

# Cálculo estructural de un varadero de buques.

## Taymí Rodríguez Delgado.

Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Mecánica Aplicada.  
 Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". ISPJAE.  
 Calle 127 s/n, Marianao 15, Ciudad Habana, Cuba.  
 Teléfono: 53 7-260 2267, Fax: 53 7-267 7129.  
 E-mail: Taymi@mecanica.ispjae.edu.cu

(Ponencia recibida para ser presentada en el 2º Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica, ISPJAE, Ciudad de la Habana, Septiembre 2000)

### Resumen

En el presente trabajo, a partir de las técnicas de computación, se realiza el análisis estructural de un varadero de buques, con 2000 toneladas de capacidad. Para cumplimentar lo antes señalado es empleando un programa de computación, basado en el Método de los Elementos Finitos, se generó el modelo físico-matemático de la estructura, para lo cual se cumplimentaron dos etapas:

1ª etapa: Elaboración de la geometría del modelo, utilizando elementos sólidos planos triangulares y cuadriláteros.

2ª etapa: Definición de las restricciones al movimiento y las fuerzas externas actuantes.

Además se realizó el estudio del comportamiento resistivo de la estructura de producción nacional, sometiendo el modelo físico-matemático a las condiciones extremas de explotación que plantea el fabricante. De este estudio, basado en el análisis de los esfuerzos equivalentes promedios. Fue concluido que el varadero diseñado puede reducir su peso e incrementar su vida útil produciéndose esfuerzos equivalentes promedios inferiores al límite de fluencia de los aceros que se emplean en este tipo de estructuras. Esta disminución del peso se obtiene de al variar solamente los espesores manteniendo las longitudes y alturas de los elementos que conforman la estructura del varadero.

**Palabras claves:** Cálculo estructural, varadero de buques, métodos de elementos finitos, modelo físico-matemático.

## 1. Introducción.

En la Cuba, existen experiencias acerca de la extracción en la bahía de algunas embarcaciones de gran porte, mediante el procedimiento de encallarla en la costa fangosa, por medio de varios camiones. Una vez que una parte del barco está en tierra, se corta esta parte, procediendo a continuación a arrastrar a tierra la parte restante para su procesamiento. Si bien así han logrado aprovechar todo el buque, el daño a la costa ha sido enorme, por ello, fue necesario realizar inversiones para llevar a cabo esta tarea de forma compacta y sin causar daño ecológico a la zona.

Este estudio fue encargado al Centro de Proyectos Navales (CEPRONA), del Ministerio de la Industria Pesquera, el cual elaboró un proyecto de varadero, para

varar buques de hasta 2000 toneladas de peso, es decir, sacar a tierra las partes de las embarcaciones que no puedan cortarse en el agua y que pesen alrededor de las 2000 tn.

El proyecto completo fue realizado por CEPRONA, pero el cálculo de la estructura soporte del buque, se realizó en el Departamento de Mecánica Aplicada del ISPJAE, con la ayuda de un programa de cálculo empleando el Método de Elementos Finitos.

Las ventajas del proyecto están dadas por consideraciones de orden ecológico, pero resultando a la larga importantes ventajas económicas.

## 2. Descripción del equipo.

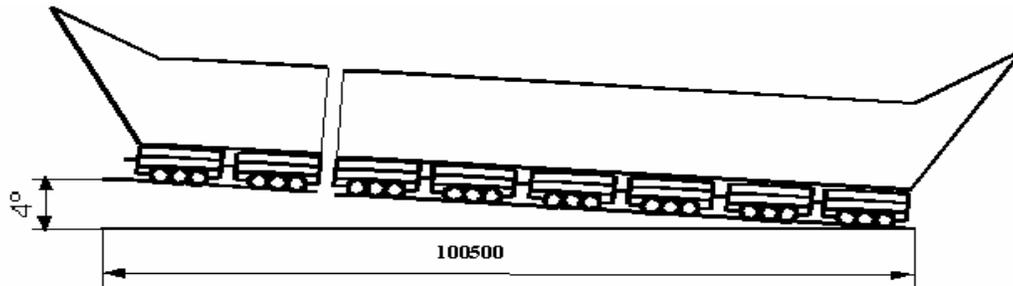
El varadero de buques analizado, se diseña con el objetivo de varar la chatarra de barcos encallados

teniendo en cuenta que su capacidad de carga es de hasta 2000 tn

Entre las características generales (Fig. 1) se encuentran:

- Longitud total (L) = 100500 mm.

