

## PARTE 4

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA**  
**XII CONGRESO CHILENO**



1

### **ANALISIS Y SOLUCIONES PARA LAS ROTURAS DEL CUENCO AMORTIGUADOR DE LA PRESA ARROYITO**

**CARLOS M. ANGELACCIO (1) - RICARDO RIEDEL G. (2)**  
**JORGE D. BACCHIEGA (3) - HECTOR D. BARRIONUEVO (3)**  
**CLAUDIO FATTOR (3)**

#### **RESUMEN**

Se plantean en el siguiente trabajo los reiterados problemas de roturas sufridos por el cuenco dissipador de energía del vertedero de la presa Arroyito, en Argentina. Se plantea la metodología utilizada para su diagnóstico, las conclusiones sobre las causas que las originaron y las soluciones de proyecto que se adoptaron. Se presenta asimismo la importancia de la interrelación entre la investigación en Laboratorio (desarrollada por el INCyTH en Argentina) y el desarrollo de la ingeniería (ejecutada por INGENDESA de Chile) para arribar a soluciones factibles de problemas concretos.

- (1) Ingeniero Civil, Jefe Programa Hidráulica de Obras, LHA-INCyTH, Argentina
- (2) Ing. Civil, Jefe de Proyectos, Área Proyectos Hidráulicos, INGENDESA, Chile
- (3) Ingenieros civiles, integrantes del equipo de Hidráulica de Obras, Laboratorio de Hidráulica Aplicada, INCyTH, Argentina

## 1. INTRODUCCION

El aprovechamiento hidroeléctrico de Arroyito se ubica en el río Limay, límite de las provincias de Neuquén y Río Negro, Argentina, aguas abajo de la central El Chocón. Consta de una presa de grava arenosa permeable de 24 m de altura, una casa de máquinas con tres turbinas Kaplan de 42,5 Mw y 300m<sup>3</sup>/s cada una y un vertedero frontal con 7 vanos de 12,5 m de ancho cada uno, separados con machones de 3,0 m de espesor.

El caudal de diseño del vertedero es 2580 m<sup>3</sup>/s, que sumado al caudal de la central totaliza un caudal máximo de evacuación de unos 3500 m<sup>3</sup>/s. El perfil del vertedero es similar a un perfil Creage normal de 5,73 m de altura de diseño. Hacia aguas abajo empalma con un cuenco de disipación a resalto con dados de impacto, ubicados en su tercio de aguas arriba. El cuenco tiene 30,0 m de largo incluyendo una grada de subida de 5,5 m de altura, aguas abajo de la cual comienza el canal de restitución de las aguas al río Limay. En las Figuras 1 y 2 se muestra la geometría de la obra.

Desde la puesta en marcha en 1976 se realizaron numerosas inspecciones del cuenco, detectándose importantes roturas en los hormigones, especialmente en los dientes de choque. Considerando estos hechos, la empresa concesionaria de la obra, Hidroeléctrica El Chocón S.A., decidió ejecutar el estudio y el proyecto de una solución definitiva al problema con el apoyo de dos modelos físicos. Los estudios en modelo fueron realizados por el Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INCyTH, Argentina. La ejecución del proyecto de la solución fue realizada por la empresa de ingeniería INGENDESA, Chile.

## 2. ROTURAS DE LOS HORMIGONES DEL CUENCO

Durante la construcción de la central Arroyito el río Limay se desvió a través de once orificios practicados en el cuerpo del vertedero. Esta operación excepcional del vertedero se extendió desde 1976 a 1982. Las inspecciones subacuáticas realizadas en 1982, antes del cierre de los orificios del vertedero, y las realizadas en 1983, después de un año de funcionamiento del vertedero erogando por su perfil definitivo, mostraron importantes deterioros de los hormigones. Se distinguen dos tipos de daños: Una erosión generalizada, caracterizada por una degradación superficial relativamente uniforme y de espesor poco significativo (3 cm en la losa) y daños en zonas localizadas, las que corresponden a roturas claramente definidas y cuyas dimensiones en superficie son pequeñas respecto al conjunto de las estructuras. La profundidad de estas erosiones varía entre algunos milímetros hasta varios centímetros. Tal es el caso de las roturas en la losa del cuenco y en la curva de empalme, que alcanzan en algunos puntos hasta 23 cm, dejando las armaduras expuestas. También se incluyen roturas de los bloques disipadores, especialmente en la parte inferior de las caras laterales.

