



**MEDICION Y PRONOSTICO DE OLAS
EN EL EMBALSE CASA DE PIEDRA**

Acta Complementaria N° 1

**Informe Técnico N° 1
Abril 2003**

Informe LHA 212-06-03



EN EL EMBALSE CASA DE PIEDRA

Acta Complementaria N° 1

**Informe Técnico N° 1
Abril 2003**

RESUMEN: Se describen las tareas realizadas hasta el 15 de marzo de 2003, relativas al procesamiento y análisis de registros de olas obtenidos en el Embalse Casa de Piedra y la validación de un modelo matemático de pronóstico de olas a partir de vientos. Se realiza una evaluación de las olas extremas esperables para distintos períodos de retorno y del daño probable sobre el enrocado que protege el talud interno de la presa.

PALABRAS CLAVE: medición de olas – pronóstico de olas – modelos matemáticos – olas en embalses – protección de taludes - enrocados - embalse Casa de Piedra



*Medición y Pronóstico de olas en el embalse Casa de Piedra
Acta Complementaria 1 - Informe Técnico 1*

Informe Producido por:

Ing. Roberto CASTELLANO

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. N. TOMAZIN

Ing. A. GRANDE

INFORME TECNICO 1

Abril 2003

INTRODUCCIÓN

El presente Informe Técnico N° 1 describe las tareas realizadas en el marco del convenio suscripto entre el *Instituto Nacional del Agua* (INA) y el *Ente Ejecutivo Presa Embalse Casa de Piedra* (ECP) el 28 de Agosto de 2001, y el Acta Complementaria N° 1 al contrato, suscripta entre las partes el 11 de septiembre de 2002.

OBJETIVOS

El objetivo de este IT1 es la actualización al 15 de marzo de 2003 de la descripción de los procesos físicos y de la evaluación de la seguridad del enrocado de protección que han formado parte del estudio encomendado por el ECP, en virtud de la ampliación de la base de datos disponible que son registrados en forma continua o periódica en el embalse (olas, vientos, relevamientos del talud de enrocado). El Informe Final presentado en 2002 incorporó la información de base disponible hasta el 15 de septiembre de ese año.

ESTADO AL 15 DE MARZO DE 2003

Medición de vientos

Desde el 22 de enero de 1997 el ECP registra en forma continua variables meteorológicas en una estación ubicada sobre el muro de guía norte al aliviadero de la presa. A partir de 24 de octubre 2001 se registran adicionalmente en una segunda estación ubicada en la margen norte del embalse.

Medición de olas

Desde el 21 de febrero de 2002 se halla instalado un olígrafo InterOcean S4B. Los registros se obtienen cada 2 horas con una duración de 14 minutos. Los registros de olas disponibles se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Periodo	Fecha de recuperación	Inicio		Finalización		N° de registros	Hs max. (m)
		Día	Hora	Día	Hora		
1	13/03/02	21 de febrero	18:00	13 de marzo	08:00	236	1.22
2	02/04/02	21 de marzo	16:00	2 de abril	12:00	143	1.00
3	30/04/02	10 de abril	12:00	30 de abril	14:00	237	1.11
4	29/05/02	9 de mayo	12:00	29 de mayo	08:00	239	0.63
5	28/06/02	29 de mayo	12:00	28 de junio	10:00	360	1.41
6	15/08/2002	16 de julio	18:00	15 de agosto	08:00	356	1.00
7	23/09/2002	15 de agosto	12:00	23 de septiembre	10:00	468	0.91
8	27/09/2002	23 de septiembre	16:00	27 de septiembre	12:00	47	0.76
9	10/01/02	27 de septiembre	16:00	1 de octubre	10:00	46	0.31
10	10/08/02	1 de octubre	13:00	8 de octubre	09:00	83	2.28
11	22/10/2002	10 de octubre	14:00	18 de octubre	04:00	92	0.96
12	25/10/2002	22 de octubre	16:00	25 de octubre	10:00	34	0.14
13	29/10/2002	25 de octubre	12:00	29 de octubre	10:00	48	0.14
14	31/10/2002	29 de octubre	12:00	31 de octubre	10:00	24	0.17
15	11/07/02	31 de octubre	12:00	7 de noviembre	10:00	84	0.98
16	15/11/2002	7 de noviembre	12:00	12 de noviembre	12:00	61	0.50
17	18/11/2002	15 de noviembre	12:00	18 de noviembre	12:00	37	0.86
18	28/11/2002	18 de noviembre	16:00	28 de noviembre	10:00	118	1.40
19	17/12/2002	28 de noviembre	14:00	7 de diciembre	14:00	109	0.94
20	20/12/2002	17 de diciembre	14:00	20 de diciembre	14:00	34	1.57
21	26/12/2002	20 de diciembre	12:00	26 de diciembre	12:00	73	1.17
22	01/02/03	26 de diciembre	13:00	2 de enero	12:00	84	0.71
23	15/01/2003	2 de enero	14:00	11 de enero	16:00	109	0.76
24	24/01/2003	21 de enero	12:00	24 de enero	10:00	36	0.68
25	30/01/2003	24 de enero	12:00	30 de enero	08:00	71	0.35
26	02/03/03	30 de enero	12:00	3 de febrero	08:00	47	0.67
27	02/07/03	3 de febrero	12:00	7 de febrero	12:00	49	0.72
28	02/10/03	7 de febrero	14:00	10 de febrero	12:00	36	0.72
29	13/02/2003	10 de febrero	14:00	13 de febrero	08:00	34	0.28
30	21/02/2003	13 de febrero	10:00	21 de febrero	12:00	98	1.33
31	25/02/2003	21 de febrero	14:00	25 de febrero	08:00	46	0.55
32	03/05/03	25 de febrero	10:00	5 de marzo	12:00	98	0.40
33	03/11/03	5 de marzo	16:00	11 de marzo	08:00	69	0.48
34	21/03/2003	21 de marzo	12:00	18 de marzo	12:00	80	0.43

En particular se describen los temporales intensos registrados en octubre y noviembre de 2002.

Temporal del 6 de octubre de 2002

El día 6 de octubre de 2002 se produjo un temporal de importancia que causó un daño considerable sobre el talud.

El nivel de embalse se encontraba en los 279.25 m durante el día de la tormenta.

La intensidad del viento fue de importancia, por momentos alrededor de los 100 Km/h, y principalmente del sector Oeste.

Las olas generadas fueron registradas por el olígrafo, habiendo persistido 4 horas por encima de 1.50 m y 1.5 horas por encima de los 2 m de altura. La **Tabla 2** muestra la secuencia de valores de altura de ola registrados. La máxima ola significativa registrada fue de 2.28 m y su período correspondiente de 4.04 s.

TABLA 2 – 6 de Octubre de 2002 - Olas registradas

OLÍGRAFO	Hora						
	7	9	11	13	15	17	19
H (m)	0.49	0.60	1.19	2.28	1.42	1.20	1.03
Ts (s)	2.62	3.21	3.41	4.04	3.68	3.51	3.55

TORMENTA DEL 26 DE NOVIEMBRE DE 2002

El martes 26 de noviembre ocurrió un segundo temporal de viento, aunque de menor intensidad y duración que el de octubre. La cota de embalse fue de 281,25 m.

