8.18	0.411	7.32	0.000						E19
4.98	0.634	1.14	0.000						E20 POPA
97.39	0.000	0.000							7)WEIGHT,VCG,GYR.RAD/ S0 PROA
255.43	0.000	0.000							S1
264.71	0.000	0.000							S2
644.97	0.000	0.000							S3
645.84	0.000	0.000							S4
656.42	0.000	0.000							S5
667.96	0.000	0.000							S6
667.11	0.000	0.000							S7
661.99	0.000	0.000							S8
661.99	0.000	0.000							S9
648.88	0.000	0.000							S10
626.00	0.000	0.000							S11
626.00	0.000	0.000							S12
652.69	0.000	0.000							S13
610.56	0.000	0.000							S14
610.56	0.000	0.000							S15
302.05	0.000	0.000							S16
273.12	0.000	0.000							S17
237.27	0.000	0.000							S18
212.94	0.000	0.000							S19
262.54	0.000	0.000							S20 POPA
5 15 5									8) :
+1.0 25 385 1.5 6 6 1.0									9)
90. 180.0 30.0									11)
-1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0									9)

**Figura B 1:** Ejemplo de archivo de datos de entrada para la ejecución del programa SCORES.

**Fuente:** Elaboración Propia



**Figura B 2:** Cuadro de diálogo al ejecutar el programa SCORES.

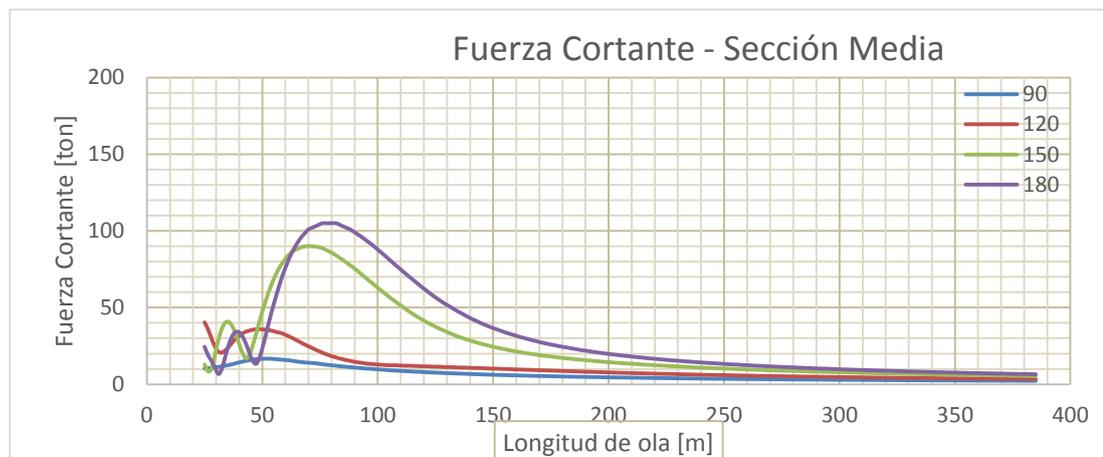
## ANEXO C

### RESULTADOS DEL PROGRAMA SCORES

#### C1. Fuerza Cortante

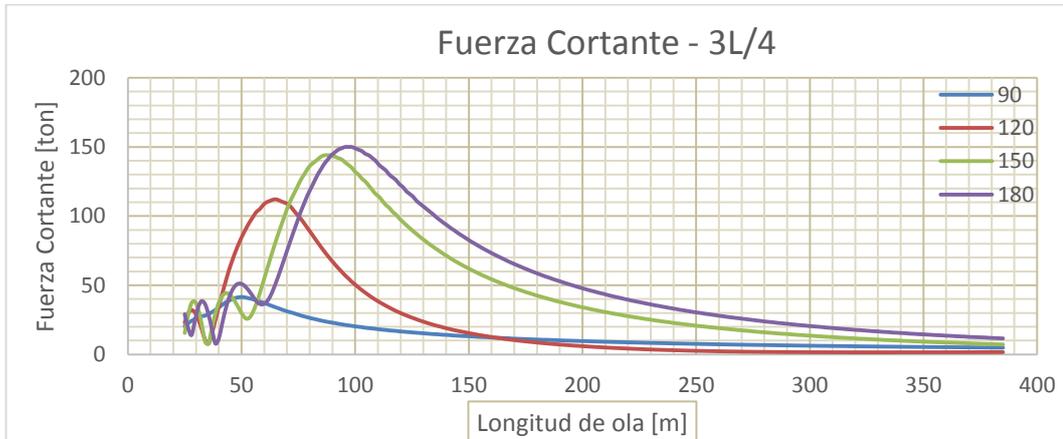
A continuación se presentan los Operadores de Amplitud de Respuesta de Fuerza Cortante que se producen a L/4, Sección Media y 3L/4 de la embarcación por acción de olas regulares de 1 m de amplitud y longitudes de ola entre 25 y 385 m.

**Condición 1: Llegada a Puerto sin carga.**



**Figura C 1:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola, condición 1.

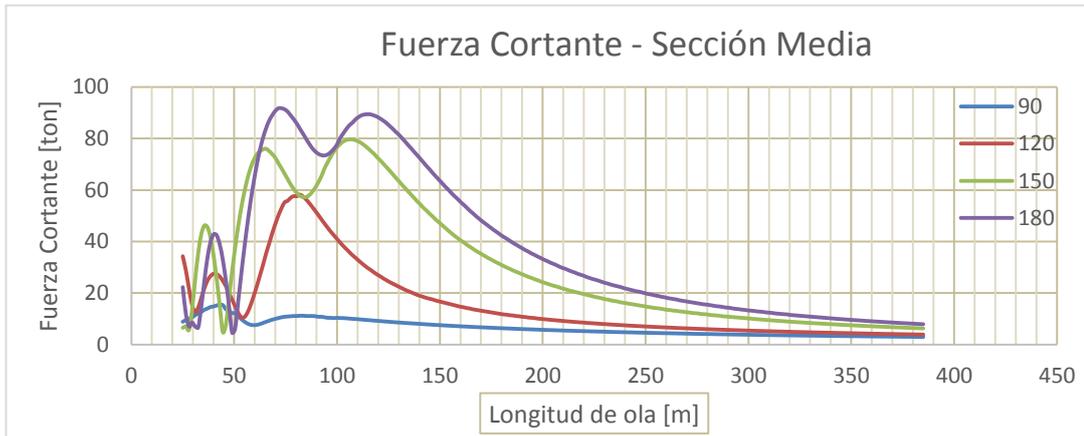
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura C 2:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre 3L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 1.

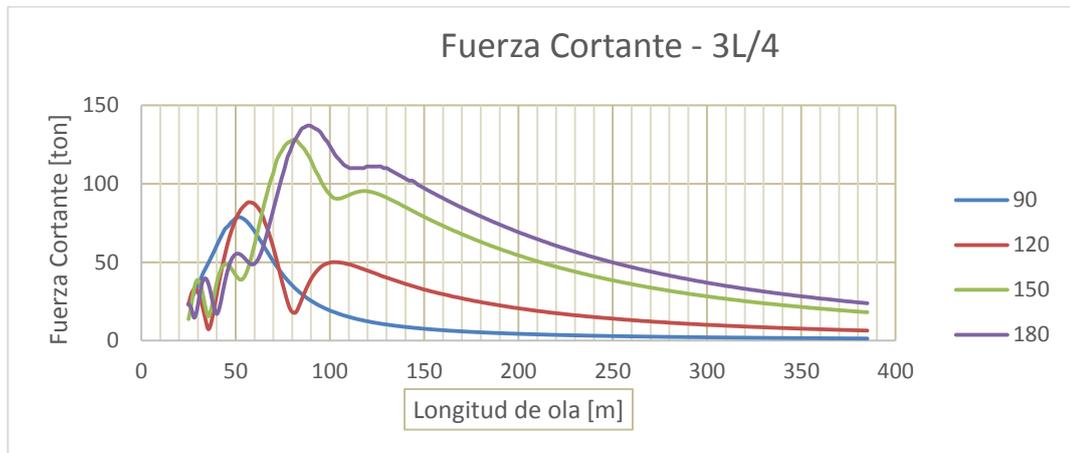
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Condición 2: Llegada a Puerto con carga.**



**Figura C 3:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola, condición 2.

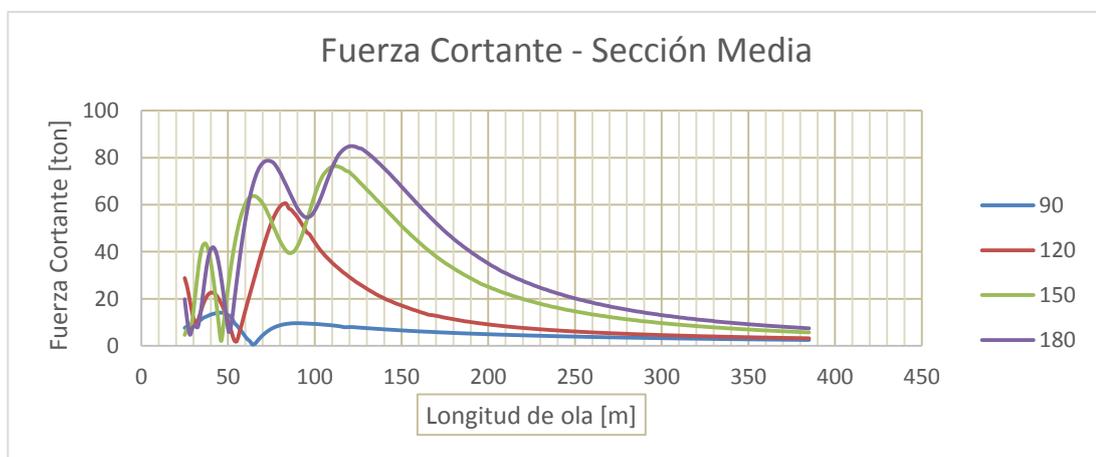
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura C 4:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre 3L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 2.

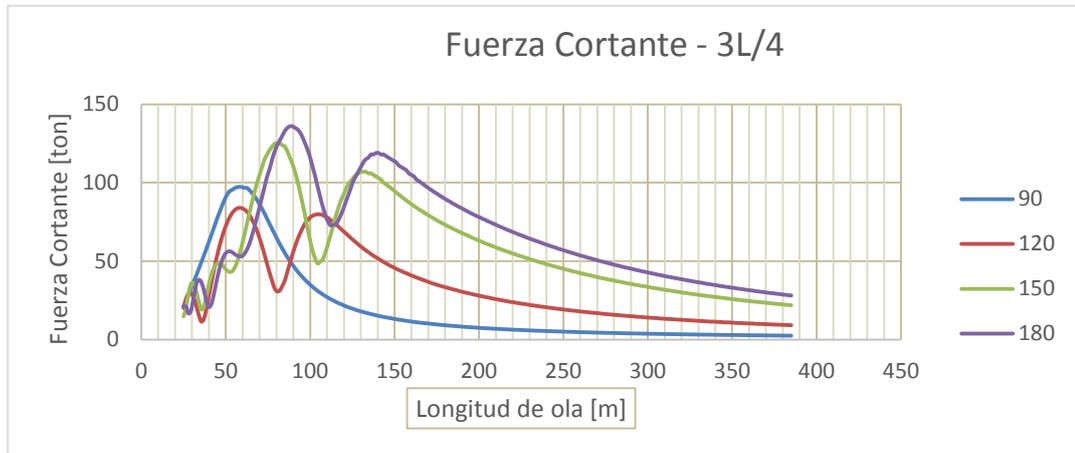
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Condición 3: Salida de Puerto (Carga completa).**



**Figura C 5:** RAO's de Fuerza Cortante actuando en Sección Media a distintos ángulos de incidencia de ola, condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.



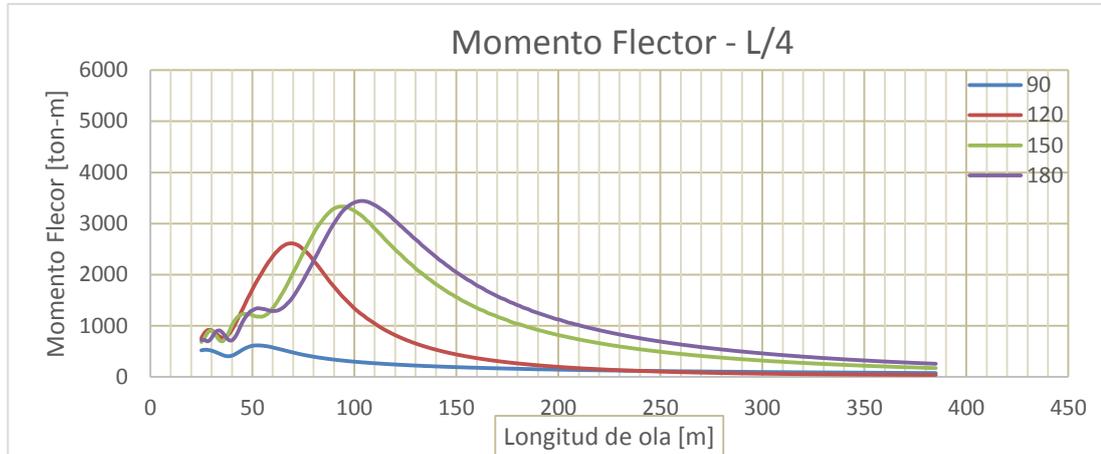
**Figura C 6:** RAO's de Fuerza Cortante actuando sobre 3L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia

## C2. Momento Flector

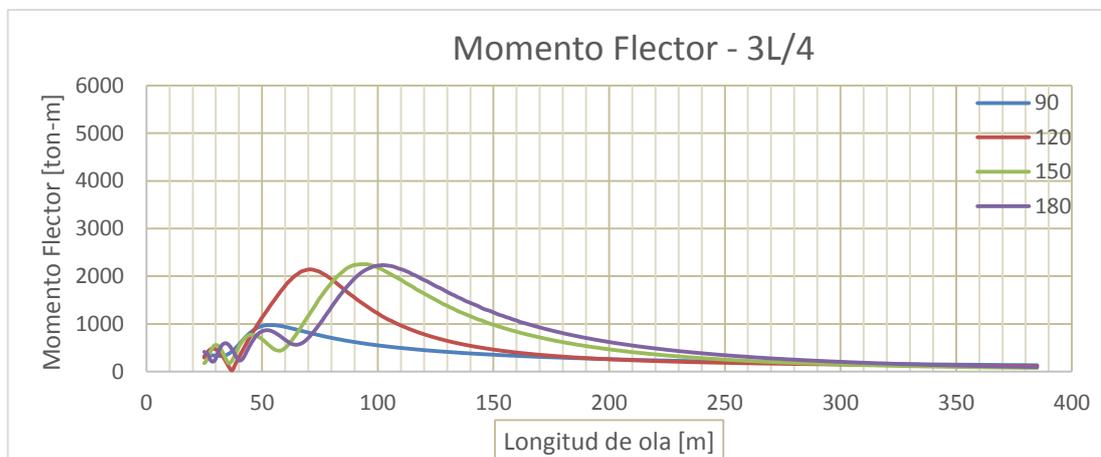
A continuación se presentan los Operadores de Amplitud de Respuesta de Momento Flector que se producen a L/4, Sección Media y 3L/4 de la embarcación por acción de olas regulares de 1 m de amplitud y longitudes de ola entre 25 y 385 m.

