

# APLICACION DE NUEVAS RECOMENDACIONES AL CASO DE DISEÑO DE UNA ESTRUCTURA DE ATRAQUE INDEPENDIENTE EN SITUACIÓN DE ACCIONES NORMALES Y EXCEPCIONALES

Ing. Gabriel Hernán Farah<sup>1</sup>

## RESUMEN

Se trata del desarrollo de un caso de aplicación en el cual se siguen los lineamientos indicados por las actuales recomendaciones planteadas para el diseño de una estructura de atraque independiente tipo “dolphin”.

A partir de la determinación de la acción de atraque en condiciones “normales” y “excepcionales” de operación se avanza con el procedimiento de diseño y verificación del funcionamiento de la estructura independiente, desde el punto de vista energético y estructural.

El trabajo se orienta a encontrar un adecuado “equilibrio” entre el diseño resistente de la estructura, la elección de un sistema de defensas flexible y la absorción de energía del conjunto, de manera de dar respuesta a dos estados de carga que se diferencian significativamente.

## 1. LOCALIZACION GEOGRAFICA

Las estructuras que son objeto del caso de aplicación aquí presentado forman parte del Muelle de Combustibles perteneciente a una central termoeléctrica localizada sobre el Río Coronda a la altura del Km 465, margen derecha, en la zona de Timbúes, a una distancia aproximada de 17 Km al norte de Puerto General San Martín y de 40 Km al norte de la ciudad de Rosario, provincia de Santa Fe.

Se acompaña figura representativa de la ubicación de la terminal portuaria:

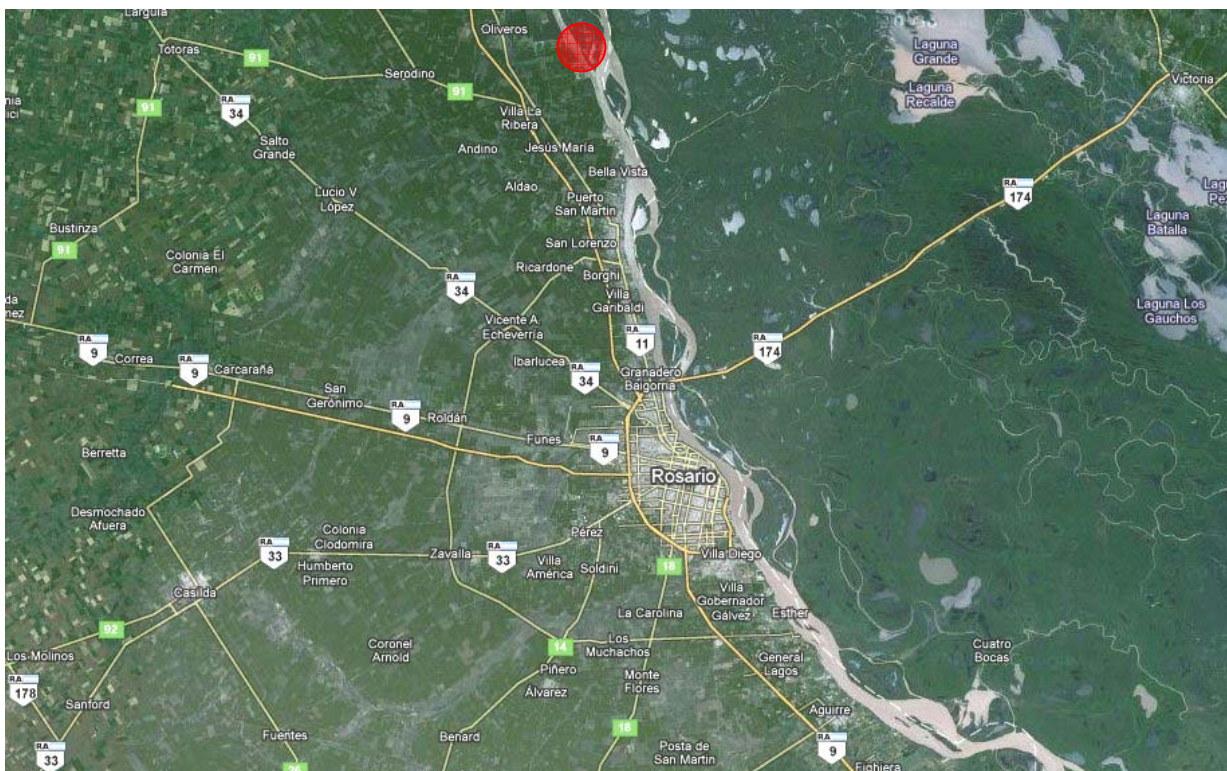


Figura 1: Localización geográfica de la terminal portuaria

<sup>1</sup> Ingeniero Portuario, Escuela de Graduados en Ingeniería Portuaria – U.B.A., Es. I. Port S.R.L.