Entre las 10:00 y las 12:00 el viento se incrementó de 30 a 62.8 Km/h procedente de dirección variable entre W y WSW. Entre las 14 y las 15 sopló de dirección W alcanzando a las 15 horas los 96.6 Km/h (velocidad media horaria). Finalmente rotó al WSW y la intensidad se redujo a valores inferiores a 50 Km/h después de la medianoche.

Las olas registradas por el olígrafo se indican en la **Tabla 3**.

Tabla 3 – Olas registradas por el olígrafo – 26/11/2002

OLÍGRAFO	Hora			
	12	14	16	18
H (m)	1.12	0.76	1.45	1.02
T(s)	3.62	3.37	4.29	3.66

Modelación de olas generadas por viento

Se implementó un modelo de crecimiento de olas por acción del viento, el que se halla en fase de ajuste y calibración mediante la medición simultánea de olas y vientos. El modelo se basa en las fórmulas empíricas de predicción de desarrollo de olas en aguas profundas. En las **Figuras 1 a 4** se muestra el ajuste resultante para las situaciones observadas el 6 de Octubre, el 26 de noviembre y el 24 de diciembre de 2002 y el 14 de febrero de 2003. Estos han sido los eventos más relevantes observados en el período comprendido entre el 15 de septiembre de 2002 y el 15 de marzo de 2003.

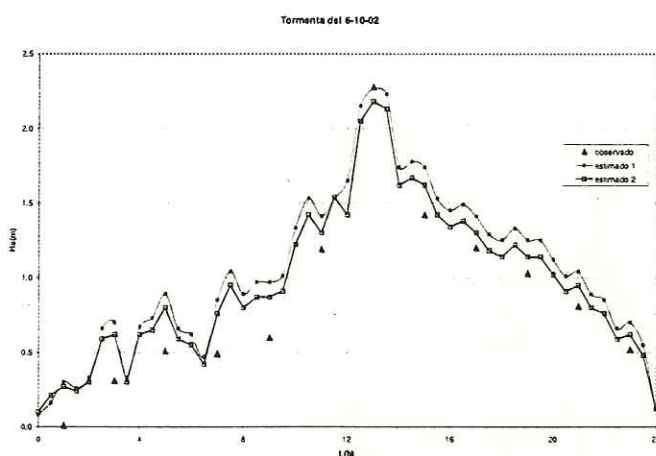


FIGURA 1

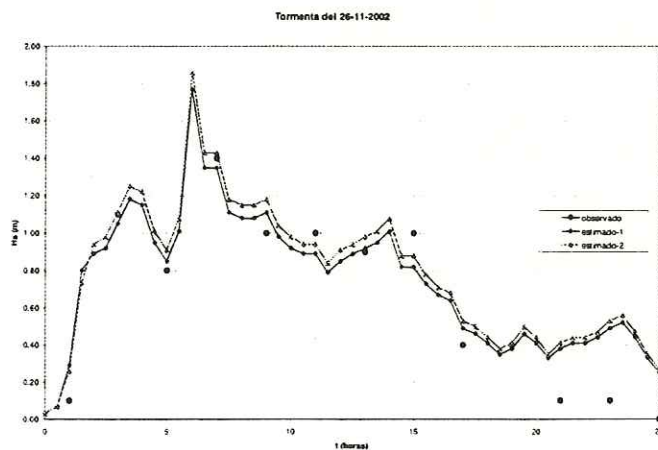


FIGURA 2

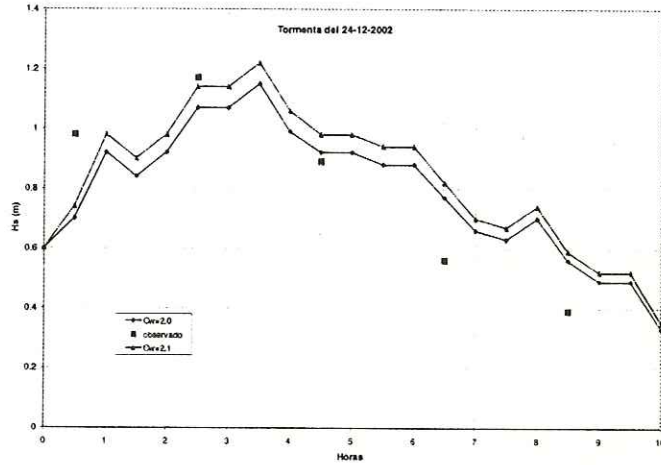


FIGURA 3

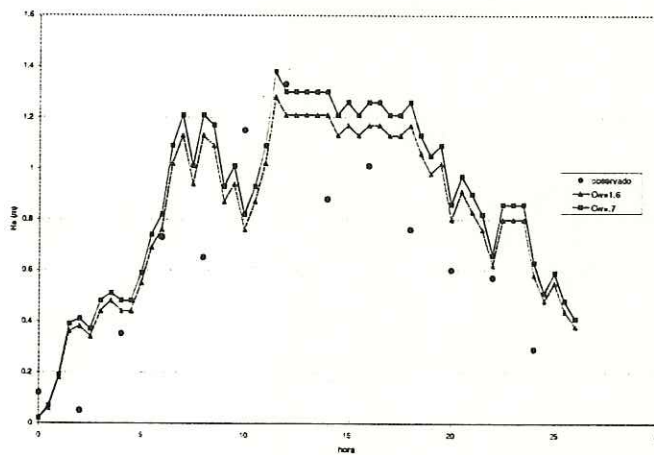


FIGURA 4

Cabe señalar particularmente que en el último caso, hallándose el nivel de embalse en cota +282, el instrumento se encontraba a 8 m bajo la superficie libre, por lo que su sensibilidad (particularmente para períodos de ola cortos) se ve fuertemente reducida. Esto puede explicar la mayor falta de correspondencia entre valores calculados y registrados.

Estadística de las olas

Un listado de eventos relevantes ($H > 1$ m) para el período enero 1997- marzo 2003 se muestra en la **Tabla 4**.

Tabla 4

Fecha	Dirección	H _{smax} [m]	Ts [seg]	Cota de embalse
1-feb-97	W	1.2	3.5	276.6
1-feb-97	WSW	2.1	4.9	276.6
27-dic-97	WSW	1.7	4.6	278.3
16-ene-98	WSW	1.8	4.6	279.4
22-oct-98	WSW	1.7	4.5	278.7
29-jul-99	W	1.5	4.3	275.8
5-ago-99	WSW	1.8	4.6	275.8
12-oct-00	WSW	1.9	4.7	276.0
11-nov-00	WSW	1.8	4.6	276.2
10-ene-01	WSW	2.3	5.1	280.8
30-ene-01	WSW	2.1	4.8	280.7
9-feb-01	WSW	2.2	5	280.7
3-jul-01	W	1.1	3.2	277.7
14-mar-02	WNW	1.3	3.7	280.3
6-oct-02	W	2.3	5.5	279.25
26-nov-02	WSW	1.8	4.6	281.25
24-dic-02	W	1.2	2.9	282.7
14-02-03	WSW	1.40	3.9	282.6

Los nuevos registros de olas obtenidos en el embalse han permitido realizar un nuevo ajuste de la descripción del clima de olas. La **Figura 5** muestra el ajuste realizado para los valores de altura de ola computados a partir de registros de viento entre el 1 de febrero de 1997 y el 31 de marzo de 2003 (6 años).

