

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



EVALUACIÓN DEL MOVIMIENTO DE ENROCADO  
EN LAS PROXIMIDADES DE LA ESCOLLERA SUR  
DEL PUERTO DE QUEQUEN

LHA 278-01-06  
*Enero, 2007*

**LABORATORIO DE HIDRAULICA**



---

## EVALUACION DEL MOVIMIENTO DE ENROCADO EN LAS PROXIMIDADES DE LA ESCOLLERA SUR DEL PUERTO DE QUEQUEN

### RESUMEN

Se evalúa el riesgo de movilidad por acción de olas de un derrame de enrocado al pie de la cara interna de la escollera Sur del puerto de Quequén. La evaluación se realiza mediante la aplicación de ecuaciones de estabilidad de enrocados y resultados de una modelación matemática de propagación de olas en el área realizada previamente

### PALABRAS CLAVE

Estabilidad de enrocados – olas – puerto Quequén

Informe	LHA 278-01-06
Fecha	Enero, 2007
PROYECTO	676
COMITENTE	HIDRA S.A.



---

INA  
LABORATORIO DE HIDRAULICA

DIRECTOR

*Ing. J.C. De Lio*

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

*Ing. R. D. Castellano*

---

Informe producido por

*Ing. R. D. Castellano*

Equipo de trabajo

*Ing. N. Tomazin  
Sr. C.A. Haspert  
Sr. S.L. Peralta*



---

## INDICE DE MATERIAS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>DESCRIPCION DE LA SITUACIÓN ACTUAL</b>	<b>3</b>
4.1	Perfiles transversales	3
4.2	Temporales ocurridos en el área	4
4.3	Cambios morfológicos del derrame.	5
4.4	Curvas granulométricas	5
<b>5</b>	<b>MODELACIÓN MATEMATICA</b>	<b>8</b>
5.1	Modelo Matemático	8
5.2	Escenarios modelados	11
5.3	Resultados	13
<b>6</b>	<b>MOVILIDAD DEL MATERIAL</b>	<b>16</b>
6.1	Estabilidad de taludes de enrocado por acción del oleaje	17
6.2	Movilidad de sedimentos no cohesivos por acción de olas y corrientes	25
6.3	Aplicación	28
6.4	Resultados	29
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>32</b>

# EVALUACION DEL MOVIMIENTO DE ENROCADOS EN LAS PROXIMIDADES DE LA ESCOLLERA SUR DEL PUERTO DE QUEQUEN

**Enero , 2007**

## **1 INTRODUCCION**

Durante la fase de construcción de la escollera sur del puerto de Quequén, algunos temporales ocurridos en el área produjeron el movimiento de parte del material de núcleo y subcapas de apoyo de la escollera, aún no completada con la cubierta resistente de bloques Core-Loc.

Este material fue depositado al pie de la cara interna de la escollera, sobre un el tramo comprendido entre progresivas 220 y 350 de la obra. Este depósito tiene un ancho variable del orden de 15 a 30 m, un espesor de 5 a 7 m, alcanzando una cota superior de 0 m.

El material acumulado se halla a una distancia variable de 125 a 150 m del veril sur del canal de navegación.

## **2 OBJETIVOS**

El objetivo de este análisis es evaluar la posible movilidad del material depositado por la acción dinámica de olas y corrientes y en el caso de que esto ocurra, determinar sus consecuencias.

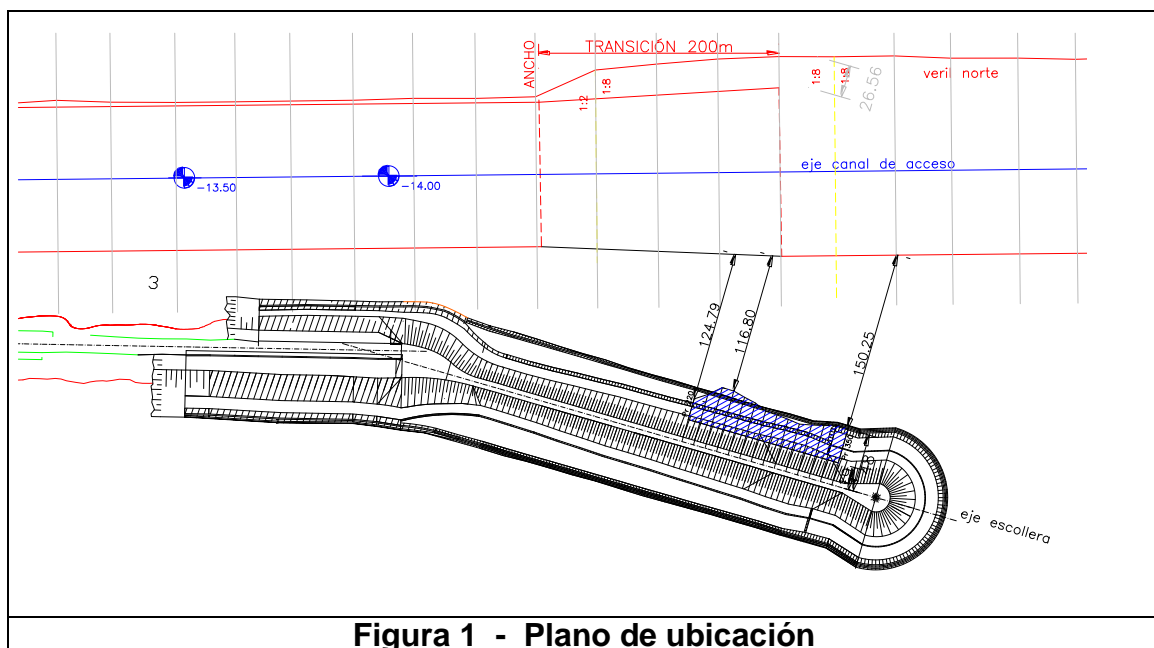
### **3 METODOLOGÍA**

La metodología aplicada consistió en la realización de las siguientes tareas:

- Evaluación de la información disponible: Relevamientos efectuados en el área, características del material, composición granulométrica. Descripción de las fuentes de información utilizadas, caracterización física del material.
- Descripción de los modelos computacionales aplicados, su implementación, aplicación y resultados.
- Descripción de las características de las olas y corrientes en el área de interés. Evaluación de los resultados de modelación matemática que el INA realiza para el consorcio de Gestión del Puerto de Quequén.
- Revisión y aplicación de fórmulas de movilidad de sedimentos.

## 4 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El área afectada por el derrame de material de enrocado de la escollera se halla comprendido entre progresivas 270 y 350, a una distancia de 125 a 150 m del veril sur del canal de acceso. (Plano CE-02, **Figura 1**).



**Figura 1 - Plano de ubicación**

El material cubre el pie de apoyo del talud interno de la prolongación de la escollera Sur.

### 4.1 Perfiles transversales

En el curso del año 2006 se efectuaron relevamientos de perfiles transversales de control del área afectada. La separación espacial entre perfiles fue de 10 m, y se realizaron entre las progresivas 270 y 350 m (Planos CE 07, 08 y 09). Los relevamientos se realizaron en las siguientes fechas:

14 de febrero  
9 de agosto  
10 de octubre

21 de octubre  
28 de octubre

El material se ha acumulado formando una berma de unas 25 a 30 m de ancho, y alrededor de 8 m de espesor máximo. El talud máximo talud es de aproximadamente 1:1,5. Los perfiles se muestran en las **Figuras A.1 a A.14 del Anexo I**

#### 4.2 Temporales ocurridos en el área

La siguiente **Tabla 1** muestra un listado de temporales que superaron 1,80 m de altura significativa en un olígrafo fondeado el 16 de febrero de 2006. Los registros corresponden a la ubicación S 38° 35.4100 W 58 41.5962. La posición del olígrafo resulta unos 450 m al SSE del morro de la escollera.

**Tabla 1.** Temporales en el área en 2006

FECHA	DURACIÓN	Hs máx	Dirección
Feb-06	152	3,5	S
Feb-06	65	4,8	SE
Mar-06	47	4	S
Mar-06	20	2,8	S
Mar-06	38	2,6	S
Abr-06	81	3,6	S desp SSE
Abr-06	45	4,2	S
Abr/May 2006	92	4,4	S a SE
May-06	27	2,1	SSE
May-06	14	1,9	S
May-06	47	2,2	SSE a S
Jun-06	47	3,2	S
Jun-06	15	2	SSE
Jun-06	35	2,6	S
Jun-06	58	3,2	S a SE
Jul-06	130	6	S a SSE
Ago-06	48	3,3	S a SSE
Ago-06	48	3,35	S
Ago-06	10	2,05	SE
Sep-06	58	3,5	S a SSE
Sep-06	10	2,3	S
Sep-06	80	3,3	SSE a SE
Oct-06	26	2,6	S

Los temporales corresponden a las direcciones comprendidas entre S y SE. Se destaca el temporal registrado en julio 2006 con olas significativas de hasta 6 m. De acuerdo a un estudio del INA<sup>1</sup> para un período de retorno 50 años, Hs en el área costera próxima a la entrada al puerto resulta estimada en 6,60 a 7,10 m , según la dirección. La comparación con estos valores da una idea de la magnitud del temporal de julio 2006.

#### **4.3 Cambios morfológicos del derrame.**

Con excepción de los 2 extremos de la serie relevada (progresivas 350 m **Figura A.14** y progresiva 220 m, **Figura A.1**) que muestran variaciones, el resto han mostrado ser estables en el tiempo en el período comprendido entre el .14 de febrero y el 28 de octubre de 2006.

En el perfil más próximo al morro (**Figura A.14**) puede notarse una modificación importante después del temporal de julio 2006, consistente en un movimiento de material en el sentido del perfil, es decir perpendicularmente a la escollera.

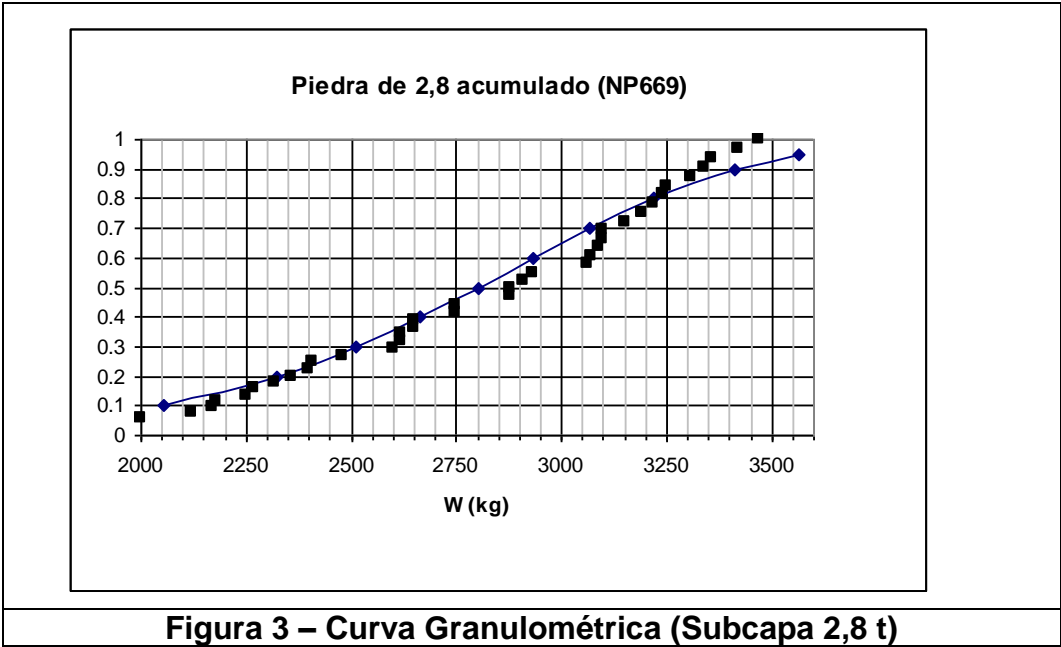
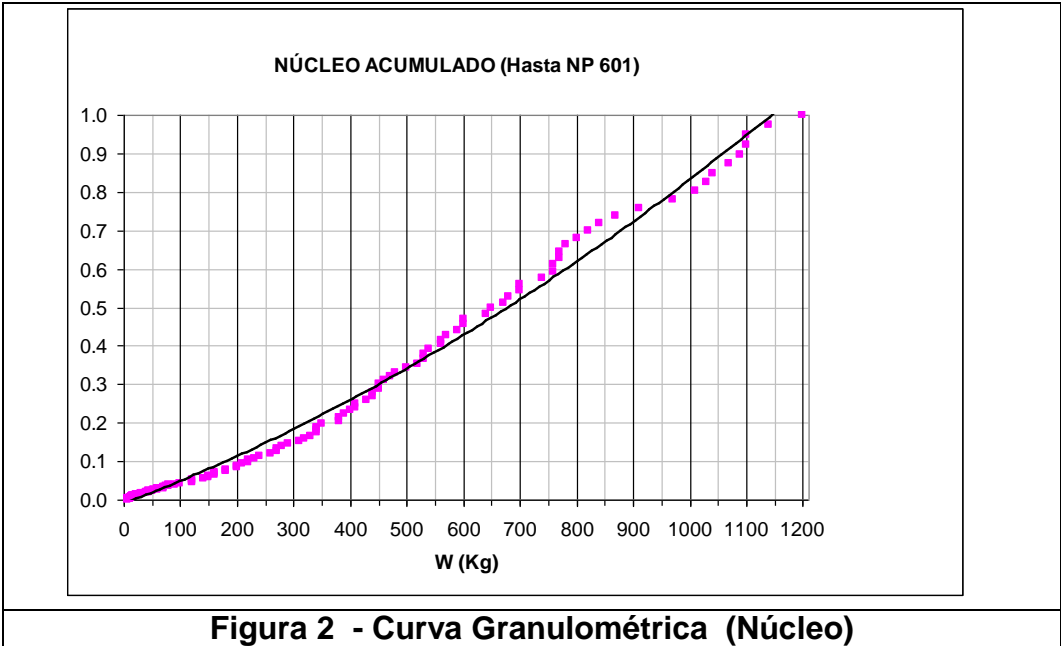
En el perfil 220 (**Figura A.1**, el más interno de la serie relevada) puede observarse una acreción para las últimas fechas, posiblemente por movimiento de materiales desde perfiles vecinos.