En el año 1984 se efectuó una reparación completa de los hormigones del vertedero.

Posteriormente, la obra fue sometida a una intensa operación (8000 a 10000 horas en los vanos centrales, evacuando caudales de hasta unos 1800 m<sup>3</sup>/s). En 1989 se efectuó una nueva inspección subacuática detectándose otra vez importantes erosiones de los hormigones. Se observó una erosión generalizada de toda la superficie del cuenco y roturas con armaduras expuestas que llegaban a profundidades de hasta 25 cm. Además, se observó erosión en los hormigones de todos los dados de impacto.

## 3. DIAGNOSTICO DE LAS ROTURAS

Con el objeto de determinar las posibles causas de rotura vinculadas a efectos de origen hidráulico, se implementó un modelo físico tridimensional que permitiera el relevamiento de los parámetros hidrodinámicos que pudieran vincularse a la principal causa posible de este tipo de daños: la cavitación.

En el modelo que se implementó se cumplió con la similitud de Froude perfecta, manteniéndose la constancia del número de Froude entre prototipo y modelo. Se adoptó una escala de longitudes  $e_L = 1:50$  que aseguró números de Reynolds superiores al crítico ( $10^5$ ), garantizando un escurrimiento turbulento netamente rugoso, con incidencia despreciable de las fuerzas dependientes de la viscosidad y la energía superficial. En estas condiciones, los campos de velocidades y presiones que caracterizan el flujo son extrapolables al prototipo.

Ante la necesidad de definir el campo de presiones, gran parte del estudio se centró en la medición de presiones medias y fluctuantes sobre las tomas de presión, completándose con mediciones de velocidades al ingreso del cuenco. Estas tomas se ubicaron considerando experiencias de estudios similares y la disposición de las roturas relevadas en 1982/83 y en 1989. El parámetro que se adoptó para definir la existencia de cavitación fue la presión instantánea con 0.1 % de probabilidad de excedencia,  $p/\tau_{0,1\%}$ , que surge de la suma de la presión media y la semiamplitud de fluctuación del 0.1 % de probabilidad de excedencia,  $p'/\tau_{0,1\%}$ .

Se realizaron una serie de ensayos tendientes a conocer el comportamiento del cuenco frente a las condiciones reales de operación a la que se vió sometido y frente a ciertas condiciones hipotéticas que podrían presentarse en la futura operación del mismo. Se analizaron las operaciones más críticas realizadas en obra, asumiendo la consigna de operación del vertedero que imponía una secuencia de apertura de las compuertas 4, 6, 2, 5, 3, 7 y 1, siendo la numeración creciente de margen izquierda a margen derecha. Los resultados más críticos se obtuvieron con caudales altos manejados con grandes aperturas y cinco o más compuertas en operación. Las tomas más solicitadas resultaron las situadas sobre las caras laterales de los bloques disipadores y sobre el cuenco, en cercanía de los mismos y en correspondencia con los vanos operados, alcanzando valores de  $p/\tau_{0,1\%}$  de -8,77 m cuando se erogaron

1300 m<sup>3</sup>/s por 5 compuertas con 3,20 m de apertura, y -7,36 m con una erogación de 1780 m<sup>3</sup>/s con todas las compuertas con 3,30 m de apertura. Para la condición hipotética de diseño (Q=2580 m<sup>3</sup>/s, apertura total de las siete compuertas y embalse a cota 314,85 m), se detectaron presiones mínimas instantáneas de hasta  $p/\tau_{0,1\%} = -9,30$  m.