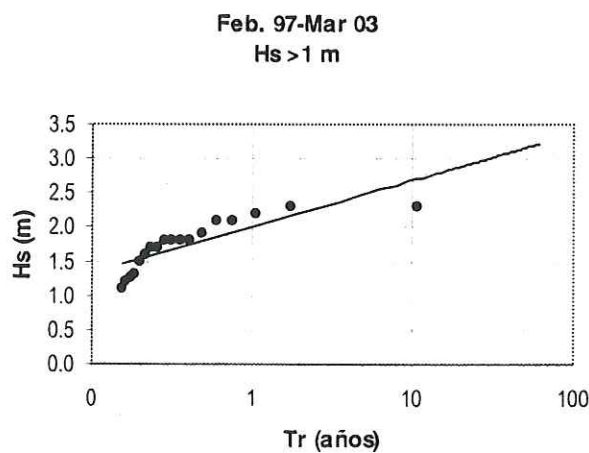


FIGURA 5

En el ajuste realizado en la **Figura 5** se consideraron valores de H_s mayores que 1 m. Como puede observarse el ajuste tiende a sobreestimar las altura de ola para períodos de retorno prolongados; el ajuste mejora si se fija como umbral un valor de H_s próximo a 1,80 m (**Figura 6**).

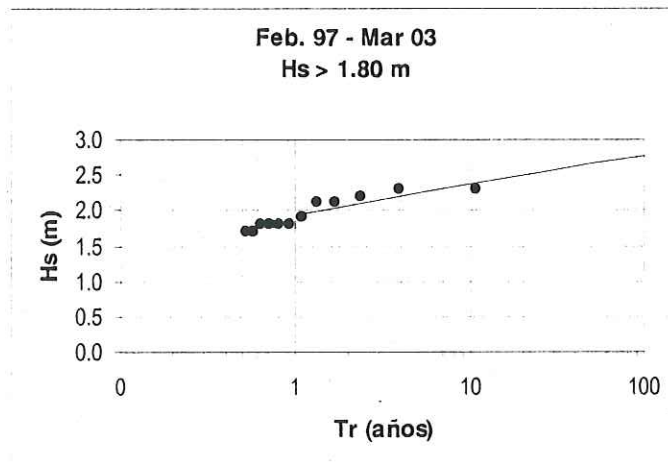


FIGURA 6

Aunque no estrictamente correcto, un segundo ajuste se realizó para una serie extendida, compuesta por el mismo conjunto de datos con el agregado del temporal de junio de 1994 ($H_s = 2.3$ m); la base de tiempo se extendió a 8,75 años. Se adoptó la hipótesis de que entre junio de 1994 y febrero de 1997 no ocurrieron eventos superiores a $H_s = 1.80$ m, esto fundamentado en el hecho de que en el período indicado el enrocado de protección no sufrió daños, habiéndose establecido que el daño se desarrolla para valores de $H_s = 1.80$ m. Los resultados se muestran en la **Figura 7**

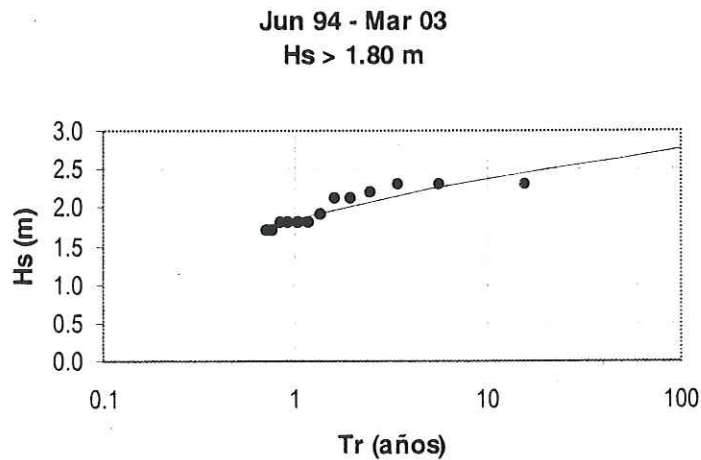


FIGURA 7

En ambos casos los resultados muestran que en 50 años es esperable que una ola de 2.65 m sea igualada o superada una vez en promedio. Esto está indicado en la **Tabla 5**.

Tabla 5

Tr (años)	Hs (m)
	1997-2003
2	2.09
5	2.26
10	2.38
25	2.53
50	2.65
100	2.76

Puede concluirse que la incorporación de nuevos temporales registrados en el período septiembre 2002 a marzo 2003 sólo ha modificado levemente las tendencias presentadas en el Informe Final, en el que se había estimado una ola de altura significativa $H_s = 2.60$ m para un período de retorno de 50 años.

Debe quedar claro sin embargo que, por una parte, el modelo matemático de generación de olas en el que se ha sustentado la obtención de los datos de base para el cálculo estadístico, se halla en etapa de ajuste, y por la otra, puesto que el ológrafo continúa instalado en el embalse nueva información será incorporada, lo que hace previsible nuevas modificaciones a la actual descripción estadística del clima de olas en el embalse.

Evaluación del daño ocurrido

El embalse alcanzó su nivel de operación en 1991. En 1994 se produjo un primer temporal de considerable intensidad y duración que produjo daños en el talud. La altura de ola estimada fue de 2,30 m. En Diciembre 1995 se realizó una reparación.

La **Tabla 6** sintetiza los eventos más importantes ocurridos a partir de que el embalse adquiriera su nivel operativo. Se han incorporado los resultados del cálculo de nivel de daño S realizados a partir de datos de ola resultantes de la modelación matemática del daño progresivo siguiendo la metodología propuesta por J. Van der Meer, en función del área erosionada A y el diámetro del enrocado D_n :

$$S = \frac{A}{D_n^2}$$

La **Tabla 6** ha sido actualizada incorporando un temporal intenso ocurrido el 6 de octubre de 2002 y dos temporales de menor importancia registrados en noviembre y diciembre de ese año. Es importante señalar que entre el primero de ellos y los siguientes el nivel de embalse sufrió un ascenso de 2 m como es habitual en esta época.

También se indican en la **Tabla 6** los valores estimados a partir de relevamientos realizados en el talud interno de la presa y de volúmenes de enrocado colocados para reparar el talud.