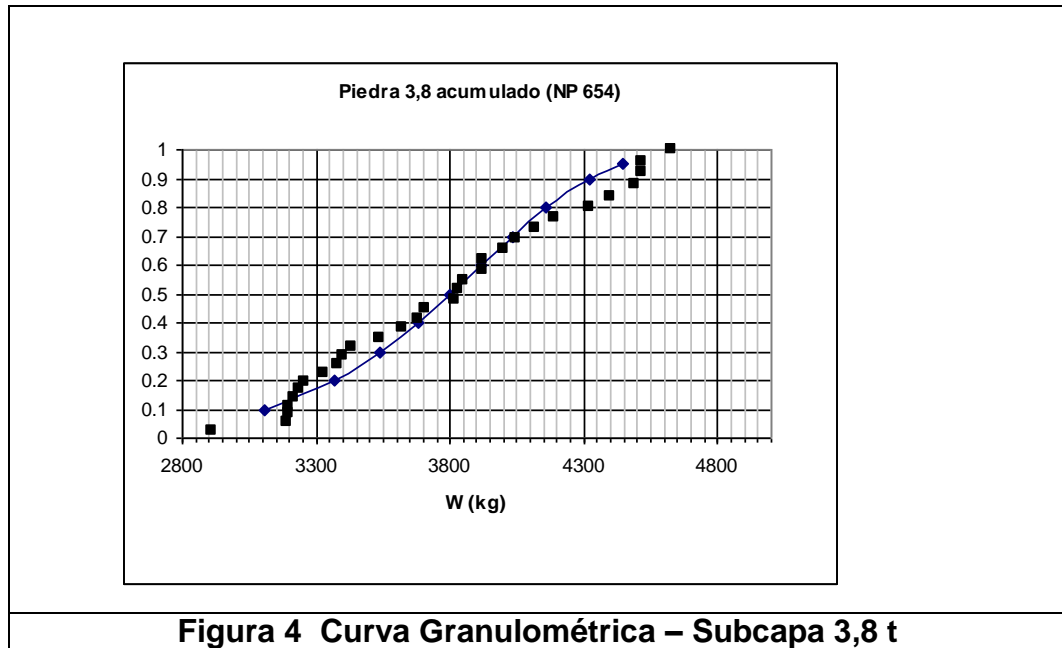
#### **4.4 Curvas granulométricas**

El material derramado consiste en material de núcleo y piedra de filtro. La granulometría se muestra en las **Figuras 2, 3 y 4**.

---

<sup>1</sup> *Estudio del Clima de Olas en el Area de Puerto Quequén*. INA, Laboratorio de Hidráulica, LHA 263-01-06, Julio 2006





La **Tabla 2** muestra el peso y diámetros nominales correspondientes al 15%, 50% y 85% de la muestra.

**Tabla 2 - Características del enrocado derramado**

Elemento	Dimensiones	15%	50%	85%
Nucleo	W (kg)	310	650	1040
	Dn (m)	0,49	0,63	0,73
Subcapa 2,8	W (kg)	2265	2800	3270
	Dn (m)	0,95	1,02	1,07
Subcapa 3,8	W (kg)	3227	3827	4423
	Dn (m)	1,07	1,13	1,19

## 5 MODELACIÓN MATEMÁTICA

El INA ha realizado un estudio de agitación por oleaje en el interior del puerto para el Consorcio de Gestión del Puerto de Quequén<sup>2</sup>. A estos efectos se determinaron escenarios de cálculo y se llevaron a cabo aplicaciones del modelo BOUSS-2D<sup>3</sup>, el que es considerado especialmente apto para este propósito y, dada su versatilidad, permitió estudiar los efectos que distintas modificaciones geométricas de la configuración portuaria pudieran ejercer sobre los patrones de la agitación interna del puerto.

Parte de los resultados obtenidos, especialmente aquéllos correspondientes al área del derrame de enrocado sobre el talud interno de la escollera sur, han sido utilizados en el presente análisis.

### 5.1 Modelo Matemático

BOUSS-2D es un modelo numérico perteneciente al sistema SMS (Surface-Water Modeling System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de U.S.Army, basado en una solución dominio-tiempo de ecuaciones tipo Boussinesq.

La forma clásica de las ecuaciones de Boussinesq para la propagación del oleaje en aguas de profundidad variable fue derivada originalmente por Peregrine (1967), con la restricción de ser aplicables a zonas de aguas relativamente poco profundas, donde la profundidad del agua,  $h$  fuera menor que la quinta parte de la longitud de onda incidente,  $L$ .

---

<sup>2</sup> *Estudio de Agitación por Oleaje en el Puerto de Quequén. Informe Final.* INA LHA-271-01-06, Diciembre 2006  
<sup>3</sup> *Nwogu, O. G. and Zeki D. "BOUSS-2D: A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors". Report 1: Theoretical Background and User's Manual (2001).*

Algunas modificaciones introducidas por Nwogu (1993) y posteriormente por Wei et al. (1995) permitieron derivar la forma completamente no lineal de las ecuaciones, lo que las convierte en una herramienta particularmente útil para la simulación de ondas altamente asimétricas en aguas poco profundas, corrientes inducidas por oleaje, wave setup cercano a la línea de costa e interacción ola-corriente.

Estas ecuaciones han sido modificadas también para incluir los efectos de fricción de fondo y caudal a través de estructuras porosas, y pueden ser utilizadas para simular la mayoría de los fenómenos de interés en el ámbito de la ingeniería de costas y puertos, como ser:

- 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 correspondientes son resueltas utilizando un método en diferencias finitas. El dominio computacional es discretizado por medio de una grilla rectangular con pasos de discretización  $\Delta x$  y  $\Delta y$  en las direcciones de los ejes respectivos.

Las variables de la ecuaciones  $\eta$ ,  $u_\alpha$  y  $w_\alpha$  son definidas sobre una grilla de puntos de manera escalonada, siendo la profundidad y elevación de la superficie definidas sobre cada nodo  $(i,j)$  de la grilla, mientras que las

velocidades se definen sobre puntos ubicados sobre cada borde celda a una distancia  $\Delta x/2$  y  $\Delta y/2$ , según corresponda el eje ( $i\pm 1/2$ ,  $j\pm 1/2$ ).

Para la resolución numérica de las ecuaciones se utiliza un esquema Crank Nicolson con un método predictor-corrector que permite obtener una estimación inicial. Las derivadas parciales son aproximadas usando un esquema de diferencias hacia delante para el tiempo y diferencias centradas en el espacio.

El proceso de cálculo se mantiene estable siempre y cuando el número de Courant,  $Cr$ , sea menor que 1:

$$Cr = \sqrt{\left[ C^2 \Delta t^2 \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right]} < 1$$

donde  $C$  es la velocidad de fase sobre el período de cruce de ceros promedio de las olas incidentes.

Esta condición, necesaria para asegurar la estabilidad del cálculo, impone restricciones sobre la relación entre el tamaño de los pasos de discretización de la grilla y el paso de tiempo utilizado para en cada simulación. Es recomendable que en el inicio del proceso de cálculo el valor de  $Cr$  permanezca entre 0.5 y 0.7, puesto que la interacción no lineal entre distintas componentes de onda, el rompimiento de olas, la reflexión, y otros procesos físicos pueden afectar la estabilidad del modelo numérico.

Para la representación del oleaje irregular BOUSS-2D dispone de un menú de espectros unidireccionales  $S_{\eta}(\omega)$  que describen la distribución de energía de las olas en función de la frecuencia, estos son:

- Espectro de Pierson-Moskowitz (PM)
- Espectro de Bretschneider (1959)
- Espectro de JOHNSWAP
- Espectro TMA

- Espectro Ochi-Hubble (espectro bimodal para estados de mar con superposición de olas oceánicas (swell) y olas de viento (wind -sea)).

El modelo permite también la utilización de espectros direccionales, para los cuales la energía del oleaje se distribuye no sólo en frecuencia sino también en un rango de direcciones de incidencia:

$$S_{\eta}(\omega, \theta) = S_{\eta}(\omega) \cdot D(\omega, \theta)$$

esto requiere la definición adicional de los parámetros correspondientes para la función  $D(\omega, \theta)$ , lo cual se encuentra también disponible en BOUSS-2D.

La asignación de propiedades absorbentes o reflejantes para los distintos contornos de una modelación se hace por medio de la definición del coeficiente de damping ( $\alpha$ ), tanto para bordes que constituyan un límite del dominio de cálculo como para las estructuras interiores.

## **5.2 Escenarios modelados**

Dadas la orientación de la costa de Quequén, y la disposición y características geométricas de la obras de abrigo del puerto, resultó de interés particular el estudio de la propagación de olas provenientes de los sectores Este y Sudeste, puesto que éstas son las que cuentan con mayores posibilidades de ingreso al recinto portuario.

