ESTIMACION DEL MOMENTO FLECTOR DINAMICO PARA UN TANQUERO DE 3800 DWT

Por: José R. Marín L.[1],
[1]Ph.D. Ing. Naval, Profesor, Facultad de Ingeniería Marítima y CC. del Mar, ESPOL,
Campus Prosperina: Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, jrmarin@espol.edu.ec

Resumen

A partir de las distribuciones de Peso y de las formas de un tanquero de 96.00 m de L_{OA} y 3800 DWT se calculó el Momento Flector Dinámico, es decir, debido a la acción de las olas. Se consideraron tres condiciones de carga, Lastre con Consumibles completos, y, Cargado con consumibles completos y parciales. Se calcularon las distribuciones de Fuerza Cortante y Momento Flector empleando SHCP, se compararon con las provistas por el astillero constructor y coinciden muy cercanamente, de manera que se puede confiar en las distribuciones de Peso estimadas. Se aplicó luego el programa SCORES, [8], para calcular el Momento Flector Dinámico, MFD, debido a la acción de las olas, considerando que la embarcación avanzaba a su máxima velocidad, 12 nudos. Se tomó luego dos Espectros de Mar 5 y 6, aplicando la formulación de ITTC y se determinaron los espectros del MFD, cuyas áreas bajo las curvas, m_0, sirven para definir las funciones de Rayleigh de densidad probabilística. Se tomó un valor conservativo (DNV, [2]) de 10^{-8} para la Probabilidad de que un Momento Flector considerado de diseño sea excedido, se obtuvieron siguiendo un enfoque de corto plazo ("short term approach"), [7], los valores de Momento Flector Dinámico, para las tres condiciones de carga analizadas. Finalmente se compararon estos valores con las formulaciones de DNV y Lloyd's y resultaron menores, en porcentajes entre 74 y 89%, respecto de los recomendados por las sociedades de clasificación, considerando los resultados de la respuesta al estado de Mar 6.

Palabras claves: Respuesta en olas, Diseño Estructural

1.- Introducción

Conforme crece la eslora de una embarcación, los esfuerzos primarios, esto es, considerando al casco como una viga de sección variable, se hacen más importantes. Para su estimación se requiere calcular la distribución de Momento Flector tanto en Aguas Tranquilas como en Olas. El primero se calcula al integrar dos veces la diferencia entre la distribución de Fuerza de Boyantez por unidad de longitud (Area Seccional*Peso específico) y el Peso por unidad de longitud.

La forma más sencilla para estimar el Momento Flector en Olas que actúa sobre el casco, es emplear formulaciones estándares dadas por las Sociedades de Clasificación, véase [2], [4], ú, otras similares. También se puede utilizar un razonamiento cuasiestático según el cual tomando una ola de amplitud dada y equilibrando estáticamente la distribución de pesos del buque se desarrollan Momentos Flectores “similares” a los que se producirían si este navegara en olas. La tercera forma implica resolver el problema de respuesta dinámica del buque en olas, y luego ir estimando a lo largo de la eslora, las fuerzas internas dinámicas, Fuerza Cortante y Momento Flector, para equilibrar dinámicamente cada segmento analizado.

Obviamente la tercera forma de las descritas para estimar el Momento Flector del casco en olas, es la más complicada, pero permite observar de mejor forma la naturaleza dinámica del fenómeno. En este trabajo se va a desarrollar el cálculo del Momento Flector Dinámico, y luego se lo comparará con los resultados de aplicar las formulaciones de una de las sociedades de clasificación. Se pretende ayudar a que el medio ecuatoriano gane confianza en la aplicación de las formulaciones estándares, porque de otra forma se tiene la idea de aplicar simples “cajas negras”.

2.- Condiciones de Carga y Momento Flector en Aguas Tranquilas

La distribución general y el cuadro de estaciones de la embarcación analizada se presenta en la siguiente figura, y tiene las siguientes características principales:

Eslora Total	96.00	m
Eslora entre Perpendic.	89.60	m
Manga	13.40	m
Puntal	6.90	m
Calado diseño	5.60	m
C_B (Calado Diseño)	0.8027	
DWT	3800	ton
Velocidad	12	nudos