Tabla 6

Embalse Casa de Piedra - Cronología de los eventos más relevantes

Fecha	Evento	Cuantificación	Observaciones
Jun-94	Finaliza llenado del embalse		cota de embalse = 280 m
23-Jun-94	Temporal	Hs= 2.3 m duración= 8 h	cota embalse = 280 m (por encima de 2 m)
	Modelación matemática	S= 5.4	(para $\gamma = 2300 \text{ Kg/m}^3$)
Abr-95	Relevamientos	S= 4.7	
Dic-95	Reparación	$V_{\text{colocado}}/\text{m} =$ s/d m^2	
Feb-97	Temporal	Hs= 2.3 m duración= 0.5 h	cota embalse = 276.6 m (por encima de 2 m)
	Modelación matemática	S= 2	(para $\gamma = 2300 \text{ Kg/m}^3$)
oct-dic 1998	Relevamientos	S= 2.6	
ene-feb 2001	temporales	Hs= 2.2 m duración= 2.5 h	cota embalse = 280 m (por encima de 2 m)
	Modelación matemática	S= 2.7	(para $\gamma = 2300 \text{ Kg/m}^3$)
abr-may 2001	Relevamientos	S= 4.5	
Jun-01	Reparación	$V_{\text{colocado}}/\text{m} =$ 3.1 m^2	
oct-nov-2002	temporales	Hs= 2.3 m^2 duración= 1.5 h	cota embalse = 279.25 (por encima de 2 m)
	Modelación matemática	S= 2	(para $\gamma = 2300 \text{ Kg/m}^3$)
Oct-02	relevamientos	S= 6.6	

Análisis del daño registrado en octubre y noviembre 2002

Con los valores de altura de ola resultantes de la modelación matemática para estas fechas se aplicó el modelo de daño progresivo sobre el talud de enrocado basado en las ecuaciones de van der Meer, para lo que se utilizó peso específico $\gamma = 1.300 \text{ Kg/m}^3$ ($\Delta = 1.3$) La adopción de este valor al igual que la descripción de las técnicas e hipótesis de cálculo han sido expuestas en Informes previos del LH presentados al ECP. Determinaciones realizadas por el Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue sobre muestras obtenidas a la altura de la progresiva 6350 del eje de presa (Anexo I) avalan este valor.

El daño final calculado para la situación indicada resultó $S = 2$.

De acuerdo a los datos provistos por el ECP que surgieron de los relevamientos y cálculos realizados, se construyó la siguiente **Tabla 7**:

Tabla 7 - Erosión y nivel de daño del temporal de Octubre 2002 (Relevamientos)

ZONA	Progresivas [m]		Área media [m ²]	Desv. Stand. A	Nivel de daño S
	Desde	Hasta			
terr. sup. izq.	1100	6654.7	1.78	0.93	7.1
terr. inf. izq.	6654.7	7234.4	2.25	0.77	5.0
garganta	7234.4	7404.1	3.71	0.70	8.3
terr. derecha	7404.1	7858.4	2.40	0.87	9.6
Promedio Nivel de daño S en garganta y terraza inferior izquierda =					6.6

Con respecto a la condición de daño inicial S_0 puede considerarse que $S_0=0$, ya que desde la última reparación realizada sobre el talud (abril-mayo 2001) hubo sólo dos temporales de poca importancia:

- 3 de julio de 2001, la dirección fue del O-OSO y con una intensidad máxima de 85 Km/h. La ola generada no alcanza el 1.20 m. El nivel del embalse se encontraba en la cota 277.70 m.

- 14 de marzo de 2002, la intensidad del viento no supera los 70 Km/h. El nivel del embalse se encontraba en la cota 280.28 m.

Estos temporales no alcanzaron a producir una ola de importancia como para generar erosión en el talud. Se ha visto que las olas capaces de iniciar el desarrollo de daño sobre el talud recto (es decir inicialmente sin deterioro) con pendiente 1:2,5 es $H = 1.80$ m. Por lo tanto, la hipótesis adoptada ($S_0=0$) se consideró razonable.

El segundo temporal (Noviembre 2002) ocurrió con cotas de embalse mayores que el de octubre. Con la secuencia de datos de ola calculados para el temporal del 26 de noviembre de 2002 se determinó el daño final para un talud originalmente sano, arribándose a un valor calculado de nivel de daño $S < 1$.

Aunque al día de la fecha no ha sido posible analizar en profundidad los relevamientos posteriores a este temporal, se estima que unos 11.000 m³ de material fueron removidos a lo largo de 5.200 m (progresivas 1.100 a 6.300).

En particular para la terraza inferior izquierda y garganta (de acuerdo a las planillas suministradas por el ECP) entre progresivas 6652.8 a 7456.5 el volumen removido resultó de 1.539 m³ y el área media erosionada $A = 1.92$ m². Para un enrocado de diámetro nominal $D_n = 0.67$ m esto significa un nivel de daño medio $S = 4.3$ en este tramo.

Los temporales ocurridos en octubre y noviembre, en los que se produjo una erosión del perfil de la protección considerablemente mayor que la predicha por el modelo desarrollado, condujo a formular la hipótesis de que estos eventos (por las condiciones particulares en las que se produjeron) reflejan la existencia de un mecanismo de falla adicional no considerado hasta ahora. Es posible que este mecanismo esté vinculado a la variación del nivel de embalse.

En efecto, debido a las condiciones de manejo del embalse, la primavera y verano constituyen la época de acumulación de agua con el consiguiente incremento de su nivel, que pasa en términos medios de cota 275 m en invierno a 282 m en verano. La época de marcado ascenso de niveles (octubre a diciembre) coincide además con la época de vientos intensos, con lo que resulta probable la ocurrencia de una sucesión de temporales con niveles líquidos en crecimiento.

Así, la cuña de erosión desarrollada durante una situación específica (y no reparada), debilita las zonas inmediatas superiores no dañadas del talud, favoreciendo y potenciando el daño eventual en ocasión de temporales posteriores con niveles de agua mayores.

Estimación del daño probable

En el Informe de Avance 3 e Informe Final (INA – LHA 2002) se han presentado las bases y fundamentos teóricos del cálculo probabilístico. Se presenta acá una síntesis de esos conceptos y de los aspectos metodológicos.

- El dimensionamiento de estructuras se realiza usualmente a partir de una carga de diseño determinada que la estructura debe resistir. Esto no permite considerar las incertidumbres involucradas en la determinación de las variables resistentes y las solicitantes.
- La carga de diseño (la ola de diseño en este caso) está en todo caso definida sobre una base probabilística como un valor característico, por ejemplo el valor esperado dentro de un período de retorno T de 100 años. Así, este período de retorno es la única contribución al margen de seguridad en el diseño de la estructura. Si se escoge un período de retorno de 100 años para caracterizar la ola de diseño H_{100} , esto significa que *en promedio H_{100} será excedida una vez cada 100 años.*
- Una mejor aproximación en la determinación de la ola de diseño es utilizar la probabilidad de ocurrencia, es decir la probabilidad de que la ola de diseño sea superada *durante la vida útil L de la estructura:*

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T}\right) \quad (1)$$

Es conveniente entonces referir la probabilidad de falla P_f de la estructura a un período L que en la práctica puede ser la vida útil de la misma. Si un conjunto de n muestras de altura de ola significativa H_s responde a la distribución de Gumbel, la probabilidad F , dada por:

$$F(H_s) = \exp\left[-\exp\left[-(H_s - B)/A\right]\right] \quad (2)$$

expresa la probabilidad de que H_s no sea superada. Los parámetros de la distribución A y B pueden ser estimados a partir de los n datos usando técnicas tales como el método de la máxima probabilidad o el de los momentos.