Acorde con ello, se seleccionaron un conjunto de escenarios de cálculo que permitieron representar un conjunto amplio de situaciones desfavorables para el puerto desde el punto de vista del análisis de la agitación portuaria, manteniendo acotado el número de ensayos numéricos a realizar. Se seleccionaron tres escenarios asociados a condiciones de temporales frecuentes oleaje y otros tres asociados a temporales extremos con períodos de recurrencia de 50 años, definidos por los siguientes valores:

**Tabla 3 - Escenarios de Cálculo**

<b>TEMPORALES FRECUENTES</b>			
<b>Viento E</b>	H= 2.16 m	Tp=8.15 s	Dir: 146°
<b>Viento SE</b>	H= 2.72 m	Tp=8.15 s	Dir: 123°
<b>Swell SSE</b>	H= 1.35 m	Tp=15 s	Dir: 135°
<b>TEMPORALES EXTREMOS (TR=50 AÑOS)</b>			
<b>Viento E</b>	H= 4.5 m	Tp=13.3 s	Dir: 137°
<b>Viento SE</b>	H= 5.2 m	Tp=13.3 s	Dir: 117°
<b>Swell SE</b>	H= 4.5 m	Tp=18.9 s	Dir: 119°

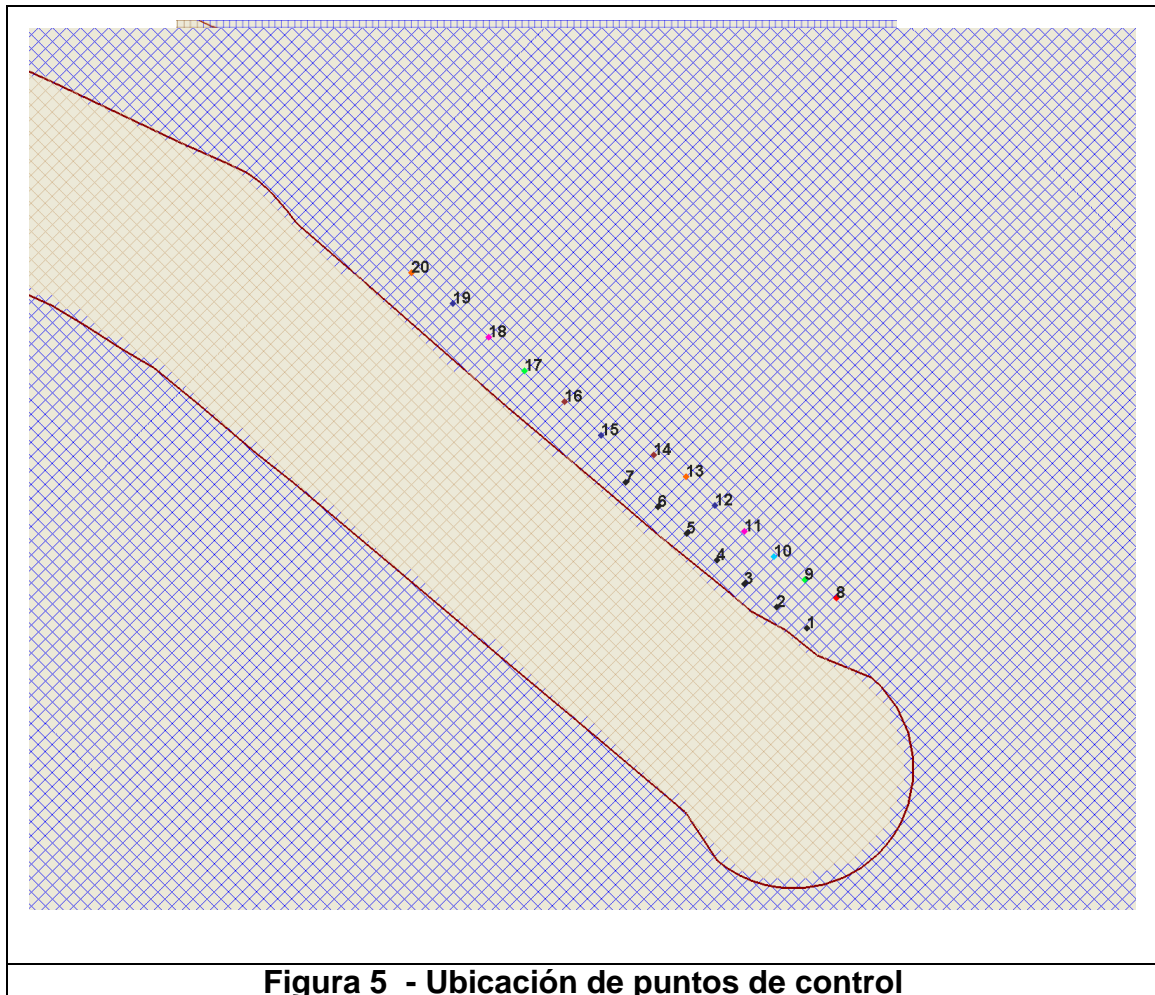
En todos los casos, los valores presentados para H, Tp y dirección, corresponden a una ubicación cercana a la boca de acceso al puerto, donde la profundidad natural es del orden de los 12 m, coincidente con la zona definida como borde de la modelación desde la cual se propagan las olas hacia la costa y el interior del puerto.

La dirección de propagación se encuentra medida en sentido antihorario y hacia donde viajan las olas, es decir que a las olas procedentes del Sur les corresponde un ángulo de 90° y a las procedentes del Este 180°. Los valores indicados para los escenarios presentados señalan que las olas se han refractado fuertemente desde la zona de generación en aguas profundas hasta su llegada a la zona costera.

Se consideró en todos los casos el Nivel Medio del mar.

### 5.3 Resultados

De los resultados obtenidos para los escenarios establecidos en la Tabla 3, se han aplicado para el presente análisis aquéllos valores ubicados en las proximidades del área del derrame de material de enrocado. Para ello se seleccionaron los puntos de control indicados en la **Figura 5**. Los puntos 1 a 7 se hallan al pie de la escollera, en la ubicación del derrame. Los puntos 8 a 14 se hallan a una distancia de 25 m del pie de la escollera, sobre el mismo frente del derrame. Los puntos 15 a 20 corresponden al pie de la escollera, en un tramo donde no se detecta la presencia de material de enrocado derramado.



**Tabla 4 - Resultados de la modelación matemática**

Punto	Configuración Actual					
	Escenarios Frecuentes			Escenarios Extremos		
	Swell SE	Viento SE	Viento E	Swell SE	Viento SE	Viento E
1	0.58	0.38	0.57	1.71	1.43	1.65
2	0.48	0.31	0.49	1.48	1.21	1.47
3	0.47	0.34	0.48	1.43	1.19	1.46
4	0.49	0.35	0.55	1.35	1.15	1.61
5	0.53	0.32	0.66	1.21	1.08	1.71
6	0.57	0.40	0.74	1.17	1.09	1.71
7	0.63	0.35	0.77	1.09	1.02	2.03
8	0.83	0.90	1.57	2.13	2.10	2.87
9	0.73	0.73	1.36	1.86	1.76	2.50
10	0.66	0.65	1.27	1.68	1.58	2.33
11	0.67	0.67	1.34	1.54	1.51	2.36
12	0.73	0.63	1.47	1.40	1.42	2.46
13	0.78	0.66	1.72	1.34	1.40	2.68
14	0.80	0.59	1.79	1.28	1.33	2.78
15	0.88	0.43	1.44	1.13	1.25	2.78
16	0.89	0.47	1.90	1.25	1.28	3.08
17	1.24	0.41	2.00	1.53	1.60	3.14
18	1.50	0.52	2.33	1.54	1.94	3.48
19	1.43	0.83	2.68	1.51	1.98	3.53
20	1.50	1.00	2.59	1.73	2.19	3.65

La **Figura 6** muestra una representación tridimensional del patrón de propagación de olas para el caso de viento intenso del SE.





Puede verse entre otros, la dirección de propagación del oleaje en el área del derrame, y el cambio de dirección de incidencia y atenuación del oleaje a medida que las olas ingresan al puerto.

## 6 MOVILIDAD DEL MATERIAL

La movilidad del material ha sido evaluada a partir de las siguientes consideraciones: el depósito de materiales constituye una berma de talud 1:1,5 al pie de la escollera. La cota superior de esta berma se halla próxima al nivel medio del mar y es susceptible de ser erosionada por acción del oleaje incidente sobre el mismo.

Para evaluar su resistencia al oleaje se aplicaron las ecuaciones de van der Meer<sup>4</sup>, válidas para un talud sobre el cual incide un oleaje de altura significativa  $H_s$ . Estas relaciones reemplazan a la extensamente utilizada fórmula de estabilidad de Hudson, con la ventaja de incorporar explícitamente algunas variables como las características y duración de las olas que inciden sobre el talud, y la porosidad de la cubierta de enrocado.

Entre el pie de la berma y el veril del canal de navegación (distante unos 120 m) se extiende una zona de suave pendiente, donde la profundidad es del orden de 7 m. En la eventualidad de que algún material pudiera resultar removido de la berma y deslizarse por el talud, alcanzando esta área expuesta a corrientes y olas no rompientes se han aplicado los criterios desarrollados por Shields<sup>5</sup> para inicio de movimiento de materiales granulares sueltos.

Como se ha indicado, el enrocado derramado muestra una gran heterogeneidad de tamaños, desde elementos de 1 Kg hasta casi 4.800 Kg. Bajo estas circunstancias existe una interacción muy fuerte entre elementos de distinto tamaño, y el material más chico tiende a ocupar los vacíos existentes entre los elementos de mayor dimensión. El acorazamiento propio del material y su consecuente influencia sobre su movilidad no ha sido tenido en cuenta en el

<sup>4</sup> *Rubble Mounds – Recent Modifications*. J. van der Meer. Handbook of Coastal and Ocean Engineering. John B. Herbich Editor, 1991

<sup>5</sup> *Threshold of Sediment Motion in Coastal Environments*. R.L. Soulsby, R.J.S. Whitehouse, Pacific Coasts and Ports '97

análisis que sigue, por la dificultad de su cuantificación. Por el contrario, se ha evaluado la capacidad de movimiento por acción de las olas, de fracciones granulométricas de dimensiones acotadas, prescindiendo de toda interacción con las otras fracciones.

No obstante el acorazamiento es un mecanismo que sin lugar a dudas actuará a favor del incremento de la estabilidad del enrocado derramado más allá de los límites acá determinados en este análisis.

### 6.1 Estabilidad de taludes de enrocado por acción del oleaje

Para la evaluación de la estabilidad del enrocado se siguieron las relaciones empíricas desarrolladas por van der Meer. El parámetro adimensional de Iribarren  $I_r$  permite incorporar las características del oleaje. El parámetro se define como:

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_o}}} \quad (6.1)$$

donde  $\tan \alpha$  es la inclinación del talud, H la altura de ola y  $L_o$  la longitud de onda en aguas profundas ( $L_o = 1,56 T^2$ , siendo T el período). El valor límite del parámetro de Iribarren que separa los distintos tipos de rompiente (plunging/surging) se evalúa según:

$$I_{r1} = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.5)} \quad (6.2)$$

Para una protección de determinado talud  $\alpha$  y porosidad P, valores inferiores de  $I_{r1}$  al indicado por la ec. [6.3] corresponden al tipo de rotura "plunging" y valores mayores a la denominada "surging", para cada una de las cuales existe una fórmula de estabilidad diferente:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} * \sqrt{I_r} = 6.2 * P^{0.18} (S/\sqrt{N})^{0.2} \quad (\text{plunging, } I_r < I_{r1}) \quad [6.3]$$

$$H_s/\Delta D_{n50} = 1.0 P^{0.13} (S/\sqrt{N})^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} Ir^P \quad (\text{surging } Ir > Ir_1) \quad [6.4]$$

donde

$H_s$  = altura de ola significativa.

$Ir$  = parametro de Iribarren.

$T$  = periodo de cruce de cerros.

$\alpha$  = angulo del talud.

$\Delta$  = peso especifico relativo del enrocado,  $\frac{\gamma_r - \gamma}{\gamma}$ .

$D_{n50}$  = diametro nominal,  $(\frac{W_{50}}{\gamma_r})^{1/3}$ .

$W_{50}$  = peso medio del enrocado.

$P$  = permeabilidad.

$S$  = nivel de daño,  $A/D_{n5}^2$

$A$  = area erosionada en la seccion transversal.

$N$  = numero de olas ( duracion de la tormenta ).

Se han adoptado los siguientes valores para las variables:

Diámetro nominal del enrocado: Variable

Talud  $\cot \alpha = 1.5$

Porosidad  $P = 0.4$

Peso específico relativo  $\Delta = 2,65$

### Aplicación

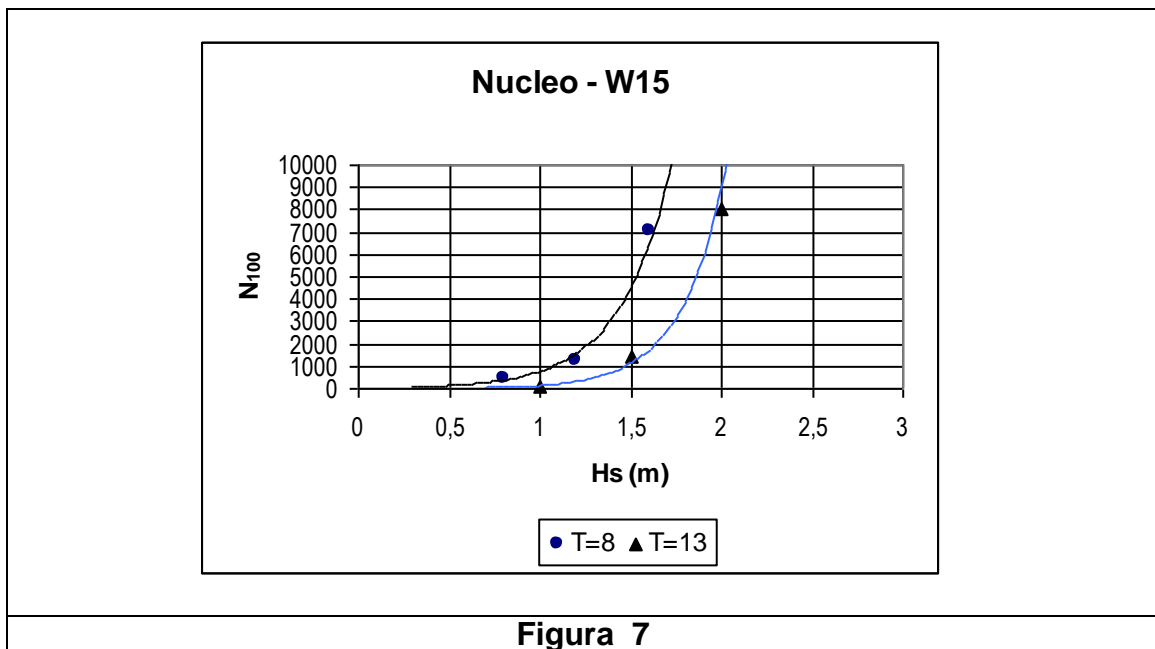
La ecuación de van der Meer se aplicó de las siguientes maneras:

- a) Para cuantificar el daño sobre el enrocado (cantidad de elementos removidos) producido por olas.

b) Para evaluar el talud de equilibrio en función del diámetro del material y las características del oleaje.

a) El daño S de las ec. (6.3) y (6.4) se evaluó para tres diámetros característicos ( $D_{85}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{15}$ ) de cada uno de los tres materiales bajo análisis (núcleo, subcapa 2,8 t y subcapa 3,8 t). El daño S fue convertido en número de unidades removidas del talud cada 100 m ( $N_{100}$ ).