**Condición 1: Llegada a Puerto sin carga.**



**Figura C 7:** RAO's de Momento Flector actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 1.

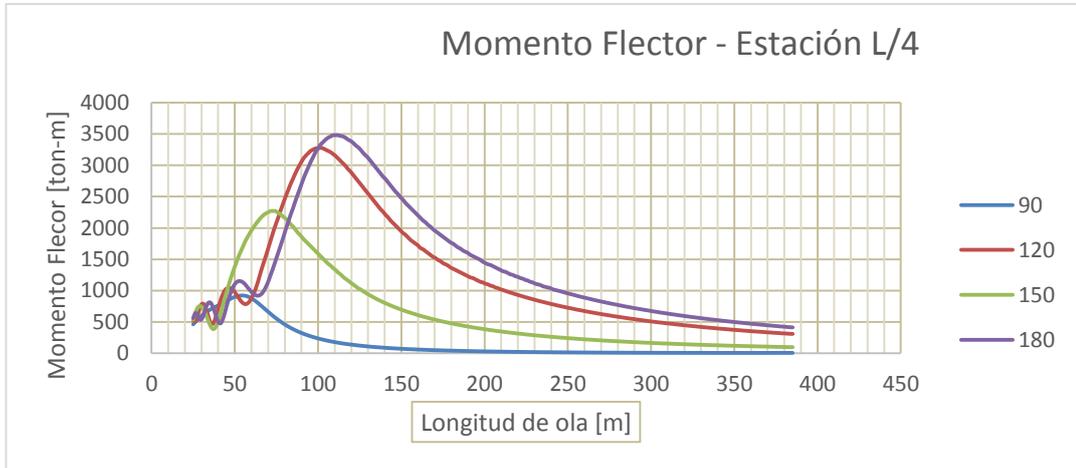
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura C 8:** RAO's de Momento Flector actuando sobre 3L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 1.

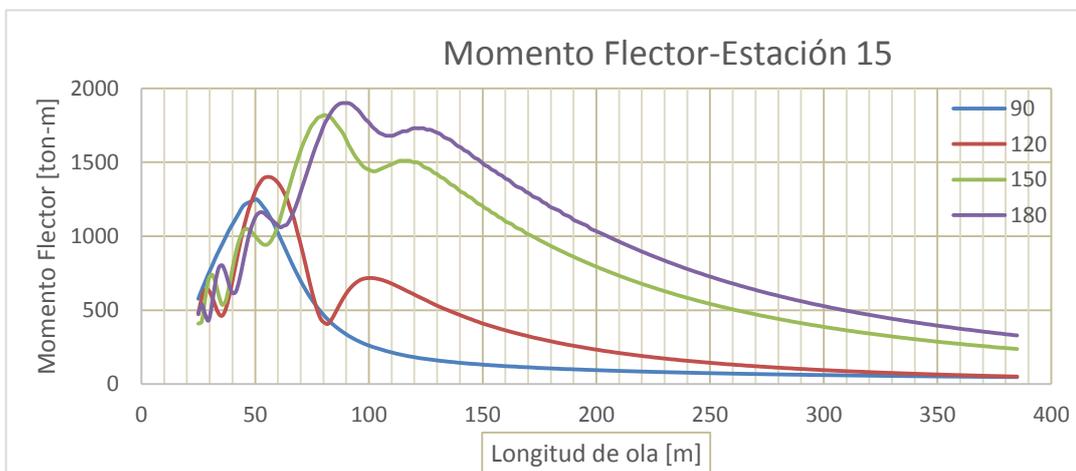
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Condición 2: Llegada a Puerto con carga.**



**Figura C 9:** RAO's de Momento Flector actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 2.

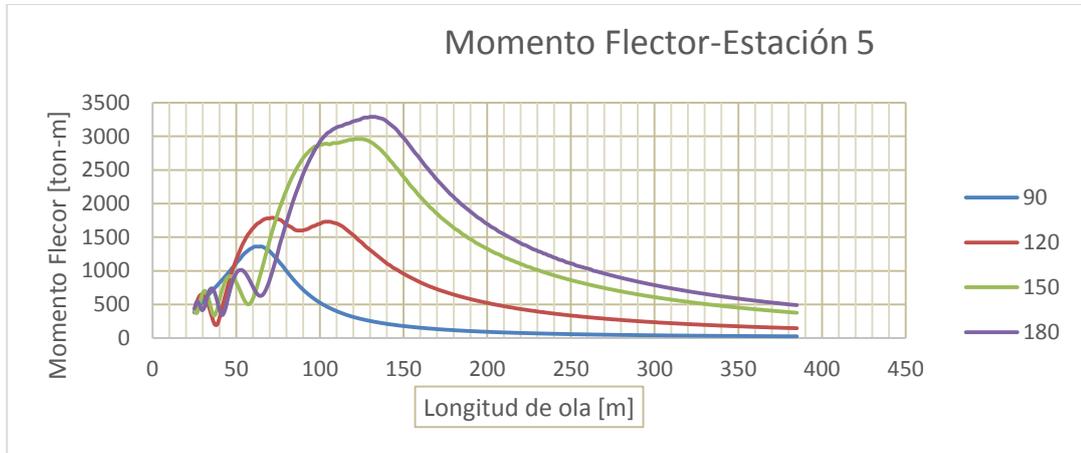
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura C 10:** RAO's de Momento Flector actuando sobre 3L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 2.

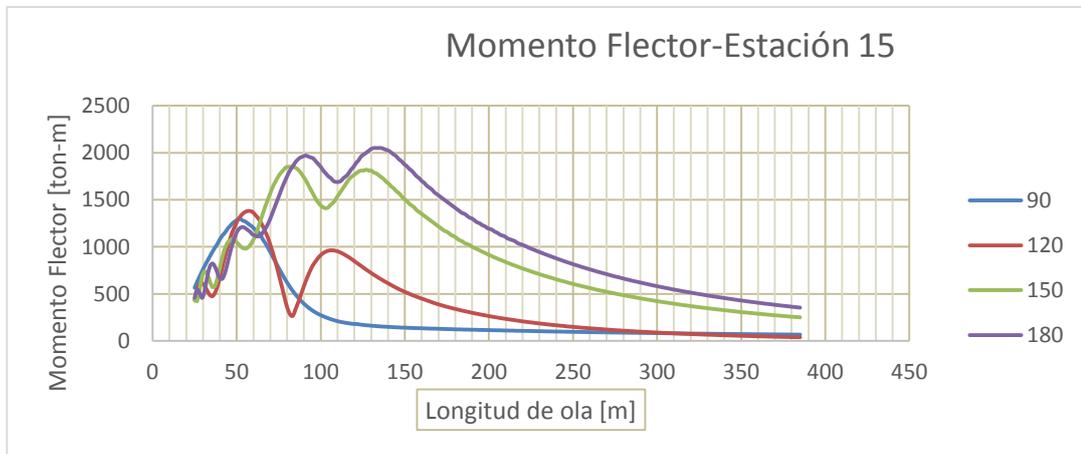
**Fuente:** Elaboración Propia

**Condición 3: Salida de Puerto (Carga completa)**



**Figura C 11:** RAO's de Momento Flector actuando sobre L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura C 12:** RAO's de Momento Flector actuando sobre 3L/4 a distintos ángulos de incidencia de ola en condición 3.

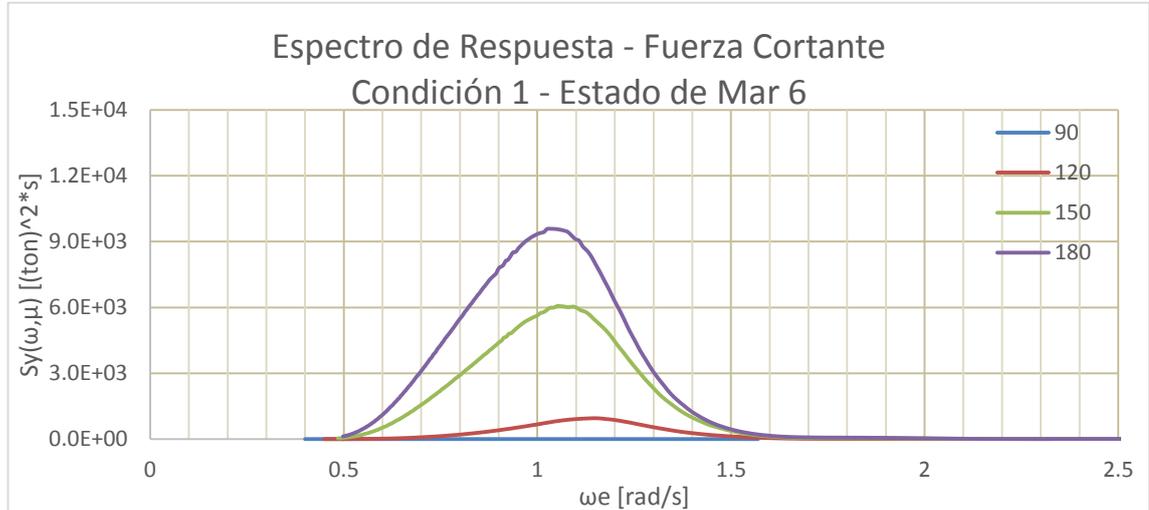
**Fuente:** Elaboración Propia.

**ANEXO D**  
**ESPECTROS DE RESPUESTA DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO**  
**FLECTOR**

**Condición 1: Llegada a Puerto sin carga.**

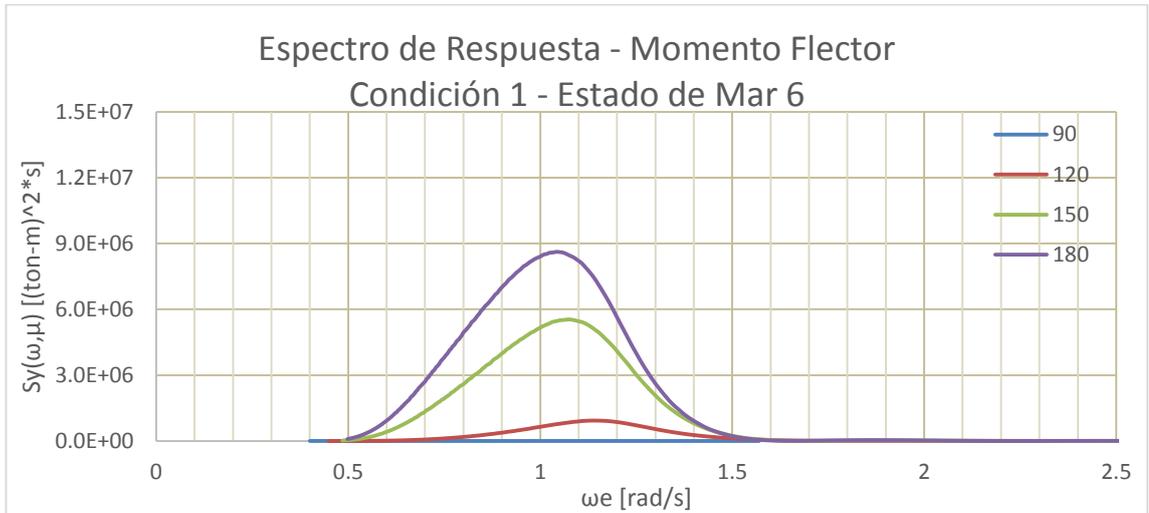
A continuación se muestran los Espectros de Respuesta de Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la combinación de la Respuesta en Olas Regulares y los Espectros de los Estados de Mar 6, y, 7 en la condición de carga 1.