- Utilizando (1) y (2) puede establecerse una altura de ola de diseño con una probabilidad determinada de no ser superada en la vida útil de la estructura, lo que constituye *un paso importante hacia un enfoque probabilístico* consistente.

Sin embargo este enfoque no permite la determinación del *grado de confianza* (o la probabilidad de falla) del proyecto; para abordar una solución a este problema deben aplicarse *métodos probabilísticos* más avanzados en los que se consideren las *incertezas* tanto de las solicitaciones involucradas como de las variables resistentes.

Las causas que contribuyen a la incertidumbre en la ola de diseño son:

1. La variabilidad estadística de la naturaleza. La altura de ola es una variable aleatoria.
2. La variabilidad debido al tamaño limitado de la muestra.
3. Errores de observación o del método de pronóstico
4. Elección inadecuada de la distribución que representará a la verdadera distribución de largo plazo.
5. Variabilidad de los algoritmos de cálculo (umbral, método de ajuste, etc.)
6. Cambios climatológicos

Los métodos probabilísticos se fundamentan en el concepto de que las variables que intervienen en el desarrollo de un proceso de daño de una estructura son de carácter aleatorio. Esto significa que una variable X tiene cierta probabilidad de adquirir un valor determinado x . La función que vincula el valor x de la variable con su probabilidad de ocurrencia p se denomina *función de densidad de probabilidad* f_x , que establece la probabilidad p de que el valor de una variable *se encuentre en el intervalo x a $x+dx$* .

Aunque en muchos casos la distribución verdadera de una variable es desconocida, bajo determinadas circunstancias se considera válido suponer que la distribución puede ser descrita por alguna función matemática como la distribución normal. En estos casos los métodos probabilísticos se denominan de *Nivel II*.

En general una ecuación que vincula variables resistentes (R) y solicitantes (S) de una estructura particular puede expresarse como:

$$g = R - S \quad (3)$$

Normalmente R y S son función de muchas variables y g se denomina función de falla.

El *estado límite* está dado por

$$g = 0 \quad (4)$$

la que se denomina *ecuación de estado límite* y define la así *denominada superficie de falla*, que separa la región segura ($g > 0$) de la de falla ($g < 0$).

En principio R es una *variable aleatoria* que incluye las variaciones en resistencia entre estructuras nominalmente idénticas, en tanto S , también aleatoria, representa los máximos efectos debidos a la sollicitación en un período de tiempo, por ejemplo L años sucesivos. Las distribuciones de R y de S se asumen independientes del tiempo. La *probabilidad de falla* P_f , *durante un período de L años* resulta dado por:

$$P_f = \text{Prob}[g \leq 0] \quad (5)$$

La *confianza (o seguridad)* de la estructura R_f se define como .

$$R_f = 1 - P_f \quad (6)$$

Puede demostrarse que la probabilidad de falla P_f *durante la vida útil de la estructura* es:

$$P_f = \text{prob}(g \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f_g(x) dx = \Phi \left[\frac{0 - \mu_g}{\sigma_g} \right] = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

donde f_g es la función de densidad de distribución normal standard de g , Φ es la función de probabilidad normal standard, y

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (8)$$

es una medida de la probabilidad de falla denominada índice de confianza, siendo μ_g y σ_g el valor medio y el desvío standard de g respectivamente.

La determinación de la probabilidad de falla durante la vida útil de una estructura se fundamenta en los siguientes conceptos:

1. La probabilidad de falla es $P_f = \Phi(-\beta)$.
2. El índice de confianza β representa la mínima distancia a la superficie de falla $g = 0$.

3. La superficie de falla se define a partir del concepto *de excedencia de la ola de diseño en la vida útil de la estructura*
4. Para el cálculo de β se linealiza la superficie de falla.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Se genera un número aleatorio entre 0 y 1 y se le asigna este valor a la probabilidad de no excedencia F. Aplicando (por ejemplo) la función inversa de Gumbel se obtiene x:

$$x = F_x^{-1}(F) = A_v [-\ln(-\ln F)] + B_v \quad (9)$$

2. Se repite 1) N veces de manera de obtener una muestra de N valores de la distribución de x según la ley de Gumbel.
3. Se ajusta la muestra de N valores de x a la distribución de Gumbel, y se tiene una nueva estimación de A y B.
4. Los pasos 2 y 3 se repiten un número grande de veces (10.000 a 15.000) de manera de obtener 10.000 a 15.000 pares de valores de A y B.
5. Se calculan las desviaciones standard σA y σB de A y B respectivamente.

Para incluir el error de medición y pronóstico se asume que estos errores también siguen la distribución normal. El siguiente paso puede ser agregado después del paso 1)

6. Generar un número aleatorio entre 0 y 1 y asignarlo a la probabilidad de no excedencia F. Con ello:

$$x_{\text{modificado}} = x + C x \Phi^{-1}(F) \quad (10)$$

donde Φ es la distribución normal standard y C el coeficiente de variación indicado en la Tabla 6.1.

7. Una vez determinados σA y σB , puede procederse al cálculo de β_{HL} y de la probabilidad de falla $P_f = \Phi(-\beta_{HL})$ en la vida útil de la estructura.

Los métodos probabilísticos permiten cuantificar la probabilidad de superación de la condición de diseño de una estructura (es decir la probabilidad de falla) teniendo en

cuenta que tanto las variables resistentes como las solicitaciones presentan normalmente apartamientos de sus valores característicos.

En el caso del presente estudio, sólo se consideró como mecanismo de falla el desplazamiento de elementos de enrocado que constituyen la protección del talud interno de la represa, lo que se denominará la *falla hidráulica de la coraza*.

Siendo las olas la principal solicitud hidráulica a la que está sujeta el talud de enrocado, como causas de falla se consideró la *variabilidad de la altura* de ola debido a la incerteza en la determinación de la ola de diseño.

Se implementaron dos metodologías para la estimación del daño probable:

1. First Order Reliability Method (FORM). Permite establecer la probabilidad de falla de la estructura (definiéndose en este caso la falla como la superación de un nivel de daño S determinado) e incorporando la incerteza en la determinación de las variables. En este caso sólo se consideró la variabilidad de la altura de ola, dado que es la variable más indeterminada debido a los cortos períodos de registro.
2. Método de los factores de seguridad parciales (PIANC, Working Group 12)

Actualización del daño probable.

