

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS  
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS  
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS



*Ampliación del Puerto de Caleta Córdova*

**CONSIDERACIONES SOBRE LOS  
ESTUDIOS MEDIANTE MODELACION MATEMÁTICA  
PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE**

*LHA-252-02-06*

*Octubre, 2006*

# **CONSIDERACIONES SOBRE LOS ESTUDIOS MEDIANTE MODELACION MATEMATICA PARA LA CARACTERIZACION DEL OLEAJE**

## **RESUMEN:**

Se presenta un análisis comparativo de resultados de altura de ola determinadas para el proyecto de las obras , tanto para el proyecto original, como para las obras de ampliación.

## **PALABRAS CLAVE:**

Olas – propagación de olas – rotura de olas – Caleta Córdova

Informe	LHA 252-02-06
Fecha	Octubre, 2006
PROYECTO	491
COMITENTE	Pcia. del Chubut.

**Director del Laboratorio de Hidráulica**

Ing. Julio De Lio

**Jefe del Programa de Hidráulica Marítima**

Ing. R. D. Castellano

**EQUIPO DE TRABAJO**

Téc. Mec. Carlos Haspert

Ing. Nicolás Tomazin

M.M.O. Sebastián Peralta

## INDICE DE MATERIAS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Datos de Base .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Aspectos metodológicos.....</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Técnicas e hipótesis de cálculo.....</b>	<b>4</b>
	4.1 Modelación Numérica: .....	4
	4.2 Criterios de Rotura de olas: .....	5
	4.3 Otros criterios de rotura.....	6
<b>5</b>	<b>Evaluación comparativa de resultados.....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Modelación mediante BOUSSINESQ.....</b>	<b>10</b>

*Ampliación del Puerto de Caleta Córdova*

**CONSIDERACIONES SOBRE LOS  
ESTUDIOS MEDIANTE MODELACION MATEMATICA  
PARA LA CARACTERIZACION DEL OLEAJE**

## **1 Introducción**

Con referencia a las obras de ampliación del puerto de Caleta Córdova, el INA realizó oportunamente<sup>1</sup> una evaluación de las olas incidentes en el área con vistas tanto a la optimización del lay-out de las nuevas obras como al dimensionamiento de la coraza de protección de la misma.

Los estudios se realizaron mediante modelación matemática de la propagación de olas desde una posición en aguas profundas hasta el entorno de las obras.

Comparando el estudio indicado con el realizado en oportunidad del proyecto de la obra actual<sup>2</sup>, surgen algunas diferencias en los resultados de evaluación de la altura de olas en el entorno de las obras. Estas diferencias son importantes en lo que se refiere a olas generadas por el viento localmente, y son particularmente notorias en el área del viaducto y en el lateral Este del islote de protección existente.

---

<sup>1</sup> *Ampliación del Puerto de Caleta Córdova. Estudio Mediante Modelación Matemática para la Optimización del Proyecto. Informe Final.* INA. Laboratorio de Hidráulica. LHA-252-01-05. Noviembre 2005.

<sup>2</sup> *Complejo Pesquero Caleta Córdova. Proyecto de Muelle.* Consejo Federal de Inversiones – Provincia de Chubut. 1980.

Un análisis preliminar para el dimensionamiento de la coraza de protección del talud de las nuevas obras fue realizado por SOGREAH<sup>3</sup>. Este análisis se limita al área de emplazamiento de la prolongación de la escollera. Los resultados también mostraron diferencias tanto con respecto al estudio del Consejo Federal de Inversiones (CFI), como a los resultados del INA.

Se evalúan diferencias y coincidencia de estos estudios.

Hay tres fuentes básicas de diferencias que pueden justificar las diferencias de resultados:

- 1) Los datos de base utilizados
- 2) La metodología aplicada
- 3) Las técnicas e hipótesis de cálculo (modelos matemáticos)

## 2 Datos de Base

El Estudio CFI se basó en datos meteorológicos. Las olas oceánicas se evaluaron mediante el análisis de cartas sinópticas meteorológicas (en escala regional) de 1 año, según las metodologías de la época. Las olas de viento se evaluaron a partir de datos de viento en Comodoro Rivadavia (1937-1947). Ambos conjuntos de datos se determinaron en un punto de aguas relativamente profundas.

