

# **Cálculo y Medición de las Reacciones en los Bloques de la Cama de Varamiento del Buque Tanquero Andes V**

Fernando Xavier Espinosa Terán y José R. Marín, Ph.D.  
Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar  
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)  
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral  
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador  
[fespinos@espol.edu.ec](mailto:fespinos@espol.edu.ec), [jrmarin@espol.edu.ec](mailto:jrmarin@espol.edu.ec)

## **Resumen**

El Buque Tanquero Andes V de 96 m de eslora fue varado en el Dique Napo de ASTINAVE en abril del 2010. En este trabajo se han calculado las Reacciones en los bloques de la cama de varamiento para el buque mencionado, mediante 3 métodos teóricos: Crandall, Viga Timoshenko y Elementos Finitos. Asimismo, se han estimado experimentalmente dichas reacciones mediante la medición del aplastamiento de los tablonces en la parte superior de cada bloque.

En la preparación de la cama de varamiento para el B/T Andes V, se encontraron prácticas inadecuadas, como la reutilización y uso de tablonces deteriorados y de diferente altura, lo que no permitió una adecuada toma de datos. Por ello se obtuvieron resultados extraños, como reacciones negativas, y hubo necesidad de seleccionar resultados que aparentaron ser razonables.

Los resultados experimentales de las reacciones se encuentran en el rango de los teóricos, y, además crecen hacia Popa, tendencia observada también en el proceso teórico (133 y 142 ton según Viga Timoshenko y MEF, respectivamente). Esto demuestra que, a pesar de las dificultades, en general las estimaciones teóricas son consistentes con las experimentales. Entonces considerando la consistencia en valores, y la tendencia de las reacciones, se concluye que tanto, el MEF y el de la Viga Timoshenko para análisis de Reacciones son adecuados, aunque se recomienda éste último porque requiere menos tiempo para el desarrollo del modelo.

**Palabras Claves:** Varamiento de Buque, Reacciones

## **Abstract**

The Andes V tanker ship of 96 m in length was stranded on the Napo ASTINAVE Dam in April 2010. In this work we have calculated the reactions of the bed blocks stranding the vessel referred to by three theoretical methods: Crandall, and Timoshenko Beam Finite Element. In addition, these reactions have been estimated experimentally by measuring the crushing of the planks on top of each block.

In preparing of the bed for B / V T Andes, found improper practices such as recycling and use of worn and the boards of different heights, which did not allow adequate data collection. So strange results were obtained as negative reactions, and they had to select results that appear to be reasonable.

The experimental results of the reactions are in the range of theorists, and also grow into Popa, a trend also seen in the theoretical process (133 and 142 ton as Timoshenko beam and MEF, respectively). This shows that, despite the difficulties, general theoretical estimates are consistent with the experimental. Then considering the consistency in values, and the trend of the reactions, it is concluded that both the MEF and the Timoshenko beam for analysis of reactions are adequate, although the latter is recommended because it requires less time for model development.

**Keywords::** Ship Docking, Reactions

## Introducción

Las fuerzas de reacción en el varamiento de un buque actúan en forma muy concentrada y si no son correctamente distribuidas pueden afectar a la estructura del mismo. Conocer dichas reacciones que, son también las cargas sobre los bloques de la cama de varamiento, permitiría determinar posteriormente la posibilidad de daños en la estructura del buque y el deterioro de los bloques por sobrecarga, [1].

Para el cálculo de las reacciones de los bloques se pueden emplear modelos que suponen al buque como una viga de sección variable, [1], [4], considerando dichas fuerzas como concentradas en crujía del buque. Además, una cama de varamiento típica en nuestro medio consta de varios bloques formados con una base cuadrada de cemento, bloques de madera dura y, tablas de sacrificio en la parte superior, las mismas que pueden modelarse como resortes lineales, [1]. Luego, dado que el cálculo de las reacciones, incluye simplificaciones, es recomendable su comprobación experimental.