## 2. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO

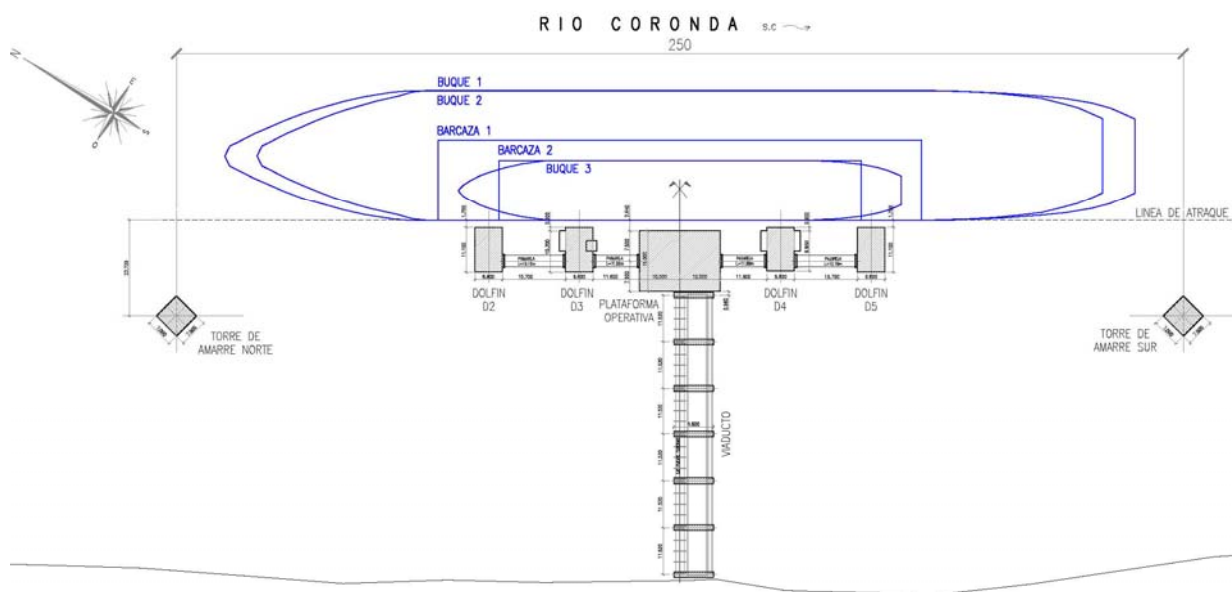
### 2.1 Infraestructura portuaria

La infraestructura portuaria se compone de una plataforma operativa vinculada a tierra mediante un viaducto de acceso sobre el cual apoya una calzada vehicular, una pasarela peatonal y un puente de tuberías apto para la transferencia de combustibles líquidos.

El muelle posee 4 estructuras independientes (delfines D2, D3, D4 y D5) para el atraque de las embarcaciones y 2 torres de amarre en cada extremo del muelle.

El frente portuario total es de 250 metros.

La estructura en análisis se corresponde con la solución de un “delfin” clásico de H<sup>0</sup>A<sup>0</sup>, conformado por un cabezal apoyado sobre 6 pilotes verticales de diámetro  $\varnothing 1450\text{mm}$  y provisto de un sistema de defensa en su parte delantera sobre el cual se recibe la acción de atraque.



**Figura 2: Características de la infraestructura portuaria**

### 2.2 Flota de buques

Para el diseño de las estructuras que componen el muelle de combustibles ha sido definida la siguiente flota de buques, las cuales llevarán a cabo las operaciones de transferencia:

Embarcación	Eslora (m)	Manga (m)	Calado operativo (m)	Desplazamiento operativo (ton)
Buque 1	226.0	32.1	7.52	42.000
Buque 2	210.0	32.2	7.55	39.300
Buque 3	110.0	15.0	7.00	8.000
Barcaza 1	120.0	20.0	6.12	14.700
Barcaza 2	90.0	16.5	3.05	4.200

**Tabla 1: Características de la flota de buques**

### 3. ENERGÍA DESARROLLADA DURANTE EL ATRAQUE

Teniendo en cuenta las características de las embarcaciones que operarán en el muelle y la configuración del mismo, se determina la energía desarrollada durante la maniobra de atraque, la cual se cuantifica para las condiciones de operación "normal" y "excepcional".

#### 3.1 Determinación de la energía de atraque en condición "normal" ( $E_n$ )

Se determina a partir de expresiones que permiten cuantificar la energía cinética desarrollada durante el atraque, con más la incorporación de coeficientes que contemplan las condiciones particulares de la maniobra:

$$E_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta}{g} \cdot v_n^2 \cdot c_m \cdot c_e \cdot c_g \cdot c_f \cdot c_r \quad (1)$$

Embarcación	Eslora (m)	Contacto en delfines (m)	Energía desarrollada ( $E_n$ ) (tm)
Buque 1	226.0	D2 ó D5	<b>118.0</b>
Buque 2	210.0	D2 ó D5	<b>110.4</b>
Buque 3	110.0	D3 ó D4	<b>29.5</b>
Barcaza 1	120.0	D3 ó D4	<b>52.7</b>
Barcaza 2	90.0	D3 ó D4	<b>13.0</b>

**Tabla 2: Determinación de energía de atraque "normal" ( $E_n$ )**

#### 3.2 Determinación de la energía de atraque en condición "excepcional" ( $E_e$ )

Se trata de una condición de atraque contemplada por recomendaciones actuales de aplicación reconocida y su determinación se basa en la introducción de un factor de mayoración " $f$ " que se aplica sobre la energía de atraque calculada para condiciones "normales" de operación ( $E_n$ ).