El estudio del INA se apoyó en una serie cronológica (10 años, 1996-2005) de olas en un punto mar afuera realizado mediante un modelo Global de Olas (UKMO), el que a su vez se apoya en información meteorológica producida por un modelo climático global. La

---

<sup>3</sup> *Abriego de Muelle Caleta Córdova (Argentina Chubut) Solución Core-Loc™ Estudio Preliminar.*  
SOGREAH. Octubre 2005

información producida consiste en olas de viento, olas oceánicas y viento en el punto de cálculo. La dirección de propagación de olas y de procedencia del viento está clasificada en 16 direcciones (cada sector de 22,5 °).

Al sitio de emplazamiento pueden llegar olas oceánicas (olas que se propagan fuera de su área de generación por viento) y olas locales (generadas localmente por el viento). Las características de estos dos tipos de olas son bien diferentes y fueron tratadas de modo separado.

### 3 Aspectos metodológicos

La metodología aplicada en el estudio del CFI consistió en la aplicación de ábacos que permiten determinar las características del oleaje a partir de datos de viento. Como fuente de información se utilizaron registros de viento de Comodoro Rivadavia. Se escogieron para el cálculo de olas generadas por viento las intensidades correspondientes a los límites superiores de las categorías en los que se clasificaron las observaciones de los 10 años utilizadas. Las categorías de intensidad son:

Fuerza (escala Beaufort)	Velocidad (nudos)
4	11-16
5	17-21
6	22-27
7	28-33
8	34-40
9	41-47

Los vientos están clasificados además en 8 direcciones (cada sector es de 45°). Los datos generados corresponden a 40 m de profundidad (20 brazas)

La evaluación del oleaje en el entorno de las obras realizada por el INA consistió en la determinación de olas extremas probables en aguas profundas y en el cálculo de los valores en las cercanías de la obra mediante modelación matemática de la propagación y transformación de las olas hasta la región costera. Los datos fueron analizados estadísticamente y se escogieron valores probables a 50 años.

## 4 Técnicas e hipótesis de cálculo

### 4.1 Modelación Numérica:

El estudio del CFI utiliza un modelo de rayos. El mismo resuelve la propagación de una onda considerando exclusivamente efectos de refracción y bajío. Un rayo representa un frente de onda de ancho infinitamente pequeño. Su celeridad de avance y dirección dependen de la conformación local del lecho marino. La hipótesis básica es que la energía total de la ola entre dos rayos contiguos se mantiene constante. Estos modelos no incorporan ningún proceso de transferencia y disipación de energía (especialmente rotura), de manera que tienen limitaciones en su aplicación especialmente en áreas costeras, especialmente cuando la topografía del lecho marino es compleja como en el caso de Caleta Córdova. Cuando dos rayos contiguos se aproximan, la energía por unidad de ancho aumenta y en consecuencia la altura de la ola. Esto exige incorporar algún criterio de rotura para limitar el crecimiento de las olas en determinadas circunstancias. En el estudio CFI se adoptó  $H_{\max}=d$ .

El estudio del INA utilizó el modelo numérico **SWAN** (Simulating **WA**ves **N**earshore, L.H. Holthuijsen, N. Booij y otros), versión 40.41 (2004), ha sido desarrollado por la Delft University of Technology, Holanda.

El mismo se basa en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas  $N(\sigma, \theta) = E/\sigma$ , donde E es la densidad energía (energía

cinética más potencial por unidad de superficie),  $\sigma$  la frecuencia relativa y  $\theta$  la dirección de propagación.

La ecuación contiene términos que representan las fuentes y sumideros de energía (energía transferida por el viento, energía disipada y energía transferida entre olas por efectos no lineales). La disipación de energía contempla procesos como rotura por empinamiento, la fricción con el fondo y la rompiente inducida por el fondo.

Las interacciones no lineales ola-ola son las responsables del intercambio de energía entre componentes de diferentes frecuencias del mismo espectro, son las responsables de redistribuir la energía entre dichas componentes y también están representadas en SWAN.