Si bien la depresión crítica desencadenante del fenómeno de cavitación es del orden de -9 m de columna de agua, se adoptó un margen de seguridad para las presiones mínimas admisibles en la estructura, teniendo en cuenta además que  $p'/\tau_{0,1\%}$  surge del análisis estadístico de un fenómeno fuertemente aleatorio. Por esta razón, se consideró una faja de presiones entre -7,50 m y -9,00 m como **zona de riesgo de cavitación por pulsos de presión.**

Para generalizar el diagnóstico ante la incertidumbre del cumplimiento de las consignas de operación, se consideró el funcionamiento con igual número de compuertas a las operaciones registradas en obra pero con diferente ordenamiento. Para las situaciones más severas se registraron valores de  $p/\tau_{0,1\%}$  entre -7,50 m y -8,91 m en las caras laterales de los bloques. Los casos citados manifiestan que en ciertos sectores del cuenco, en particular sobre las caras laterales de los bloques y en el entorno de los mismos, los daños detectados fueron provocados por presiones instantáneas que alcanzaron la tensión de cavitación. Con relación a las roturas del cuenco, los registros de presiones fluctuantes arrojan valores significativos pero no suficientes para atribuirles estas roturas. Por lo tanto, se evaluó la tendencia a cavitación por discontinuidades superficiales causadas por irregularidades constructivas o generadas por procesos de abrasión.

A partir de la observación del registro de roturas efectuado en obra, los deterioros registrados en el cuenco y diente final podrían interpretarse como un fenómeno progresivo que se inició al pie del vertedero mediante un proceso de abrasión, como consecuencia de la presencia de materiales en el cuenco. Este proceso se vio favorecido por las particulares características del escurrimiento, con importantes flujos de recirculación y torbellinos de eje horizontal, los que se detectaron claramente en el modelo.

El fenómeno antes descrito dio origen a la formación de irregularidades superficiales que se convirtieron en elementos desencadenantes de un proceso de cavitación localizada, el cual se incrementó progresivamente en el tiempo. El inicio del proceso de cavitación en un escurrimiento puede ser caracterizado mediante la comparación de un índice de cavitación  $K$  respecto de un cierto valor  $K_c$  definido como índice crítico de cavitación. La presencia de depresiones instantáneas provocadas por pulsos de baja frecuencia incrementan los riesgos de cavitación en estructuras inmersas en flujos macroturbulentos como el del resalto forzado de Arroyito, aun en casos en que los valores medios temporales de presión están muy alejados de la tensión de vapor del líquido, incluso superando la presión atmosférica (1). De este modo, la cavitación por pulsos de presión no requiere del desplazamiento de la cavidad para alcanzar presiones que provoquen el colapso, pues la variación de

presión se produce prácticamente en el mismo punto. Ante esto, el empleo de coeficientes de cavitación no resulta estrictamente válido dado que no se han desarrollado valores experimentales de  $K_c$  para cada caso. No obstante es posible analizar la cavitación en escurrimientos macroturbulentos corrigiendo los valores de  $K_c$  existentes en la bibliografía para flujos de intensidades de turbulencia normales (2):

$$K' = K - (2,23 - 1,12 Ad) C'p \quad (1)$$

donde  $Ad$  es la asimetría de distribución de la función de densidad de probabilidad de amplitudes y  $C'p$  el coeficiente de presiones fluctuantes. Los coeficientes de la expresión anterior surgen de considerar como mínimo estadístico para definir el umbral de cavitación en flujos de alta turbulencia, el 0.1% de la probabilidad de excedencia.