La cuantificación del factor de mayoración " $f$ " se define a partir del tipo de embarcación que opera y de la consideración de aspectos particulares relacionados con la eventualidad de una maniobra de atraque "excepcional".

Para el caso de aplicación que nos ocupa, el factor " $f$ " ha sido cuantificado a partir de la aplicación de las recomendaciones EAU 2004, cuya información se acompaña a continuación:

Table R 60-1. Additional factors for exceptional berthing manoeuvres

Type of vessel	Size of vessel	Additional factor
Tanker, bulk cargo	large	1.25
	small	1.75
Container	large	1.5
	small	2.0
General cargo		1.75
Ro/Ro, ferry		≥ 2.0
Tug, workboat		2.0

**Figura 3: factores de cuantificación de energía "excepcional" (EAU 2004)**

La aplicación de esta recomendación indica que la situación de atraque “excepcional” debe tenerse en cuenta como un estado de diseño que contemple la capacidad última del sistema de defensa.

Esto implica utilizar un “f” entre 1,25 y 1,75, alcanzándose los siguientes resultados:

Embarcación	Eslora (m)	Contacto en dolfines (m)	Energía desarrollada ( $E_n$ ) (tm)	Factor utilizado ( $f$ )	Energía desarrollada ( $E_e$ ) (tm)
Buque 1	226.0	D2 ó D5	118.0	1.25	<b>147.5</b>
Buque 2	210.0	D2 ó D5	110.4	1.25	<b>138.0</b>
Buque 3	110.0	D3 ó D4	29.5	1.75	<b>51.6</b>
Barcaza 1	120.0	D3 ó D4	52.7	1.75	<b>92.2</b>
Barcaza 2	90.0	D3 ó D4	13.0	1.75	<b>22.8</b>

**Tabla 3: Determinación de energía de atraque “excepcional” ( $E_e$ )**

### 3.3 Resumen de requerimiento de energía

Como conclusión del análisis energético llevado a cabo, el caso de las estructuras delfin D2 ó D5 se presenta como el más crítico para el diseño, alcanzando los siguientes valores de energía a absorber mediante un adecuado “equilibrio” entre la selección del sistema de defensa y el diseño / verificación de las estructuras:

- Energía de atraque en condición “normal”:  **$E_n = 118.0 \text{ tm}$**
- Energía de atraque en condición “excepcional”:  **$E_e = 147.5 \text{ tm}$**

## 4. SELECCION DEL SISTEMA DE DEFENSA

A partir del análisis energético llevado a cabo y luego de definido el requerimiento de energía a absorber como situación más crítica para el diseño, se seleccionan defensas elásticas tipo “celular” para ser instaladas en cada uno de los 4 dolfines que posee el muelle de combustible.