Existen varios equipos para medir las cargas sobre los bloques, sin embargo, el calibrador Vernier es una herramienta efectiva para medir la carga a través de la compresión de los tabloncillos, [2]. Entonces para determinar las reacciones en los bloques de una cama de varamiento se puede empezar por medir la reducción del espesor de las tablas de sacrificio. Teniendo además el área donde se aplica la fuerza

y el Módulo de Young de la madera, [1], se podría utilizar la ley de Hooke y estimar la fuerza que se aplicó para producir el aplastamiento medido.

El objetivo general de esta tesis es calcular la reacción en cada uno de los bloques de la cama de varamiento del buque tanquero Andes V y comprobar los resultados con las estimaciones experimentales encontradas a partir de mediciones tomadas en sitio.

### 1. Descripción del buque a analizar

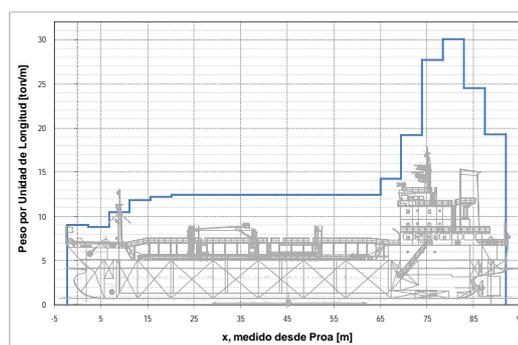
El buque tanquero ANDES V fue construido en un astillero ubicado en la República de China, en el año 2006. Comúnmente trabaja transportando petróleo entre las ciudades de La Libertad y Guayaquil (Terminal de Tres Bocas). A continuación se presentan las dimensiones principales del buque:

**Tabla 1.** Dimensiones principales del B/T Andes V

Eslora Total	96.00 m
Eslora entre Perpendiculares	89.60 m
Manga	13.40 m
Puntal	6.90 m
Calado Máximo	5.60 m
Desplazamiento	5555 TM
Peso Muerto	4136.5 TM
Desplazamiento Ligero	1418.5 TM
Tonelaje Bruto	2364 Ton. Moorsoon
Tonelaje Neto	1323 Ton. Moorsoon
Capacidad de Carga	3923 TM
Velocidad	12 Kt.

### 2. Distribución simplificada de pesos

Para realizar la distribución de pesos del B/T Andes V, se utilizaron los datos proporcionados por el armador del buque, que se presentan a en el siguiente gráfico:



**Figura 1.** Distribución de pesos en condición ligera para el B/T Andes V

Sumando los pesos en Condición Ligera y pesos adicionales se tiene que el desplazamiento total con el que el buque ingresó al dique es de 1794.5 ton. y el Centro de Gravedad se ubica a 2.95 m desde la Línea de Crujía hacia Popa.

### 3. Geometría y Conformación de los bloques de la cama de varamiento

La cama de varamiento para el buque analizado en esta tesis, está conformada por 24 bloques centrales y 34 bloques laterales, los cuales están distribuidos de la siguiente manera:

- 17 bloques en la banda de Estribor,
- 17 bloques en la banda de Babor
- 24 bloques a lo largo de la Línea de Crujía del buque



**Figura 2.** Cama de Varamiento para el B/T Andes V

En el Dique Napo, los bloques que forman la cama de varamiento de un buque (Figura 4), tanto centrales como laterales, tienen una altura promedio de 56 plg. Los bloques laterales típicamente están conformados por una base de 4 troncos de madera, normalmente Fernán Sánchez, unidos por platinas de acero con pernos y/o tiras de madera con clavos y un tablón de 1" o 2" en la parte superior. Mientras tanto, los bloques centrales están constituidos de la siguiente manera:

- Una base de 4 troncos de madera dura, cada uno de 121.9 x 30.48 x 38.1 cm (48 x 12 x 15 plg) colocados uno al lado del otro;
- Dos bloques de cemento cada uno de 121.9 x 121.9 x 38.1 cm (48 x 48 x 15 plg.), uno sobre el otro;
- Cuatro troncos de madera, clase Fernán Sánchez, cada uno aproximadamente de 121.9 x 30.48 x 38.1 cm (48 x 12 x 15 plg.) colocados uno al lado de otro, y;
- Cuatro tablonces de madera, clase Fernán Sánchez, aproximadamente de 100 x 20 x 2.54 ó 5.08 cm (39.37 x 7.87 x 1 ó 2 plg.), que cubren en la parte superior del bloque un área de 121.9 x 121.9 cm (48 x 48 plg.).

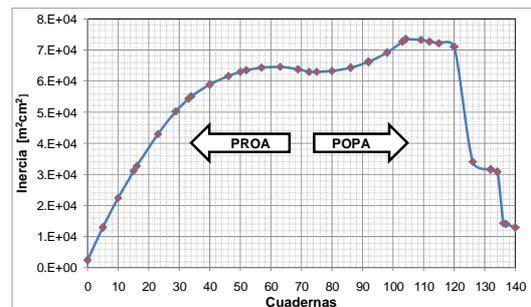
#### 4. Resumen de las propiedades requeridas para el cálculo

El módulo de elasticidad para la madera tipo Fernán Sánchez se lo ha tomado como 365.8 kg/cm<sup>2</sup> equivalente al MOE de la maderan pino Amarillo. Debido a que no existe información suficiente acerca de la madera Fernán Sánchez. Se ingresaron los calados del buque, tomados durante su varamiento al programa SHCP para obtener su desplazamiento total y LCG igual a 1795.94 ton y 2.54cm a popa desde sección media.

**Tabla 2.** Calados ingresados al SHCP

Calados Ingresados		
Calado de Proa	1.05	m
Calado de Popa	3.00	m
Resultados		
Desplazamiento de diseño	1795.94	Tons
LCG Diseño	-2.957	m. desde sección media (+ Proa)

A partir de las inercias calculadas para ciertas estaciones, se ha estimado una curva para calcular las inercias necesarias, que se muestra a continuación:



**Figura 3.** Estimación de inercias para las secciones del B/T Andes V

#### 5. Cálculo de las reacciones utilizando el modelo de Crandall

El modelo de Crandall considera al buque como una viga de sección variable muy rígida, es decir, que las deformaciones en él son despreciables. Debido a dicha asunción este proceso no es recomendable para embarcaciones de esloras muy grandes o para embarcaciones que van a ser cortadas o que tengan un considerable daño. También se asumen a los bloques de la cama de varamiento como muy rígidos para poder calcular la presión sobre ellos.

Para la aplicación del método, el modelo de Crandall transforma la distribución de pesos del buque en forma trapezoidal. Los valores extremos de la distribución de pesos trapezoidal se calculan como se muestra a continuación, [1]:

$$w_A = \frac{W}{L_K} + 6 \frac{W.e}{L_K^2} \quad (1)$$

$$w_F = \frac{W}{L_K} - 6 \frac{W.e}{L_K^2} \quad (2)$$

En las ecuaciones (1) y (2), W es el desplazamiento total del buque, L<sub>K</sub> es la longitud de la quilla soportada por la cama de varamiento, y, e es la excentricidad o la distancia longitudinal entre el centro de gravedad longitudinal (L<sub>CG</sub>) y el centro de la longitud soportada por la cama. La excentricidad se la puede obtener mediante:

$$e = L_{CG} - \frac{L_K}{2} - L_{1B} \quad (3)$$

donde  $L_{1B}$  es la distancia longitudinal desde el bloque más a proa hasta la perpendicular de proa. La distribución de pesos, [peso/longitud], se la expresa a partir de la asunción de linealidad, de la siguiente manera:

$$W_B = \frac{W_A - W_F}{L_K} x + W_F, \quad (4)$$

donde  $x$  es la ubicación de cada bloque con respecto al bloque más a Proa.