Mediante la medición de velocidades y el relevamiento de las presiones medias y fluctuantes en las tomas más próximas a las zonas donde se detectaron las mayores roturas relevadas en 1989 (Figura 3), se obtuvieron los parámetros para el cálculo de los coeficientes de cavitación para las condiciones más críticas producidas en obra. La evaluación del índice crítico de cavitación se realizó mediante el criterio de Arndt, que permite la estimación del  $K_c$  teniendo en cuenta la velocidad a la altura de la discontinuidad y la incidencia de la capa límite a través de una expresión del tipo:

$$K_c = C * (d/\delta)^m * (V_d * \delta/\sigma)^n \quad (2)$$

donde  $C$ ,  $m$  y  $n$  dependen de la irregularidad considerada.

Asumiendo una irregularidad aislada del tipo elíptica como representativa de las posibles discontinuidades existentes en la losa del cuenco, se obtuvo la dimensión « $d$ » admisible de estas irregularidades, la cual, para las velocidades relevadas en el modelo, alcanzó valores entre 2,3 y 2,5 cm. El orden de magnitud de estas discontinuidades resulta comparable con las irregularidades susceptibles de producirse a partir de la abrasión generada por la presencia comprobada de materiales. Juntas constructivas deficientes, erosión ocasionada por falta de adherencia entre materiales durante la reparación efectuada en 1984, abrasión por presencia de materiales en el cuenco, pueden ser responsables de la existencia de discontinuidades en estas zonas para crear condiciones de cavitación.

**A partir de los resultados obtenidos en esta etapa se puede concluir que, la combinación de efectos producidos por la cavitación por pulsos de presión, los fenómenos de abrasión originados en la presencia de materiales en el cuenco y la cavitación por discontinuidades superficiales justifican ampliamente la formación de las roturas registradas en las distintas zonas del cuenco disipador de la presa (3).**

#### 4. ESTUDIO DE MEDIDAS CORRECTIVAS

Una vez detectadas las causas que dieron origen a las roturas reiteradas del cuenco amortiguador, se analizaron y propusieron las medidas correctivas tendientes a controlar las mismas, verificando cada una de ellas sobre los modelos físicos. Estas medidas se centraron básicamente en dos tipos de acciones: a) Redefinición de las consignas de operación del vertedero y, b) Incorporación forzada de aire para controlar los fenómenos de erosión por cavitación.

##### 4.1 EVALUACION DE LA SECUENCIA DE OPERACION OPTIMA

Se fijó una sucesión de apertura de compuertas similar a la establecida en obra, pero asignando claramente las condiciones de apertura y la secuencia en que deberían operarse, permitiendo evaluar una consigna de operación que minimice los riesgos de cavitación por pulsos de presión en el cuenco. Los criterios adoptados en la selección de la secuencia fueron el alejamiento de estados hidráulicamente críticos y la regulación progresiva de caudales con un orden de maniobra y aperturas claramente indicadas (Figura 4). De este modo, para un caudal total por vertedero cercano a 1800 m<sup>3</sup>/s, la secuencia de apertura adoptada no generó situaciones de riesgo de cavitación por pulsos de presión. Para caudales de 1800 m<sup>3</sup>/s a 2400 m<sup>3</sup>/s, se relevaron presiones dentro del rango de riesgo de cavitación. Se infiere que la consigna propuesta permite regular sin inconvenientes caudales menores a 1800 m<sup>3</sup>/s, debiendo efectuarse una apertura simétrica y uniforme de todas las compuertas para caudales superiores a dicho límite. La secuencia propuesta no generó un campo de presiones fluctuantes más crítico que el originado con apertura total y uniforme de las siete compuertas. Entonces, una condición fundamental para la correcta operación en esta gama de caudales lo constituye no sólo la uniformidad de aperturas, sino la simetría en la descarga. El estudio se completó con la definición del número mínimo de compuertas a operar para los caudales de mayor probabilidad de ocurrencia.