SOGREAH no realizó una modelación numérica para describir el patrón de propagación de las olas en la región, sino que se limitó a aplicar el criterio de rotura de Goda para olas aleatorias para estimar la máxima ola posible en función de la profundidad local de la nueva obra.

#### **4.2 Criterios de Rotura de olas**

La rotura de olas por profundidad limitada es un mecanismo de disipación de energía que es importante en el entorno de la actual escollera (islote) que ha aprovechado precisamente la existencia de bajos fondos provistos por la restinga sobre la cual se apoya, la que funciona entonces como un rompeolas natural, limitando la llegada de las olas más altas a la estructura.

El estudio del CFI fijó como criterio de rotura de olas por profundidad  $H/d=1$ , donde  $H$  es la altura de ola y  $d$  la profundidad media.

En la modelación del INA, aunque **SWAN** también utiliza básicamente un criterio de rotura del tipo  $H/d = \text{constante}$ , el mismo se incorpora en un modelo que, basado en la

tasa de disipación de energía (Batjes y Janssen, 1978), se aplica a la rotura de las componentes de ola en todo el espectro, extendido incluso al caso multidireccional. En la ecuación de gobierno de SWAN, el término de disipación por rotura por profundidad  $S_{ds,br}$  se expresa como:

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = D_{tot} \frac{E(\sigma, \theta)}{E_{tot}}$$

donde  $D_{tot}$  ( $<0$ ) es la tasa de disipación de energía  $E$  de acuerdo a Batjes y Janssen, determinado como:

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left( \frac{\sigma}{2\pi} \right) H_m^2$$

en la que  $Q_b$  es la fracción de las olas rompientes en el espectro, determinada por:

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_m^2}$$

$H_m$  es la máxima ola que puede existir en la profundidad y  $\sigma$  la frecuencia media. Para determinar  $H_m$  SWAN utiliza el criterio  $H_m = \gamma \cdot d$ , con  $\gamma = 0.73$ .

### **4.3 Otros criterios de rotura**

Algunos criterios de rotura por profundidad adicionales se presentan a los efectos de para evaluar altura de ola máxima al pié del islote y en el área del viaducto, donde estos procesos son dominantes.

#### **Criterio de McCOWAN**

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.78$$

**Criterio del CERC**

El Shore Protection Manual (SPM, 1984) da algunas formulas alternativas para estimación de la máxima altura de ola rompiente.

$$\frac{H_b}{d_b} = \frac{B}{\left(1 + A \frac{d_b}{L}\right)}$$

con

$$A = 6.963 (1 - e^{-19m})$$

$$B = \frac{1.56}{(1 + e^{-19.5m})}$$

m es la pendiente del lecho.

**Criterio de GODA para olas aleatorias**

$$H_{S_b} = \begin{cases} K_s H'_o & d/L_o \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_o H'_o + \beta_1 d), \beta_{\max} H'_o, K_s H'_o\} & d/L_o < 0.2 \end{cases}$$

donde

$$\beta_o = 0.028 \left(\frac{H'_o}{L_o}\right)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta)$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \theta)$$

$$\beta_{\max} = \max \left\{ 0.92, 0.32 \left(\frac{H'_o}{L_o}\right)^{-0.29} \exp(2.4 \tan \theta) \right\}$$

$\tan\theta=m$  (pendiente del lecho marino)

**Criterio de IVERSSEN**

$$\frac{H_b}{d_b} = C_b m^\alpha \left( \frac{d_b}{L_o} \right)^\beta$$

$C_b=0.758$ ,  $\alpha = 0.110$  y  $\beta = 0.847$  para  $0.020 < m < 0.100$

## 5 Evaluación comparativa de resultados

De 6 escenarios comparables, en algunos casos (que se indican en la Tabla 1) la ola determinada por INA resulta inferior a la determinada por el CFI. Las diferencias + (es decir cuando CFI sobreestima respecto de INA) llegan hasta 1,90 m en el caso de olas del SE que llegan al pie del islote.