Tabla 1.- Características Principales del tanquero de 3800 DWT

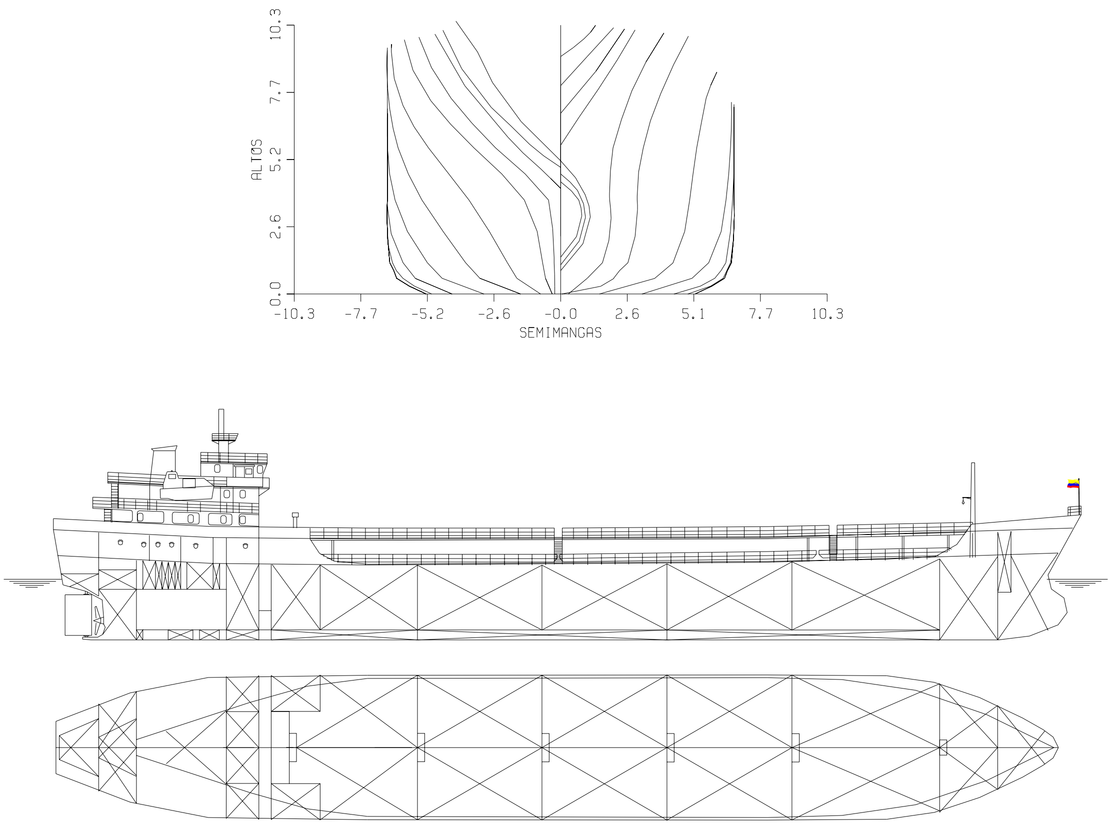


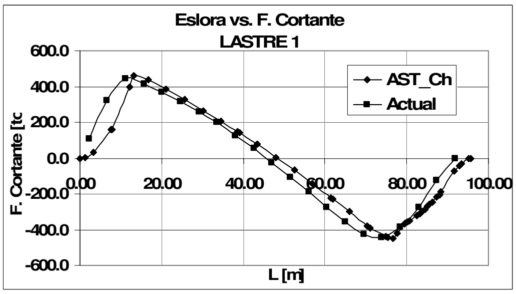
Figura 1.- Distribución General y Formas de la embarcación analizada

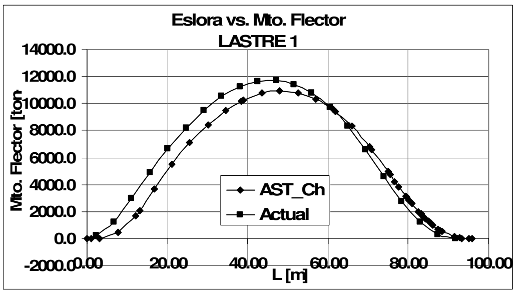
De la información provista por el armador, se tomaron 3 condiciones de carga: Lastre a la salida de puerto, y dos condiciones de carga, con consumibles parciales y con consumibles completos, que serán denominadas condición Lastre 1, Cargada 4, y, Cargada 11, respectivamente. A continuación se presentan las cantidades de los principales componentes de la distribución de pesos de las tres condiciones de carga. Los detalles de las distribuciones de se presentan en el apéndice de este trabajo, junto con la convención de signos para las fuerzas internas.