Una vez obtenida la distribución de pesos, y tomando en cuenta las simplificaciones mencionadas, la presión sobre los bloques de la cama de varamiento ( $P_B$ ) puede ser calculada de la siguiente manera:

$$P_B = \frac{W_B S}{A_B}, \quad (5)$$

A diferencia del método de Crandall, este método asume al buque como una viga flexible de sección variable, pero adicionalmente toma en cuenta el efecto de corte. Este método, considera las siguientes asunciones: el piso del dique no se deflecta al ser cargado; el material de la estructura del buque es homogéneo, isotrópico y elástico; y, las reacciones en los bloques tienen una relación directa a la deflexión del buque en cualquier punto a lo largo de su eslora. A partir de las ecuaciones de equilibrio determina, ecuaciones diferenciales para el cálculo de las reacciones sobre los bloques:

$$\sum M_z = 0 \implies V = -\frac{dM}{dx}$$

$$\sum F_y = 0 \implies q = -\frac{dV}{dx}$$

Entonces se determinan las siguientes ecuaciones:

$$E \frac{d}{dx} \left( I(x) \frac{d\psi(x)}{dx} \right) + A_s(x) G \left( \psi(x) - \frac{dy}{dx} \right) = 0 \quad (11)$$

$$G \frac{d}{dx} \left[ A_s(x) \left( \psi(x) - \frac{dy}{dx} \right) \right] - k(x)y - w(x) = 0 \quad (12)$$

Para los fines de esta tesis, se ha desarrollado un programa en Fortran, llamado DFTIMOSH, para

obtener las reacciones en los bloques usando el método de la viga Timoshenko.

## 6. Cálculo de las reacciones utilizando el Método de Elementos Finitos

Para este fin se hará uso del programa de análisis estructural SAP2000, en el cual se ha modelado la estructura del B/T Andes V como una Viga Buque.

El modelo de la Viga Buque aplicado se compone de 51 nodos, 50 secciones, modeladas con elementos "Frame", y de 24 resortes que, como ya se había mencionado anteriormente, representan a los bloques. Adicionalmente se han tomado en cuenta las propiedades ya calculadas para las estaciones tales como Inercia, área que interviene en el corte (Apéndice B), y las propiedades del acero tipo ASTM A-131, tales como el Módulo de Elasticidad ( $E=2.11E6 \text{ kg/cm}^2$ ), Constante de Poisson ( $\nu=0.25$ ), y el Módulo de corte ( $G=8.45E5 \text{ kg/cm}^2$ ).

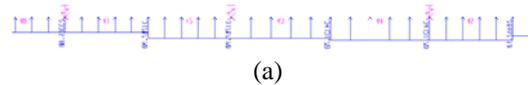


Figura 4. Viga Buque del B/T Andes V modelado en SAP2000

## 7. Descripción del proceso para obtener la estimación de las reacciones experimentalmente

Para poder estimar las Reacciones que desarrollan los bloques de la cama de varamiento, de acuerdo al método seleccionado en este trabajo, primero se tiene que medir el aplastamiento de los tablones que tienen contacto con el fondo del buque. El término aplastamiento se refiere a la diferencia entre el espesor del tablón antes de que el buque se encuentre varado (espesor inicial) y el espesor del tablón cuando éste se encuentre comprimido por el peso del buque sobre él (espesor final). Este proceso se lo realizó con la ayuda de un calibrador Vernier y un compás de interiores.

Una vez conocidos los valores del aplastamiento que sufre cada tablón, para obtener las reacciones se puede aplicar la ley de Hooke que establece que: "El alargamiento unitario que experimenta un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada  $F$ ", [4]. Así tenemos:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \Rightarrow \frac{\Delta t}{t_{inicial}} = \frac{F}{AE}$$

$$\Rightarrow F = AE \left( \frac{t_{final}}{t_{inicial}} - 1 \right)$$

Para la presente tesis se han tomado las fuerzas como positivas.