##### 4.2 ESTUDIO PARA LA INCORPORACION FORZADA DE AIRE

La adecuada representación del fenómeno de incorporación de aire se realizó con otro modelo del vertedero y cuenco amortiguador, adoptándose una escala de longitudes  $e_L = 1:12$ . La necesidad de recircular caudales muy altos llevó a representar sólo una faja seccional equivalente a 7,32 m de ancho de vano.

En primer lugar se realizaron ensayos sobre el modelo seccional sin el dispositivo aireador, con la finalidad de evaluar la presencia del aire incorporado naturalmente. Los perfiles de concentración

de aire mostraron que su presencia próximo al fondo es relativamente baja, con concentraciones medias menores al 0,2% para una faja de 50 mm y al 2% para una faja de 900 mm de altura, en una sonda ubicada delante del bloque de choque. Esto demostró la existencia de una faja de escurrimiento adyacente a la solera prácticamente sin aire, justificando el uso del dispositivo.

Se adoptaron como condiciones de borde para el diseño, la mínima alteración estructural del vertedero y la necesidad de arribar a un proyecto de fácil implementación. Esto condujo al análisis de deflectores de fondo y deflectores laterales. Los parámetros que se variaron para optimizar el dispositivo aireador fueron **su ubicación en el vertedero, la geometría del deflector de fondo y la geometría del deflector lateral**. Respecto al primero, se caracterizó una zona factible para la colocación del dispositivo, limitada aguas arriba por la necesidad de no alterar la ley de descarga del vertedero, y aguas abajo por la ubicación del resalto en el cuenco, que condiciona el posible ahogamiento del dispositivo y la longitud de la cavidad autoformada aguas abajo del aireador. En todos los casos se consideró que el inicio del deflector resultara tangente al perfil del vertedero, para generar la menor perturbación posible al escurrimiento.

Se optimizó así el deflector de fondo en progresiva 8,64 m, en la que se ensayaron deflectores de altura  $t$  de 0,30 m, 0,40 m y 0,50 m. El parámetro más importante para definir la eficiencia del deflector es la relación  $\beta$ , definida como la relación porcentual de volumen de aire sobre el de agua. En la Figura 5 se observa la variación de  $\beta$  con la apertura de compuerta para cada deflector, obteniéndose con  $t=0,50$  m los mayores valores. La consideración aislada de  $\beta$  conduciría a adoptar rampas deflectoras con  $t > 0,50$  m, pero deflectores de tales dimensiones comienzan a perturbar la lámina líquida, por lo que se descartaron del análisis. Consecuentemente, el deflector de  $t=0,50$  m es el óptimo en la progresiva 8,64 m.

Con relación a la distribución del aire próximo al borde sólido, se relevaron perfiles en cada una de las alternativas, observándose un importante aumento en la incorporación de aire respecto de la situación original, tal como surge de la Figura 6. Se destaca que este parámetro no resulta determinante en la selección puesto que la comparación de perfiles se efectúa sobre una sonda fija, variando en cada alternativa su posición relativa respecto de la cavidad autoformada.

Luego, se pasó a la optimización del deflector lateral, reproduciendo el modelo una faja adyacente a la pila del vertedero. Se analizaron cuatro deflectores laterales con anchos  $s$  de 0,20 m, 0,30 m, 0,35 m y 0,40 m, manteniéndose la altura del deflector de fondo. Para evitar perturbaciones adicionales en el escurrimiento, el punto de partida se hizo coincidir con el correspondiente al deflector de fondo. El deflector con  $s=0,30$  m resultó ser el más apropiado, ya que presentaba valores reducidos de depresión en la cavidad autoformada y las condiciones del flujo alterado por la presencia del mismo resultaban aceptables.

Por último, se ensayaron los deflectores adoptados,  $t=0,50$  m y  $s=0,30$  m, en una región más

cercana a la cresta del vertedero, progresiva 7,30 m, con la finalidad de aumentar la longitud de la cavidad autoformada evaluando el cambio de  $\beta$ . Este parámetro se aprecia en la Figura 7, en la que se compara el mismo deflector en ambas progresivas, advirtiéndose un aumento de  $\beta$  al disminuir la progresiva, principalmente por el mayor tamaño de la cavidad autoformada.