- Presenta 16 bloques o carros de carga de 6000 mm cada uno.
- 15 uniones entre bloques de 300 mm cada una.
- El ancho total es de 14445 mm.
- Peso estimado de la anguila (q) = 270 tn.
- Inclinación de 4°.



**Fig. 1** Elevador de Buques o Varadero.

El elevador de buques consta de 16 módulos o bloques y cada uno de estos contiene 4 patines o vigas longitudinales. En total el equipo tiene 192 ruedas (12 ruedas por módulo) y el número de estas por patín es de 3, existiendo una distancia entre las mismas de 2600 mm.

Los módulos están compuestos, además de los patines con sus ruedas, por los denominados tranques o travesaños teniendo dos en la parte central y cuatro en las partes exteriores unidos por cartabones.

La distancia a recorrer el carro por encima de la base de la instalación es de 180000 mm, con una inclinación de 4°.

La configuración de los patines es en forma de vigas tipo cajón, a partir de dos canales de altura de 400 mm, cerrados arriba y abajo por cinco platabandas de 16 mm de espesor.

Para dar resistencia al pandeo se colocan reforzadores en el alma de las canales. Con esto se consiguen elementos de gran resistencia y rigidez acorde con las altas cargas a transportar.

Los tranques o travesaños se conciben como vigas cajones. Con ello se aspira a mayores resistencias y rigideces respecto a los patines.

La formación en forma de carros articulados de la estructura de carga, permite lograr que el mayor número de ruedas posible esté realmente en contacto con los

rieles a pesar de las inevitables irregularidades de ellos. Además facilita la construcción en talleres de cada carro de forma separada, con sus longitudes mucho menores que la total de toda la anguila, y su posterior traslado hacia el lugar definitivo de la instalación. La instalación consta de un cabrestante de tiro de la anguila, que no es más que un enorme sistema motriz, con un motor de combustión interna de 240 HP, con reductores, frenos, tambora, acoples y cable de acero, con una capacidad de tiraje de unas 100 tn.

La tercera parte de la instalación, es la base de sustentación de la anguila y del cabrestante, que está formada por columnas de hormigón enterrados en el fondo marino, sobre las que se apoyan patines de hormigón, que a su vez sirven para soportar los rieles. Esta base se prolonga hacia tierra adentro, en la costa,

de modo que permita que toda la anguila con su carga salga fuera del agua.

### 3. Análisis de las condiciones de carga.

Este análisis va dirigido a determinar las cargas que actúan sobre el varadero, para esto es necesario analizar lo que sucede entre el barco y el varadero.

Para realizar los cálculos se tuvieron en cuenta algunas consideraciones orientadas por CEPRONA, centro encargado del proyecto y diseño del varadero. Primeramente, fue supuesto que en todo momento el buque está completamente apoyado en los 16 carros de carga. Esto se garantiza porque la pendiente o inclinación del varadero es pequeña ( $4^\circ$ ), manteniéndose luego de sacarlo del agua, por la concepción de la anguila en forma de carros independientemente articulados entre sí.

Fue asumido que el peso del barco a varar no está uniformemente distribuido a lo largo de toda la estructura sino que el 75% de la carga total estará actuando en una mitad del varadero y el resto en la otra mitad. Está suposición se hace ya que se conoce que el centro de masa del barco queda desplazada a  $3/8$  de su longitud.

A pesar de las consideraciones iniciales, se hizo un análisis de la distribución de las cargas en el varadero, para lo cual se tomó la anguila como dos bloques de carros cada uno compuesto por ocho carritos.