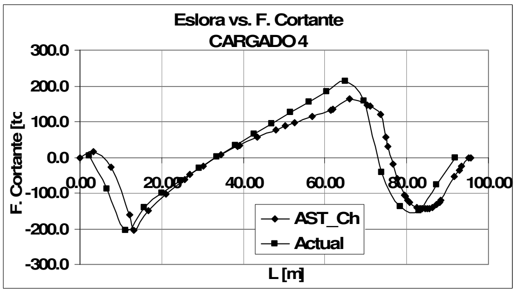
	Ligero	Consum.	Lastre	Carga	Total	LCG
	ton	ton	ton	ton	ton	m, S.Med.
Lastre 1	1400	213.1	1139	0	2752.1	0.643
Cargada 4	1400	67.4	0	3917.77	5385.17	1.566
Cargada 11	1400	233.3	0	3917.77	5551.07	0.666

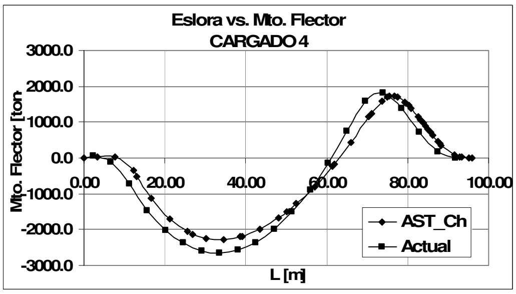
Tabla 2.- Características de las condiciones de carga analizadas

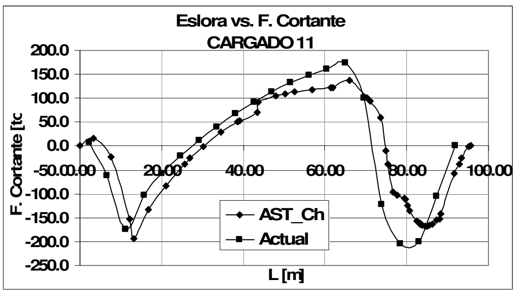
Se preparó luego un archivo de datos para calcular las distribuciones de Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas, para las tres condiciones de carga analizadas, véase el apéndice de este reporte. A continuación se presentan los resultados del cálculo de las fuerzas internas empleando el programa SHCP, [6], y se las comparó con las obtenidas por el astillero constructor (AST_Ch). En el presente caso se emplearon únicamente 21 segmentos de igual longitud para discretizar las distribuciones de peso, para emplear la misma información en el análisis dinámico posterior. En el apéndice se presentan las distribuciones de Boyantez resultantes para equilibrar las distribuciones de pesos respectivas. En general, observando las figuras, parece que los resultados coinciden muy cercanamente con los provistos por el constructor, de manera que las distribuciones de peso estimadas son consideradas como aceptables.











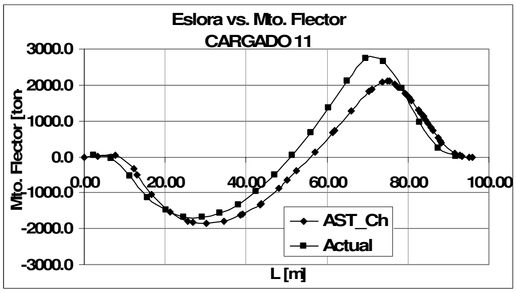


Figura 2.- Fuerza Cortante y Momento Flector en Aguas Tranquilas

Claramente se nota que en la condición 1, en Lastre, el Momento Flector es el más alto, y se presenta alrededor de Sección Media. Además, en esta condición, el MF tiene un solo signo, a diferencia de las otras dos, con carga, en las que dicho parámetro cambia de signo a lo largo de la eslora.

3.- Momento Flector en Olas Regulares

A continuación se empleó el programa SCORES, [8], que calcula la respuesta lineal de una embarcación en olas, para estimar el momento flector dinámico en olas regulares. El sistema de referencia móvil se ubica en Sección Media, a la altura del calado, con el eje x positivo hacia Proa, el y positivo hacia Estribor, y, el z positivo hacia abajo. Además, se define un sistema de referencia fijo, según el cual las olas se desplazan en dirección x negativa. Esto permite definir el ángulo entre la dirección de los movimientos del buque y las olas:

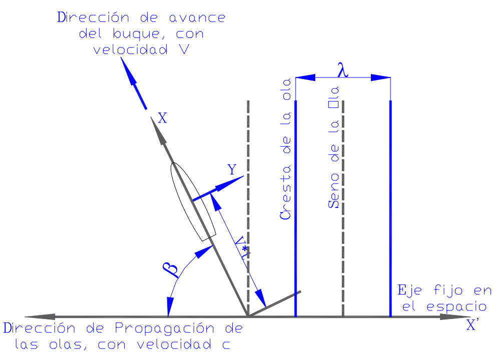


Figura 3.- Movimiento de las Olas respecto del movimiento del buque

Las distribuciones de peso empleadas en el punto anterior, fueron ingresadas para este cálculo, junto con la gravedad. Además, se debió ingresar también las distribuciones de Areas Seccionales, Mangas y Calados, a lo largo de la embarcación. Las propiedades de Proa que incluyen el Bulbo fueron manejadas en forma simplificada como las restantes.