**Estado de Mar 6**



**Figura D 1:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 1 y Estado de Mar 6.

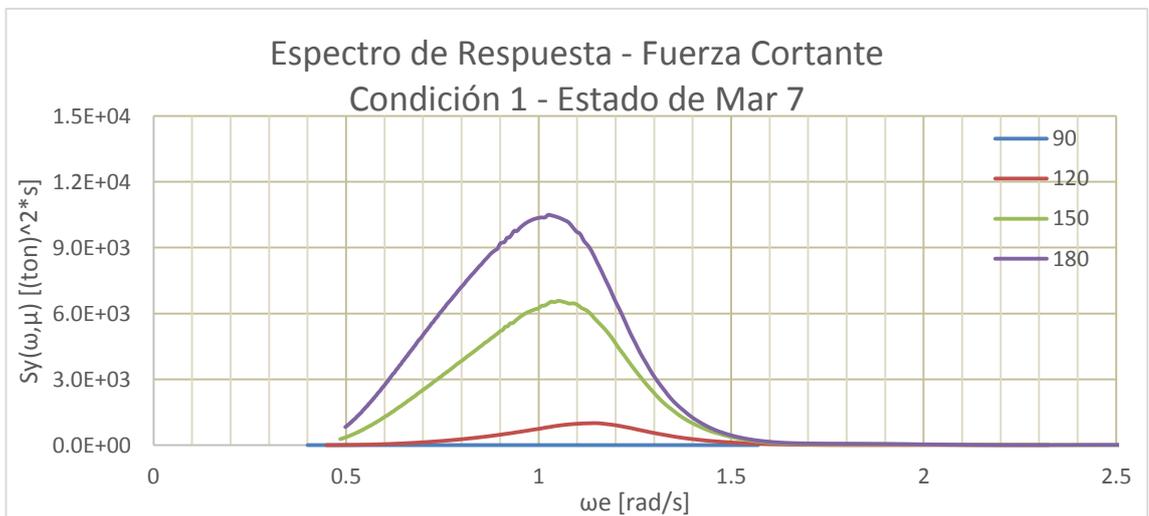
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura D 2:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 1 y Estado de Mar 6.

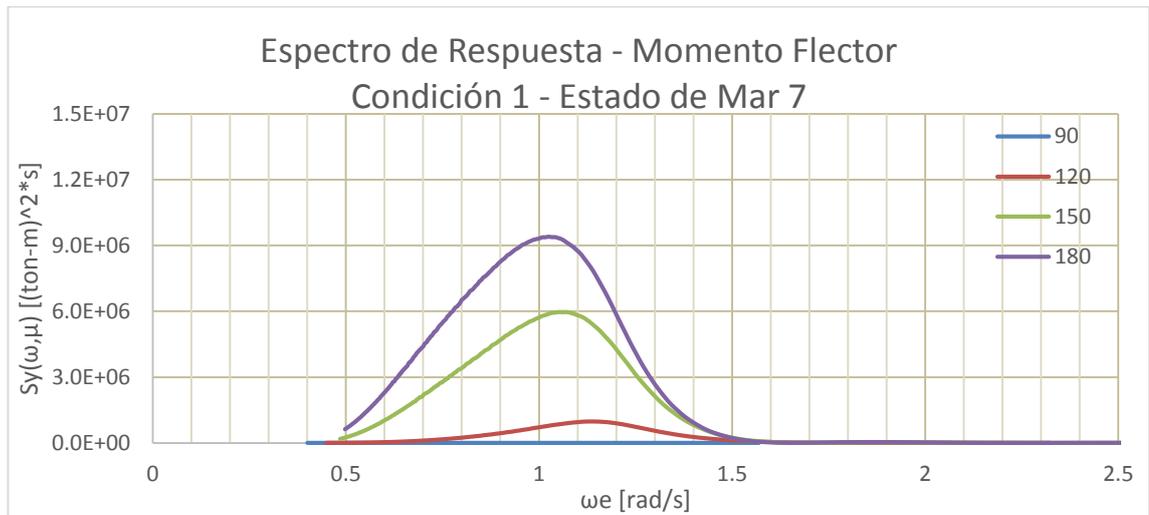
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Estado de Mar 7**



**Figura D 3:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 1 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.



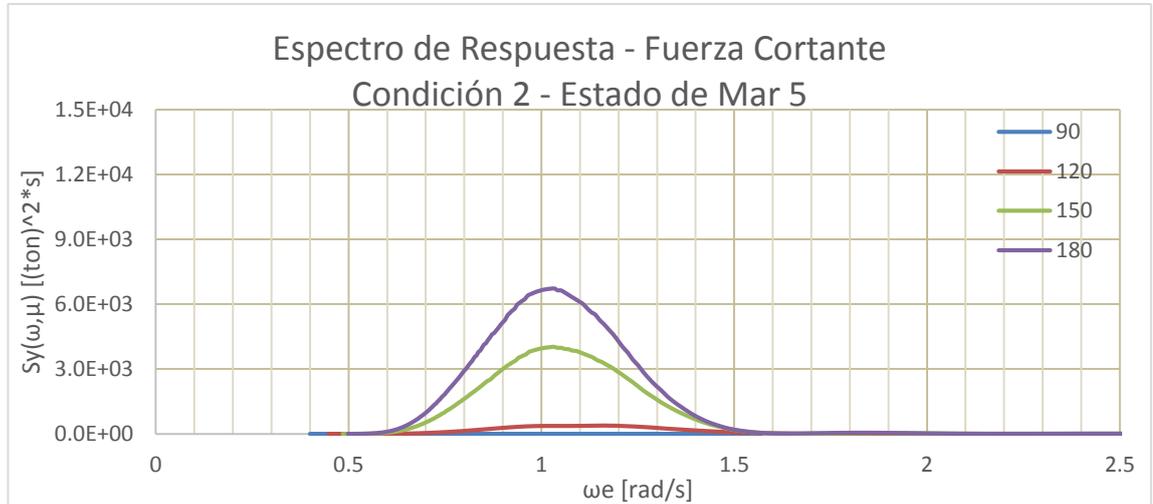
**Figura D 4:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 1 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### **Condición 2: Llegada a Puerto con carga.**

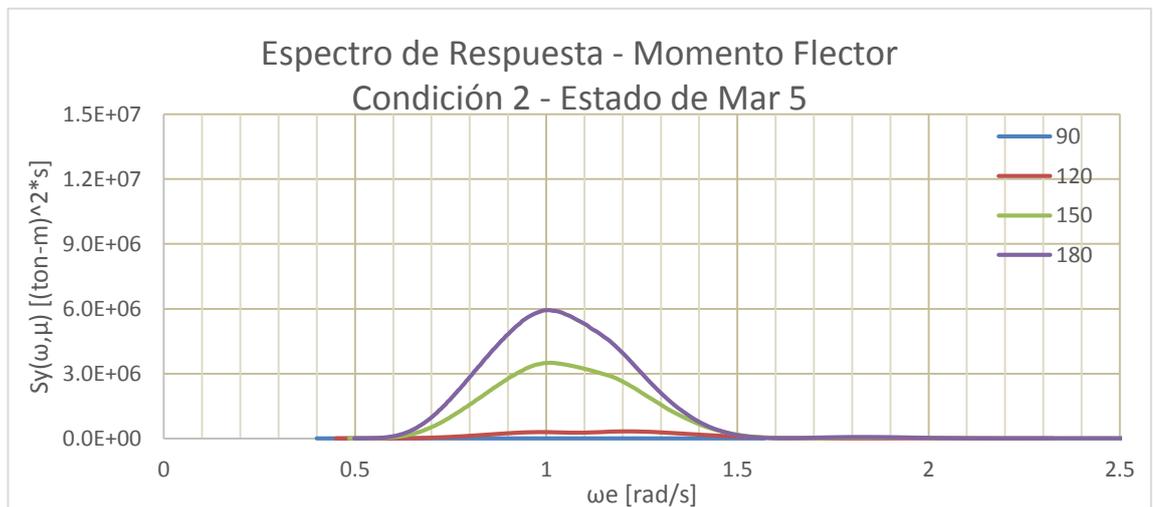
A continuación se muestran los Espectros de Respuesta de Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la combinación de la Respuesta en Olas Regulares y los Espectros de los Estados de Mar 5, 6, y 7 en la condición de carga 2.

## Estado de Mar 5



**Figura D 5:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 2 y Estado de Mar 5.

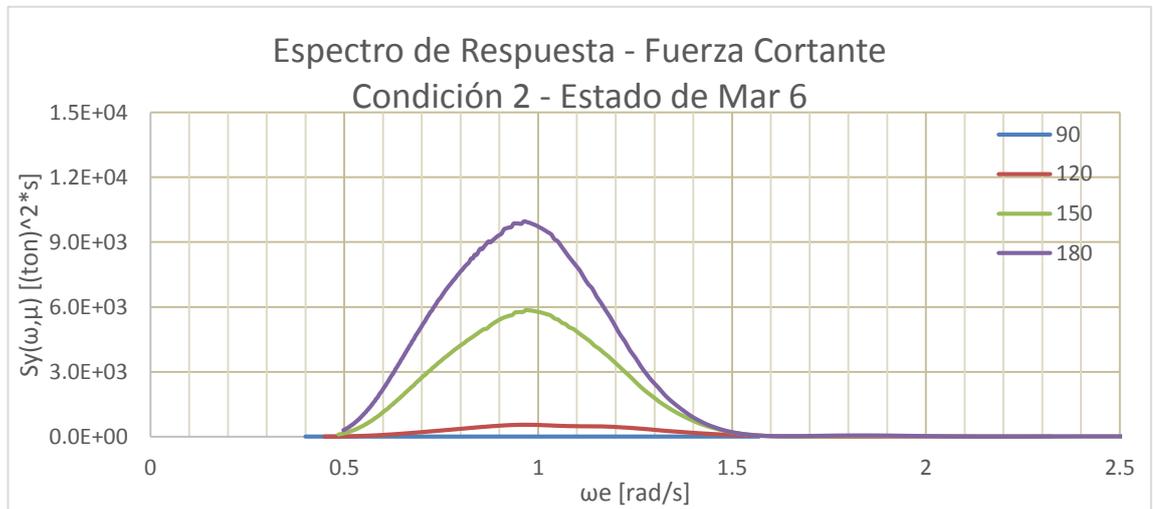
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura D 6:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 2 y Estado de Mar 5.

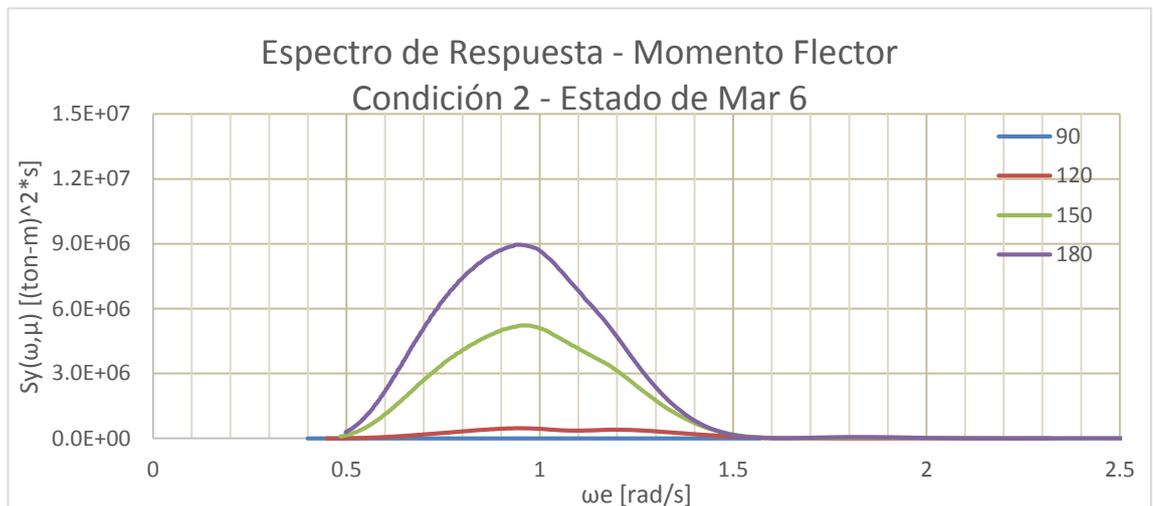
**Fuente:** Elaboración Propia.

## Estado de Mar 6



**Figura D 7:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 2 y Estado de Mar 6.

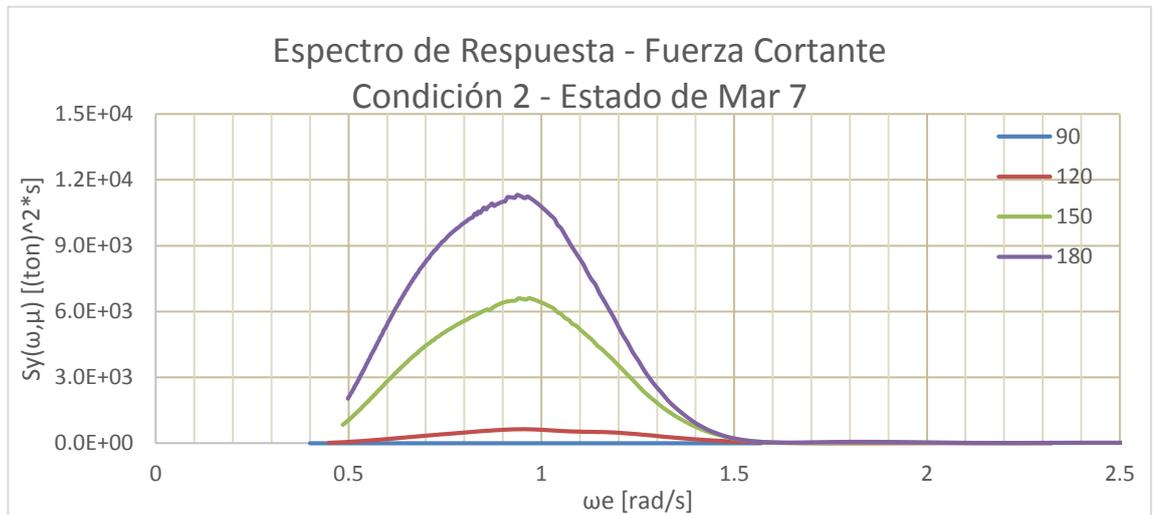
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura D 8:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 2 y Estado de Mar 6.