A continuación se muestran los análisis de carga realizados para determinar las fuerzas normales producto del peso de la embarcación, que serán las fuerzas que actúan directamente sobre la anguila, tomando que las cargas en A y B representan las fuerzas de reacción surgidas en los puntos de apoyos de cada bloque de carros. Analizándose dos casos, un primer caso donde el centro de masa de la embarcación está situado en la mitad de la distancia y en el segundo se desplaza el centro de masa a  $3/8$  de su longitud, con esto se busca el comportamiento de las reacciones para ver cuál sería la condición más desfavorable:

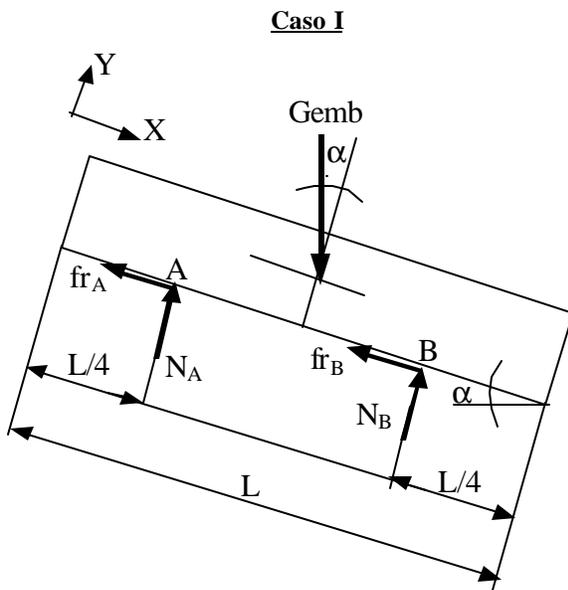


Fig. .2 Cuerpo libre del barco suponiendo que el centro de gravedad esta situado en la mitad de la distancia.

$$\sum M_A = 0$$

$$Gemb(\cos \alpha) \frac{L}{4} - N_B \frac{L}{2} = 0 \quad (1)$$

$$N_B = \frac{Gemb \times \cos \alpha}{2} = 998 \cdot 10^4 [N]$$

$$\sum F_x = 0$$

$$fr_A + fr_B = Gemb \times \sin \alpha \quad (2)$$

$$fr_B = \mu \times N_B$$

$$\sum F_y = 0$$

$$N_A + N_B = Gemb \times \cos \alpha \quad (3)$$

$$N_A = Gemb \times \cos \alpha - N_B = 998 \cdot 10^4 [N]$$

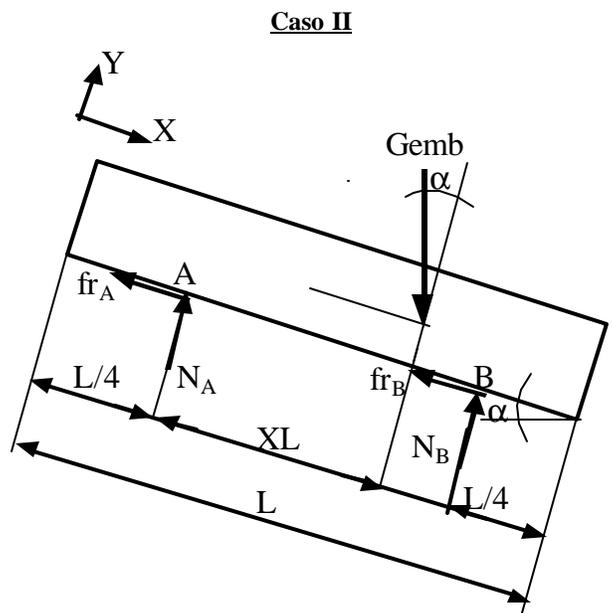


Fig. 3 Cuerpo libre del barco suponiendo que el centro de gravedad esta desplazado a una distancia  $3/8$  de su longitud.