Las **Figuras 7 a 15** muestran los resultados. Puede concluirse que las tres fracciones del núcleo resultan móviles para olas entre 1 y 2 m y  $T = 13$  s. (temporales extremos) pero sólo la fracción fina ( $D_{15}$ ) resulta móvil para temporales frecuentes con alturas de ola de 0,5 a 1 m.



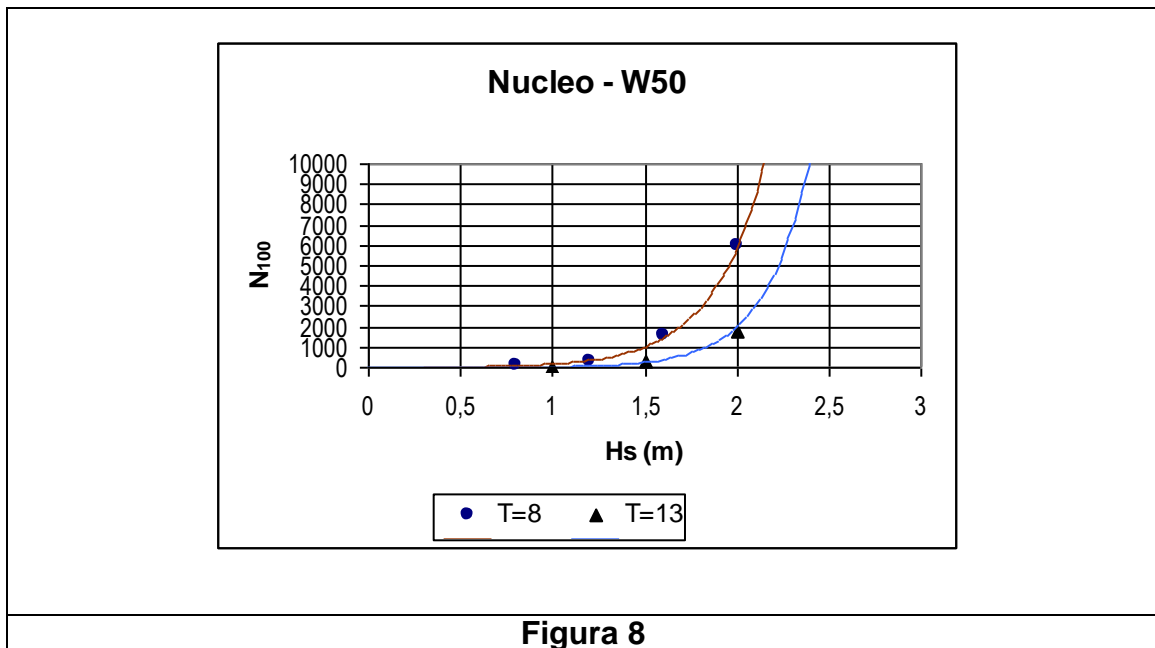


Figura 8

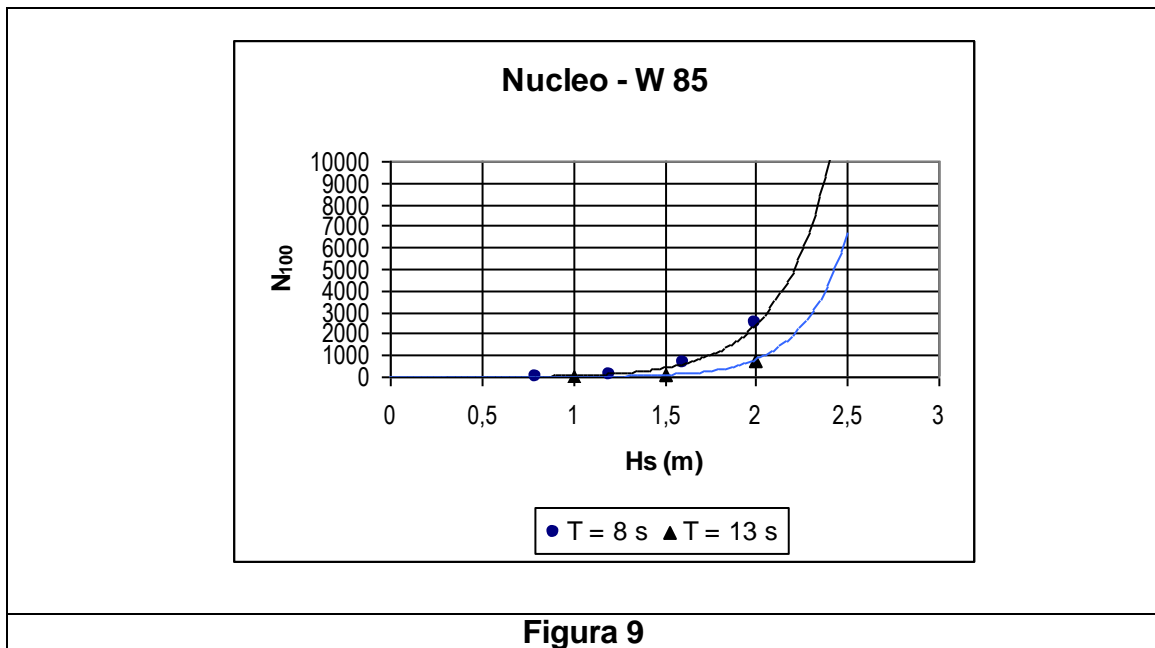
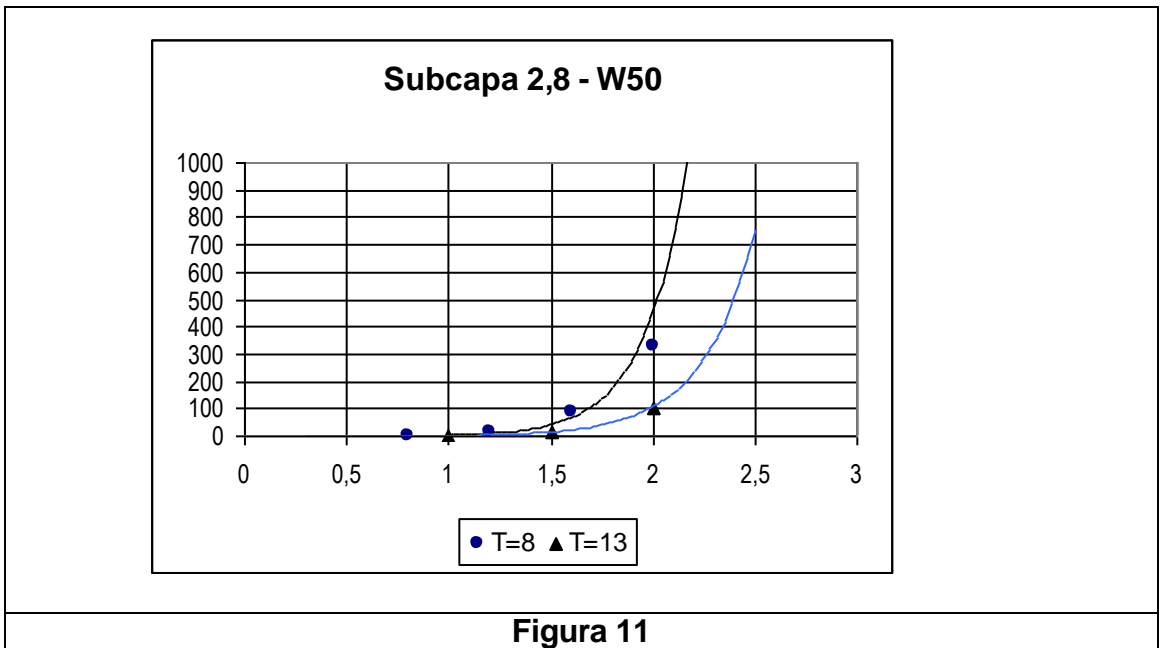
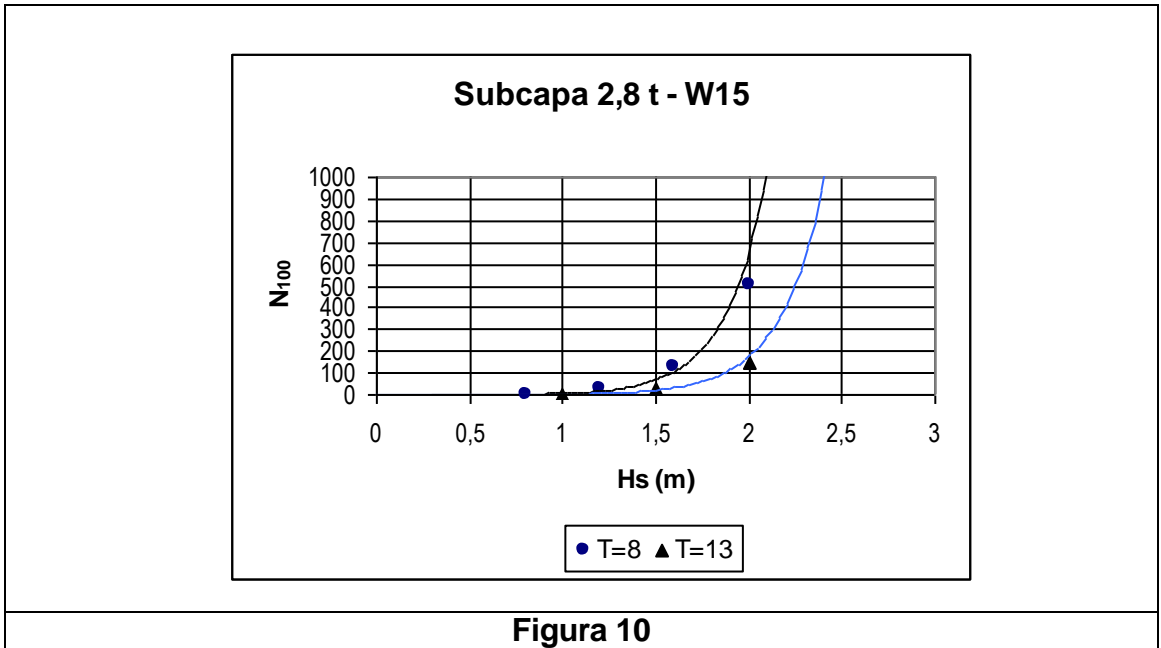