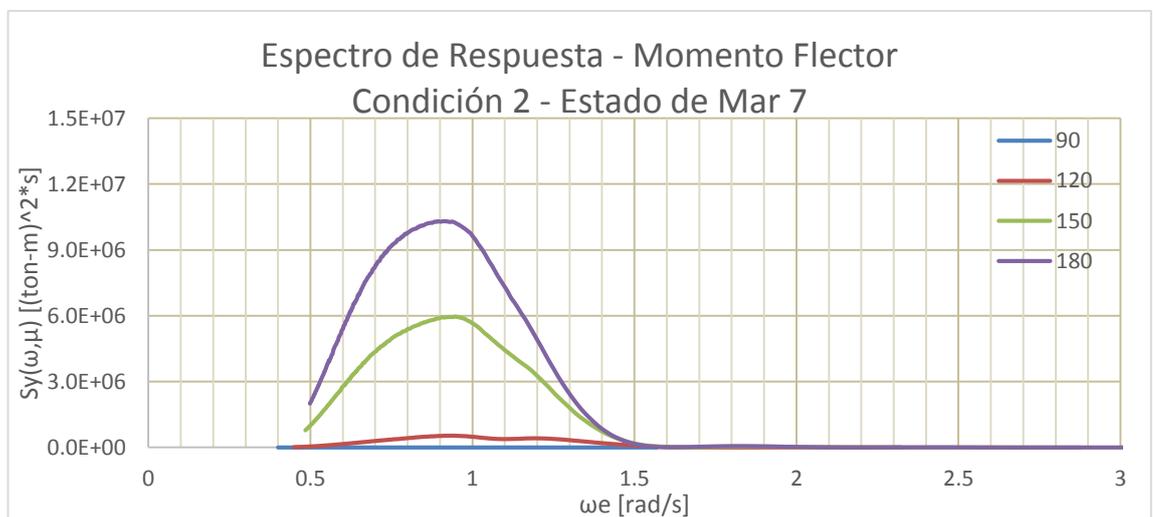
**Fuente:** Elaboración Propia.

## Estado de Mar 7



**Figura D 9:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 2 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.



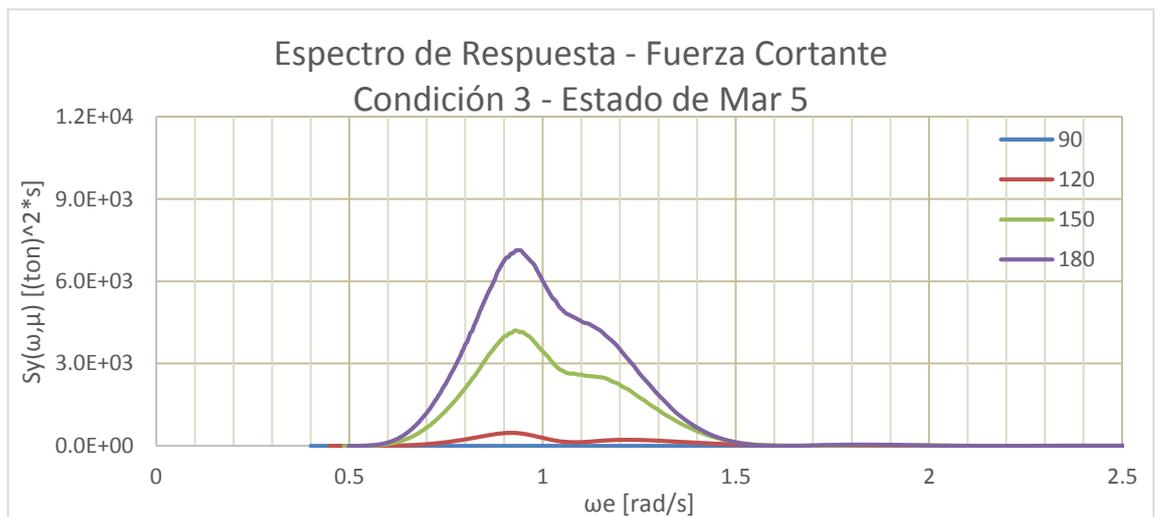
**Figura D 10:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 2 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

### Condición 3: Salida de Puerto (Carga completa).

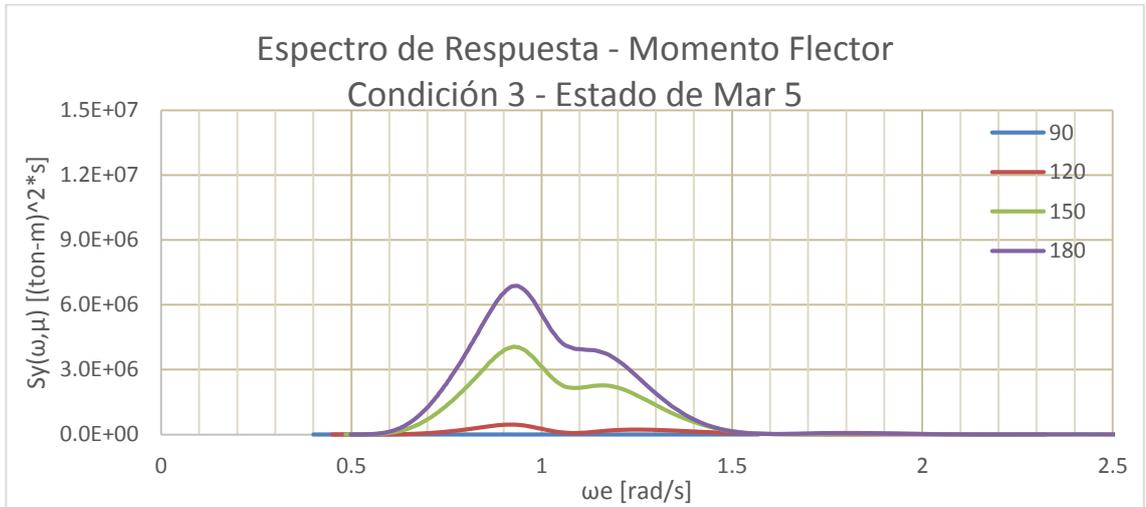
A continuación se muestran los Espectros de Respuesta de Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la combinación de la Respuesta en Olas Regulares y los Espectros de los Estados de Mar 5, 6, y 7 en la condición de carga 3.

#### Estado de Mar 5



**Figura D 11:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 3 y Estado de Mar 5.

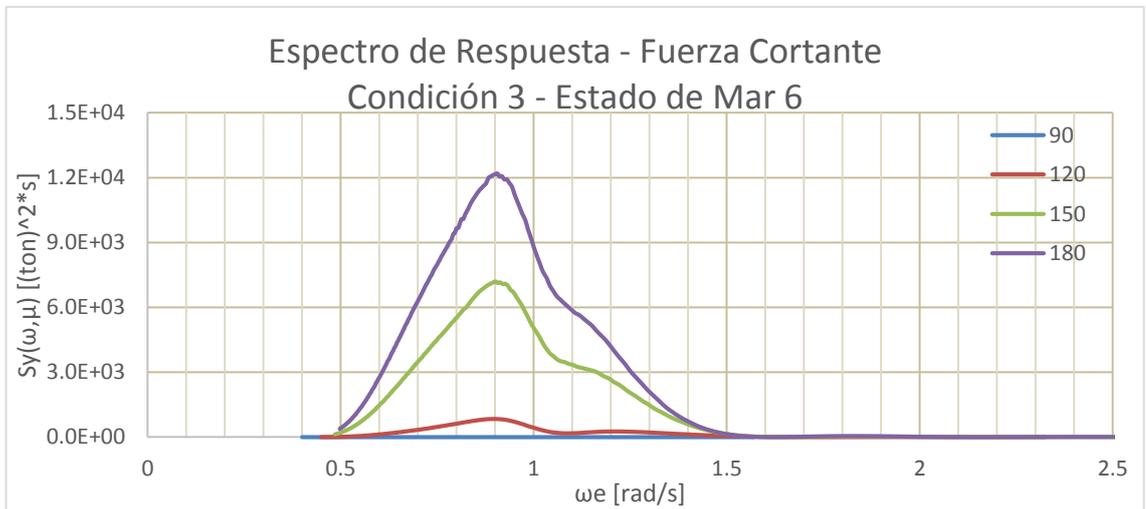
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura D 12:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 3 y Estado de Mar 5.

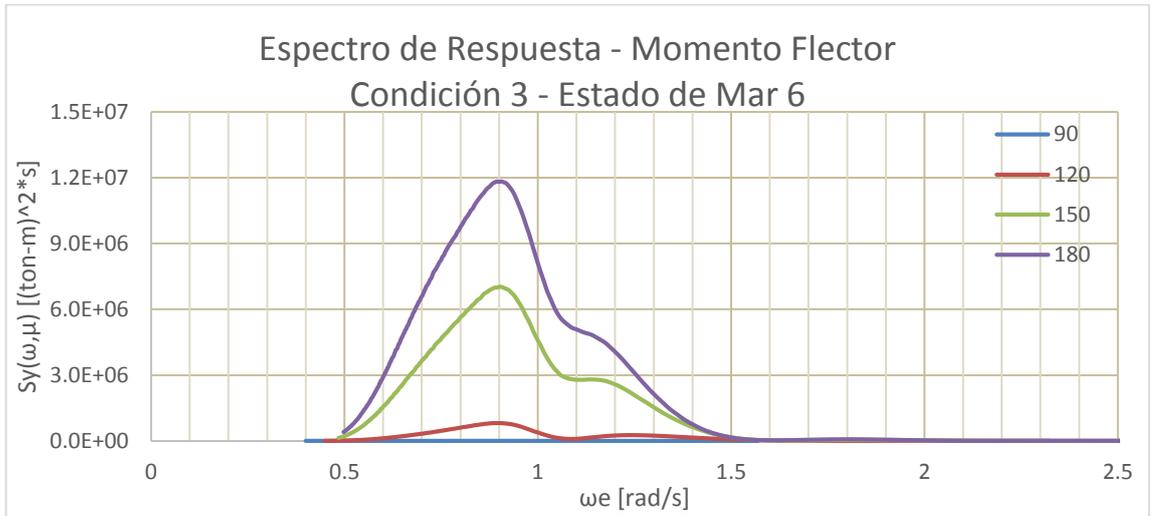
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Estado de Mar 6**



**Figura D 13:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 3 y Estado de Mar 6.

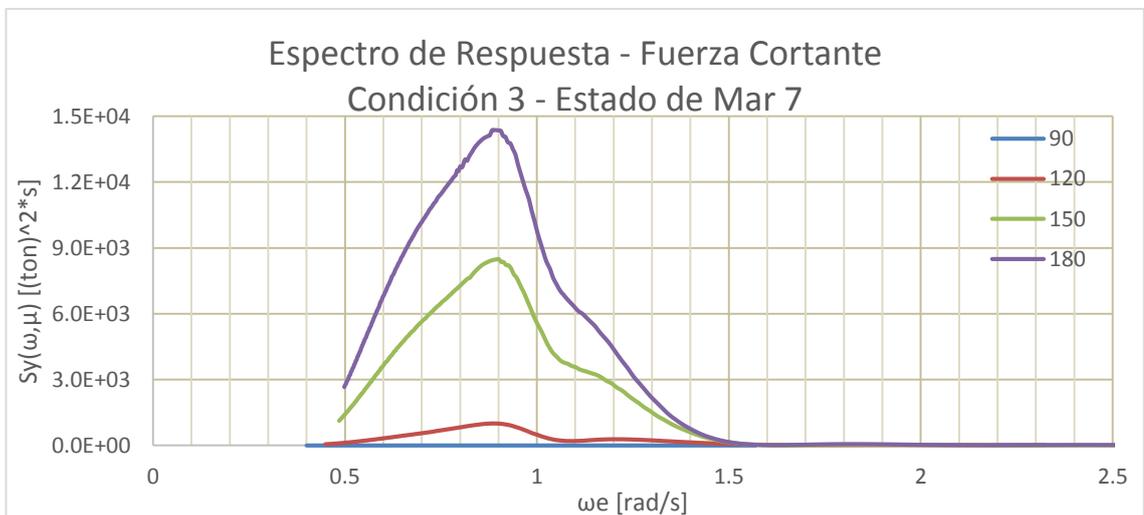
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura D 14:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 3 y Estado de Mar 6.

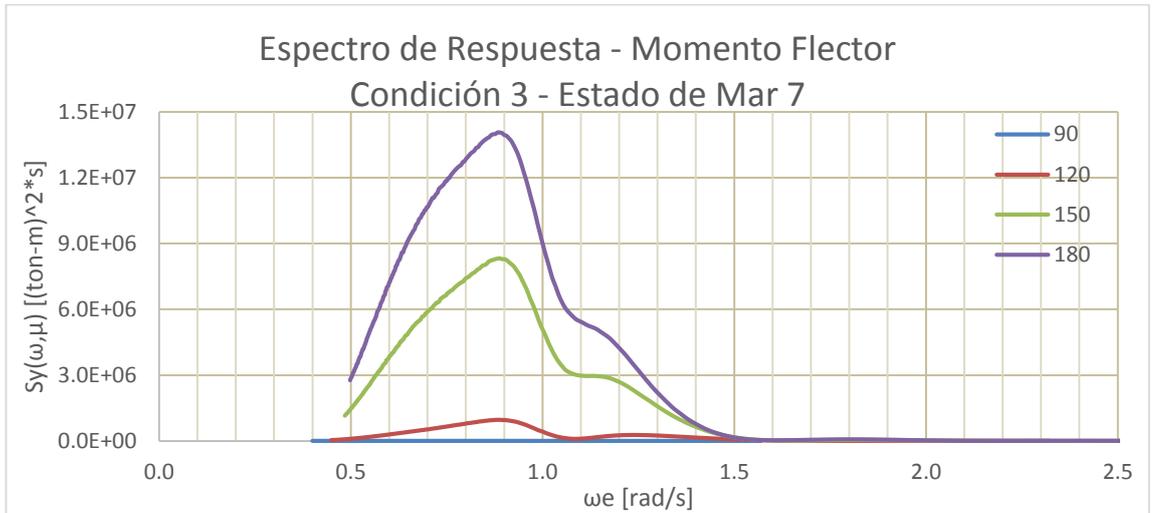
**Fuente:** Elaboración Propia.