### Características generales de la defensa:

Denominación comercial:.....Defensa tipo celular SC 1600

Altura de cada defensa:.....h = 1600mm

Cantidad de defensas por delfin de Hº Aº:.....2 unidades

### Característicos de desempeño:

Deformación:..... $\delta = 52.5\%$

Energía absorbida:..... $E_{sd} = 128.2 \text{ tm}$

Fuerza reactiva:..... $Fr = 182.6 \text{ t}$

Deformación:..... $\delta = 55\%$

Energía absorbida:..... $E_{sd} = 135.8 \text{ tm}$

Fuerza reactiva:..... $Fr = 194.0 \text{ t}$

Deformación: .....  $\delta = 58\%$

Energía absorbida: .....  $Esd = 150.0tm$

Fuerza reactiva: .....  $Fr = 220.0t$

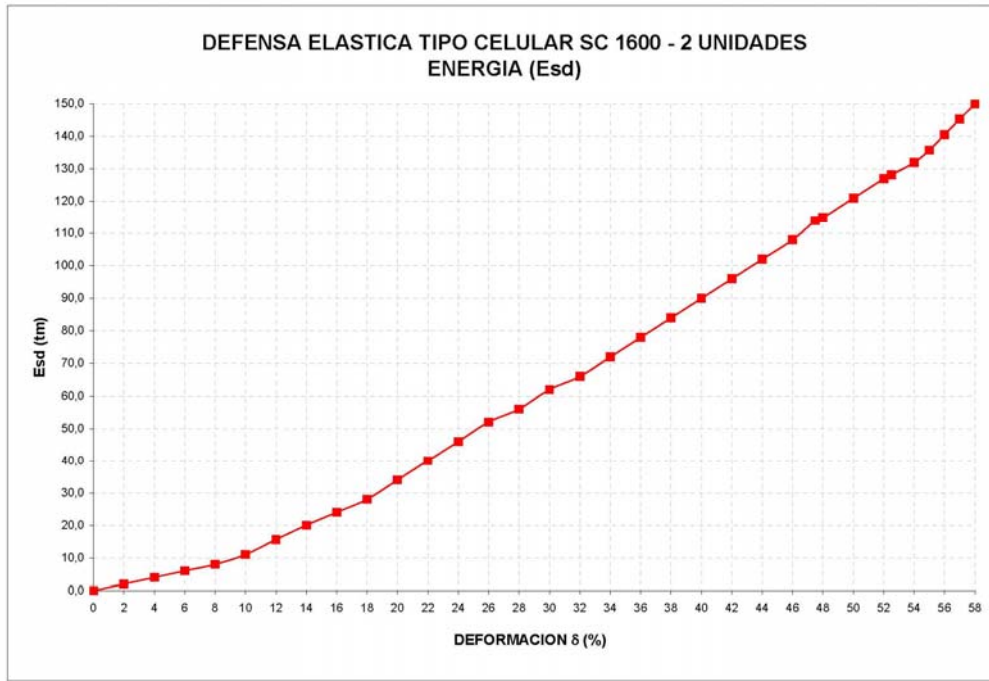


Figura 4: Curva de desempeño de defensa elástica – energía absorbida

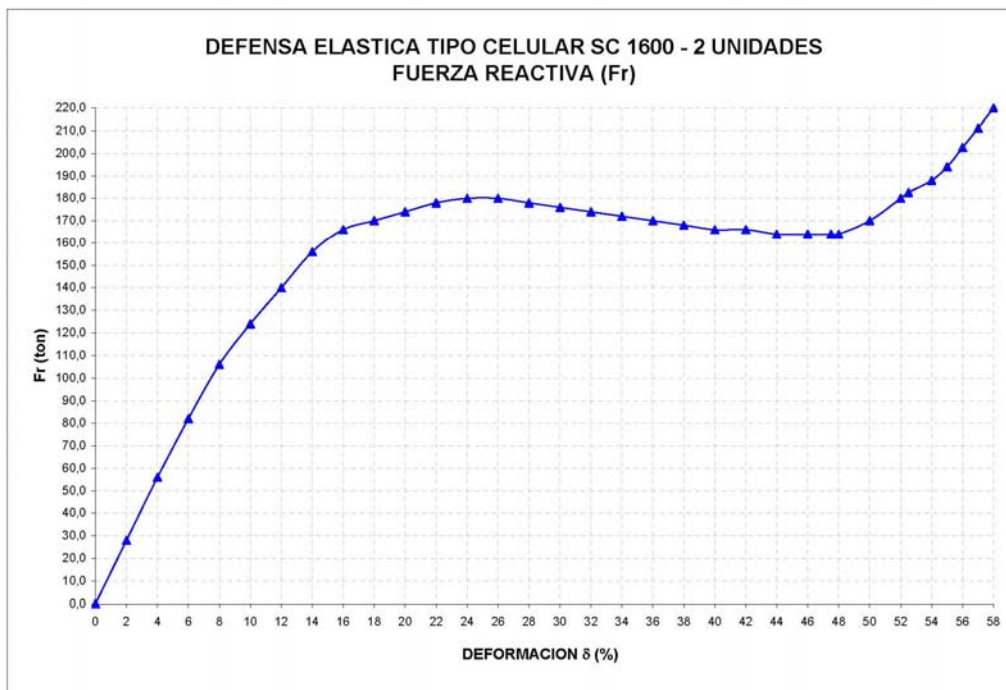


Figura 5: Curva de desempeño de defensa elástica – fuerza reactiva

## 5. DISEÑO Y VERIFICACION DE LAS ESTRUCTURAS

A partir de los valores característicos de desempeño del sistema de defensa seleccionado, se avanza con el procedimiento de diseño y verificación de la estructura independiente tipo "dolphin" desde los puntos de vista energético y estructural, teniendo en cuenta las siguientes pautas (recomendación ROM 0.2-90, punto 4):

- Diseño de la estructura a efectos de resistir, con un coeficiente de seguridad determinado, todas las acciones derivadas del atraque en condiciones "normales" de operación.
- Verificación de la estructura, con un coeficiente de seguridad aceptable, frente a todas las acciones de derivadas del atraque en condiciones "excepcionales" de operación.

### 5.1 Diseño para operaciones de atraque en condición "normal"

#### Verificación energética

Se trabaja con el sistema de defensa bajo las siguientes características de desempeño:

Deformación: .....  $\delta = 52.5\%$

Energía absorbida: .....  $Esd = 128.2tm$

Fuerza reactiva: .....  $Fr = 182.6t$

De ésta manera, se alcanza la siguiente verificación de equilibrio de energías:

$$Esd = 128.2tm \geq 118.0tm = En \Rightarrow (VERIFICA)$$

#### Diseño estructural

La situación de atraque "normal" se ve representada en este caso por la actuación de una fuerza reactiva total  $Fr = 185 ton$ . Se trabaja con el siguiente esquema de cálculo para la estructura "dolphin", hormigón en calidad H-21, acero en calidad ADN-420 y se alcanza un diseño con un coeficiente de seguridad determinado ( $\nu = 1.75$ ) a partir de la aplicación de reglamentaciones vigentes:

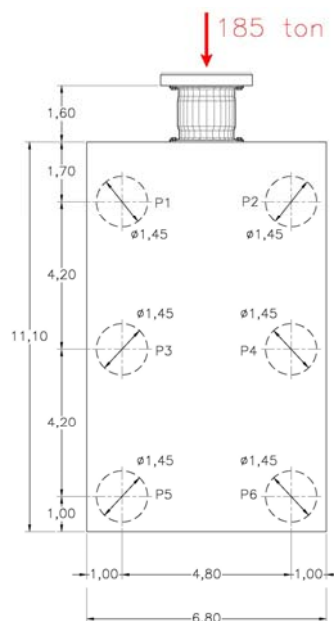


Figura 6: Planteo del diseño estructural

Se obtienen las siguientes solicitaciones en pilotes  $\varnothing 1450\text{mm}$ , indicándose las armaduras adoptadas:

Solicitación	Sección	N (t)	M (tm)	M'' = M+N·(ek+f) (tm)	Armadura adoptada
Flexo Compresión	Superior	- 242.8	489.8	599.1	<b>100 <math>\varnothing</math> 25</b>
	Inferior	- 297.4	391.8	---	<b>70 <math>\varnothing</math> 25</b>
Flexo Tracción	Superior	+ 39.4	489.8	---	<b>100 <math>\varnothing</math> 25</b>
	Inferior	- 15.2	391.8	---	<b>70 <math>\varnothing</math> 25</b>

**Tabla 4: Resultados del diseño estructural**

### 5.2 Verificación para operaciones de atraque en condición “excepcional”

Dentro de las varias opciones que se tiene para llevar adelante la verificación de las estructuras frente a condiciones “excepcionales” de operación, se han adoptado 2 planteos de aplicación al caso que aquí se presenta:

Un primer planteo que cual contempla que la totalidad de la energía desarrollada en condición “excepcional” ( $E_e$ ) es equilibrada por deformaciones compatibles del sistema de defensa ( $E_{sd}$ ) y de la estructura ( $E_{estr}$ ), esto es:

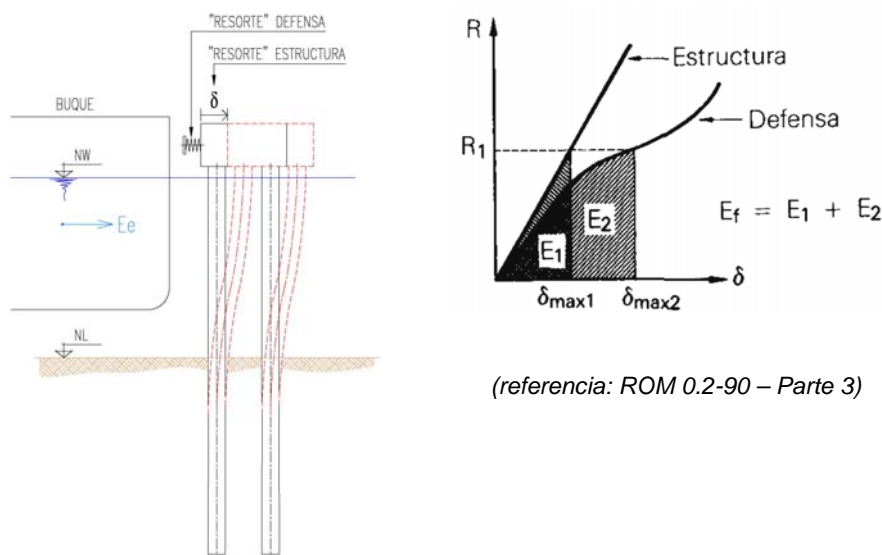
$$E_{sd} + E_{estr} \geq E_e \quad (2)$$

Un segundo planteo que contempla que la totalidad de la energía desarrollada en condición “excepcional” ( $E_e$ ) es equilibrada únicamente por el sistema de defensa ( $E_{sd}$ ) transmitiendo mayor fuerza reactiva a la estructura, esto es:

$$E_{sd} \geq E_e \quad (3)$$

#### 5.2.1. Primer planteo de verificación

Se plantea que la totalidad de la energía desarrollada durante una condición de atraque “excepcional” es equilibrada por el sistema de defensa y por la propia deformación de la estructura:



**Figura 7: Planteo de verificación energético – estructural**

**Verificación energética**

Se trabaja con el sistema de defensa bajo las siguientes características de desempeño:

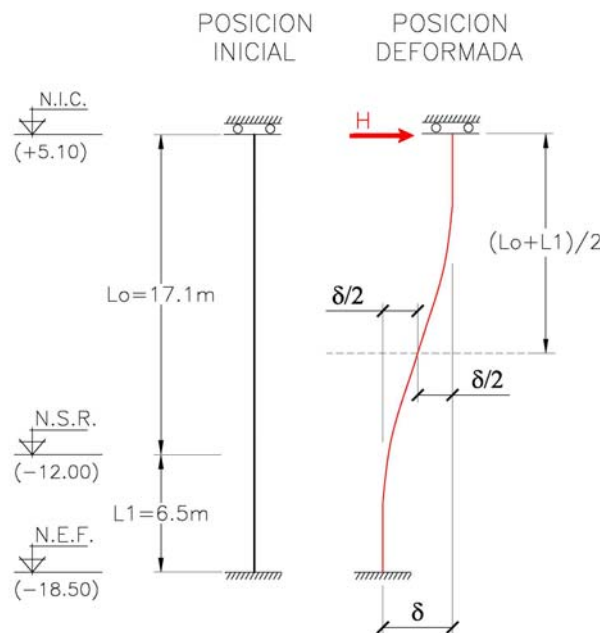
Deformación: .....  $\delta = 55\%$

Energía absorbida: .....  $E_{sd} = 135.8tm$

Fuerza reactiva: .....  $Fr = 194.0t$

En lo que hace a la energía que es capaz de absorber la estructura, se tiene que la deformación propia de la misma constituye un mecanismo de absorción para la situación de ataque "excepcional".