$$\sum M_A = 0$$

$$\mathbf{Gemb} (\cos \alpha) \bullet \mathbf{XL} - \mathbf{N}_B \frac{\mathbf{L}}{2} = 0$$

$$\mathbf{N}_B = \mathbf{Gemb} \times \cos \alpha \frac{2\mathbf{XL}}{\mathbf{L}} \quad (4)$$

$$\text{cuando } \mathbf{XL} = \frac{3}{8}\mathbf{L}$$

$$\mathbf{N}_B = \mathbf{Gemb} \times \cos \alpha \times \frac{2}{\mathbf{L}} \times \frac{3}{8}\mathbf{L} = 1496,35 \cdot 10^4 [\mathbf{N}]$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\mathbf{N}_A + \mathbf{N}_B = \mathbf{Gemb} \times \cos \alpha \quad (5)$$

$$\mathbf{N}_A = 498,78 \cdot 10^4 [\mathbf{N}]$$

$$\sum F_x = 0$$

#### Cálculo de fuerzas de rozamiento.

$$\text{frA} + \text{frB} = \mathbf{Gemb} \times \text{sen } \alpha$$

$$\text{frB} = \mu \times \mathbf{N}_B = 330 \cdot 10^4 [\mathbf{N}] \quad (6)$$

$$\text{frA} = \mu \times \mathbf{N}_A = 100 \cdot 10^4 [\mathbf{N}]$$

$\mu$ : coeficiente de fricción entre madera y acero ( 0.2 ) .

Del análisis se observa que el caso más desfavorable será el II, donde se toma que el centro de masa está desplazado. Trabajaremos con los siguientes valores en B de 1500E4[N] y en A de 500E4[N].

Las cargas en los referidos apoyos, representan las cargas que actúan por acción y reacción en los bloques de carros para dichos puntos de apoyos.

Para la mitad más cargada, la carga será 188.10<sup>4</sup> [N]/carro.

Para la mitad menos cargada, la carga será 62.10<sup>4</sup> [N]/carro.

#### 4. Modelo físico matemático .

Para dar cumplimiento a los objetivos trazados en el estudio se decidió seleccionar el programa MSC/pal2. Aunque este programa tiene el inconveniente de

disponer de 1000 nodos como máximo, para abordar el análisis estático, dicha limitación es manejable, si habilidosamente se elabora el modelo físico matemático del sistema. El MSC/pal2 contiene subprogramas [1,2,3,7] que se conjugan para el análisis tensional y deformacional de los cuerpos, siendo ellos, el *PAL2*, *STAT2*, *DYNA2*, *VIEW2*, *XYPLOT2*.

El subprograma *PAL2* a partir de la introducción del fichero geométrico, construye el modelo, lo que significa obtener la matriz rigidez para el análisis estático y la matriz masa para el análisis dinámico, así como desarrolla las ecuaciones del problema, esto es realizado a partir del fichero geométrico y las propiedades del material, en el presente caso después de conocida la matriz rigidez es empleado el subprograma *STAT2* para introducir el fichero de cargas actuantes del sistema y de esta forma se determina el campo de desplazamientos nodales, obteniéndose las tensiones y deformaciones en cualquier punto.

El subprograma *VIEW2*, permite visualizar el modelo a partir de la introducción del fichero geométrico, esto se puede realizar al inicio lo cual facilita la corrección de cualquier error. El subprograma *VIEW2* después de haber pasado por el subprograma *STAT2* muestra las isozonas de tensiones y de desplazamientos, pudiéndose de forma rápida detectar las zonas más peligrosas, así como las magnitudes de tensiones y desplazamientos de dicha zona y a partir de este análisis poder hacer variaciones.

El subprograma *XYPLOT2*, permite obtener los esfuerzos en los elementos que componen el modelo y los desplazamientos en la dirección y en los elementos seleccionados.

Para la creación del modelo físico matemático del sistema real, mediante la utilización de los programas de computación, se requiere de:

La geometría del sistema.

Las restricciones al movimiento y la aplicación de las cargas.

#### 5. Geometría del sistema.

Para la generación del modelo geométrico es necesario: definir el tipo de elemento finito que se utilizará para simular las partes que componen el sistema y establecer la ubicación de los nodos, garantizando la adecuada discretización, así como las posiciones para el ensamble y las fijaciones a tierra.