Existen ciertos casos en los que el buque se asienta tan solo en el centro del tablón lo que produce un aumento del espesor del tablón en todos sus bordes. Recordando que las mediciones de los espesores de los mismos fueron tomadas en sus bordes, como resultado se obtienen reacciones negativas y por lo mencionado en el párrafo anterior dicha fuerza se toma como nula a pesar de que en la realidad si existe un aplastamiento.

Como ya se había mencionado anteriormente, muchas veces los tablonces son reutilizados a pesar de que estén deteriorados, lo que provoca una medición poco confiable.

Todo esto nos ha obligado a seleccionar las reacciones experimentales que se consideran mejores, y se muestran a continuación:

Bloque	Reacción [Ton]
8C, lateral 4	157
10C, lateral 6	165
14C, lateral 10	130
19C, lateral 15	39
23C	249

Tabla 3. Resultados experimentales considerados

### 8. Análisis entre resultados teóricos

A continuación se presentan las reacciones para los bloques de la cama de varamiento:

Cuad del dique	Cuad del buque	Bloque	Reacciones [ton]		
			Crandall	MEF	V. Timosh.
10	137	1C	26.4	57.6	60.7
11	132	2C	54.4	53.8	57.3
12	126	3C	56.7	50.2	53.6
13	120	4C	53.7	47.2	50.2
14	115	5C, lateral 1	55.6	65.7	68.7
15	109	6C, lateral 2	63.0	63.0	64.7
16	103	7C, lateral 3	65.2	60.5	61.0
17	98	8C, lateral 4	67.5	59.6	58.9
18	92	9C, lateral 5	69.7	54.8	53.6
19	86	10C, lateral 6	72.0	55.0	53.4
20	80	11C, lateral 7	74.2	57.4	55.9
21	75	12C, lateral 8	76.4	56.8	56.1
22	69	13C, lateral 9	78.7	62.9	63.0
23	63	14C, lateral 10	80.9	59.8	61.2
24	57	15C, lateral 11	83.1	62.4	65.1
25	52	16C, lateral 12	85.4	68.4	72.3
26	46	17C, lateral 13	87.6	78.1	83.3
27	40	18C, lateral 14	89.9	82.9	87.9
28	34	19C, lateral 15	92.1	98.4	102.3
29	29	20C, lateral 16	94.3	110.0	108.4
30	23	21C, lateral 17	106.0	142.1	133.4
31	16	22C	108.7	96.3	83.2
32	10	23C	101.5	119.7	101.5
33	5	24C	51.6	135.4	113.0
Sumatoria			1794.5	1798.1	1768.7
Promedio			74.8	74.9	73.7

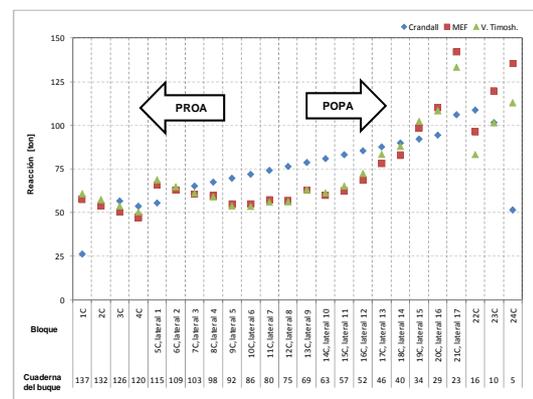


Figura 5. Resultados Teóricos para las reacciones en los bloques de la cama de varamiento

Cada método considera al desplazamiento del buque distribuido de manera diferente, especialmente en la parte en voladizo hacia los extremos del mismo, y debido a que en popa existe más peso, ahí es más evidente la diferencia entre las reacciones calculadas por cada método. En cuanto a los métodos de Viga Timoshenko y MEF, si se busca tener mayor exactitud en los resultados se podría realizar modelos con una mayor cantidad de segmentos.