**TABLA 1**

UBICACIÓN	CFI						INA					
	S	SE	ESE	E	ENE	NE	S	SE	ESE	E	ENE	NE
Extremo Norte	2.4	5.0	5.2	5.2	3.7	2.5	3.3	3.3	3.3	3.7	3.8	3.4
Islote	5.2	5.2	5.0	3.7	3.4	2.0	3.2	3.3	3.3	3.4	3.5	3.2
Viaducto	3.0	3.7	3.4	3.6	2.6	2.0	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3

Una diferencia sustancial en la estimación de las olas en el entorno del islote y el área del viaducto es el criterio de rotura que se adopte, dado que este mecanismo de disipación es el dominante en estas dos regiones. La aplicación de la ec. del SPM 1984 para  $m = 1/100$ ,  $T = 8$  s y  $d_b = 5,20$  m (profundidad al pie de las obras actuales en la isla) resulta  $H_b$

---

≈ 4,20 a 4,30 m. Es decir **prácticamente 1 m menos** que los valores indicados en la Tabla 12 del estudio de CFI.

Si se aplica la metodología de Goda para olas irregulares, con iguales hipótesis resulta  $H_b = 3,30\text{m}$  en la isla. Si se considera un periodo de 12 s,  $H_b = 3,50\text{ m}$ . Otros criterios de rotura indican siempre valores inferiores a los de CFI. Este coincide con el cálculo realizado por INA ( $H = 3,53\text{ m}$ ) y es además concordante con la evaluación realizada por SOGREAH para cota de fondo 2 m .

Existen otras fuentes de diferencias. Para el caso particular de olas del ESE, CFI partió de una ola de 5 m (en  $d = 40\text{ m}$ ) mientras el INA (UKMO) lo hizo con una de 3,70 m.

El valor de CFI de  $H = 5\text{ m}$  surge (Tablas 7<sup>a</sup> y 7<sup>b</sup> del estudio) de promediar  $H = 5,5\text{ m}$  (dir SE) y  $H = 4,40\text{ m}$  (dir E), ya que dada la resolución en dirección de los datos de viento disponibles, no existe registro de viento del ESE sobre el que realizar el cálculo en forma directa para esa dirección. Las olas del SE determinadas por CFI resultan de vientos de 47 nudos ( $<24\text{ m/s}$ ) y las del E de 40 nudos ( $20\text{ m/s}$ ). Las intensidades de viento utilizadas en el cálculo son en realidad los extremos superiores del intervalo de la categoría.

El INA obtiene el dato directamente del registro de UKMO. En los registros del UKMO los máximos vientos del E son de  $15\text{ m/s}$  (es decir considerablemente inferiores a los de CFI) y los del SE de  $22,5$ . Si se aplican las ecuaciones de crecimiento de olas para estas dos condiciones y se promedian los resultados, las más altas olas del ESE resultan de  $3,70\text{ m}$  en aguas profundas (se requiere duración aproximada de 12 hs de este viento para generar esa ola, mientras que en las planillas de CFI Tabla 7a , la duración máxima de vientos intensos asumida es de 8 horas).

Con referencia a las olas resultantes en el extremo norte del islote y la entrada a la Caleta, donde se construirá la prolongación de la escollera, el lecho marino en esta

ubicación presenta cotas comprendidas entre  $-6$  y  $-8$  m. El estudio preliminar de SOGREAH arroja valores de  $H_b \approx 6$  m en esta zona.

Si se considera un nivel de marea de  $+7$  m, la profundidad total resulta de  $13$  a  $15$  m, la aplicación directa del criterio de rotura de Goda para olas aleatorias resulta efectivamente en  $H_b \approx 6$  m. Sin embargo este análisis no contempla los efectos de refracción y otros procesos (fricción del fondo) que contribuyen fuertemente a la reducción de la altura de ola en su propagación desde aguas profundas hasta este sitio, como lo ha mostrado la modelación a escala regional realizada por el INA.

Para las direcciones E a ESE la estimación del CFI produce olas mayores que las del INA en esta zona. Por el contrario, para olas procedentes del NE y ENE el INA arroja valores superiores.

## **6 Modelación mediante BOUSSINESQ**

Con el propósito de verificar los resultados obtenidos en el estudio del INA, se realizó la aplicación del modelo BOUSS-2D para el estudio de la propagación del oleaje en la zona costera de Caleta Córdova.