Figura 9



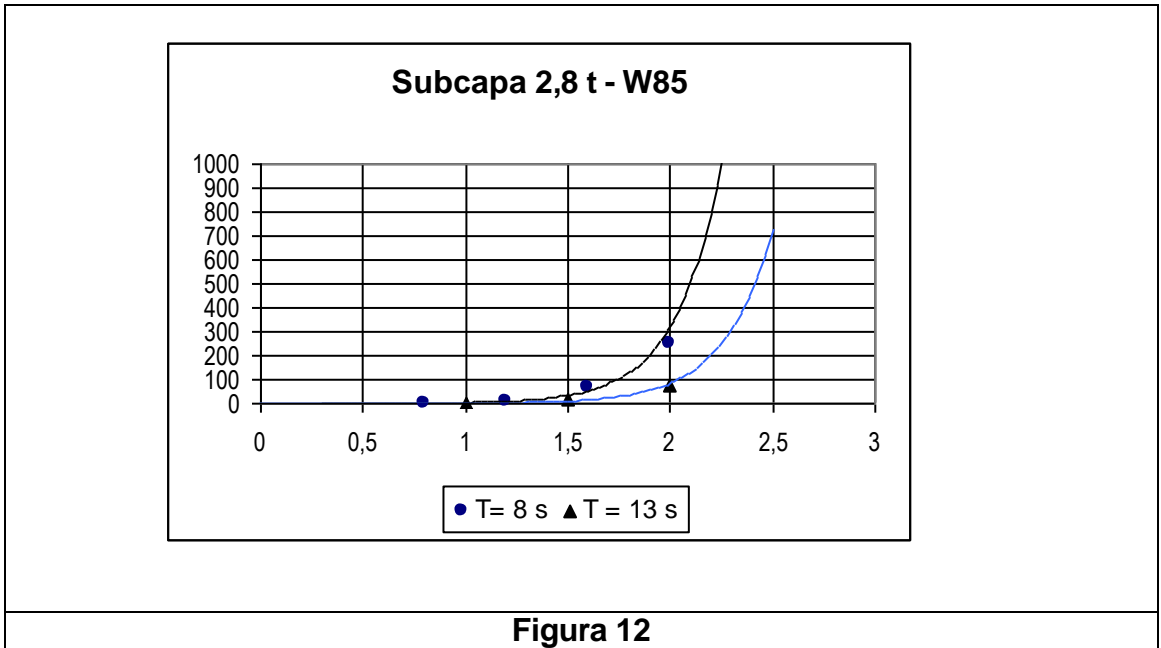


Figura 12

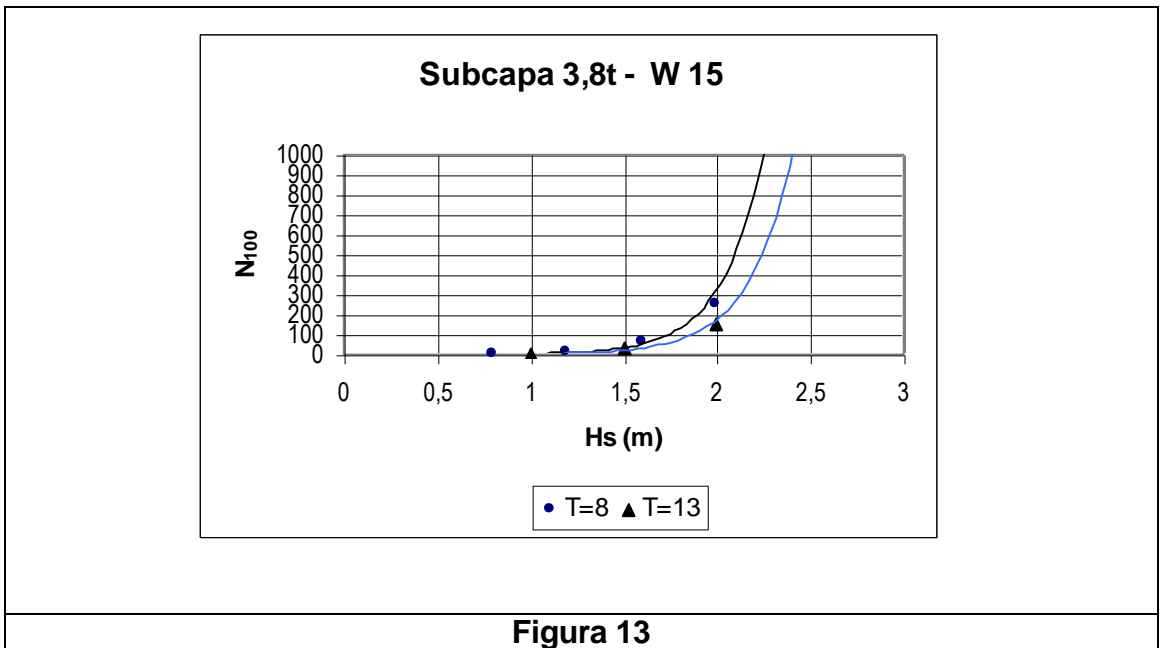
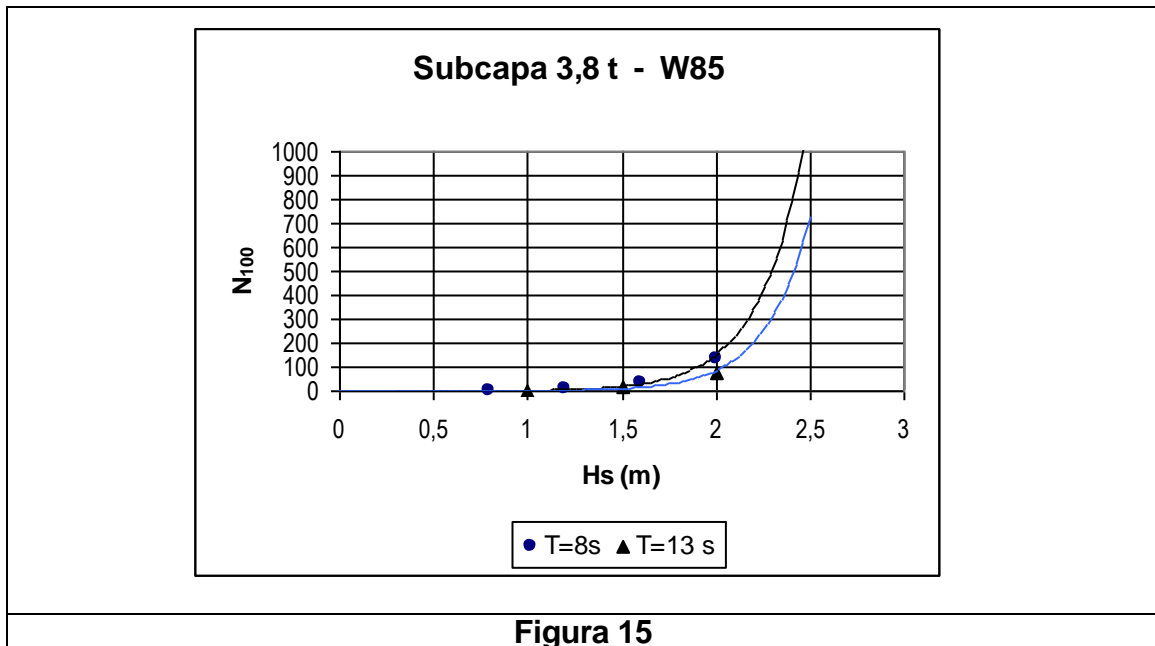
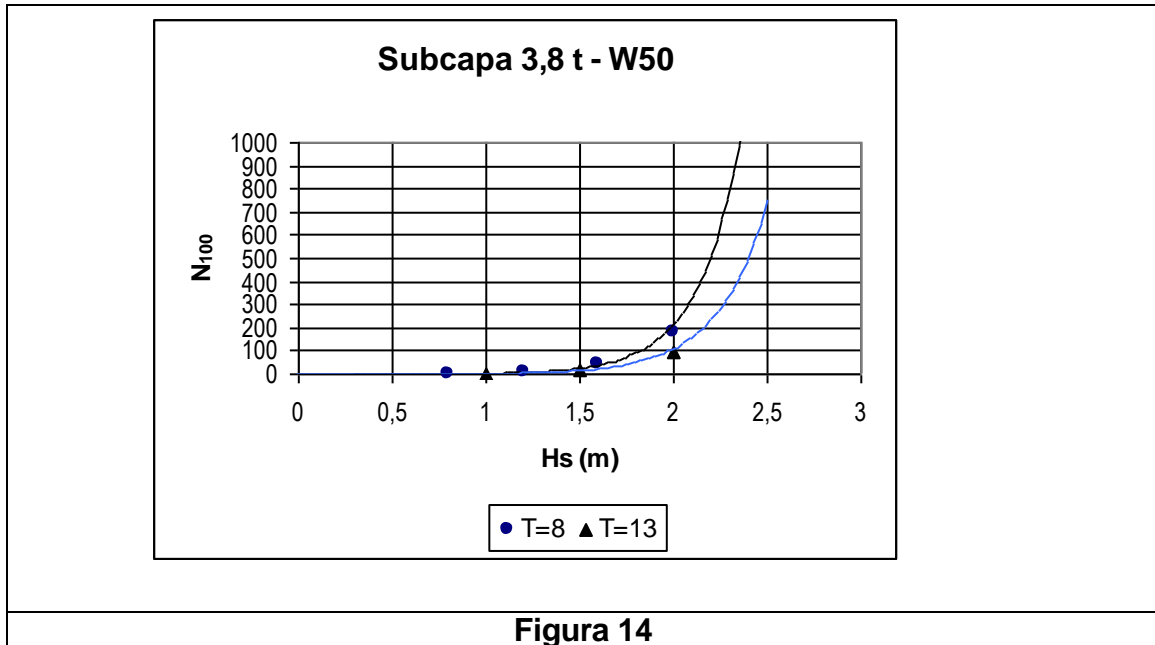


Figura 13



Estos movimientos pueden llevar a la deformación de la berma por movimiento del material desde la parte superior hacia la inferior. Esta deformación implica una reducción progresiva de la pendiente del talud en un proceso que tiende a desarrollar un talud de equilibrio.

b) A partir de las ec. (6.3) y (6.4) se determinó el daño resultante para distintos taludes comprendidos entre el actual (1:1,5) hasta 1:10, para tres alturas de ola ( $H_s=1\text{ m}$ ,  $H_s=1,50\text{ m}$  y  $H_s=2\text{ m}$ ). Los resultados se muestran en las Figuras 16 a 18 para los tres materiales (núcleo, subcapa 2,8 y subcapa 3,8) este análisis se realizó para el  $D_{50}$  correspondiente a cada caso