### Estado de Mar 7



**Figura D 15:** Espectro de Respuesta 2D de Fuerza Cortante en Condición 3 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Figura D 16:** Espectro de Respuesta 2D de Momento Flector en Condición 3 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## ANEXO E

### MOMENTOS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA

A continuación se muestran los Momentos de Espectro de Respuesta de orden 0, 2 y 4 para Fuerza Cortante y Momento Flector al realizar la primera integración, respecto a la frecuencia de encuentro, en las tres condiciones de carga analizadas en este trabajo y Estados de Mar 5, 6 y 7.

<b>Condición 1</b>							
<b>Estado de Mar</b>	<b>Ángulo de Incidencia</b>	<b>Fuerza Cortante</b>			<b>Momento Flector</b>		
		<b>m<sub>0</sub></b>	<b>m<sub>2</sub></b>	<b>m<sub>4</sub></b>	<b>m<sub>0</sub></b>	<b>m<sub>2</sub></b>	<b>m<sub>4</sub></b>
5	90	0	0	0	0	0	0
	120	315	445	706	307823	436340	692707
	150	1975	2482	3588	1763874	2173546	2994199
	180	3053	3701	5185	2672789	3152840	4161843
6	90	0	0	0	0	0	0
	120	418	554	835	406116	541255	818374
	150	2951	3345	4467	2635394	2948802	3784159
	180	4750	5133	6580	4182974	4426628	5395948
7	90	0	0	0	0	0	0
	120	459	590	873	444316	576239	855371
	150	3446	3699	4772	3067393	3263709	4059005
	180	5665	5754	7087	4985224	4976632	5848316

**Tabla E I:** Momentos de Orden 0, 2 y 4 para Fuerza Cortante y Momento Flector a diferentes Ángulos de Incidencia. Condición 1 de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Condición 2							
Estado de Mar	Ángulo de Incidencia	Fuerza Cortante			Momento Flector		
		m0	m2	m4	m0	m2	m4
5	90	0	0	0	0	0	0
	120	215	282	434	190059	259681	418614
	150	1834	2135	2880	1676413	1954067	2623646
	180	2967	3341	4358	2715662	3041943	3911226
6	90	0	0	0	0	0	0
	120	326	377	530	283704	340067	501323
	150	3050	3087	3751	2816750	2835376	3424082
	180	5104	4967	5799	4744597	4561096	5242128
7	90	0	0	0	0	0	0
	120	388	418	563	335426	374475	529621
	150	3799	3707	4092	3530594	3265342	3740851
	180	6453	5907	6383	6052548	5329787	5789886

**Tabla E II:** Momentos de Orden 0, 2 y 4 para Fuerza Cortante y Momento Flector a diferentes Ángulos de Incidencia. Condición 2 de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Condición 3							
Estado de Mar	Ángulo de Incidencia	Fuerza Cortante			Momento Flector		
		m0	m2	m4	m0	m2	m4
5	90	0	0	0	0	0	0
	120	181	213	309	176018	213541	324282
	150	1717	1873	2404	1654076	1816484	2358969
	180	2867	3048	3778	2759874	2938210	3663214
6	90	0	0	0	0	0	0
	120	323	317	398	311465	312681	409732
	150	3116	2893	3265	3044126	2814311	3193320
	180	5310	4804	5237	5200770	4664244	5078912
7	90	0	0	0	0	0	0
	120	414	370	434	397769	363026	444642
	150	4034	3422	3631	3975068	3342494	3552238
	180	6929	5730	5869	6856622	5594695	5701805

**Tabla E III:** Momentos de Orden 0, 2 y 4 para Fuerza Cortante y Momento Flector a diferentes Ángulos de Incidencia. Condición 3 de carga.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## ANEXO F

### RESULTADOS DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR PARA PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA DE $10^{-7}$ , $10^{-8}$ Y $10^{-9}$ EN CONDICIONES 2 Y 3. MÉTODOS A, B, C, D Y E

<b>Condición 2 – Método A</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		95	5191
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	325	9818
	$10^{-8}$	325	9821
	$10^{-9}$	325	9823
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	420	12753
	$10^{-8}$	420	12754
	$10^{-9}$	420	12755
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	469	14291
	$10^{-8}$	469	14293
	$10^{-9}$	469	14295

**Tabla F I:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método A en la condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 3 – Método A</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		29	2707
<b>Estado de Mar 5</b>	10 <sup>-7</sup>	315	9978
	10 <sup>-8</sup>	315	9981
	10 <sup>-9</sup>	315	9983
<b>Estado de Mar 6</b>	10 <sup>-7</sup>	425	13293
	10 <sup>-8</sup>	425	13294
	10 <sup>-9</sup>	425	13295
<b>Estado de Mar 7</b>	10 <sup>-7</sup>	484	15198
	10 <sup>-8</sup>	484	15199
	10 <sup>-9</sup>	484	15200

**Tabla F II:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método A en la condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 2 – Método B</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		95	5191
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	700	21043
	$10^{-8}$	741	22284
	$10^{-9}$	782	23524
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	843	25468
	$10^{-8}$	897	27084
	$10^{-9}$	950	28699
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	918	27793
	$10^{-8}$	977	26607
	$10^{-9}$	1037	31421

**Tabla F III:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método B en la condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 3 – Método B</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		29	2707
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	794	20314
	$10^{-8}$	834	21552
	$10^{-9}$	874	22789
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	961	25614
	$10^{-8}$	1014	27300
	$10^{-9}$	1068	28986
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	1050	28494
	$10^{-8}$	1111	30425
	$10^{-9}$	1173	32356

**Tabla F IV:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método B en la condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 2 – Método C</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		95	5191
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	614	18432
	$10^{-8}$	634	19037
	$10^{-9}$	653	19614
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	731	22042
	$10^{-8}$	756	22829
	$10^{-9}$	781	23581
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	791	23931
	$10^{-8}$	820	24814
	$10^{-9}$	847	25656

**Tabla F V:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método C en la condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 3 – Método C</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		29	2707
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	710	17702
	$10^{-8}$	730	18305
	$10^{-9}$	748	18880
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	846	22023
	$10^{-8}$	872	22844
	$10^{-9}$	897	23628
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	918	24362
	$10^{-8}$	948	25302
	$10^{-9}$	977	26200

**Tabla F VI:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método C en la condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 2 – Método D</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		95	5191
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	613	18419
	$10^{-8}$	633	19026
	$10^{-9}$	653	19605
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	730	22033
	$10^{-8}$	756	22821
	$10^{-9}$	781	23574
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	790	23923
	$10^{-8}$	820	24808
	$10^{-9}$	847	25652

**Tabla F VII:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método D en la condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 3 – Método D</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		29	2707
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	710	17692
	$10^{-8}$	729	18296
	$10^{-9}$	748	18873
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	845	22014
	$10^{-8}$	872	22837
	$10^{-9}$	897	23622
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	918	24354
	$10^{-8}$	948	25296
	$10^{-9}$	976	26194

**Tabla F VIII:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método D en la condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 2 – Método E</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		95	5191
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	340	10260
	$10^{-8}$	363	10968
	$10^{-9}$	385	11620
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	439	13335
	$10^{-8}$	469	14257
	$10^{-9}$	498	15105
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	491	14949
	$10^{-8}$	525	15981
	$10^{-9}$	556	16933

**Tabla F IX:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método E en la condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 3 – Método E</b>			
	<b>Probabilidad de excedencia</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
<b>Aguas Tranquilas</b>		29	2707
<b>Estado de Mar 5</b>	$10^{-7}$	329	10220
	$10^{-8}$	352	10924
	$10^{-9}$	373	11576
<b>Estado de Mar 6</b>	$10^{-7}$	445	13905
	$10^{-8}$	476	14861
	$10^{-9}$	504	15745
<b>Estado de Mar 7</b>	$10^{-7}$	507	15905
	$10^{-8}$	542	17001
	$10^{-9}$	574	18014

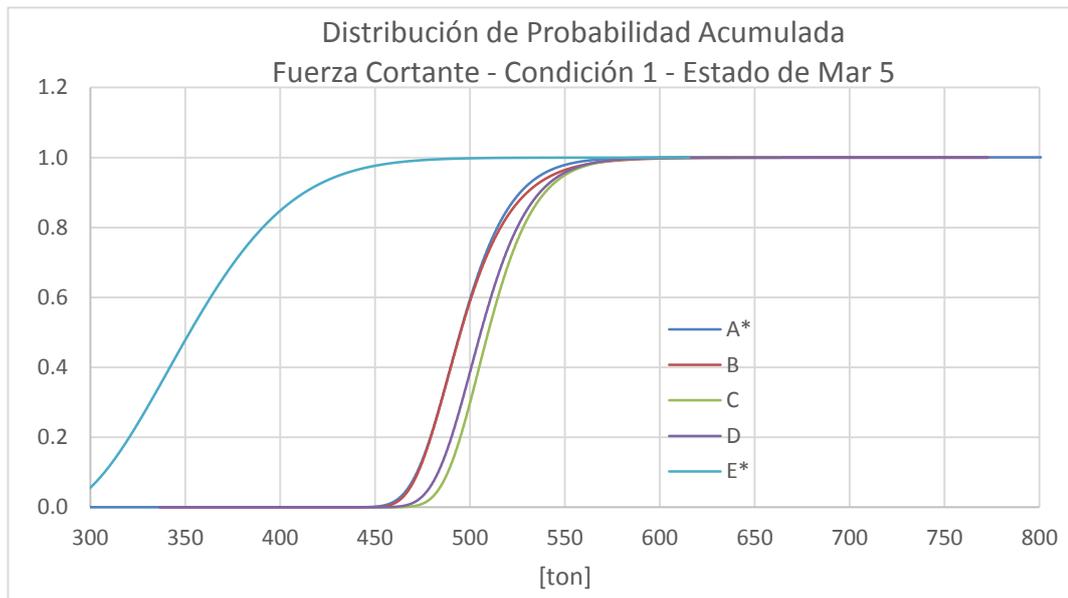
**Tabla F X:** Fuerza Cortante y Momento Flector resultantes de la aplicación del método E en la condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## ANEXO G

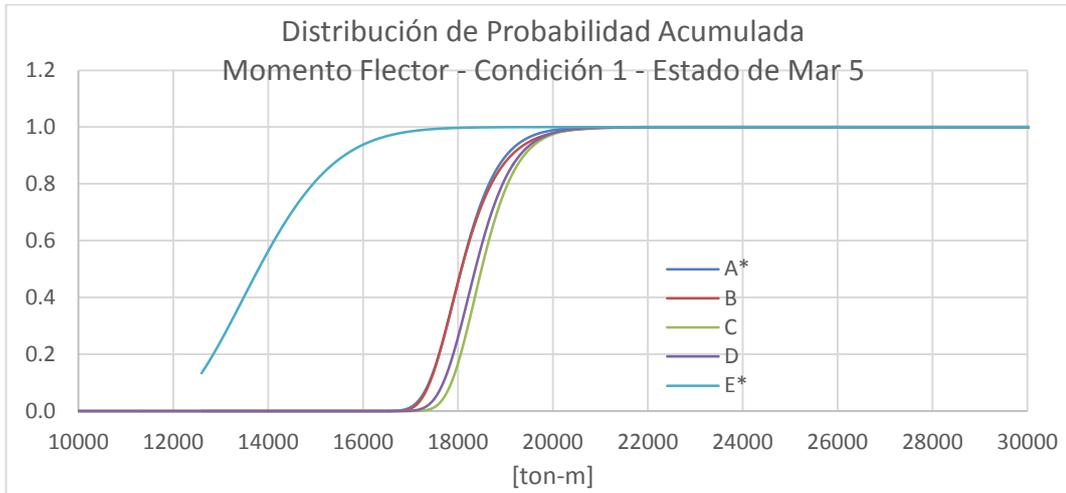
### DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD ACUMULADA PARA FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN CONDICIÓN 1 Y ESTADOS DE MAR 5, 6 Y 7.

#### Estado de Mar 5.



**Tabla G I:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 1 y Estado de Mar 5.

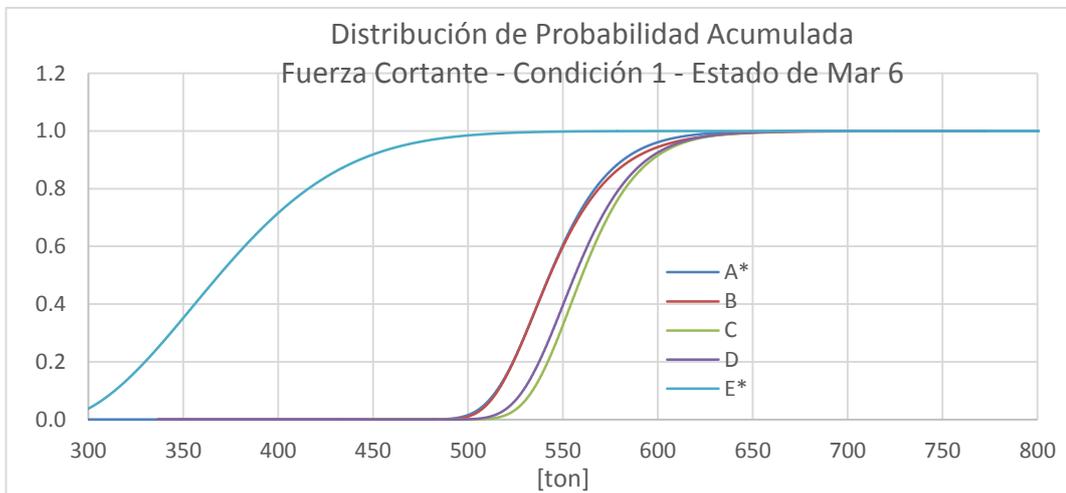
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Tabla G II:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 1 y Estado de Mar 5.