La metodología indicada fue aplicada para la determinación de la probabilidad de falla de enrocados con pesos específicos $\gamma=2.4 \text{ t/m}^3$, $\gamma= 2.5 \text{ t/m}^3$ y $\gamma = 2.6 \text{ t/m}^3$. Las determinaciones se realizaron para diámetro nominal $D_n = 0.6 \text{ m}$, 0.7 m , 0.8 m y 1.0 m .

Los valores indicados se adoptaron en virtud de la reparación del talud prevista para 2003, en la que se utilizará roca proveniente de canteras cercanas para las que se estiman valores de pesos específicos de ese orden.

Si bien no está definido con certeza cual va a ser el nuevo material a utilizar, según el personal en obra se considera muy factible el uso de una riolita de densidad $\gamma=2.45 \text{ t/m}^3$ por lo que se agregó el correspondiente juego de curvas. Las características de este material fueron determinadas por el laboratorio CIMAR de la Universidad del Comahue y se adjuntan en el Anexo I.

Aunque se ha utilizado en esta determinación las mismas distribuciones estadísticas de olas presentadas (y utilizadas) en el Informe Final, se ha visto que los ajustes por

incorporación de nuevos datos no son sustanciales (altura de ola 5 cm mayor para $T_r = 50$ años).

Los nuevos conjuntos de curvas resultantes se muestran en las Figuras 5 a 10, y podrán ser de utilidad para el diseño de la reparación prevista.