En consecuencia, los estudios realizados permitieron afirmar que la combinación del deflector de fondo de altura  $t=0,50$  m situado en progresiva 7,30 m respecto de la cresta del vertedero, y el deflector lateral de ancho  $s=0,30$  m, resultó la alternativa más favorable (2).

## 5. PROYECTO DE INGENIERIA

Las medidas correctivas para los problemas de erosión del vertedero de Arroyito se pueden resumir en tres aspectos: Reparación completa de las superficies dañadas de los hormigones, construcción de dispositivos de aireación del flujo y operación de compuertas de acuerdo a normas definidas en el modelo hidráulico.

### 5.1 REPARACION DEL VERTEDERO

La reparación de los hormigones del vertedero se efectuará sobre las erosiones en zonas localizadas, utilizándose los productos y métodos resumidos a continuación:

-Erosión superficial leve  $3 < e < 5$  mm. Mortero de cemento a base de emulsión de resinas sintéticas y arena fina.

-Erosión superficial media  $5 < e < 20$  mm: Mortero de cemento a base de emulsión de resinas sintéticas y arena gruesa,  $20 < e < 50$  mm: hormigón proyectado y malla de acero anclada con cáncamos.

-Erosión superficial alta,  $e > 50$  mm. Reemplazo de hormigón del vertedero, con armaduras y anclajes.

-En los dados disipadores se utilizará un mortero epóxico, el que se empleará como revestimiento y como relleno de los huecos donde se presentan las armaduras a la vista.

La reparación del vertedero requiere vaciar el cuenco, para lo cual se ha proyectado una atagüa de cierre de materiales graduados ubicada sobre la losa aguas abajo del disipador (Figura 1). Durante la reparación, el vertedero quedará fuera de servicio, pero la central podrá seguir operando. Funcionando la central a plena capacidad (900 m<sup>3</sup>/s) el coronamiento de la atagüa, que está a la cota 300 m, queda con una revancha de 1 m. Durante la situación de cuenco vacío y embalse con niveles altos el vertedero estará sometido a las máximas solicitaciones estructurales. Se efectuó un cálculo detallado de estabilidad para determinar el nivel máximo admisible del embalse con cuenco vacío (ver esquema de

subpresiones en Figura 8). El resultado de este cálculo tiene una implicancia económica importante, pues puede conducir a una limitación de generación de las centrales Arroyito y El Chocón mientras dure la reparación del vertedero. Los cálculos han llevado a concluir que con el cuenco vacío el nivel del embalse debe limitarse a la cota 312 m, situación en la cual el factor de seguridad al deslizamiento resulta 1,19. También se concluye la importancia decisiva que tiene la cortina de drenaje de aguas arriba, por lo cual deberá verificarse en el terreno el correcto funcionamiento de los drenes previo al vaciado del cuenco. Finalmente, se verifica la importancia que tiene considerar en el diseño estructural de los vertederos situaciones eventuales como las que pueden producirse durante su reparación.

### 5.2 DISPOSITIVOS DE AIREACION

Los dispositivos de aireación proyectados consisten en deflectores de hormigón armado que se ubicarán en cada uno de los siete vanos del vertedero, en el radier y en los machones. Para construir estos aireadores se picará el hormigón un mínimo de 20 cm bajo la superficie existente. Las armaduras de acero de los aireadores se unirán a las existentes y se anclarán al hormigón mediante cáncamos. Para el cálculo de los anclajes se consideró por seguridad una subpresión equivalente a la carga total del embalse, lo cual condujo a cáncamos de  $\phi$  18 ubicados al tresbolillo cada 90 x 90 cm (ver Figura 8). Finalmente, se destaca que tanto para la reparación de las superficies de hormigón como para la terminación superficial de los deflectores se han especificado irregularidades admisibles para flujos de alta velocidad ( $V > 12$  m/s), las cuales se resumen a continuación:

-Irregularidades bruscas  $< 3$  mm

-Irregularidades progresivas  $< 50:1$  (H:V)

-Hoyos o poros: Superficie  $< 50\%$  de la superficie reparada; profundidad  $< 3$  mm; longitud máxima en planta  $< 10$  mm.