### 9. Comparación entre los resultados teóricos y experimentales

A continuación se muestran una tabla con las comparaciones:

Bloque	Crandall	MEF	V. Timosh.	Experimentales	Min. % diferencia	Max. % diferencia
1C	26.4	57.6	60.7	---	---	---
2C	54.4	53.8	57.3	---	---	---
3C	56.7	50.2	53.6	---	---	---
4C	53.7	47.2	50.2	---	---	---
5C, lateral 1	55.6	65.7	68.7	---	---	---
6C, lateral 2	63.0	63.0	64.7	---	---	---
7C, lateral 3	65.2	60.5	61.0	---	---	---
8C, lateral 4	67.5	59.6	58.9	157	57%	63%
9C, lateral 5	69.7	54.8	53.6	---	---	---
10C, lateral 6	72.0	55.0	53.4	165	57%	68%
11C, lateral 7	74.2	57.4	55.9	---	---	---
12C, lateral 8	76.4	56.8	56.1	---	---	---
13C, lateral 9	78.7	62.9	63.0	---	---	---
14C, lateral 10	80.9	59.8	61.2	130	38%	54%
15C, lateral 11	83.1	62.4	65.1	---	---	---
16C, lateral 12	85.4	68.4	72.3	---	---	---
17C, lateral 13	87.6	78.1	83.3	---	---	---
18C, lateral 14	89.9	82.9	87.9	---	---	---
19C, lateral 15	92.1	98.4	102.3	39	138%	165%
20C, lateral 16	94.3	110.0	108.4	---	---	---
21C, lateral 17	106.0	142.1	133.4	---	---	---
22C	108.7	96.3	83.2	---	---	---
23C	101.5	119.7	101.5	249	52%	59%
24C	51.6	135.4	113.0	---	---	---

## Conclusiones

Se han empleado los métodos teóricos de Crandall, Viga Timoshenko y Elementos Finitos para calcular las reacciones sobre los bloques de la cama de varamiento del B/T Andes V en el dique Napo de ASTINAVE. Luego dichos resultados fueron comparados con las estimaciones experimentales a partir del aplastamiento de los tablonces de los bloques, y, se puede concluir lo siguiente:

1. El proceso aplicado en este trabajo para medir las reacciones es muy simple, basándose en el aplastamiento de los tablonces por efecto de la reacción desarrollada por el bloque. Sin embargo, la reutilización de tablonces, el uso de material deteriorado y la variación de la altura de los bloques, dificulta su aplicación.

2. El método de Crandall es muy sencillo de aplicar, debido a que solo necesita información básica del buque como su eslora total, desplazamiento y, además de ciertas distancias que pueden ser medidas rápidamente en la cámara de varamiento. A pesar de esto, éste método debe ser utilizado únicamente para análisis preliminares por las simplificaciones que aplica.

3. Graficando los resultados experimentales de las reacciones consideradas confiables, se encuentran en el rango de los teóricos (ver el Gráfico 8), y, además crecen hacia Popa, tendencia observada también en el proceso teórico. Esto demuestra que, a pesar de las dificultades, en general las estimaciones teóricas son consistentes con las experimentales. Entonces considerando la consistencia en valores, y la tendencia de las reacciones, se concluye que, el MEF o el de la Viga Timoshenko para análisis de Reacciones son adecuados, aunque se recomienda éste último porque requiere menos tiempo para su aplicación.

4. Para determinar teóricamente las reacciones en los bloques de la cama de varamiento de un buque los métodos de la Viga Timoshenko y de Elementos Finitos pueden ser utilizados con mayor confianza que el de Crandall. Esto es debido a que incluyen menos simplificaciones, y consideran las propiedades del buque como Inercia Seccional, área de corte y distribución real de pesos. A su favor, el Método de la Viga Timoshenko, contando con su implementación en un programa, requiere menos tiempo que el MEF para su aplicación.