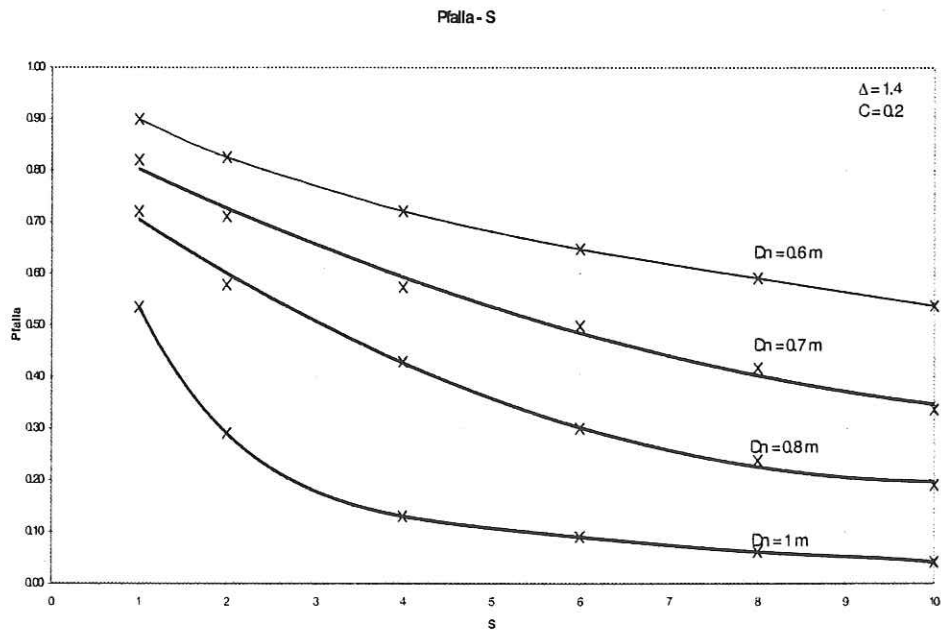


FIGURA 5

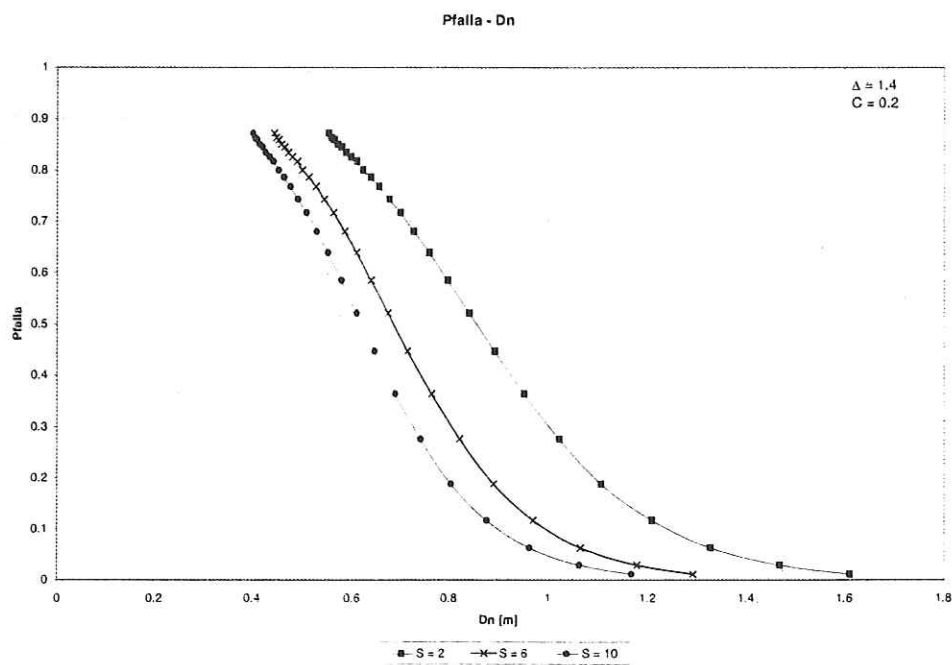


FIGURA 6

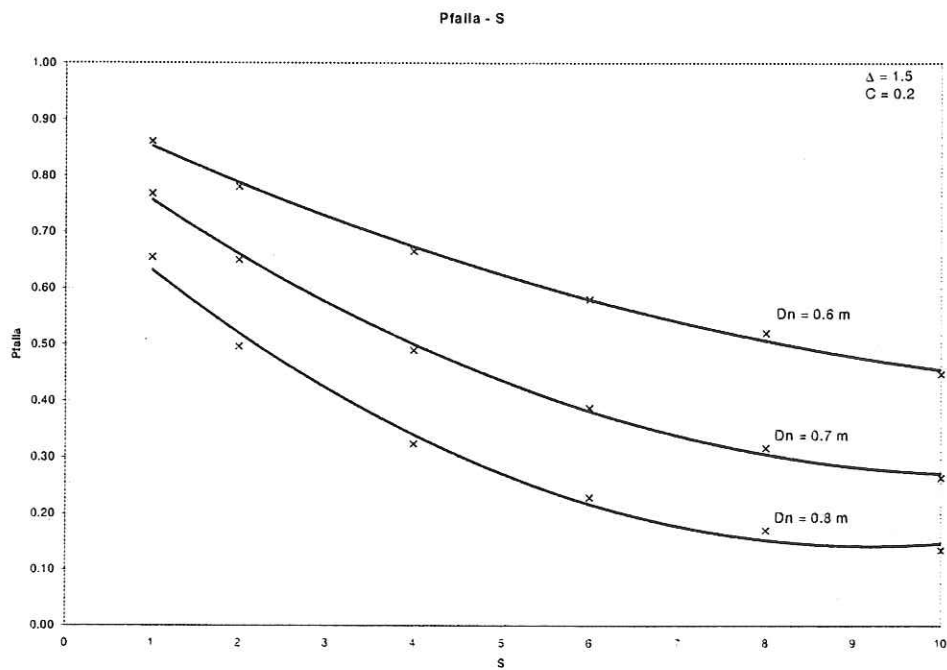


FIGURA 7

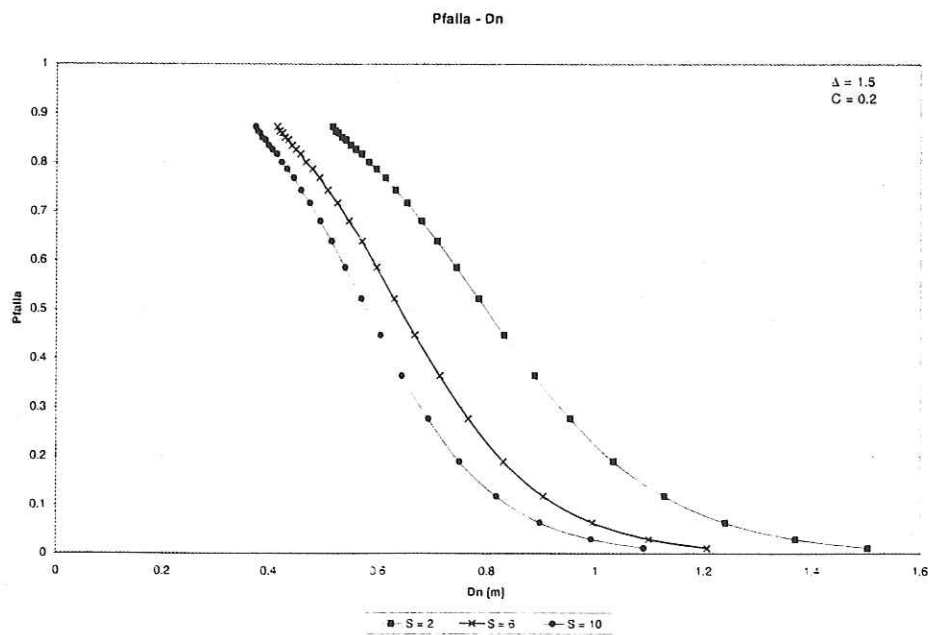


FIGURA 8

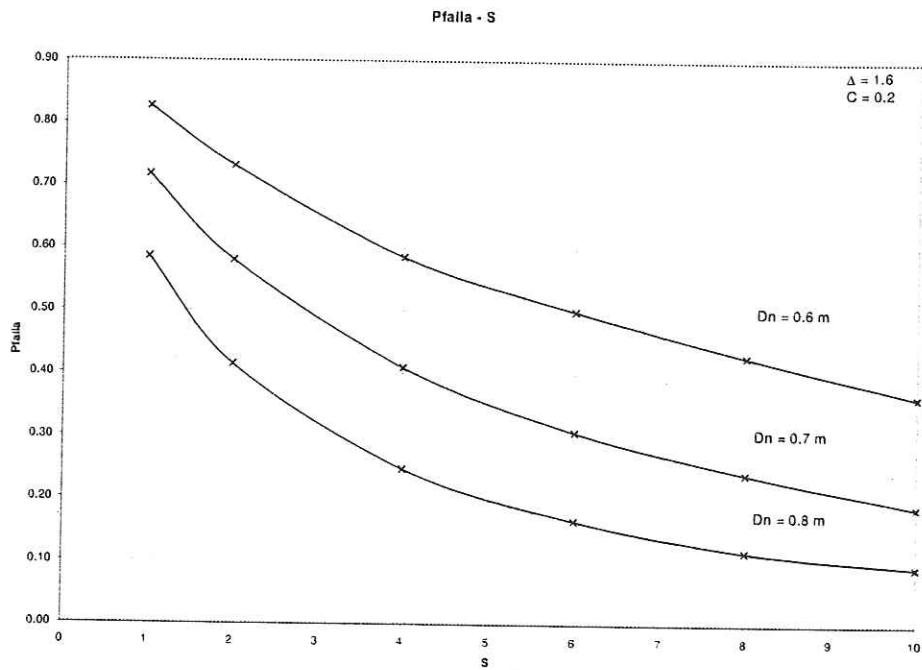


FIGURA 9

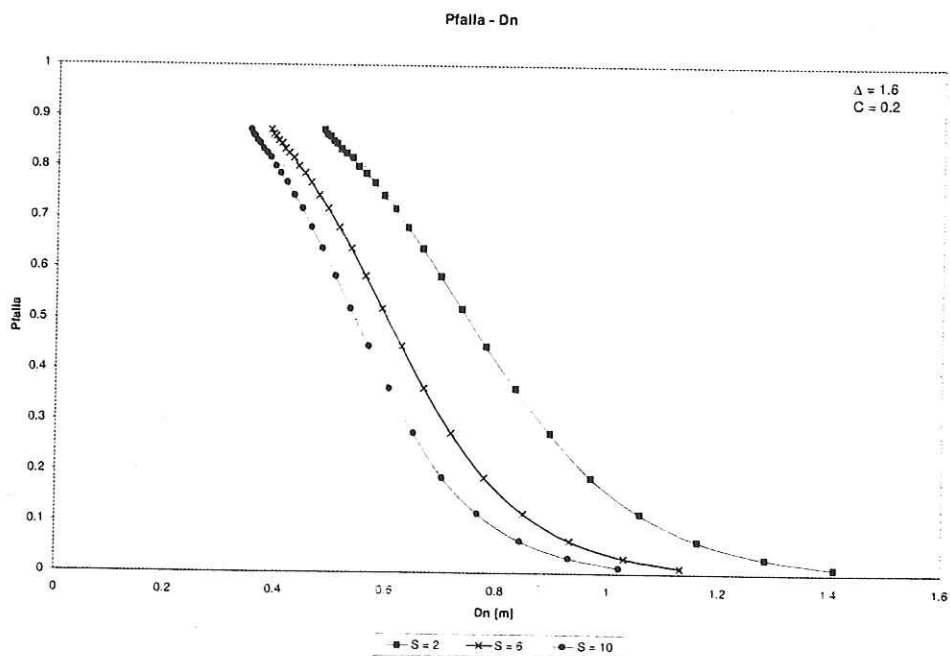


FIGURA 10

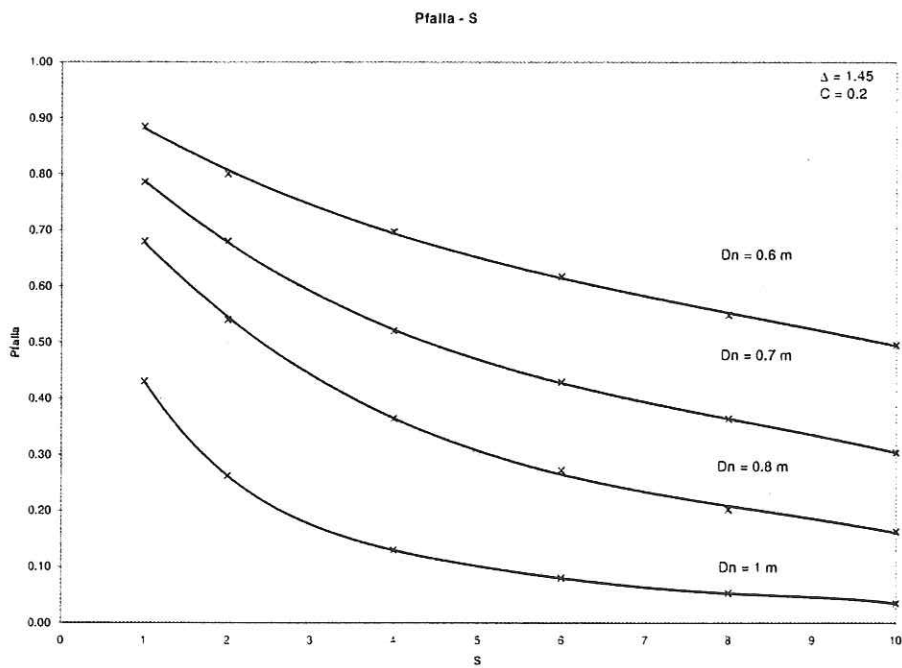


FIGURA 11

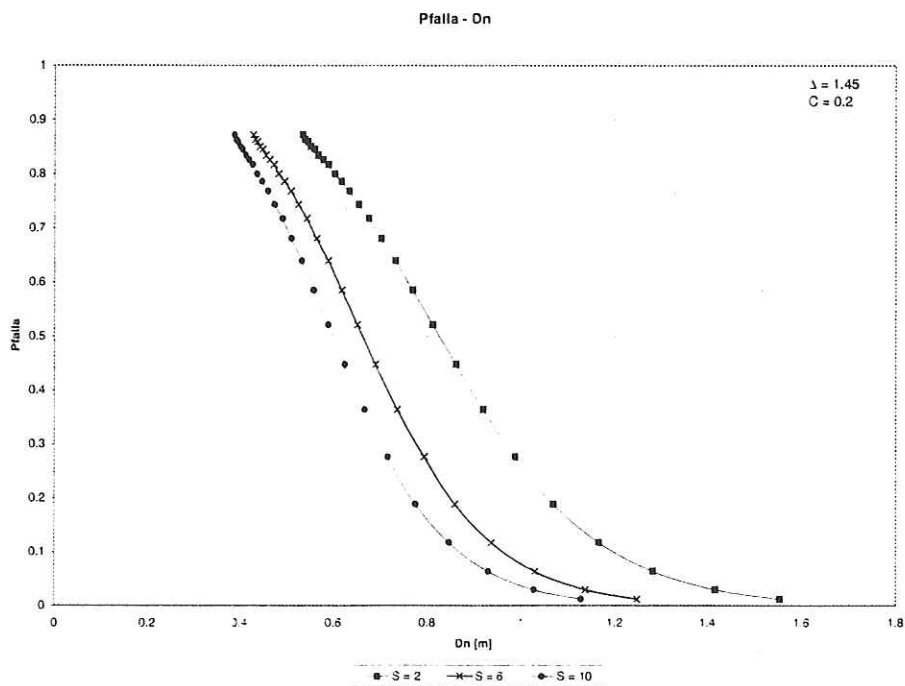


FIGURA 12

Informes

Durante el período de vigencia del Contrato y del Acta Complementaria 1, se produjeron los siguientes informes:

MEDICION Y PRONOSTICO DE OLAS EN EL EMBALSE CASA DE PIEDRA.
Informe de Avance N° 1. LHA-212-01-01. Diciembre de 2001.

MEDICION Y PRONOSTICO DE OLAS EN EL EMBALSE CASA DE PIEDRA.
Informe de Avance N° 2. LHA-212-02-02. Abril 2002.

MEDICION Y PRONOSTICO DE OLAS EN EL EMBALSE CASA DE PIEDRA.
Informe de Avance N° 3. LHA-212-01-01. Julio de 2002.

MEDICION Y PRONOSTICO DE OLAS EN EL EMBALSE CASA DE PIEDRA.
Informe de Avance N° 4. LHA-212-01-01. Septiembre de 2002.

MEDICION Y PRONOSTICO DE OLAS EN EL EMBALSE CASA DE PIEDRA.
Informe Final. LHA-212-01-01. Octubre de 2002.

INFORME SOBRE LAS TORMENTAS Y DAÑOS OCURRIDOS EN EL EMBALSE
CASA DE PIEDRA EN OCTUBRE Y NOVIEMBRE 2002 Ing. R. CASTELLANO –
Ing. A. GRANDE. INA - Laboratorio de Hidráulica Diciembre 2002



ANEXO I

Norma IRAM 1533 – AGREGADOS GRUESOS