Para definir el tipo de elemento, se contó con las posibilidades que brinda el programa y las características geométricas del sistema a simular. El programa posee tres tipos de elementos [7]; barras, poliedros (tetraedros, pentaedros y hexaedros) y placas (triangulares y cuadriláteras). El sistema a modelar es

uno de los carros del varadero que se conforman con barras de perfiles delgados [6], empleándose elementos de tipo triangulares y cuadriláteros. No se utilizará la barra porque no permite modelar los nervios o huecos donde van las ruedas, ni otros detalles de interés. Tampoco se utilizó el poliedro por conllevar a un gran número de nodos lo cual es inconveniente ya que el programa admite hasta 1000 nodos, además se pretende garantizar la seguridad con el menor peso posible lo que implica cambio de los espesores y resulta muy sencillo si se emplea la placa.

Ubicando los nodos de acuerdo a la configuración de la estructura y numerándolos adecuadamente se obtiene

un fichero geométrico que consta de 980 nodos, 1550 elementos y el material es acero CT3 cuyas propiedades mecánicas son: [8]

Módulo de elasticidad,  $E = 2.0 \text{ E5 MPa}$ .

Módulo de distorsión,  $G = 8.0 \text{ E4 MPa}$ .

Densidad másica,  $\rho = 7.85 \text{ E-9 N s}^2/\text{mm}^4$ .

Coefficiente de Poisson,  $\mu = 0.3$

Límite de fluencia,  $\sigma_f = 2.5 \text{ E2 MPa}$ .

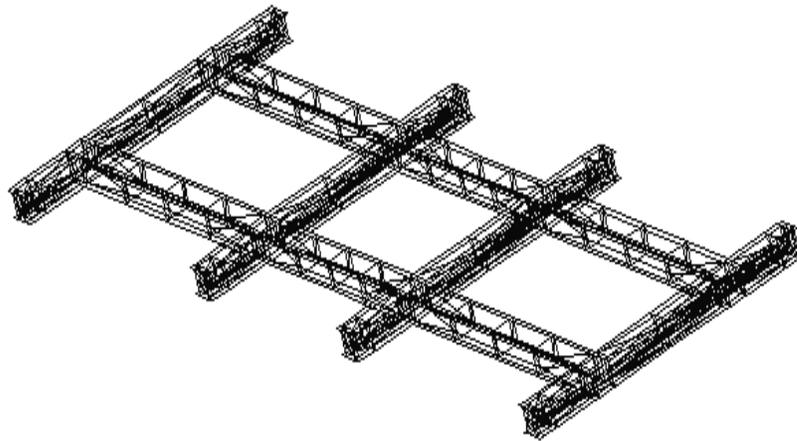


Figura 4 Modelo de un carro.

## 6. Restricciones al movimiento y cargas actuantes del sistema.

Para imponer las limitantes al movimiento se hace necesario conocer bien el funcionamiento del equipo, permitiendo esto definir los grados de libertad de los diferentes nodos que componen el modelo de la estructura, así como los que se encuentran fijos a tierra.

Al inicio de los ficheros de carga se encuentran las restricciones al movimiento del modelo, donde se fijan a tierra todas las ruedas mediante el comando DIS 21, se utiliza este porque se simulan los huecos de las ruedas mediante planos, esto se hace manteniendo el sistema en equilibrio y con vistas a simplificar los cálculos. Concluida las restricciones al movimiento se pasa a la fase de las cargas actuantes sobre el modelo.

### Las cargas externas se componen de:

- Las fuerzas verticales, se distribuyen uniformemente en todos los nodos donde serán colocadas.
- Las fuerzas horizontales debidas al cálculo tractivo.

Las cargas horizontales se distribuirán solamente en el primer carro de la anguila, se considera que este recibe la tracción total del cabrestante, la tracción del resto de los carros se hace por el propio buque que arrastra a los demás carritos. Si a esto se le suma que la mitad más cargada es la delantera esto constituye la condición más peligrosa. Para la confección del fichero de carga, primero se distribuye uniformemente el valor de la fuerza vertical que le corresponde a un carrito de la mitad más cargada en la cantidad de nodos donde se ubica dicha fuerza. Las cargas horizontales están compuestas por la carga tractiva y la fuerza de fricción

anterior ambas distribuidas en la cantidad de nodos donde serán colocadas.