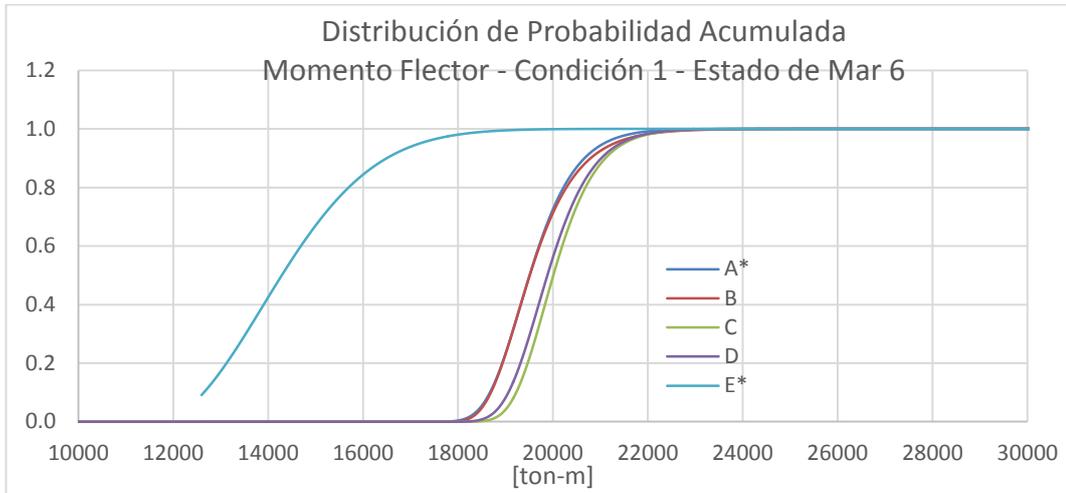
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Estado de Mar 6**



**Tabla G III:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 1 y Estado de Mar 6.

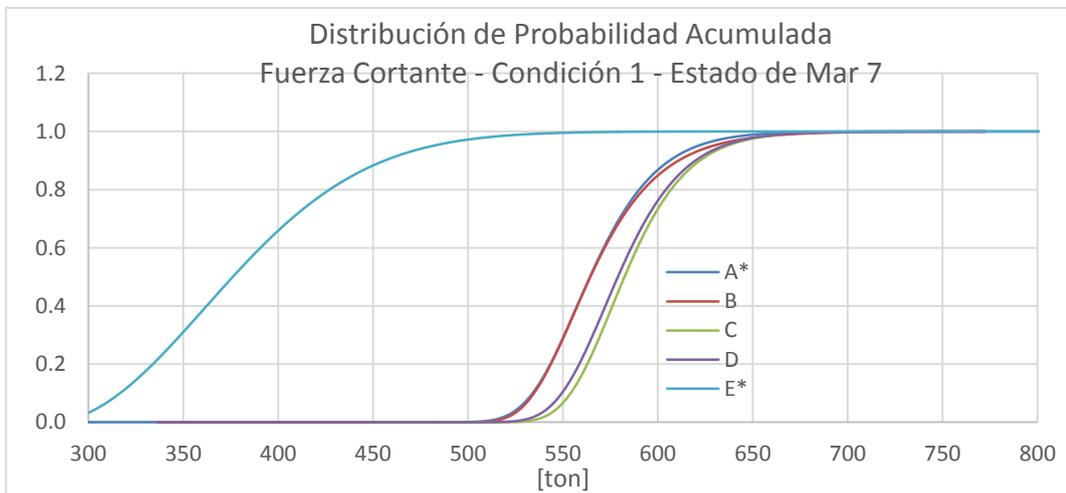
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Tabla G IV:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 1 y Estado de Mar 6.

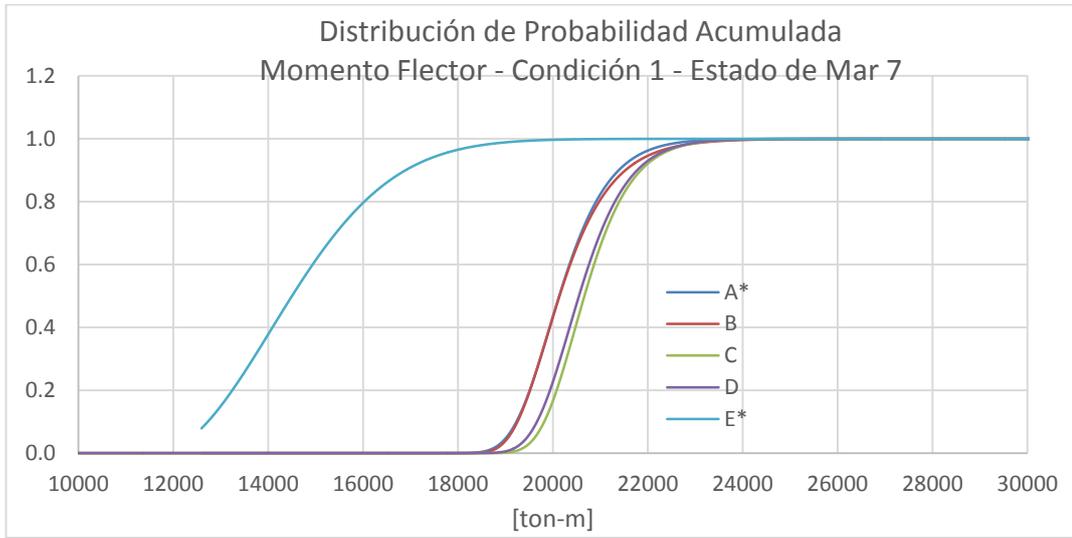
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Estado de Mar 7**



**Tabla G V:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 1 y Estado de Mar 6.

**Fuente:** Elaboración Propia.

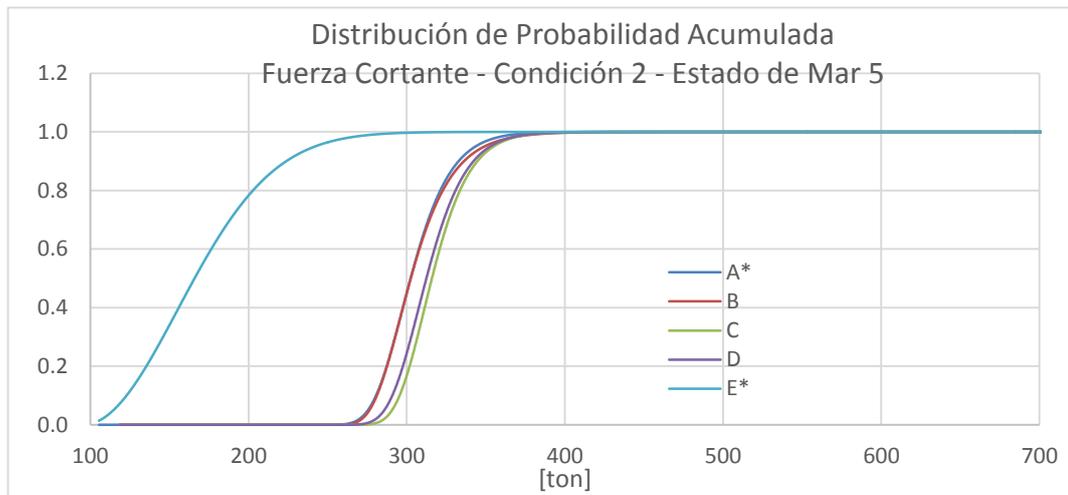


**Tabla G VI:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 1 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

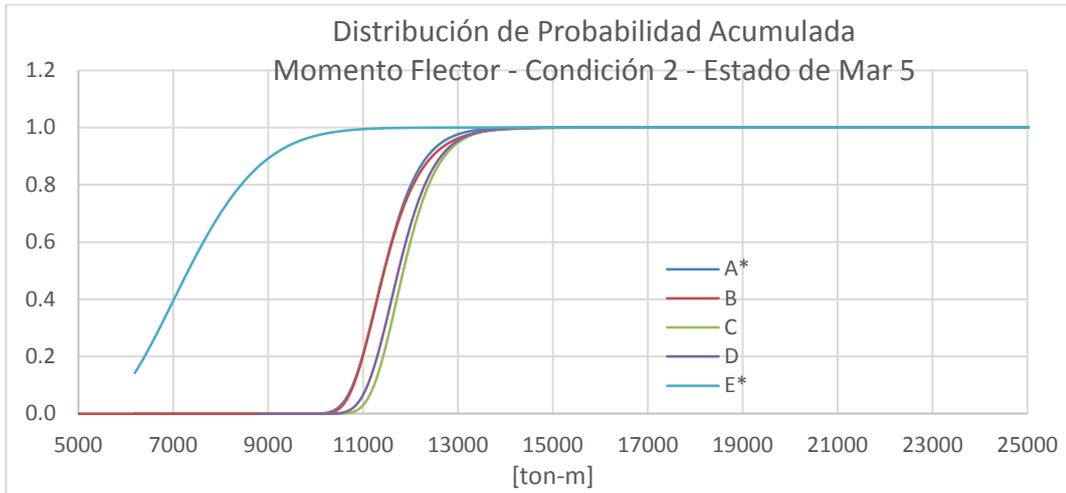
**DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD ACUMULADA PARA FUERZA  
CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN CONDICIÓN 2 Y ESTADOS DE  
MAR 5, 6 Y 7.**

**Estado de Mar 5**



**Tabla G VII:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 2 y Estado de Mar 5.

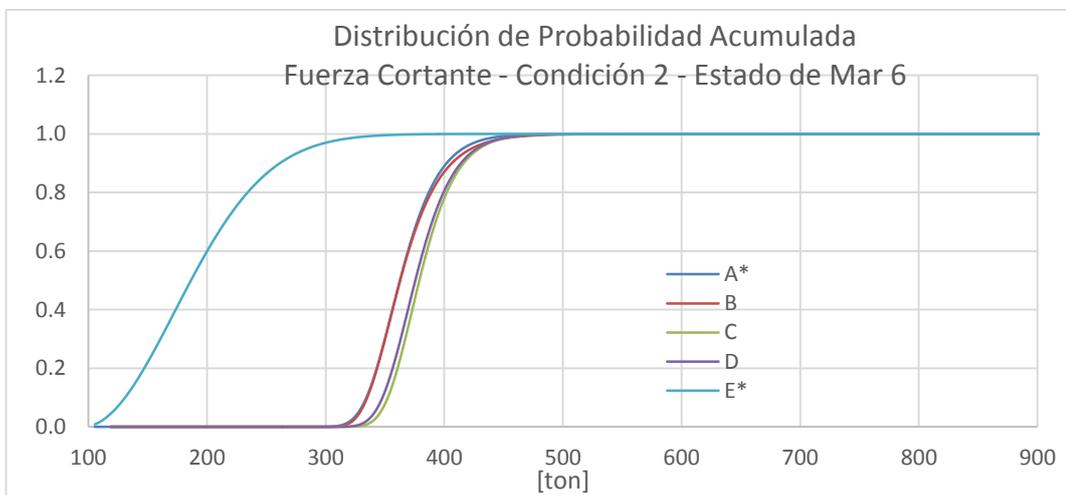
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Tabla G VIII:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 2 y Estado de Mar 5.

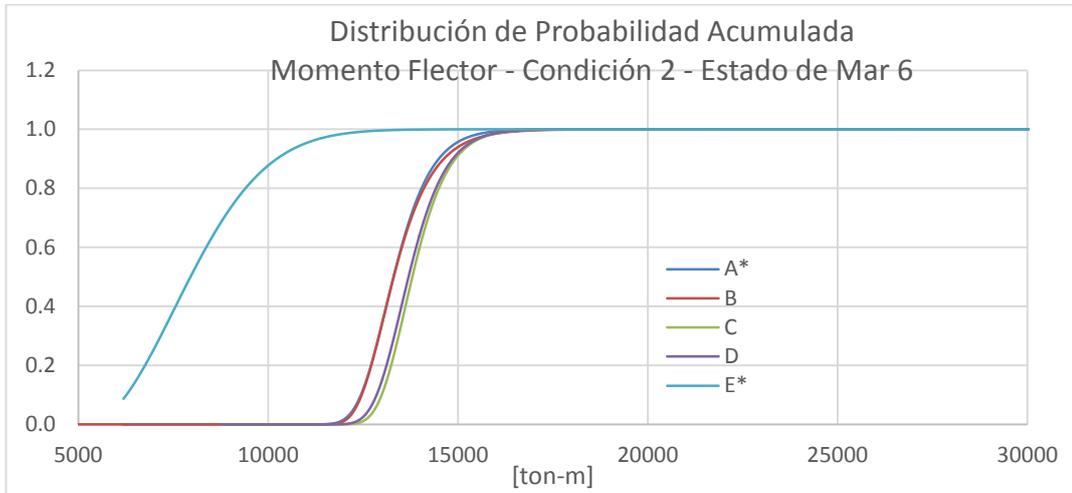
**Fuente:** Elaboración Propia.