La velocidad de la embarcación se tomó 12 nudos, la máxima según los planos del buque. Las olas que se acercaban desde Proa, tenían un metro de amplitud, mientras que su longitud variaba entre 30 y 520 metros, con incrementos de 10 metros.

A continuación se presenta la distribución de la amplitud del Momento Flector a lo largo del buque para las tres condiciones analizadas, para una longitud de ola, que produce el máximo valor en Sección Media. Debe notarse que los valores graficados no se presentan simultáneamente a lo largo del buque, sino que se presentan con un desfase entre ellos. Además, nótese que la longitud de ola a la cual se producen estos valores máximos, depende de la condición de carga, sin embargo, estos valores oscilan alrededor de la eslora del buque. Se nota la forma de la distribución de MF asumida como típica para este parámetro, esto es, una forma cercana a la trapezoidal.

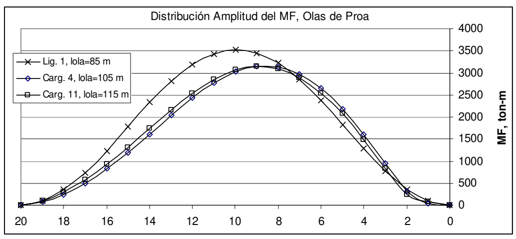


Figura 4.- Distribución a lo largo de la eslora de la Amplitud del Momento Flector

Luego, para las tres condiciones de carga analizadas, se grafican las amplitudes del momento flector dinámico en Sección Media, en función de la longitud de ola incidente. Para longitudes de ola alrededor de la eslora, se producen los valores más altos de exigencia flexural. Es interesante notar que en el caso de las condiciones cargadas, se presentan dos máximos, posiblemente por resonancias en Levantamiento y Cabeceo.

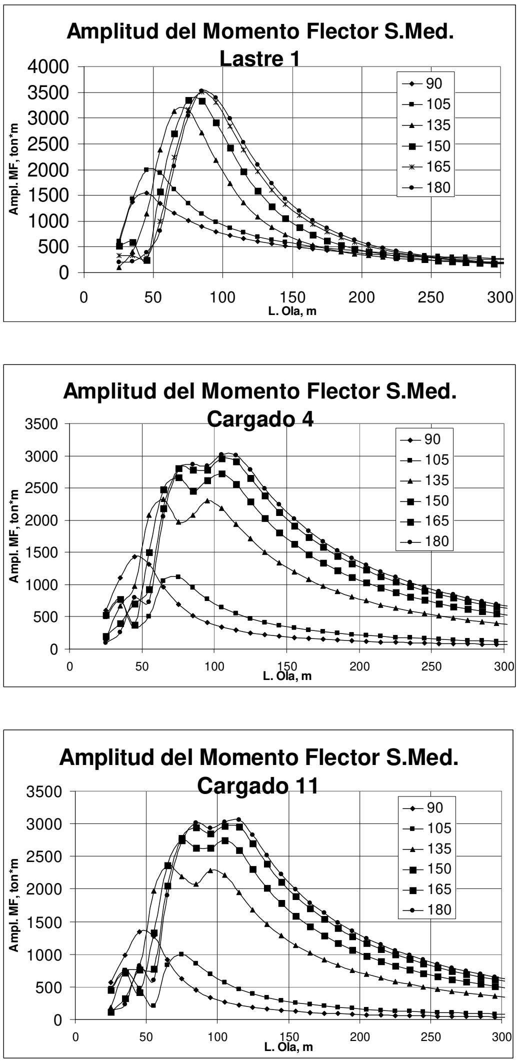


Figura 5.- Amplitud del Momento Flector en Sección Media en función de la longitud de ola

Dado que las figuras anteriores fueron obtenidas tomando una amplitud de ola unitaria, sus valores corresponden a lo que se denomina Operador de la Amplitud de Respuesta, OAR (conocido como RAO, por sus siglas en Inglés, "Response Amplitud Operator").

4.- Espectro del Momento Flector en Mares Irregulares

Dado que una embarcación navega en Mares Irregulares, a continuación se estimará el Espectro (Función Densidad Espectral) del Momento Flector en Mares de Estado 5 y 6. El estado de Mar 4 es considerado como de diseño para nuestro medio.

El espectro del estado de Mar se obtendrá aplicando la formulación de la ITTC, [1]:

$$S_\eta(\omega) = \frac{A}{\omega^5}\exp(-B/\omega^4), \qquad (1)$$

donde:

$$A = 173(H_{1/3})^2 / T_1^4, \qquad (2)$$

$$B = 691 / T_1^4, \qquad (3)$$

$H_{1/3}$: Altura significativa de las olas (Promedio del 1/3 de las olas más grandes),
$T_1 = 0.773\tau_m$, donde τ_m es el Período Modal (corresponde a la frecuencia de máximo valor del Espectro).