### 5.3 OPERACION DE COMPUERTAS DEL VERTEDERO

Se verifica la importancia en la operación uniforme y simétrica de las compuertas. En el punto 4.1 se describe en detalle este aspecto.



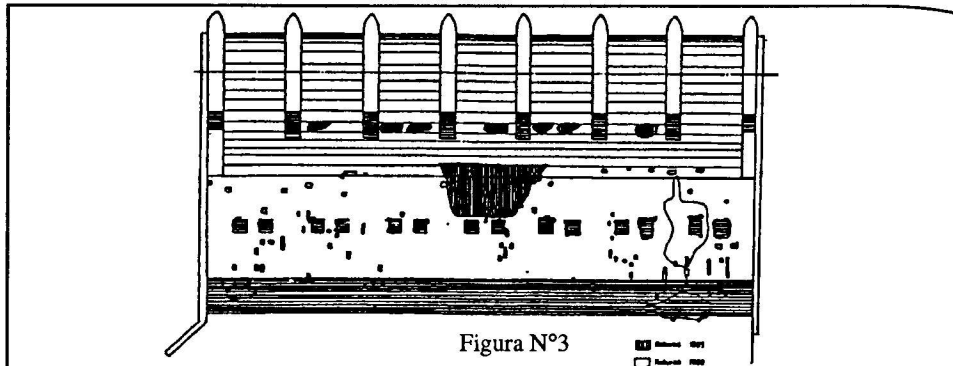


Figura N°3

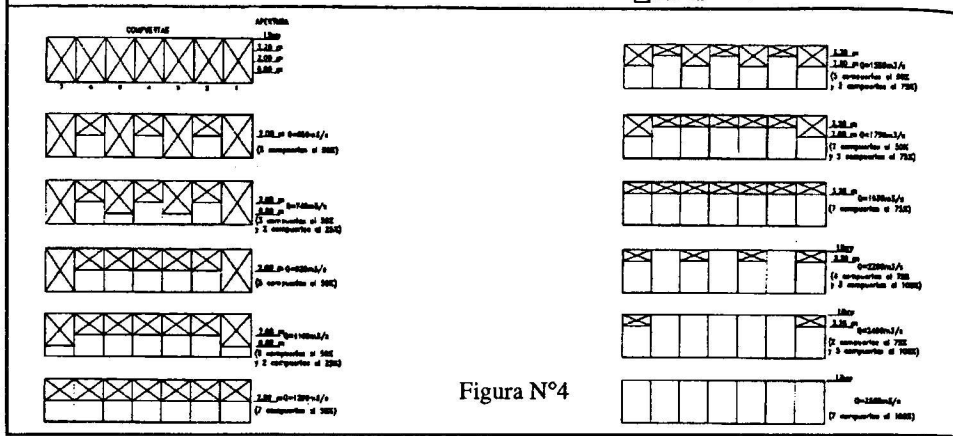