### Estado de Mar 6



**Tabla G IX:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 2 y Estado de Mar 6.

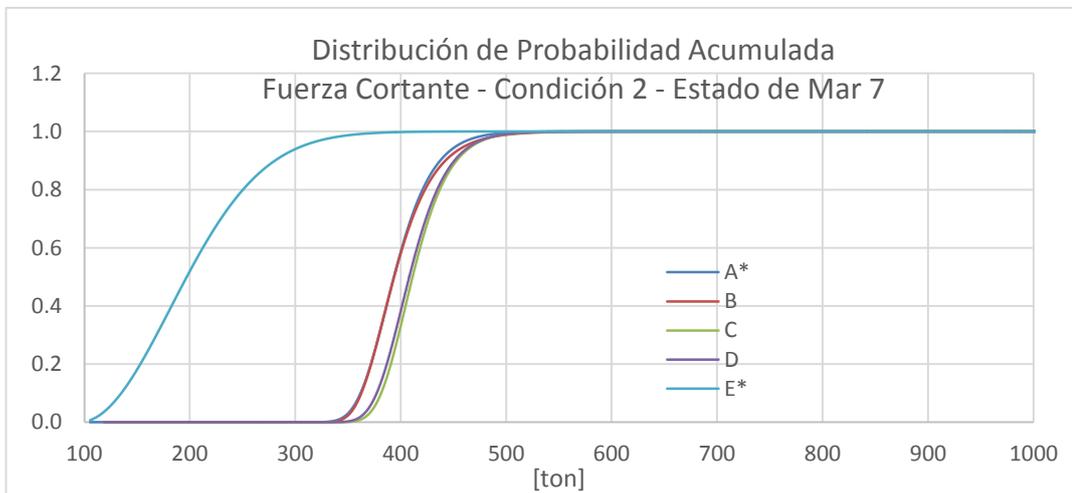
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Tabla G X:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 2 y Estado de Mar 6.

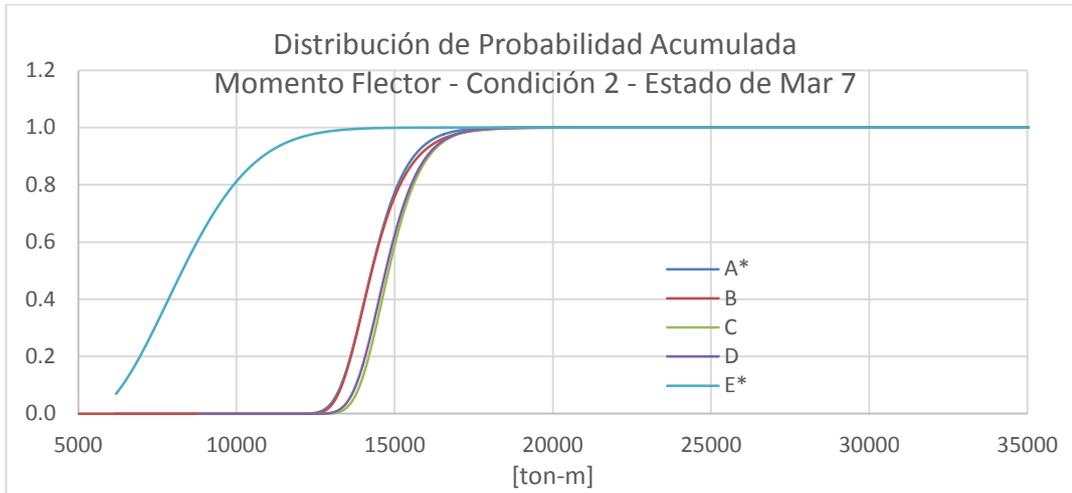
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Estado de Mar 7**



**Tabla G XI:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 2 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

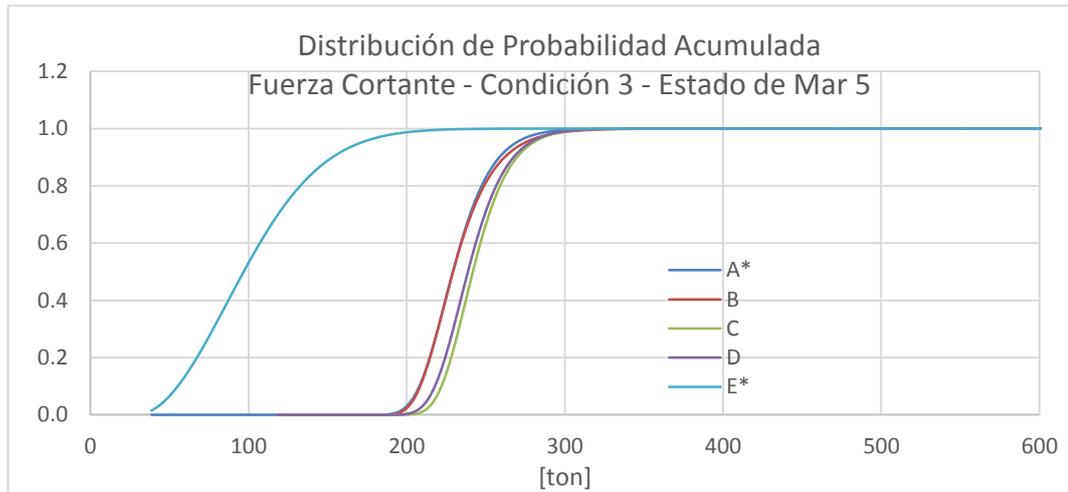


**Tabla G XII:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 2 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

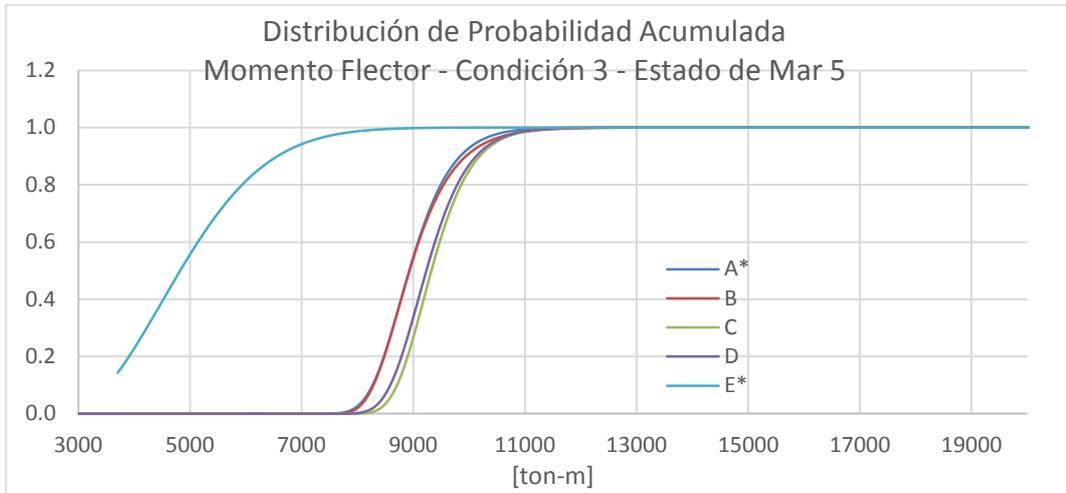
**DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD ACUMULDA PARA FUERZA  
CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN CONDICIÓN 3 Y ESTADOS DE  
MAR 5, 6 Y 7.**

**Estado de Mar 5**



**Tabla G XIII:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 3 y Estado de Mar 5.

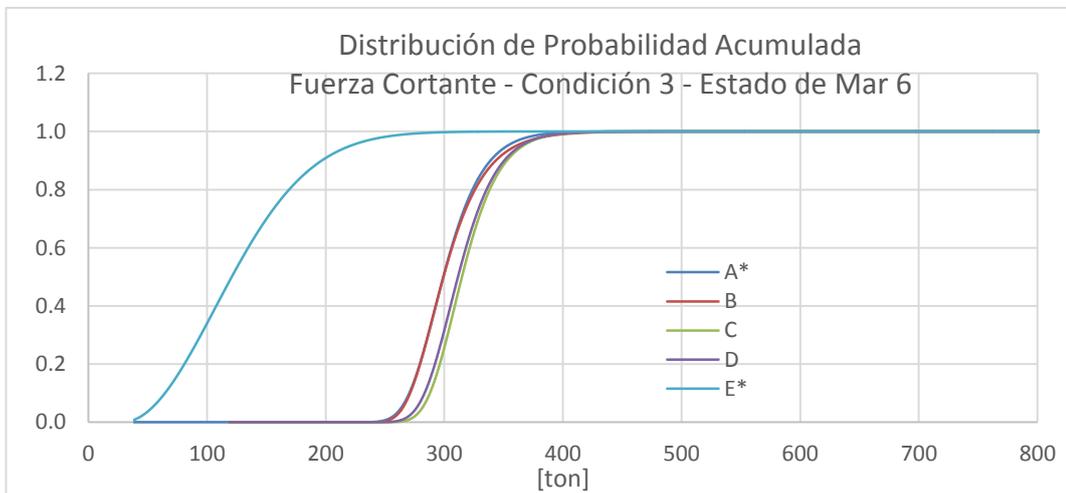
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Tabla G XIV:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 3 y Estado de Mar 5.

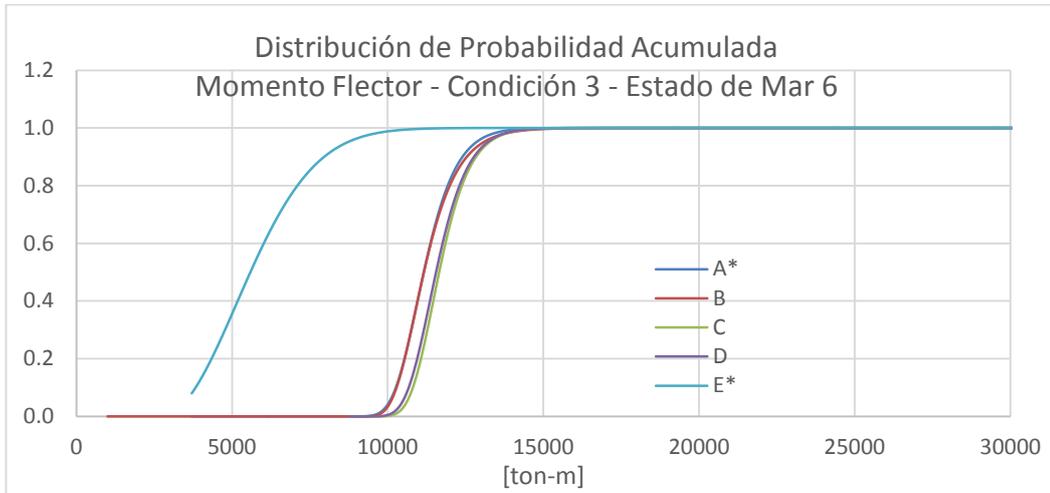
**Fuente:** Elaboración Propia.

### Estado de Mar 6



**Tabla G XV:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 3 y Estado de Mar 6.

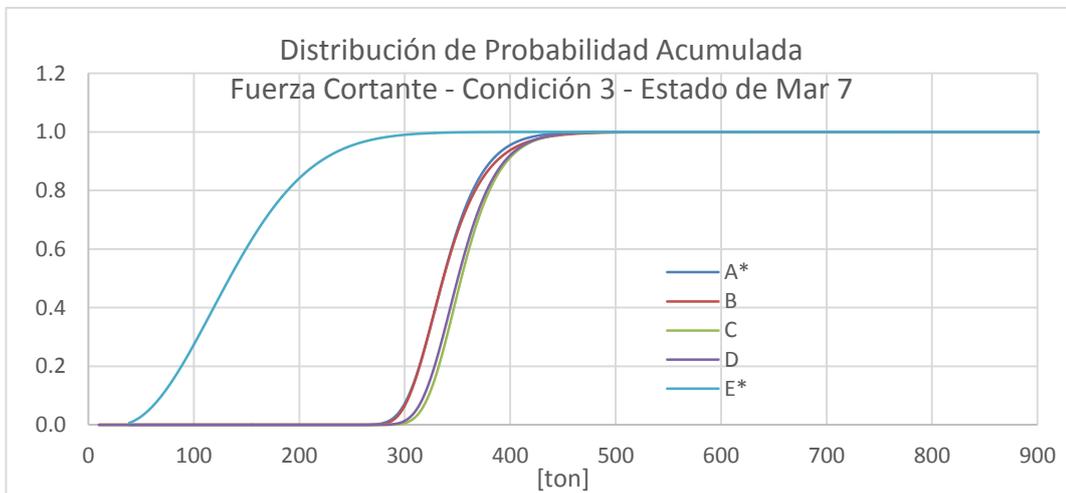
**Fuente:** Elaboración Propia.



**Tabla G XVI:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 3 y Estado de Mar 6.

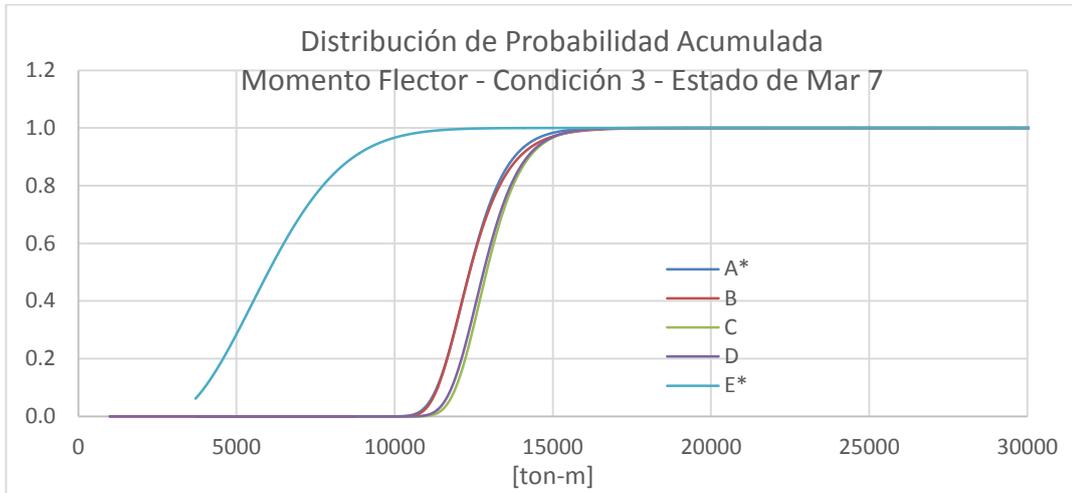
**Fuente:** Elaboración Propia.

**Estado de Mar 7**



**Tabla G XVII:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Fuerza Cortante en condición 3 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.