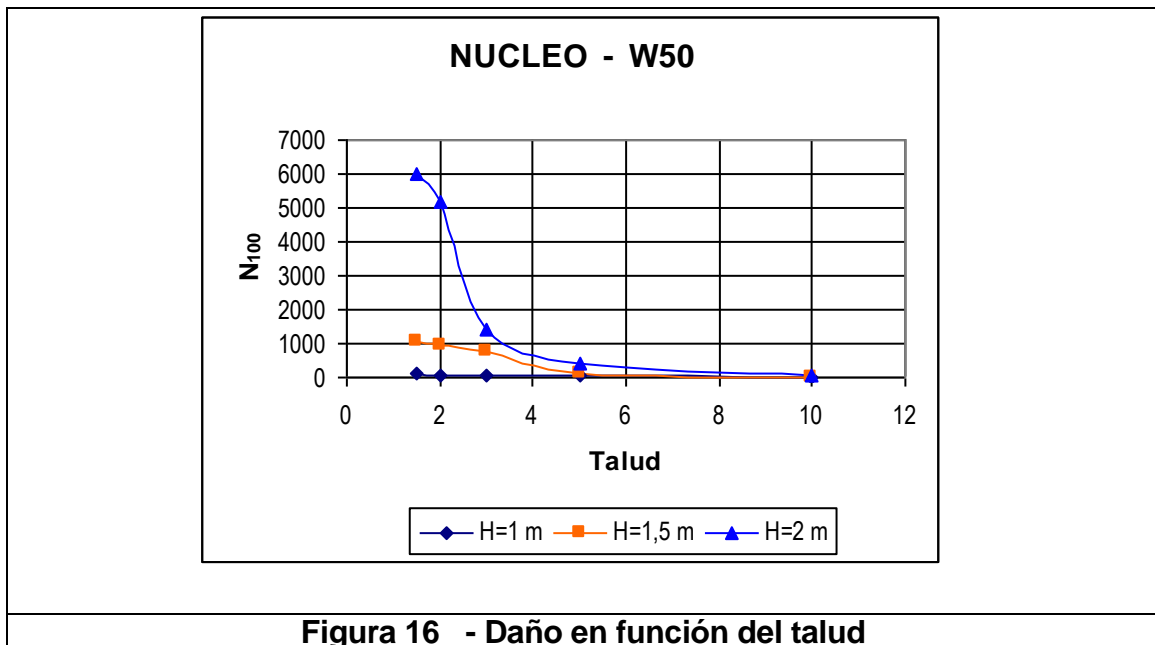


Figura 16 - Daño en función del talud

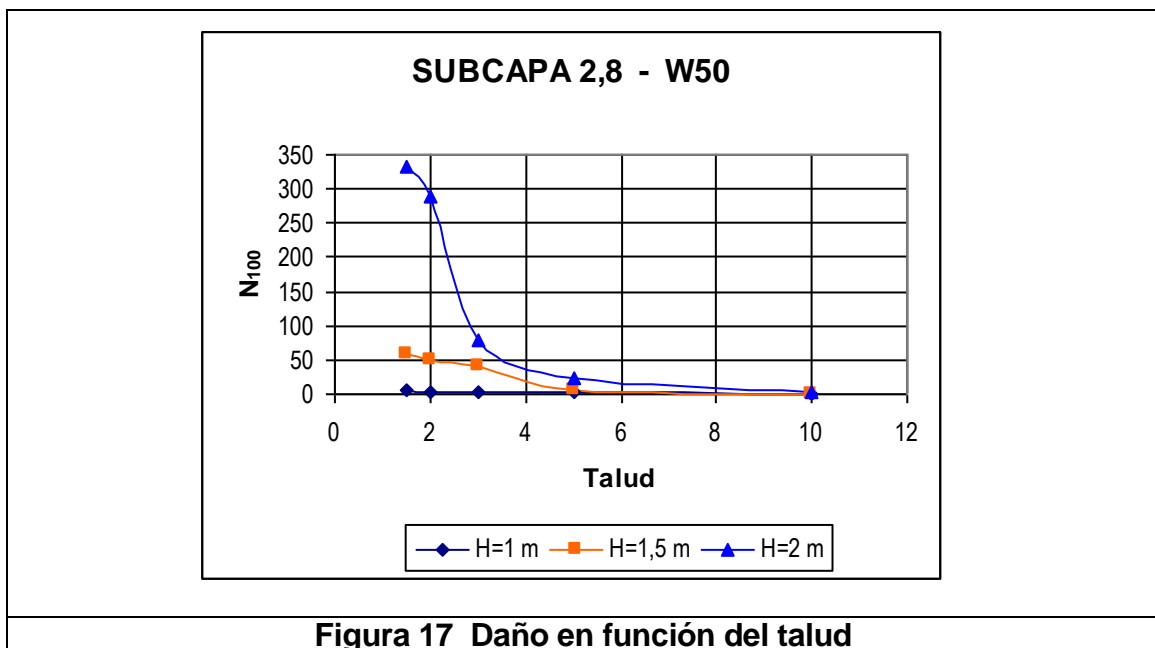
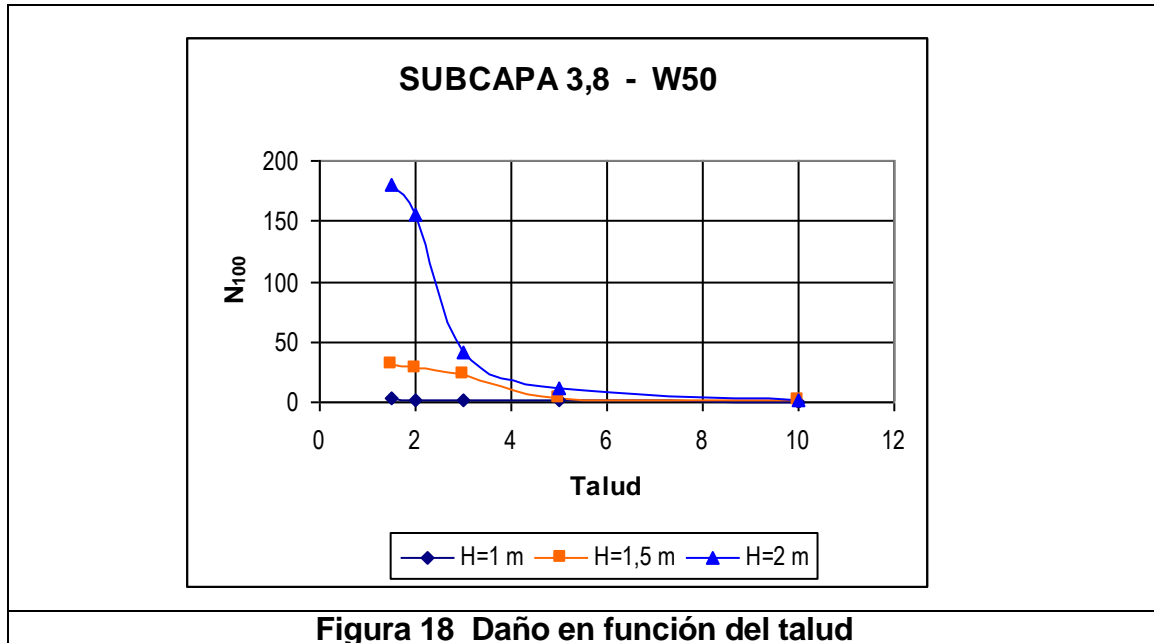


Figura 17 Daño en función del talud



**Figura 18 Daño en función del talud**

La **Figura 16** muestran que el material del núcleo aumenta significativamente su estabilidad al oleaje si su talud pasa de 1:1,5 a 1:3. Para talud 1:8 a 1:10 el daño es prácticamente nulo aún para olas de 2 m. Consideraciones similares valen para la subcapa 2,8 y subcapa 3,8 (**Figuras 17 y 18**).

En cualquiera de estos casos las deformaciones para taludes estables 1:8 y 1:10 llegan a mantener el pie del talud deformado a unos 100 m, en promedio, del veril del canal.

## 6.2 Movilidad de sedimentos no cohesivos por acción de olas y corrientes

El inicio de movimiento de sedimentos no cohesivos por acción de olas y corrientes es un aspecto básico en la determinación del transporte de sedimentos, en la evaluación de la estabilidad de materiales granulares, determinación de erosión local, etc. En el caso de un flujo de agua con

velocidad constante, las investigaciones de Shields (1936) llevaron a establecer una relación entre el valor crítico o umbral de un parámetro adimensional  $\theta_{cr}$  (parámetro adimensional de Shields) y el número de Reynolds del grano:

$$(6.5) \quad \theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{g(\rho_s - \rho)d}$$

$$(6.6) \quad \text{Re}_* = \frac{u_{*cr} d}{\nu}$$

donde  $\tau_{cr}$  es la tensión de corte en el momento de inicio de movimiento,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\rho$  la masa específica del agua y  $\rho_s$  la del sedimento y  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua,  $d$  el diámetro del grano y  $u_{*cr} = (\tau_{cr} / \rho)^{1/2}$  la velocidad crítica de corte.

La hipótesis de base que conduce a la expresión (6.5) se halla vinculada a la estabilidad de un grano. Se asume que sobre el mismo actúa una fuerza estabilizante vertical que es el peso sumergido del mismo, y una fuerza desestabilizante que es debida al arrastre hidrodinámico ejercido por el fluido en movimiento. Esta última resulta función del diámetro del grano y el espesor de la sub capa laminar, y en consecuencia del número de Reynolds. Bajo consideraciones de equilibrio de ambas fuerzas, es posible establecer la relación (6.5), y además que  $\theta_{cr} = f(\text{Re}^*)$ . Dado que  $u_{*cr}$  aparece en ambos términos de la ec. (6.5), desde el punto de vista práctico es preferible (mediante una transformación matemática) expresar  $\theta_{cr}$  en función de un diámetro adimensional  $D^*$  dado por:

$$(6.6) \quad D_* = \left[ \frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/2} d$$

Numerosos investigadores han realizado determinaciones experimentales de la relación  $\theta_{cr} = f(D^*)$ , tanto para corrientes puras, para olas, y para olas combinadas con corrientes (**Figura 19**).

Soulsby <sup>1</sup> propone la siguiente expresión para  $\theta_{cr}$ :

$$(6.7) \quad \theta_{cr} = \frac{0.30}{1 + 1.2 D^*} + 0.055 [1 - \exp(-0.020 D^*)]$$

En el caso de olas (no rompientes) el valor de  $\tau_{cr}$  en (6.5) es:

$$(6.8) \quad \tau = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2$$

donde  $f_w$  es un coeficiente de fricción que puede expresarse como:

$$(6.9) \quad f_w = 0.00251 \left[ 5.21 \left( \frac{U_w T}{4\pi d} \right)^{-0.19} \right]$$

con un máximo de  $f_w=0.30$ .

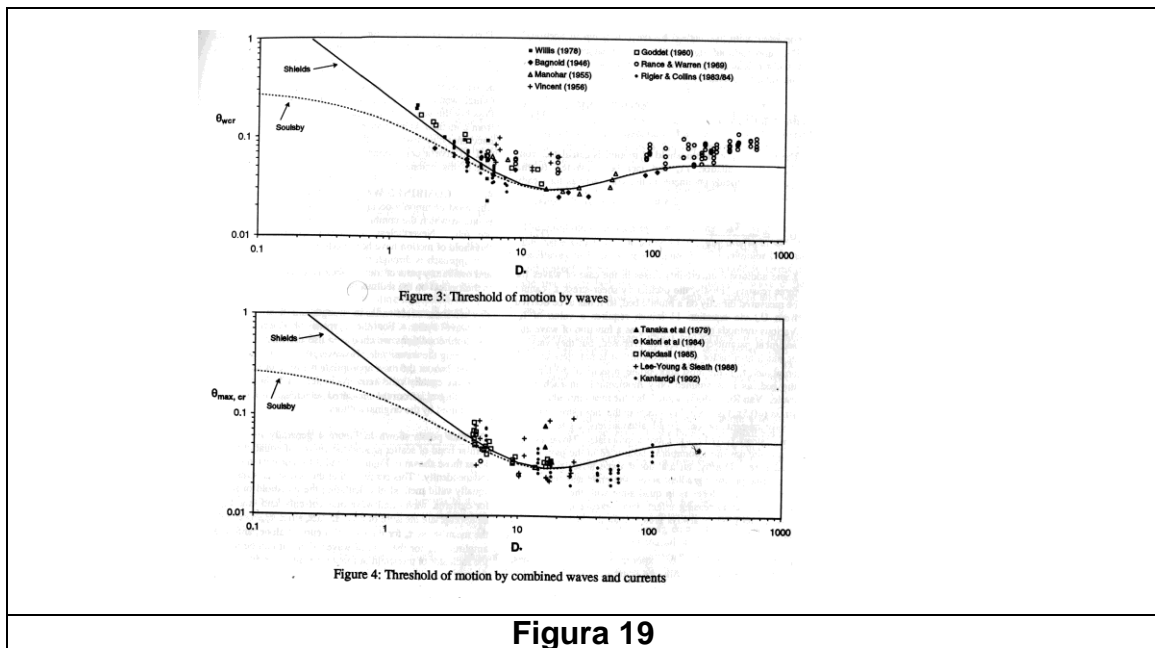


Figura 19

Para el caso de un lecho inclinado con un ángulo  $\beta$ , y un escurrimiento con un ángulo  $\Psi$  respecto del talud, el parámetro adimensional se relaciona con el de fondo horizontal mediante

$$(6.10) \quad \frac{\theta_{\beta cr}}{\theta_{cr}} = \frac{\cos \Psi \operatorname{sen} \beta + (\cos^2 \beta \tan^2 \Phi - \operatorname{sen}^2 \Psi \operatorname{sen}^2 \beta)^{1/2}}{\tan \Phi}$$

### 6.3 Aplicación

El procedimiento de cálculo para la aplicación del conjunto de ecuaciones indicadas en 6.5 a 6.10. fue el siguiente:

Datos de entrada: Periodo, inclinación del talud, diámetro del material).

Calculo de  $D^*$

Aplicación de (6.7) y cálculo de  $\theta_{cr}$

Aplicación de (6.10) y cálculo de  $\theta_{cr\beta}$

Cálculo de  $\tau_{wcr}$  mediante ec (6.5)

Calculo iterativo de  $U_{wcr}$  mediante ec. (6.8), a partir de un valor inicial de  $f_w$ , ya que éste es función de  $U_w$  (ec. 6.9).