Para una fuerza reactiva total  $Fr = 194 ton$ , se determina la capacidad de absorción de energía a través de la deformación de los pilotes, aproximando los resultados a un funcionamiento tipo "lineal":



**Figura 8: Planteo de cálculo para determinación de  $E_{estr}$**

Desplazamiento horizontal promedio de la cabeza de un pilote:

$$\frac{\delta}{2} = \frac{H \cdot \left(\frac{L_0 + L_1}{2}\right)^3}{3 \cdot E \cdot J} \Rightarrow \frac{\delta}{2} = \frac{39ton \cdot \left(\frac{17,10m + 6,50m}{2}\right)^3}{1.302.000tm^2} \Rightarrow \delta = 0,10m$$

Energía promedio absorbida por la deformación de un pilote:

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \delta \Rightarrow E_p = \frac{1}{2} \cdot 39ton \cdot 0,10m \Rightarrow E_p = 1,95tm$$

Energía absorbida por la estructura (N = 6 pilotes):

$$E_{estr} = N \cdot E_p \Rightarrow E_{estr} = 6 \cdot 1.95tm \Rightarrow E_{estr} = 11.7tm$$

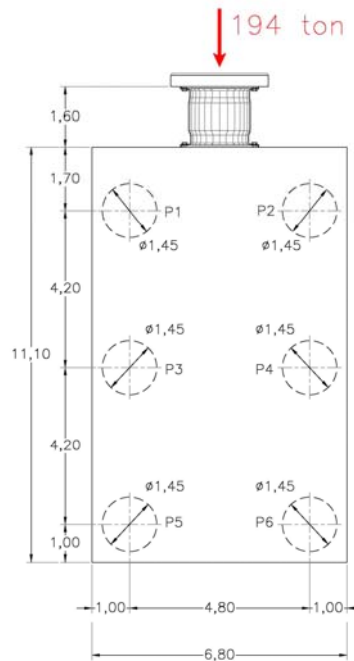
De ésta manera, se alcanza la siguiente verificación de equilibrio de energías:

$$\boxed{E_{sd} + E_{estr} = 135.8tm + 11.7tm = 147.5tm \geq 147.5tm = E_e \Rightarrow (VERIFICA)}$$



**Verificación estructural**

La situación de ataque "excepcional" se ve representada en este caso por la actuación de una fuerza reactiva total  $Fr = 194 \text{ ton}$ . Se trabaja con el siguiente esquema de cálculo para la estructura "dolphin", hormigón en calidad H-21, acero en calidad ADN-420 y se alcanza una verificación de un coeficiente de seguridad aceptable ( $v = 1.70$ ):



**Figura 9: Planteo de verificación estructural**

**5.2.2. Segundo planteo de verificación**

Se plantea que la totalidad de la energía desarrollada durante una condición de ataque "excepcional" es equilibrada únicamente por el sistema de defensas (esto es: asignar  $E_{estr} = 0 \text{ tm}$ ) transmitiendo una mayor fuerza reactiva a la estructura:

**Verificación energética:**

Se trabaja con el sistema de defensa bajo las siguientes características de desempeño:

Deformación: .....  $\delta = 58\%$

Energía absorbida: .....  $E_{sd} = 150.0 \text{ tm}$

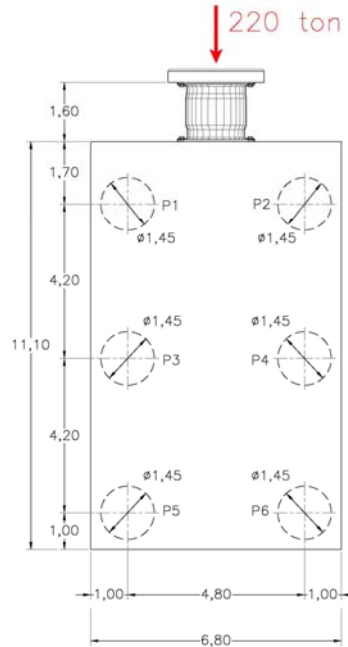
Fuerza reactiva: .....  $Fr = 220.0 \text{ t}$

De ésta manera, se alcanza la siguiente verificación de equilibrio de energías:

$E_{sd} + E_{estr} = 150.0 \text{ tm} + 0 \text{ tm} = 150.0 \text{ tm} \geq 147.5 \text{ tm} = E_e \Rightarrow \text{(VERIFICA)}$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Verificación estructural**