BOUSS-2D es un modelo perteneciente al sistema SMS (Surface Modeling System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de U. S. Army. Está basado sobre ecuaciones tipo Boussinesq que consideran la conservación de masa y momento para la propagación de ondas en aguas intermedias y poco profundas. Las ecuaciones originales han sido modificadas para incluir en la modelación distintos procesos físicos de interés capaces de producir modificaciones en las características del oleaje. Así, el modelo es apto para simular los siguientes fenómenos:

Bajío.

Refracción.

Difracción.

Reflexión parcial o total.

Fricción de fondo.

Interacción no lineal entre distintas componentes de onda.

Rompimiento de olas y Run-up.

Corrientes inducidas por acción del oleaje.

Interacción entre olas y corrientes.

Las ecuaciones son resueltas por el método numérico de diferencias finitas, por lo cual, la aplicación del modelo requiere la construcción una grilla de cálculo como la que se muestra en la **Figura 1 (Anexo I)**. En esta figura se puede observar la costa de Caleta Córdova, el Islote para la protección del Muelle contra la acción del oleaje, y la zona desde la cual se propagan las olas (wave maker).

En el entorno del Islote se dispusieron un total de 18 puntos de control coincidentes con las ubicaciones seleccionadas en el estudio del INA. La zona de generación del oleaje para esta grilla se encuentra sobre la isobata de  $-12$  m.

Para este análisis se seleccionaron tres escenarios de cálculo constituidos por valores de altura  $H_s$  y período pico  $T_p$  del oleaje en la zona de wave maker surgidos del resultado de la modelación desarrollada en el estudio del INA. Estos valores se corresponden con las situaciones en las cuales se observaron las condiciones más exigentes para estabilidad de la estructura:

- 1) Ola de viento Dirección E ( $90^\circ$ )  $H_s=6$  m  $T_p=13$  s.
- 2) Ola de viento Dirección ENE ( $75^\circ$ )  $H_s=6.0$  m  $T_p=13$ s.
- 3) Swell Dirección E ( $90^\circ$ )  $H_s=4$  m  $T_p=16.5$  s.

Todas las simulaciones se realizaron considerando un nivel de pleamar de  $+7$  m.

Los resultados se indican en la **Tabla 2** y puede notarse que son comparables a los valores determinados en el estudio realizado por el INA <sup>(1)</sup>. Cabe señalar que los valores indicados en la Tabla 2 han sido determinados a una distancia aproximada de 40 m del pie de la obra. Las mayores alturas de ola se encuentran sobre el islote.

**TABLA 2**

UBICACIÓN	ESCENARIOS		
	1	2	3
Extremo Norte	2.9	3.4	2.5
Islote	3.7	3.5	3.7
Viaducto	2.0	2.3	2.1

En las **Figuras 2, 3 y 4** (Anexo I) se muestra la distribución espacial de isoclinas de altura de ola para los escenarios indicados. Las Figuras muestran claramente los fuertes efectos de transformación de las olas por efecto de la topografía del lecho marino.

## 7 CONCLUSIONES

- Con el propósito de fundamentar algunas diferencias encontradas en la altura de ola en las proximidades de las obras determinadas por distintas fuentes, se han evaluado los datos de base utilizados, la metodología aplicada y las técnicas e hipótesis de cálculo adoptadas para los modelos matemáticos en cada una de ellas.
- Las diferencias en los valores estimados (CFI) en el lateral del actual islote se deben primordialmente a la adopción de un criterio de rotura conservativo ( $H/d=1$ ), en el que no se tienen en cuenta tampoco las características aleatorias (distribución espectral) del oleaje incidente. Las técnicas de cálculo disponibles en la época de realización de los estudios de base para el proyecto justifican

- Las olas determinadas en la ubicación correspondiente a las nuevas obras previstas (SOGREAH), si bien han utilizado un criterio de rotura de olas para una distribución aleatoria (o espectral), no han tenido en cuenta los importantes procesos de refracción que sufren las olas en su propagación desde aguas más profundas hasta el área costera.
- Dos modelaciones independientes realizadas por el INA mediante SWAN v.40.11 y SMS BOUSS2D, arrojaron valores comparables.



## **ANEXO I**