Figura N°4

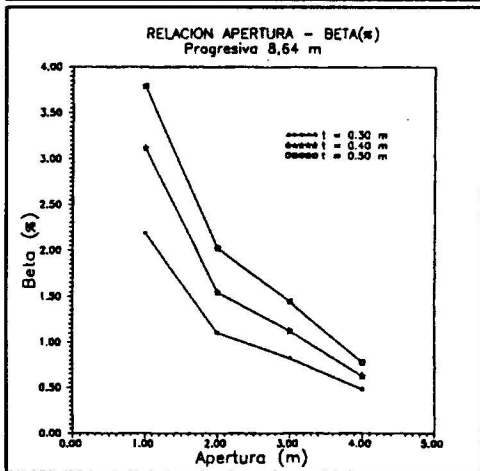


Figura N°5

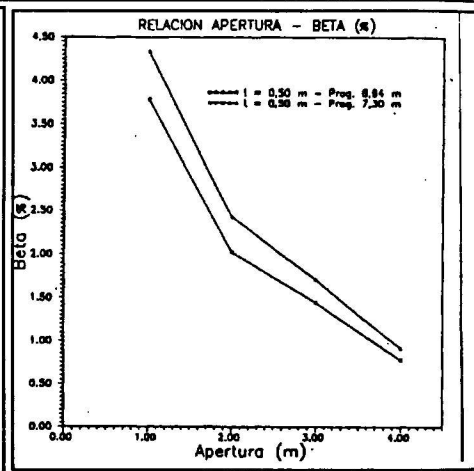


Figura N°6

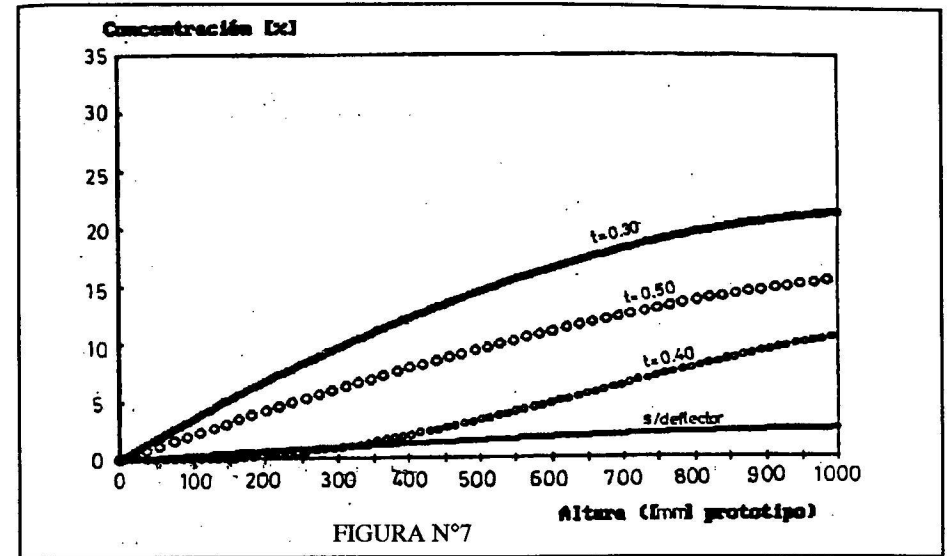


FIGURA N°7

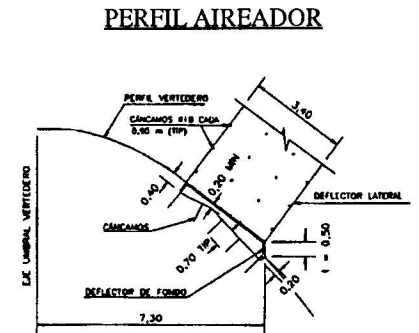
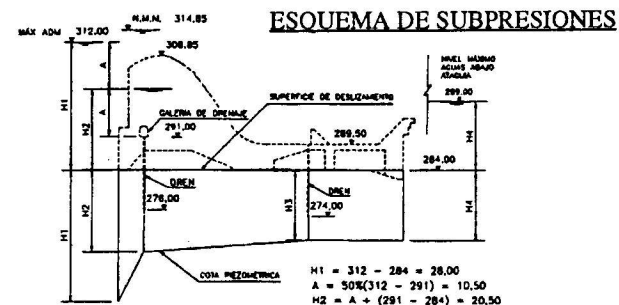


FIGURA N°8