La situación de ataque "excepcional" se ve representada en este caso por la actuación de una fuerza reactiva total  $Fr = 220 \text{ ton}$ . Se trabaja con el siguiente esquema de cálculo para la estructura "dolphin", hormigón en calidad H-21, acero en calidad ADN-420:



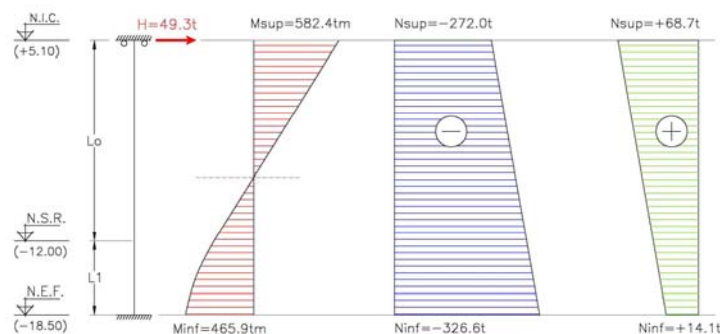
**Figura 10: Planteo de verificación estructural**

La determinación del coeficiente de seguridad supone la realización de los siguientes pasos:

- Resolución de la estructura "dolphin" para la fuerza reactiva total  $Fr = 220 \text{ ton}$  de manera de obtener las solicitaciones "características" ( $N;M$ ) para las secciones superior e inferior del pilote más cargado.
- Determinación de las solicitaciones "últimas" ( $N_u;M_u$ ) a partir del planteo de planos últimos de deformación en las secciones superior e inferior del pilote más cargado.
- Determinación del coeficiente de seguridad ( $\nu$ ) mediante la comparación de los valores "últimos" ( $N_u;M_u$ ) frente a los valores correspondientes a la actuación de la fuerza reactiva  $Fr = 220 \text{ ton}$  ( $N;M$ ).

➤ Resolución de la estructura, determinación de solicitaciones "características" ( $N;M$ ):

Para éste planteo de cálculo, la máxima carga horizontal que actúa sobre un pilote es  $H = 49.3 \text{ ton}$ , alcanzándose las siguientes solicitaciones características sobre los mismos:



**Figura 11: Solicitaciones "características" obtenidas**

Resumen de resultados obtenidos:

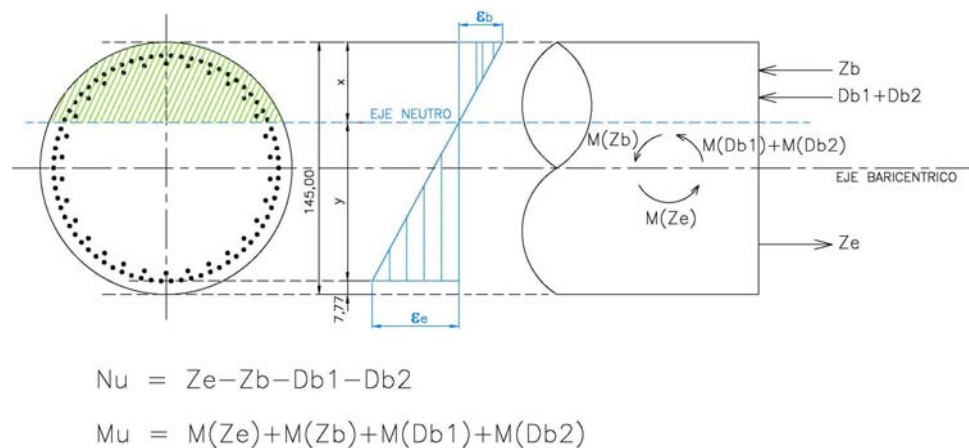
Solicitación	Sección	N (t)	M (tm)	M' = M+N·(ek+f) (tm)
Flexo Compresión	Superior	<b>- 272.0</b>	582.4	<b>704.4</b>
	Inferior	<b>- 326.6</b>	<b>465.9</b>	---
Flexo Tracción	Superior	<b>+ 68.7</b>	<b>582.4</b>	---
	Inferior	<b>+ 14.1</b>	<b>465.9</b>	---

**Tabla 5: Solicitaciones “características” en pilotes para la actuación de  $Fr = 220 \text{ ton}$**

➤ Determinación de solicitaciones “últimas” ( $N_u; M_u$ ):

Se determinan los valores de solicitaciones “últimas” a partir del planteo de planos de deformación “últimos” tanto para la sección superior como para la sección inferior del pilote mas cargado:

La determinación de estas solicitaciones últimas se realiza integrando las tensiones actuantes en cada material a partir del plano de deformaciones planteado. Esquema representativo del planteo:



**Figura 12: Planteo para la determinación de solicitaciones “últimas”**

Resumen de resultados obtenidos:

Solicitación	Sección	Diámetro (m)	Fe	Hormigón	Acero	Planos últimos		Solicitaciones últimas	
				H-21 $\beta_r$ (kg/cm <sup>2</sup> )	ADN-420 $\beta_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_b$ (‰)	$\epsilon_e$ (‰)	$N_u$ (t)	$M_u$ (tm)
Flexo Compresión	Superior	1.45	100ø25	175	4200	-3.5	+5.0	<b>- 433</b>	<b>1117</b>
	Inferior	1.45	70ø25	175	4200	-3.5	+4.6	<b>- 640</b>	<b>919</b>
Flexo Tracción	Superior	1.45	100ø25	175	4200	-2.5	+5.0	<b>+ 110</b>	<b>946</b>
	Inferior	1.45	70ø25	175	4200	-2.3	+5.0	<b>+ 22</b>	<b>711</b>

**Tabla 6: Solicitaciones “últimas” en pilotes para las secciones resistentes**

➤ Determinación del coeficiente de seguridad (v):

El valor del coeficiente de seguridad se determina a partir de la relación de valores correspondientes a solicitaciones “últimas” frente a valores de solicitaciones calculadas para  $Fr = 220 \text{ ton}$ .

Se acompaña tabla con resultados alcanzados, considerando a los coeficientes de seguridad obtenidos como aceptables:

Solicitud	Sección	Solicitaciones últimas		Solicitaciones para $Fr = 220 \text{ t}$		Coeficientes de seguridad	
		$N_u$ (t)	$M_u$ (tm)	$N$ (t)	$M$ (tm)	$v_N = \frac{N_u}{N}$	$v_M = \frac{M_u}{M}$
Flexo Compresión	Superior	-433	1117	-272.0	704.4	<b>1.59</b>	<b>1.59</b>
	Inferior	-640	919	-326.6	465.9	<b>1.96</b>	<b>1.97</b>
Flexo Tracción	Superior	+110	946	+68.7	582.4	<b>1.60</b>	<b>1.62</b>
	Inferior	+22	711	+14.1	465.9	<b>1.56</b>	<b>1.53</b>

**Tabla 7: Coeficientes de seguridad de la estructura en condición de ataque “excepcional”**

## 6. COMENTARIOS FINALES

- Se ha presentado un caso de aplicación práctica de diseño y verificación de una estructura independiente de ataque tipo “dolphin” perteneciente a una terminal portuaria que opera con combustibles líquidos, ubicada en el ámbito fluvial local dentro del Sistema de Navegación Troncal.
- En el desarrollo de éste caso de aplicación se ha intentado alcanzar un adecuado “equilibrio” entre la selección de un sistema de defensas flexible, el diseño y verificación de la estructura resistente y la absorción de energía del conjunto, de manera de dar respuesta a estados de carga correspondientes a ataque en situaciones “normal” y “excepcional” (los cuales se diferencian significativamente).
- En referencia a la selección de un sistema de defensas flexibles para este tipo de estructuras, la aplicación de las recomendaciones actuales conduce a adoptar unidades de mayor tamaño. De ésta manera se propone trabajar en condiciones de ataque “normales” con deformaciones menores a las usualmente adoptadas en el ámbito local y así conservar un rango de deformaciones que permita aportar un “plus” de energía si se presentase una operación de ataque “excepcional”.
- En referencia al diseño y verificación de la estructura resistente, el coeficiente de seguridad que se obtiene durante la etapa de diseño en el estado “de servicio” para operaciones de ataque “normales” resulta determinado ( $v = 1.75$ ) mediante la aplicación de reglamentaciones vigentes. Para el caso que aquí se presenta, la verificación de la estructura frente a una condición de ataque “excepcional”, conduce a coeficientes de seguridad que se aprecian como aceptables ( $v = 1.5 / 1.6 / 1.7$ ).

- En referencia a la absorción de energía que materializa el conjunto (sistema de defensa + estructura tipo “dolphin”) se tiene que la deformación propia de la estructura constituye un mecanismo de absorción válido para cualquier situación de diseño. La capacidad de absorción de energía que cabe asignarle a la estructura tipo “dolphin” se propone dentro del orden del 10% del valor de la energía que absorbe el sistema de defensa.
- Se acompaña a continuación una tabla resumen de las verificaciones llevadas a cabo:

Situación a verificar	Verificación energética				Verificación estructural			
	<i>E</i> (tm)	$\delta$ (%)	<i>Esd</i> (tm)	<i>Eestr</i> (tm)	Verificación (tm)	<i>Fr</i> (ton)	<i>v seguridad</i>	Observación
Normal ( <i>En</i> )	118.0	52	128.2	---	<b>128.2 <math>\geq</math> 118.0</b>	185	<b>1.75</b>	Determinado
Excepcional ( <i>Ee</i> )	147.5	55	135.8	11.7	<b>147.5 <math>\geq</math> 147.5</b>	194	<b>1.70</b>	Aceptable
Excepcional ( <i>Ee</i> )	147.5	58	150.0	---	<b>150.0 <math>\geq</math> 147.5</b>	220	<b>1.50 / 1.60</b>	Aceptable

**Tabla 8: Resumen de las verificaciones llevadas a cabo**

## 7. REFERENCIAS

A los efectos de la realización del presente trabajo han sido de aplicación las siguientes recomendaciones:

- EAU (2004) Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways, 8th Edition. Ernst & Sohn.
- PIANC (2002) Guidelines for the design of fender systems: 2002. Report of Working Group 33, PIANC General Secretariat, Brussels.
- ROM 0.2-90, Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias (1990).