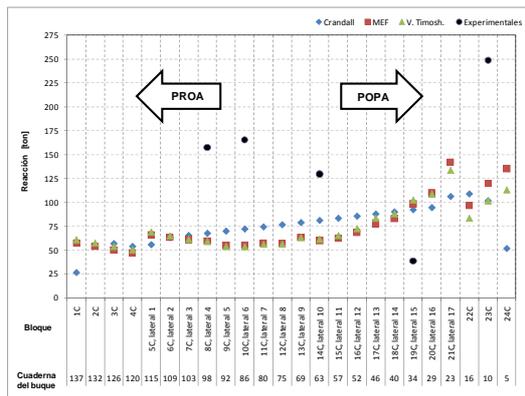


Figura 6. Resultados Teóricos para las reacciones en los bloques de la cama de varamiento

Cabe recalcar que en la preparación de la cámara de varamiento del B/T Andes V, se encontraron algunas prácticas inadecuadas, como la reutilización de tablonces de camas de varamiento antiguas, y no uniformidad en las alturas de los tablonces. Todo esto no permitió una adecuada toma de datos para estimar el aplastamiento y posterior cálculo de las reacciones en los bloques en forma experimental. Por ello se obtuvieron resultados experimentales extraños, como por ejemplo puntos en los que el buque no asentaba y reacciones negativas, y como consecuencia hubo necesidad de seleccionar resultados que aparentan ser los más razonables.

En la figura anterior, se nota que los resultados teóricos se encuentran comprendidos entre el rango de los resultados experimentales. Esto da a entender que, aun con las dificultades descritas en el párrafo anterior, en promedio las estimaciones teóricas son consistentes con los experimentales.

También se puede ver que las reacciones experimentales van creciendo hacia Popa, como se nota en el bloque 23C, comportamiento que también puede ser observado en la distribución de las reacciones teóricas. Todo esto se debe a la mayor concentración de pesos en popa y a la parte del buque en voladizo en dicho extremo.

## Referencias

- [1] Taravella Brandon M., Accuracy Assessment of Methods for Predicting Dry Dock Block Reactions, Revista Marine Technology, Vol. 42, No 2, Abril 2005, pag. 103 -112
- [2] Taravella Brandon M., Comunicación vía correo electrónica, 21 de Enero de 2009
- [3] Velarde Toscano Marco, Pruebas de Resistencia y Durabilidad de Maderas Nacionales y Recomendaciones para su uso en Construcción de Embarcaciones Menores, Tesis de Grado Ing. Naval, FIMCM-ESPOL, 1974.
- [4] Popov, Egor P., Introducción a la Mecánica de Sólidos, LIMUSA, Segunda Edición, 2000
- [5] Computer and Structures Inc, CSI, Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures, SAP 2000, Versión 10, Septiembre 2005
- [6] Chinese Shipyard, Loading Manual for M/N Andes V. República de China, 2006
- [7] Manual de Diseño de Maderas del Grupo Andino, Junta del Acuerdo de Cartagena, PADT- REFORT, 3ra Edición, 1984
- [8] Keenan, F.J.y Tejada, M., Maderas tropicales como material de construcción en los países del Grupo Andino de América del Sur., CIID, 1987.
- [9] Chichignoud Michéle, Atlas de las maderas de América Latina, Editorial Quae, 2da edición, 1990
- [10] José R. Marín, Ph.d, Notas de clase: Diferencias Finitas para EDO's, 2000
- [11] José R. Marín, Ph.d, Aplicación del método numérico de Diferencias Finitas para la resolución de las ecuaciones del Método de la Viga Timoshenko para encontrar las reacciones en los bloques de la cama de varamiento de un buque, 2010.
- [12] Cowper G.R., The Shear Coefficient in Timoshenko's Beam Theory, Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, 1966