Tomando de Bhattacharyya, [1], para estados de Mar 5 y 6, valores para $H_{1/3}$ y τ_m de 2.68/3.32 m, y, 8.3/9.2 segundos, respectivamente, a continuación se presentan los espectros para dichos estados de mar. También se presentan fotografías de cómo luciría la superficie del mar en dichos estados, [3].

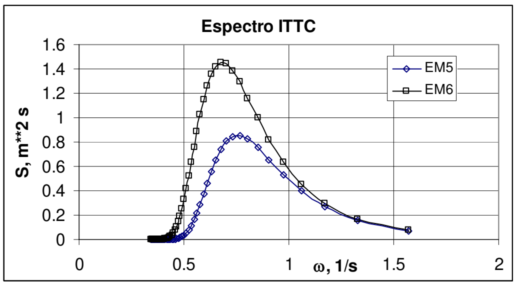
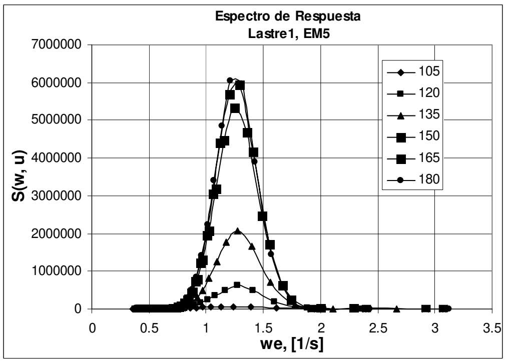
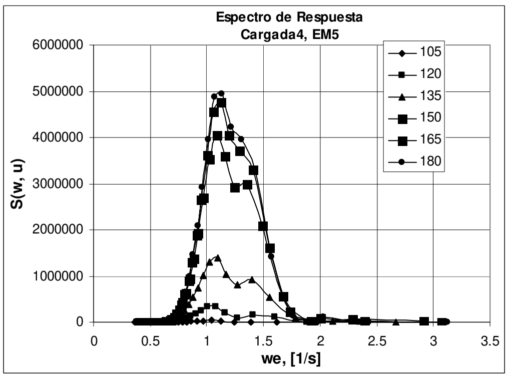


Figura 6.- Espectros de los Estado de Mar 5 y 6, según formulación de ITTC

El espectro de la respuesta se obtendrá multiplicando el cuadrado de la OAR por el espectro de las olas incidentes, $S_\eta(\omega_e)$. El resultado se muestra a continuación:





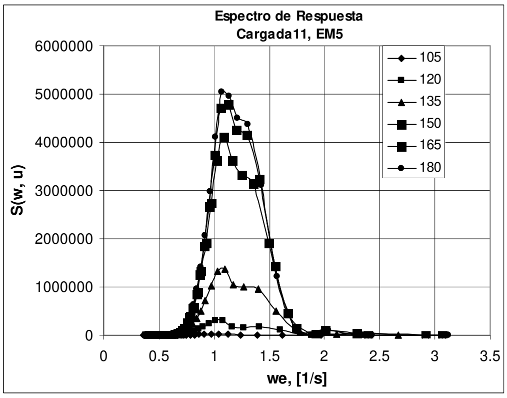
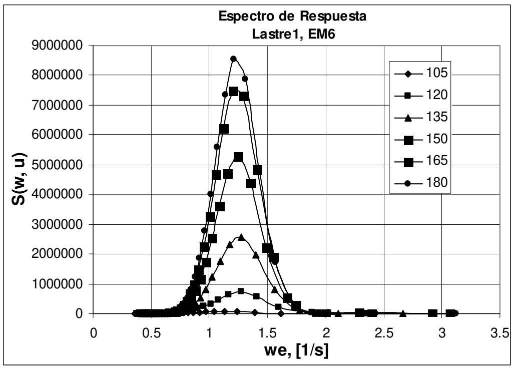
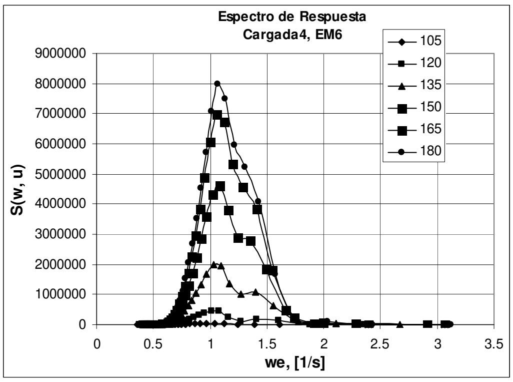