Calculo de  $H_{cr}$  mediante la aplicación de:

$$(6.11) \quad U_w = \frac{\pi}{T} \frac{H \cosh(2\pi(z+h)/L)}{\sinh(2\pi h/L)}$$

donde  $z$  es la posición desde el nivel estático de la superficie libre,  $h$  la profundidad local  $L$  la longitud de onda,  $H$  la altura de ola y  $T$  el periodo.

En la presente aplicación, la velocidad  $U_w$  se evalúa en  $z = -h$ , de manera que el coseno hiperbólico del numerador es igual a 1.

## 6.4 Resultados

La **Figura 20** muestra la altura de ola crítica necesaria para iniciar el movimiento de enrocados con el peso indicado en el eje de abscisas, para distintos períodos que cubren el rango de las situaciones posibles en el área de Quequén.

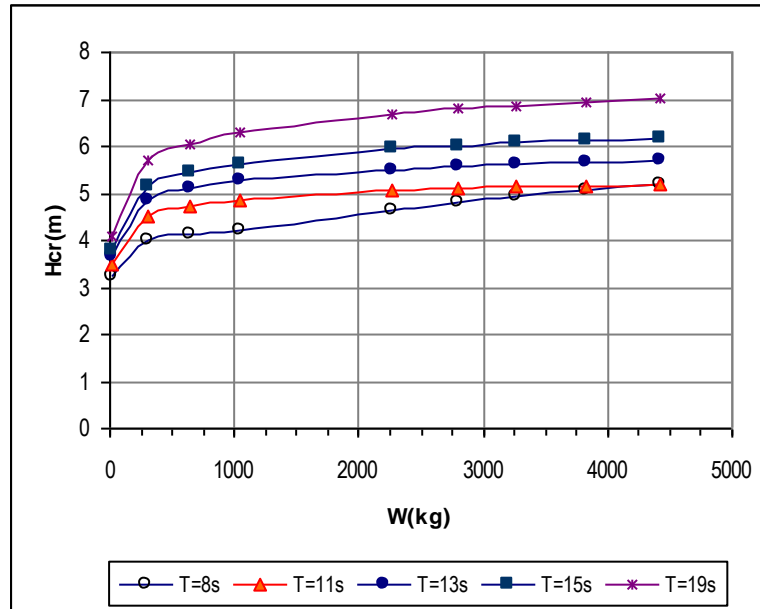


Figura 20

Los valores de la **Tabla 3** (resultados de la modelación matemática) corresponden a altura significativa. Los valores  $H_{cr}$  de la **Figura 20** son olas de altura y periodo constantes.

Bajo la hipótesis de que las olas responden a una distribución de Rayleigh, algunas relaciones entre la altura  $H_s$  y otras olas mayores que componen la distribución es:

$$H_{1/10} = 1,27 H_s, \quad H_{2\%} = 1,4 H_s \quad \text{y} \quad H_{1\%} = 1,67 H_s$$

$H_{1/10}$  es la altura media del 10 % de las olas más altas.  $H_{2\%}$  y  $H_{1\%}$  son el promedio del 2% y del 1% de las olas más altas de la distribución respectivamente.

En la **Tabla 3** se han presentado las alturas de ola en un conjunto de posiciones ubicadas sobre el lateral interno de la escollera Sur, para situaciones frecuentes y extremas ( $T_r=50$  años).

Considerando que el enrocado adquiera un talud de equilibrio en el entorno de 1:8 a 1:10, puede aceptarse que no se extenderá a más de 25 o 30 m del pie de la escollera. Los puntos 8 a 14 de la **Tabla 3 (Figura 5)** muestran valores de altura de ola precisamente a esta distancia de la escollera. Considerando el máximo valor de ola sobre el frente del derrame (posición 14), ( $H_s = 1,80$  m,  $H_{2\%} = 2,50$  m,  $T = 8$ s) correspondiente a temporales frecuentes del E, puede concluirse que ninguna fracción del núcleo es móvil para las situaciones indicadas, aún considerando el 2% de las olas más altas de la distribución. Las subcapas 2,8 y 3,8, con mayor diámetro nominal y peso, son estables.

En el caso de temporales extremos ( $T_r=50$  años) del E ( $H_s = 2,78$  m  $T=13$  s,  $H_{2\%} = 3,90$  m) una parte del material del núcleo sería potencialmente móvil bajo los efectos de las mayores olas que componen la distribución aleatoria, si no se tienen en cuenta efectos de acorazamiento.

## 7 CONCLUSIONES

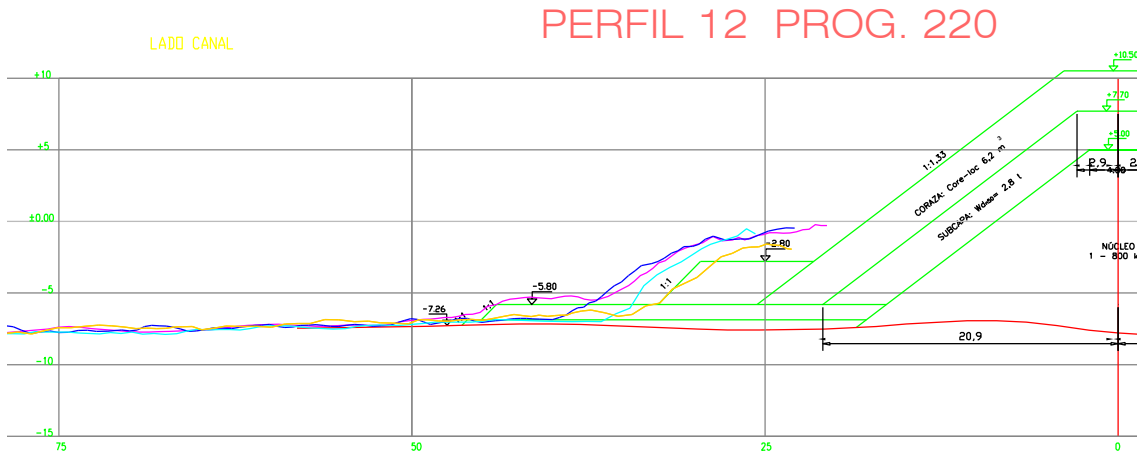
- Se ha realizado una evaluación de la movilidad del enrocado derramado, estableciéndose que en situaciones de oleaje frecuente el mismo podrá alcanzar una geometría (talud) estable como consecuencia de su deformación gradual por acción de las olas.
- Resulta razonable suponer que las deformaciones del depósito por acción del oleaje lleven a pendientes de equilibrio no mayores que 1:8 a 1:10, con lo cual el depósito se mantendrá alejado del veril del canal de navegación.
- Para condiciones de temporales extremos con un período de retorno de 50 años, las fracciones más finas del núcleo resultan móviles para las olas más altas que componen la distribución espectral (H2%), si no se tienen en cuenta efectos de acorazamiento.
- Dado que la fracción fina del núcleo representa aproximadamente un 10% del total del depósito, que no se han considerado efectos de acorazamiento, y que esta fracción fina resulta potencialmente móvil sólo en condiciones de oleaje extremo, el canal de navegación no resultará afectado, para las condiciones analizadas en el presente estudio.
- El enrocado derramado ya ha resultado expuesto a la acción de temporales, uno de ellos de considerable intensidad (período de retorno comprendido posiblemente entre 25 y 50 años) habiéndose detectado sólo algunos cambios en la geometría del depósito en sus dos extremos.
- Las hipótesis de base para análisis realizado son muy conservativas. El material derramado es extremadamente heterogéneo en granulometría y

las fracciones más finas tenderán a ocupar los vacíos entre las mayores, tendiendo el conjunto a una situación de más estabilidad que el de las fracciones consideradas individualmente.

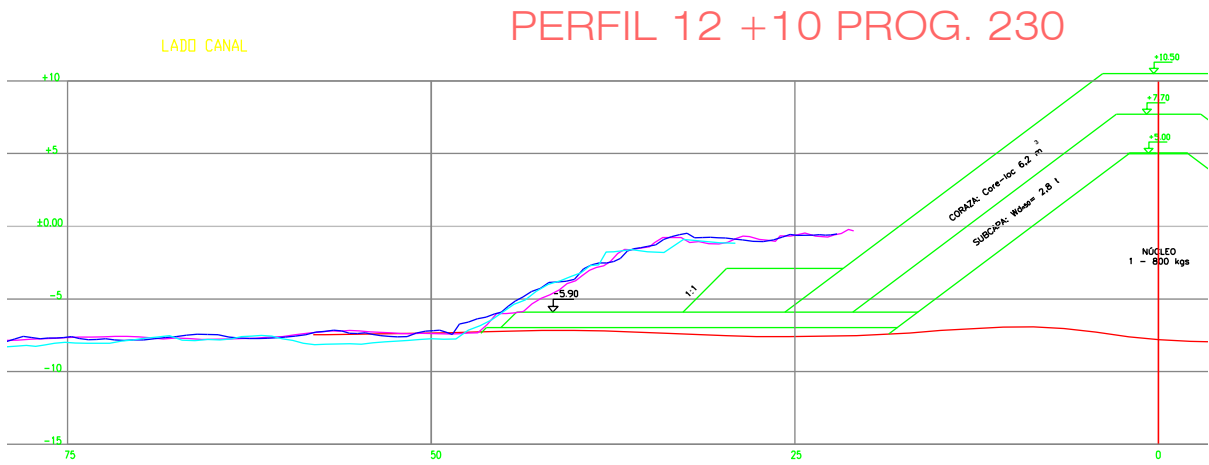
- La dificultad de abordar el cálculo de un problema tan complejo ha obligado a adoptar hipótesis simplificativas y consecuentemente es recomendable el monitoreo periódico del estado del depósito, especialmente después de la ocurrencia de temporales intensos.

# ANEXO I

## Perfiles transversales



**Figura A.1**



**Figura A.2**

REFERENCIAS

- Línea de proyecto
- Relevamiento Batimétrico 14 de Febrero 2006 \*
- Relevamiento Batimétrico 9 de Agosto 2006 \*
- Relevamiento Batimétrico 10 de Octubre 2006 \*
- Relevamiento Batimétrico 21 de Octubre 2006 \*
- Relevamiento Batimétrico 28 de Octubre 2006 \*

\* Los lugares bajo el nivel del mar que no fueron relevados fue dado que no se puede acceder con equipo de batimetría