Método de Laboratorio para la determinación de la Densidad Relativa, Densidad Relativa
Aparente y Absorción de Agua

Bloques de caliza Casa de Piedra Progr. 6350

Muestra N°	Densidad Relativa Agregado Saturado Superficie Seca	Densidad Relativa Agregado Seco	Densidad Relativa Aparente	Absorción %
01-02	2,36	2,35	2,38	0,47
01-02-X	2,38	2,36	2,40	0,60
02-02	2,34	2,31	2,37	1,15
02-02-X	2,29	2,23	2,36	2,50
03-02	2,19	2,13	2,27	2,91
03-02-X	2,23	2,15	2,34	3,60

La muestra 01-02 corresponde a caliza masiva de Prog 6350, densidad medida en un solo bloque
La muestra 01-02-X corresponde a la misma muestra, densidad medida en 9 a 10 fragmentos de 7 a 10 cm de tamaño.

Idem para las muestras 02-02 y 02-02-X correspondiente a caliza intermedia Proy 6350 (lavador)

Idem para las muestras 03-02 y 03-02-X correspondiente a caliza muy oquerosa de Proy 6350.

Laboratorio de Hormigones
Facultad de Ingeniería
U.N. del Comahue

Norma IRAM 1533 – AGREGADOS GRUESOS

Método de Laboratorio para la determinación de la Densidad Relativa, Densidad Relativa
Aparente y Absorción de Agua

PUELEN - CANTERA RUTA 17 Y AFLORAMIENTO IGM 42

Muestra N°	Densidad Relativa Agregado Saturado Superficie Seca	Densidad Relativa Agregado Seco	Densidad Relativa Aparente	Absorción %
1-20	2,47	2,46	2,51	0,61
2-20	2,44	2,43	2,48	0,64
3-20	2,46	2,45	2,48	0,59
4-20	2,44	2,43	2,46	0,56
5-20	2,47	2,43	2,47	0,70
6-20	2,44	2,42	2,46	0,68