Figura 7.- Espectros del Momento Flector en Sección Media para estado de Mar 5, ton²m²s





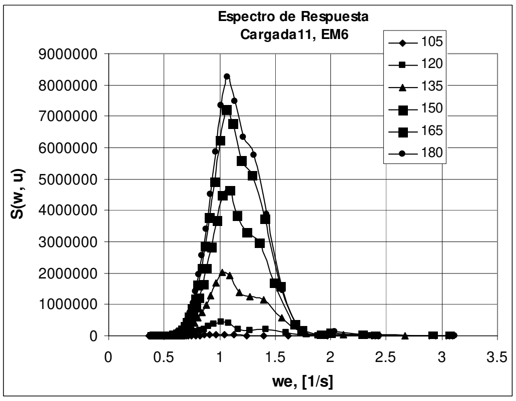


Figura 8.- Espectros del Momento Flector en Sección Media para estado de Mar 6, ton²m²s

A partir del Espectro se calcula el área bajo la curvas, que corresponde al momento de orden cero, m_0. Luego se los integra, considerando la dirección del movimiento respecto del buque:

$$S_{MF}(\omega_e, \beta) = S_{MF}(\omega_e)\left[\frac{2}{\pi}\cos^2\beta\right] \quad (4)$$

Donde β es el ángulo entre la dirección de movimiento de las olas y del buque, véase la figura 3.

	mo(μ)	FS	Prod1
90	0	1	0
105	36842.69	4	147370.775
120	244048	2	488096.084
135	709248.6	4	2836994.47
150	1947641	2	3895282.36
165	1770778	4	7083111.1
180	1947641	1	1947641.18
		mo=	2862077.47

Tabla 3.- Integración de los espectros según la dispersión, Lastre 1, Estado de Mar 6

	mo(μ)	FS	Prod1
90	0	1	0
105	12450.86	4	49803.4493
120	150424.9	2	300849.879
135	622635.2	4	2490540.75
150	2134231	2	4268462.57
165	1908429	4	7633717.02
180	2134231	1	2134231.29
		mo=	2945697.76

Tabla 4.- .- Integración de los espectros según la dispersión, Cargada 4, Estado de Mar 6

	mo(μ)	FS	Prod1
90	0	1	0
105	9396.569	4	37586.28
120	145170.8	2	290341.5
135	623035.7	4	2492143
150	2149647	2	4299294
165	1923330	4	7693318
180	2149647	1	2149647
		mo=	2960485

Tabla 5.- Integración de los espectros según la dispersión, Cargada 11, Estado de Mar 6

Estos parámetros nos permiten establecer la función densidad probabilística del Momento Flector, siguiendo la formulación de Rayleigh, [1]:

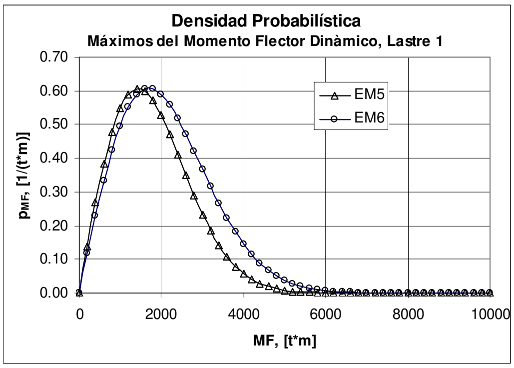
$$p_{MF}(mf) = (mf / m_o)\exp(-x^2 / 2m_o) \quad (5)$$

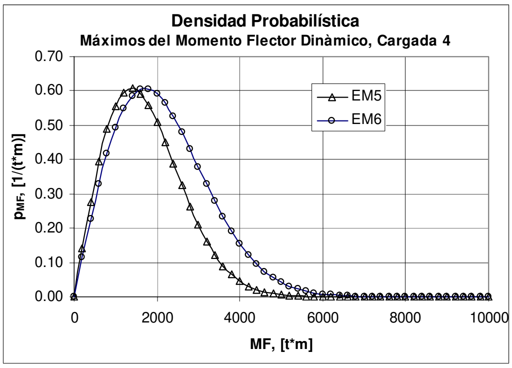
Este resultado es justificable cuando se trata de procesos de banda angosta (“narrow-band processes”), y de acuerdo con [7], esa es una asunción común en estos cálculos. Si integramos esta distribución desde un valor dado hasta el infinito, se obtendría la probabilidad de que dicho valor sea excedido:

$$P[mf > mf] = \int_{mf}^{\infty} p_{MF}(mf)dmf = \\ = \exp\left[-mf^2 / 2m_0\right] \quad (6)$$