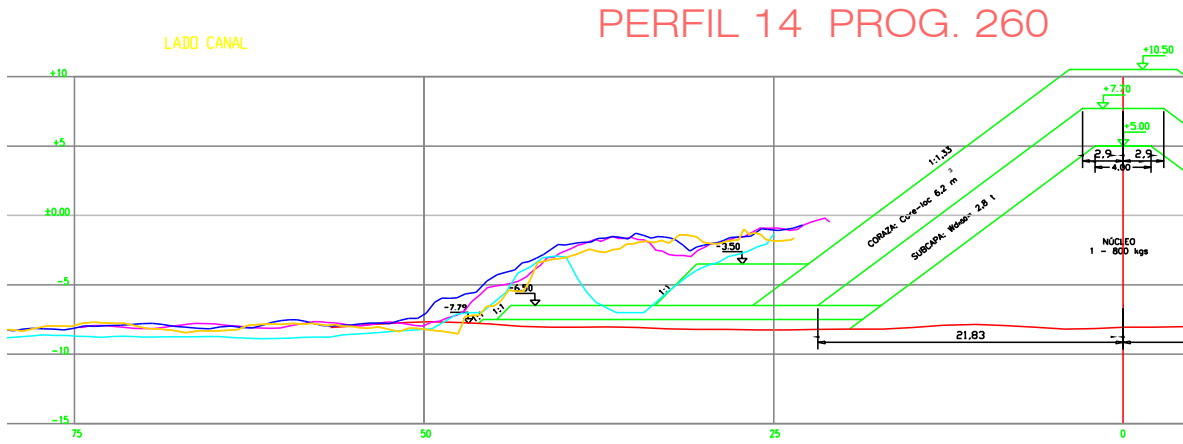


Figura A.5

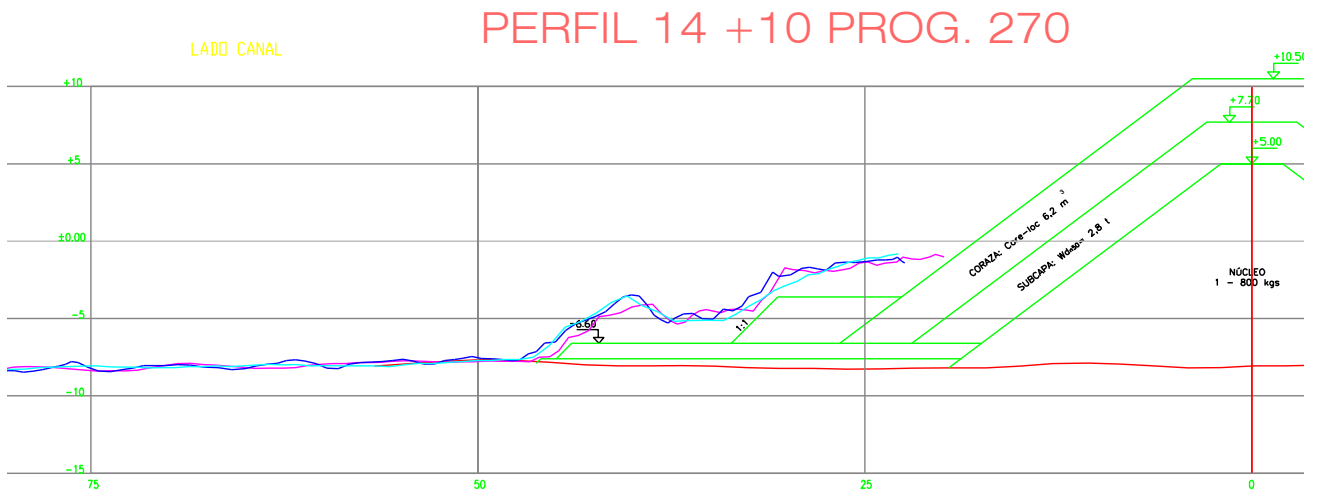


Figura A.6

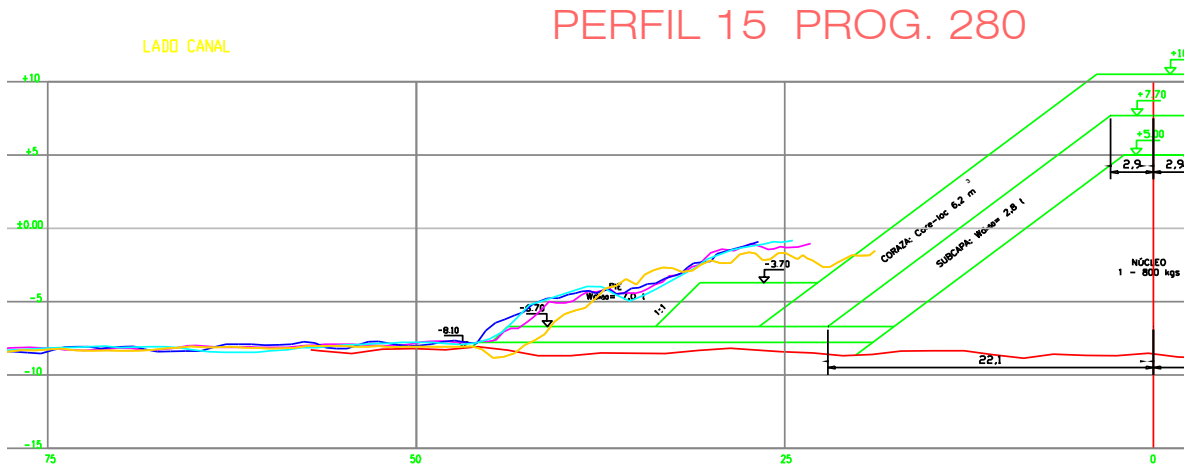


Figura A.7

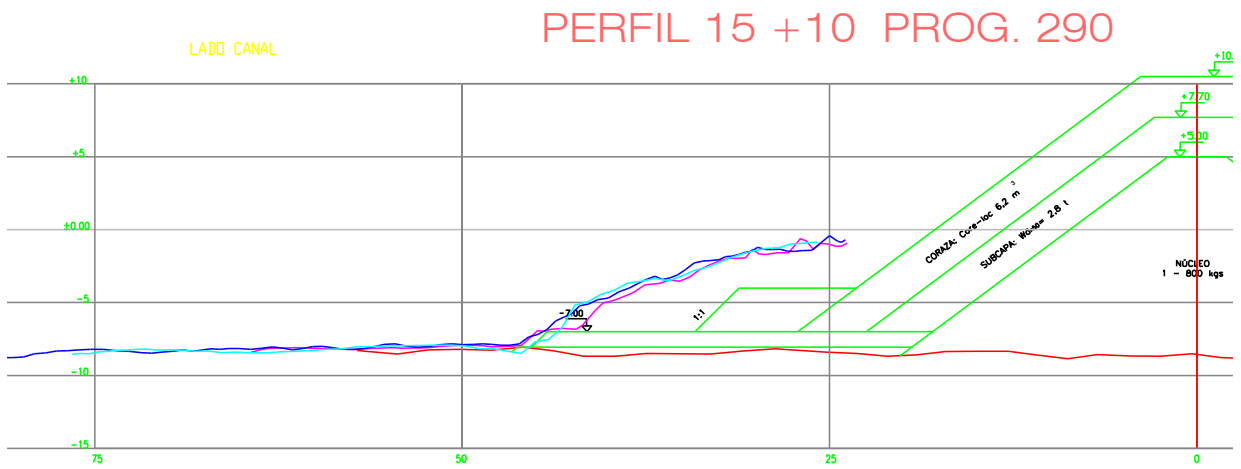
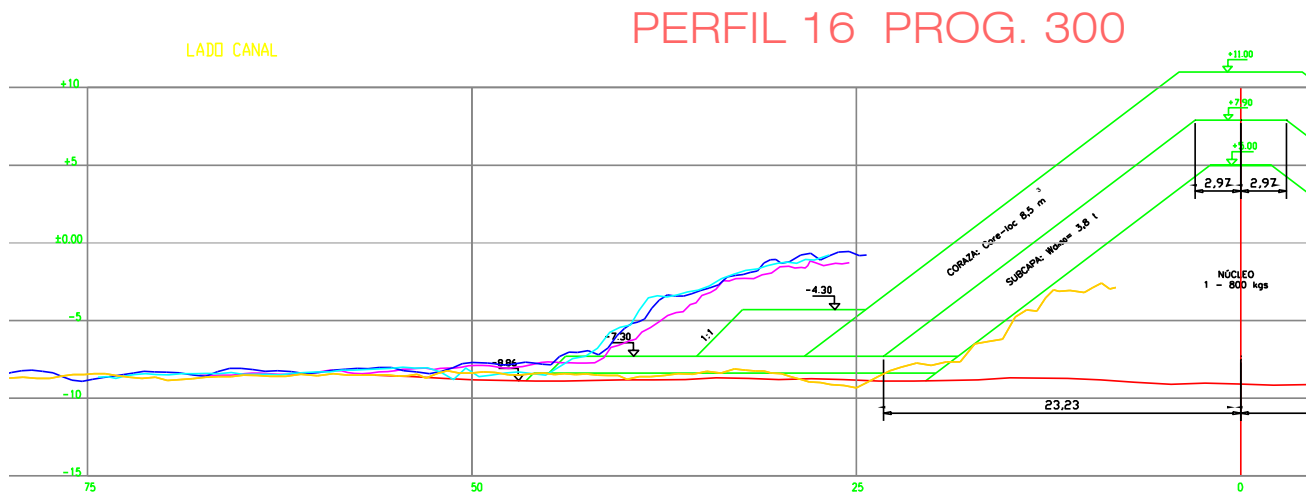
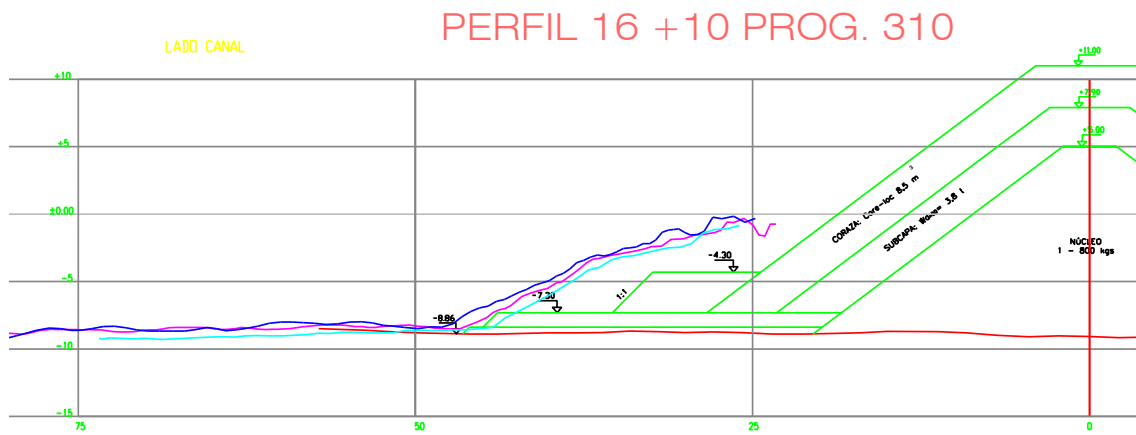


Figura A.8



**Figura A.9**



**Figura A.10**

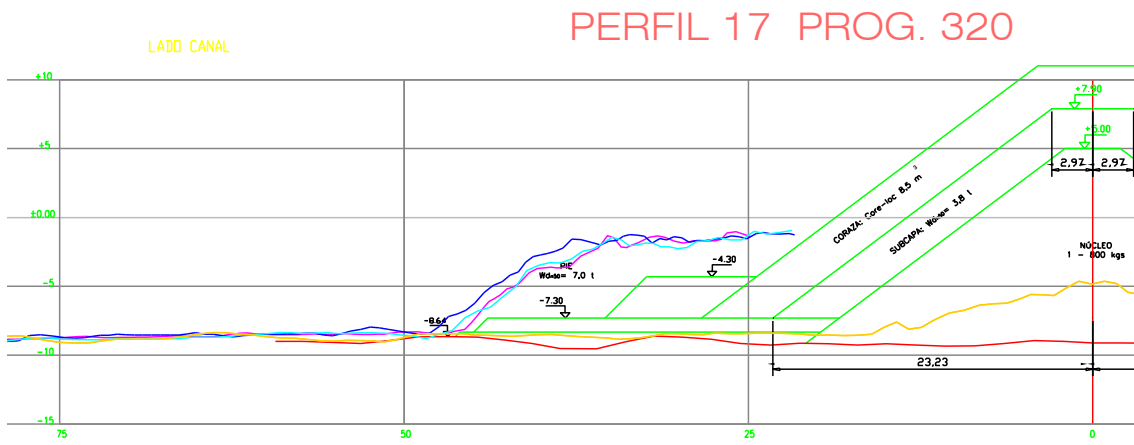


Figura A.11

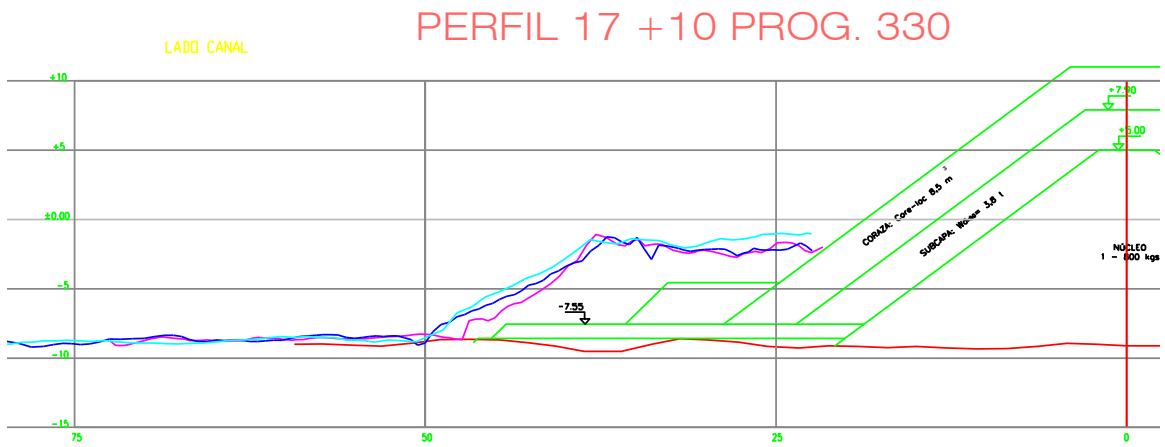


Figura A.12