- La carga vertical se distribuye en 176 nodos quedando un valor de 10681[N] por nodo.
- La fuerza horizontal por nodo producto de la tracción en las uniones delanteras del cable al primer carro.  $(\frac{215E4}{16}) = 134125 \text{ (N/nodo)}$ .
- La fuerza horizontal por nodo producto de la fricción.  $= \frac{223E4}{18} = 247777 \text{ (N/nodo)}$
- Por ultimo, las cargas fueron multiplicadas por un coeficiente igual a dos, se duplicaron para tener en cuenta el impacto que se produce al arrancar el equipo cargado. Con todo ese análisis se elaboró el fichero de cargas aplicadas sobre el modelo de la estructura usando los comandos del programa de elementos finitos

Con el modelo físico-matemático desarrollado y la modelación de las cargas exteriores, se procede a ejecutar el programa de elementos finitos, de modo que brinde los esfuerzos y desplazamientos en cada uno de los 980 nodos del modelo, en las distintas direcciones. Se analizarán los esfuerzos normales equivalentes ( $\sigma_{eqm\acute{a}x}$ ) máximos (Huber-Mises) para establecer la resistencia de la estructura y los desplazamientos máximos para establecer la rigidez de dicha estructura.

### 7. Análisis de resistencia.

En el análisis de resistencia se comparan los esfuerzos máximos con el límite de fluencia del material. En los resultados de los esfuerzos obtenidos en la corrida del programa, se puede apreciar que todos los valores son menores que el esfuerzo límite de fluencia (250 MPa).

A continuación se observan las tensiones normales equivalentes en el modelo por isozonas, donde en la tabla de sombreado se observan los valores de dichas isozonas, siendo, las uniones del cable de tracción, los patines y en las alas superiores de los patines donde aparecen las mayores tensiones.

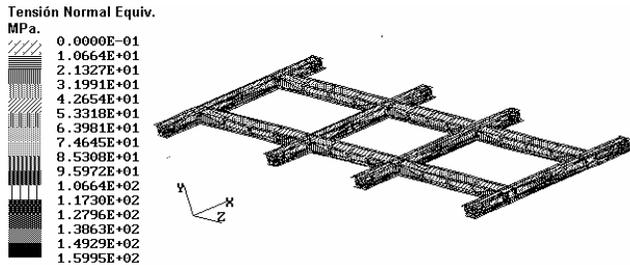


Fig 5 Tensiones máximas equivalentes por isozonas.

A continuación se muestra una vista del carro deformado, producto de la aplicación de las cargas.

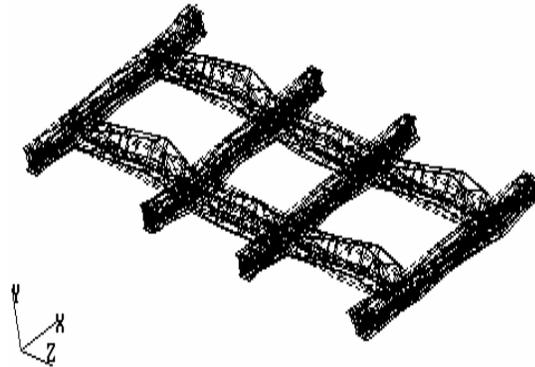


Fig 6 Carro deformado.

### 8. Análisis de los desplazamientos.

La estructura se desplaza en los tres ejes cuyos valores se pueden apreciar en las figuras que se muestran:

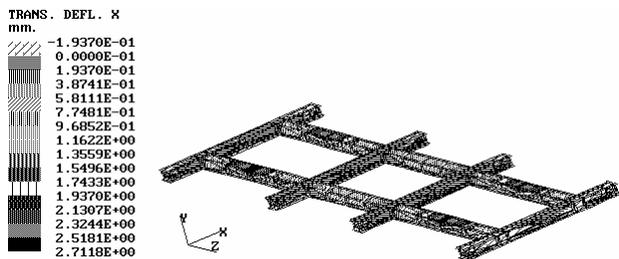


Fig 7 Desplazamientos en el eje x.