**Tabla G XVIII:** Distribución de Probabilidad Acumulada para Momento Flector en condición 3 y Estado de Mar 7.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## ANEXO H

### MOMENTOS DE LOS ESPECTROS DE RESPUESTA EN LA RUTA DE NAVEGACIÓN.

<b>Condición de Carga 2: Llegada a Puerto con Carga</b>						
<b>Estado de Mar</b>	<b>Fuerza Cortante</b>			<b>Momento Flector</b>		
	<b>m0</b>	<b>m2</b>	<b>m4</b>	<b>m0</b>	<b>m2</b>	<b>m4</b>
	<b>ton<sup>2</sup></b>			<b>(ton-m)<sup>2</sup></b>		
1	205.5	277.0	429.5	187299.0	254363.2	391834.5
2	1849.2	2493.3	3865.8	1685691.4	2289268	3526510.0
3	4435.8	5105.2	6836.2	4048990.5	4666860	6232609.0
4	6192.5	6461.7	8030.0	5693366.0	5919768	7327111.5
5	6493.5	6262.3	7385.4	6010035.0	5753849	6746875.0
6	7451.3	6962.5	8052.4	6914410.5	6405240	7360088.5
7	8289.1	7581.9	8657.0	7704699.5	6980983	7915535.5
8	8834.6	7947.6	8985.7	8222007.5	7322547	8218423.5
9	10335.0	9242.3	10413.1	9622560.0	8517412	9524910.0
10	8996.1	7899.1	8805.2	8387012.5	7284789	8056719.5
11	9789.3	8556.3	9512.6	9129410.0	7892324	8704649.0
12	11742.7	10263.7	11410.8	10951149.0	9467207	10441632.0
13	11087.9	9619.3	10648.4	10345885.0	8875437	9745207.0

**Tabla H I:** Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición de Carga 3: Salida de Puerto (Carga Completa)</b>						
<b>Estado de Mar</b>	<b>Fuerza Cortante</b>			<b>Momento Flector</b>		
	<b>m0</b>	<b>m2</b>	<b>m4</b>	<b>m0</b>	<b>m2</b>	<b>m4</b>
	ton <sup>2</sup>			(ton-m) <sup>2</sup>		
1	173.5	226.0	342.4	167092.1	221897.2	341746.0
2	1561.7	2034.2	3081.9	1503829.0	1997075	3075715.0
3	4196.2	4508.2	5714.5	4046104.8	4373008	5614288.0
4	6235.4	5984.5	6922.6	6069317.5	5815661	6780761.5
5	6809.2	5986.6	6500.2	6683570.0	5837855	6365208.0
6	7925.5	6730.7	7138.7	7803989.5	6573602	6991690.5
7	8896.5	7381.9	7710.0	8778157.0	7217172	7552499.5
8	9546.1	7779.4	8030.3	9433678.0	7612137	7867471.0
9	11193.7	9063.7	9317.0	11067776.0	8871373	9128739.0
10	9812.9	7790.3	7906.9	9718163.0	7631933	7748670.0
11	10696.6	8450.2	8549.7	10597501.0	8280272	8379008.5
12	12831.1	10136.4	10255.7	12712203.0	9932579	10051006.0
13	12149.6	9521.4	9584.1	12044631.0	9333324	9393664.0

**Tabla H II:** Momentos de orden 0, 2 y 4 en Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Estado de Mar	Fuerza Cortante		Momento Flector	
	RMS	$\epsilon$	RMS	$\epsilon$
	ton		ton-m	
1	14.3	0.361	432.8	0.344
2	43.0	0.361	1298.3	0.344
3	66.6	0.375	2012.2	0.370
4	78.7	0.400	2386.1	0.400
5	80.6	0.427	2451.5	0.428
6	86.3	0.438	2629.5	0.440
7	91.0	0.446	2775.7	0.448
8	94.0	0.452	2867.4	0.454
9	101.7	0.454	3102.0	0.457
10	94.9	0.461	2896.0	0.463
11	98.9	0.462	3021.5	0.465
12	108.4	0.462	3309.3	0.465
13	105.3	0.465	3216.5	0.468

**Tabla H III:** Valores de RMS y ancho de banda en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

Estado de Mar	Fuerza Cortante		Momento Flector	
	RMS	$\epsilon$	RMS	$\epsilon$
	ton		ton-m	
1	13.2	0.375	408.8	0.371
2	39.5	0.375	1226.3	0.371
3	64.8	0.390	2011.5	0.398
4	79.0	0.413	2463.6	0.422
5	82.5	0.436	2585.3	0.446
6	89.0	0.446	2793.6	0.456
7	94.3	0.453	2962.8	0.463
8	97.7	0.459	3071.4	0.468
9	105.8	0.461	3326.8	0.470
10	99.1	0.467	3117.4	0.476
11	103.4	0.468	3255.4	0.477
12	113.3	0.468	3565.4	0.477
13	110.2	0.471	3470.5	0.480

**Tabla H IV:** Valores de RMS y ancho de banda en los Estados de Mar que ocurren en la ruta de navegación. Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## ANEXO I

### PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN LA RUTA DE NAVEGACIÓN EN LAS CONDICIONES 2 Y 3 DE CARGA.

<b>Condición 2</b>				
<b>Estado de Mar</b>	<b>Fuerza Cortante [ton] <math>m_s = 95 \text{ ton}</math></b>			
	<b><math>l = 1.14</math></b>		<b><math>l = 1.16</math></b>	
	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>
1	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
2	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
3	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
4	1.66E-10	1.6E-11	0.00E+00	0.0E+00
5	1.35E-10	6.2E-12	0.00E+00	0.0E+00
6	6.68E-10	1.3E-11	1.34E-10	2.6E-12
7	2.23E-09	2.2E-11	5.01E-10	4.9E-12
8	2.92E-09	1.3E-11	7.08E-10	3.1E-12
9	1.59E-08	2.9E-11	4.54E-09	8.3E-12
10	8.78E-10	9.7E-13	2.16E-10	2.4E-13
11	1.83E-09	1.1E-12	4.94E-10	2.8E-13
12	1.48E-08	4.1E-12	4.76E-09	1.3E-12
13	1.07E-09	5.3E-14	3.26E-10	1.6E-14
<b>Probabilidad Total</b>		1.0E-10		2.1E-11

**Tabla I I:** Probabilidad de excedencia de Fuerza Cortante correspondiente al valor límite de 1573 ton para dos parámetros de Weibull. Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 2</b>				
<b>Estado de Mar</b>	<b>Momento Flector [ton-m] <math>m_s = 5191</math> ton-m</b>			
	<b>I = 1.25</b>		<b>I = 1.30</b>	
	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>
1	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
4	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
6	2.67E-11	3.2E-12	0.00E+00	0.00E+00
7	7.34E-11	9.4E-12	0.00E+00	0.00E+00
8	1.30E-10	1.8E-11	0.00E+00	0.00E+00
9	1.23E-09	1.7E-10	3.99E-11	5.59E-12
10	4.46E-11	6.9E-12	1.14E-12	1.77E-13
11	1.23E-10	2.0E-11	3.47E-12	5.56E-13
12	1.72E-09	2.7E-10	7.97E-11	1.28E-11
13	1.07E-10	1.8E-11	4.26E-12	7.24E-13
<b>Probabilidad Total</b>		4.6E-12		9.8E-14

**Tabla I II:** Probabilidad de excedencia de Momento Flector correspondiente al valor límite de 44944 ton-m para dos parámetros de Weibull. Condición 2.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 3</b>				
<b>Estado de Mar</b>	<b>Fuerza Cortante [ton] <math>m_s = 29</math> ton</b>			
	<b>I = 1.14</b>		<b>I = 1.16</b>	
	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>
1	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
2	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
3	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
4	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.0E+00
5	6.76E-11	3.1E-12	0.00E+00	0.0E+00
6	4.01E-10	7.9E-12	8.02E-11	1.6E-12
7	1.61E-09	1.6E-11	3.55E-10	3.4E-12
8	2.41E-09	1.1E-11	5.78E-10	2.5E-12
9	1.39E-08	2.5E-11	3.92E-09	7.2E-12
10	8.55E-10	9.4E-13	2.10E-10	2.3E-13
11	1.84E-09	1.1E-12	4.96E-10	2.9E-13
12	1.48E-08	4.1E-12	4.77E-09	1.3E-12
13	1.12E-09	5.6E-14	3.42E-10	1.7E-14
<b>Probabilidad Total</b>		6.9E-11		1.7E-11

**Tabla I III:** Probabilidad de excedencia de Fuerza Cortante correspondiente al valor límite de 1573 ton para dos parámetros de Weibull. Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

<b>Condición 3</b>				
<b>Estado de Mar</b>	<b>Momento Flector [ton-m] <math>m_s = 2707</math> ton-m</b>			
	<b>I = 1.25</b>		<b>I = 1.30</b>	
	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>	<b><math>p_{e(i)}</math></b>	<b><math>p_{e(i)} * f(i)</math></b>
1	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
4	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	0.00E+00	0.0E+00	0.00E+00	0.00E+00
6	2.67E-11	3.2E-12	0.00E+00	0.00E+00
7	9.78E-11	1.2E-11	0.00E+00	0.00E+00
8	1.87E-10	2.6E-11	5.20E-12	7.09E-13
9	1.75E-09	2.5E-10	5.88E-11	8.23E-12
10	7.55E-11	1.2E-11	1.14E-12	1.77E-13
11	2.12E-10	3.4E-11	6.37E-12	1.02E-12
12	2.79E-09	4.5E-10	1.40E-10	2.23E-11
13	1.85E-10	3.1E-11	8.04E-12	1.37E-12
<b>Probabilidad Total</b>		8.1E-10		3.4E-11

**Tabla I IV:** Probabilidad de excedencia de Momento Flector correspondiente al valor límite de 44944 ton-m para dos parámetros de Weibull. Condición 3.

**Fuente:** Elaboración Propia.

## ANEXO J

### FUERZA CORTANTE Y MOMENTO FLECTOR EN AGUAS TRANQUILAS A LO LARGO DE LA ESLORA DE LA EMBARCACIÓN

Condición 2: Llegada a puerto con carga en Aguas Tranquilas			
Estación	Posición [m]	Fuerza Cortante [ton]	Momento Flector [ton-m]
PROA-0	-1.1	0.0	0.0
0-1	5.6	43.4	160.2
1-2	11.2	63.0	516.3
2-3	16.8	-15.5	710.8
3-4	22.4	65.1	889.7
4-5	28.0	87.1	1329.8
5-6	33.6	105.3	1875.5
6-7	39.2	110.2	2485.1
7-8	44.8	112.1	3113.1
8-9	50.4	160.2	3881.8
9-10	56.0	193.9	4879.4
10-11	61.6	154.7	5860.0
11-12	67.2	0.5	6297.7
12-13	72.8	-159.2	5855.1
13-14	78.4	-184.8	4892.2
14-15	84.0	-102.3	4078.0
15-16	89.6	21.4	3826.4
16-17	95.2	-125.7	3496.3
17-18	100.8	-206.7	2518.7
18-19	106.4	-211.8	1290.3
19-20	112.0	-111.3	321.2
20-POPA	118.6	0.0	0.0

**Tabla J I:** Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas, condición de carga 2.

**Fuente:** Elaboración Propia

<b>Condición 3: Salida de puerto en Aguas Tranquilas</b>			
<b>Estación</b>	<b>Posición [m]</b>	<b>Fuerza Cortante [ton]</b>	<b>Momento Flector [ton-m]</b>
PROA-0	-1.1	0.0	0
0-1	5.6	21.9	118.9
1-2	11.2	46.8	396
2-3	16.8	-103.8	316
3-4	22.4	-10.7	41.8
4-5	28.0	21.8	83.8
5-6	33.6	52.7	296.3
6-7	39.2	87.8	692.7
7-8	44.8	116.0	1265.5
8-9	50.4	133.8	1967.9
9-10	56.0	143.9	2748.7
10-11	61.6	135.7	3533.4
11-12	67.2	102.6	4201.0
12-13	72.8	70.8	4685.2
13-14	78.4	70.2	5077.2
14-15	84.0	40.2	5372.6
15-16	89.6	60.2	5623.7
16-17	95.2	-146.3	5338.7
17-18	100.8	-279.1	4094.5
18-19	106.4	-321.3	2349.8
19-20	112.0	-243.5	697.3
20-POPA	118.6	0.0	0

**Tabla J II:** Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas, condición de carga 3.

**Fuente:** Elaboración Propia

## **BIBLIOGRAFÍA**

[1] Marín, José R. “Estimación del Momento Flector Dinámico para un Tanquero de 3800 DWT”. CINAVE, 2007.

[2] Marín, José R. Notas de clase de “Dinámica del Buque”. FIMCBOR-ESPOL, 2011.

[3] Mansour, Alaa & Liu, Donald “Strength of Ships and Ocean Structures”, SNAME, 2008.

[4] Mansour, Alaa E. “An Introduction to Structural Reliability Theory”. SSC “Ship Structure Committee” #351, 1990.

[5] Egas, César. Comunicación personal. Guayaquil, 2013.

[6] Raff, Alfred I, Program SCORES. Ship structural response in waves. SSC "Ship Structure Committee" #230, 1972.

[7] Programa ChidrBuq. "Cálculos Hidrostáticos de Buques". Guayaquil, 2010.

[8] Bhattacharyya, R. "Dynamics of Marine Vehicles". John Wiley & Sons, Inc. New York, 1978.

[9] Rules for Classification, "Hull Structural Design Ships with Length 100 Metres and Above", DNV "Det Norske Veritas". 2008.

[10] Lee, Wah T, "Global Wave Statistics for Structural Design Assessments". Naval Surface Warfare Center. NSWCCD-HD-1048-01, 1995.

[11] Bissell, Chris C. & Chapman, David A., "Digital signal transmission". Cambridge University Press. p. 64. Second Edition, 1992.

[12] Munse, W, University of Illinois, "Fatigue Criteria for Ship Structure Details". SNAME, 1981.