5.- Estimación del Momento Flector Dinámico

Aplicando los valores de los parámetros que definen la formulación de Rayleigh, se grafica a continuación dicha distribución, para ambos estados de mar, y para las tres condiciones de carga analizadas:





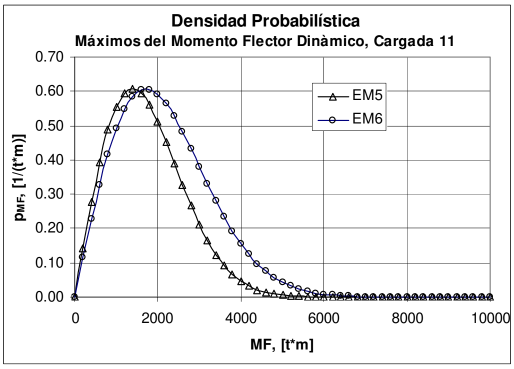


Figura 9.- Funciones de densidad probabilística para el Momento Flector en Sección Media

Finalmente, para establecer el Momento Flector Dinámico de diseño en la Sección Media, se debe seleccionar un número pequeño que refleje la probabilidad de que el momento seleccionado sea sobrepasado. Este valor corresponde a la integral de la función de densidad probabilística, (6), y, despejando el valor del momento flector de diseño se obtiene:

$$mf_{diseño} = \sqrt{-2m_0 \ln P_{MF}} \qquad (7)$$

En la introducción de las reglas de la Det Norske Veritas, [2], se establece que sus formulaciones son útiles con un nivel de confianza de 10^{-8}. Entonces tomando este valor para la probabilidad de que nuestro valor de Momento Flector de diseño lo exceda, se obtiene que:

Estado de Mar 5		
	m_o, (ton m)^2	$MF_{diseño}$, ton-m
Lastre 1	2052598	8696
Cargada 4	1924929	8421
Cargada 11	1937552	8449

Estado de Mar 6		
	m_o, (ton m)^2	$MF_{diseño}$, ton-m
Lastre 1	2862077	10269
Cargada 4	2945698	10417
Cargada 11	2960485	10444

Tabla 6.- Momentos Flectores Dinámicos de Diseño para Estados de Mar 5 y 6

Finalmente para efectos de comparación, se va a calcular el Momento Flector en Olas, aplicando alguna de las formulaciones disponibles. Se van a usar las reglas de DNV y Lloyd's, [2] y [4], respectivamente, para Sección Media:

DNV Part 3, Ch. 2, Sec. 4, B200:

$$M_{W0} = 0.11C_W L^2 B(C_B + 0.7), kNm\,(Arr)$$
$$M_{W0} = 0.19C_W L^2 BC_B, kNm\,(Que), \qquad (8)$$

donde, C_W=0.0792L.

Lloyd's Part 3, Ch. 4, Sec. 5.2:

$$M_{W0} = -1.1 * 0.1(0.0412L + 4.0) * L^2 B(C_B + 0.7), \qquad kNm\,(Arr)$$

$$M_{W0} = \frac{1.9C_B}{(C_B + 0.7)} * 0.1(0.0412L + 4.0) * L^2 B(C_B + 0.7), \qquad kNm\,(Que) \qquad (9)$$

Y luego de las evaluaciones respectivas se obtienen los siguientes resultados:

DNV	M_{WO}, Arrufo	124297.429	kN*m
	M_{WO}, Quebr.	114617.72	kN*m
Lloyd's	M_{WO}, Arrufo	-135060.67	kN*m
	M_{WO}, Quebr.	124542.769	kN*m

Tabla 7.- Momentos Flectores en Olas

Comparando los resultados tenemos que los Momentos Flectores calculados como respuesta dinámica en un Estado de Mar 6 representan entre el 75 y 89% de las estimaciones respectivas aplicando las reglas de Sociedades de Clasificación.

6.- Conclusiones y Recomendaciones

La estimación del Momento Flector que actúa sobre la estructura de un buque considerándolo como una viga de sección variable es un proceso complejo que involucra diferentes áreas de la Ingeniería Naval. Además, el proceso de cálculo incluye la simplificación resultante de asumir que el proceso es Lineal y que la representación de la superficie del mar es una combinación de olas senoidales. Así también debemos recordar que en el cálculo dada la limitación del paquete empleado, no se pudo representar adecuadamente la influencia hidrodinámica del bulbo de proa.

Respecto de los valores obtenidos, considerando un Estado de Mar 6, y aplicando un esquema a corto plazo, los valores de Momento Flector Dinámicos oscilan alrededor del 80% de los estimados aplicando las ecuaciones de dos sociedades de clasificación. Esto es razonable, dado que dichas relaciones fueron generadas para cubrir "todas" las situaciones posibles. También se debe mencionar que algunos autores, [7], consideran que la aplicación del esquema a corto plazo para estimar el Momento Flector en Olas de Diseño resulta en valores de tipo conservativo. Para efectos de comparación, en el apéndice se presentan los resultados de estimar las distribuciones de Momento Flector en Olas, aplicando el método Cuasiestático (equilibrando el buque en una ola), y los resultados lucen consistentes con los otros dos métodos.