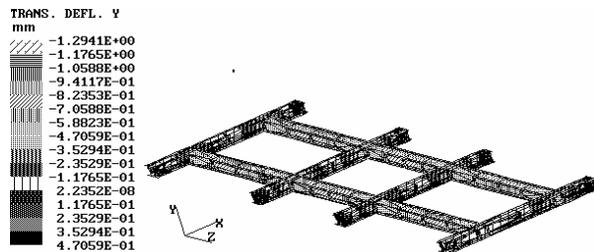


Fig 8 Desplazamientos en el eje y.

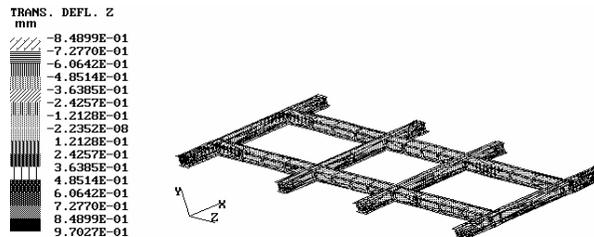


Fig.9.-Desplazamientos en el eje z.

## 9. Conclusiones.

- El modelo físico–matemático desarrollado tiene un fino mallado; con el empleo de elementos triangulares y rectangulares, lo que brinda una adecuada precisión en los cálculos.
- Para las condiciones extremas del varadero y con el material propuesto por CEPRONA se logra un coeficiente de seguridad de 1.56, los desplazamientos máximos no superan la magnitud de 3 mm, lo que resulta una adecuada rigidez para las funciones que realiza el equipo objeto del trabajo.

## 10. Bibliografía.

1. Alarcón, E., “Notas sobre el Método de los Elementos Finitos”, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Superior de Ingenieros Industriales, Sección de Publicaciones., Madrid, España,1978.
2. Alvarez, J. V., Apuntes para el Curso de postgrado “Los Elementos finitos Aplicados a la Técnica”, Imprenta ISPJAE,1987.
3. Akin, J. G.,”Application and Implementation of Finite Element Methods”, Academic of Press, London, 1982.
4. Bathe; K. J., “Finite Elements Procedure in Engineering Analysis”, McGraw Hill Book Co. , London. 1980.
5. Beer,F. P.,Johnston,E.R.,”Mecánica de Materiales”, Editorial McGraw Hill,México, 1985.
6. Feodosiev, V. I., Resistencia de Materiales, Editorial Mir, Moscú, 1985.
7. Manual del Usuario MSC/PAL2, MacNeal-Schwendler Corporation, los Angeles, California, 1987.
8. Pisarenco, g. S., Yakovlev, A. P. Manual de Resistencia de Materiales, Editorial Mir, Moscú, 1985

## Shipyards structural calculation.

### Abstract

A structural analysis of a 2000 tons capacity shipyard is carried out, starting from computers techniques. To accomplish the task is used a calculation program, based on the finite elements method , the physical-mathematical pattern of the structure was generated, for which two stages were executed:

1<sup>st</sup>. stage: Elaboration of the geometry pattern , using quadrilateral and triangular plane solid elements.

2<sup>nd</sup>. stage: Definitions of movement restrictions and location of external acting forces.

The resistive behavior study of the structure of national production was carried out, subjecting the physical-mathematical model to the extreme conditions of exploitation outline by manufactures. Of this study, based on the equivalent stress average analysis, arrived to the conclusion that the design shipyard can reduce its weight and increase useful life, taking place equivalent stress averages inferior to the fluence limits of the steel used in this type of structures. This decrease of weight is obtained by varying only the thickness, maintaining the length and height of the elements that conform the shipyard structure.

**Key words: Structural calculus, shipyard , finite element method, physical-mathematical model.**