En nuestro medio no se cuenta con información completa sobre la composición de los estados de Mar locales. Por ello, sería recomendable comparar mediciones de espectros resultantes de mediciones locales con las obtenidas aplicando formulaciones estándares, como la de ITTC, aplicada en el presente trabajo.

El esquema aplicado en este trabajo es el de plazo corto, usando la técnica de la probabilidad de excedencia, existiendo también el esquema de largo plazo, [7]. Sería conveniente aplicar también este segundo esquema para efectos de comparación.

Bibliografía

[1] Battacharyya, R., Dynamics of Marine Vehicles. Wiley Interscience, 1978.

[2] Det Norske Veritas, Rules for the Structural Design of Ships with Length less than 100 metres. DNV, 1991

[3] INOCAR, Escala Beaufort. Armada del Ecuador, Instituto Oceanográfico de la Armada, 2002

[4] Lloyd's Register of Shipping, Rules for the Construction of Steel Ships.. Lloyd's, 2003

[5] Marín, J. R., Estimación Probabilística del Francobordo de una Embarcación Menor Oceánica. XIX Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria, Guayaquil, Oct. 2005

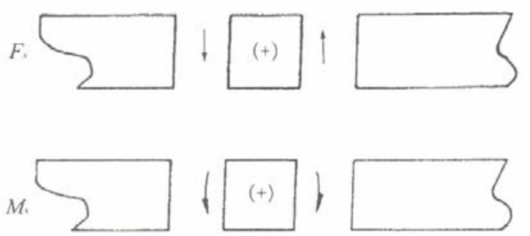
[6] Naval Ship Engineering Center, Ship Hull Characteristics Program, Users Manual. Armada de EE.UU., NAVSEC, 1976

[7] Paulling, J. Randolph, Strength of Ships, Cap. 4, en Principles of Naval Architecture, vol. I, Lewis, E., ed. SNAME, 1988

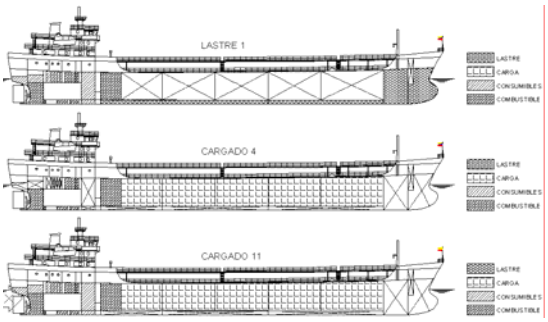
[8] Raff, A., SCORES Ship Structural Response in Waves. Ship Structure Comittee, Report 230, 1972

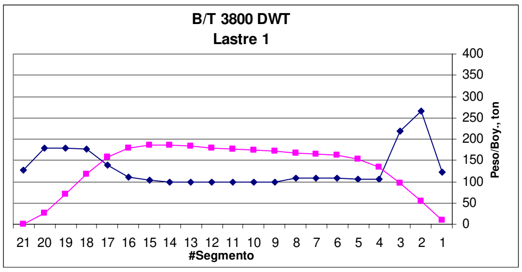
APENDICES

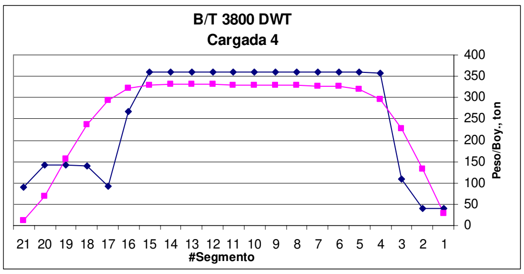
Convención de Signos para las Fuerzas Internas

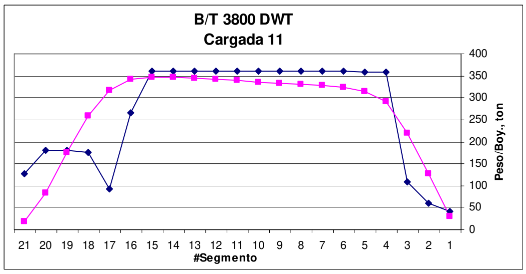


Distribuciones de Peso y Boyantez de las Condiciones de Carga Analizadas









Momento Flector por Acción de las Olas por el Método Cuasiestàtico, Altura de la ola: 5.74 m (=$1.1\sqrt{L}$)