

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**EROSIÓN POR ABRASIÓN EN ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS.
COMPORTAMIENTO DE ALGUNOS MATERIALES**

**LINCOLN ALVARADO¹.
HERNAN ZABALETA²**

RESUMEN

El Comité 210 del ACI (American Concrete Institute) define la erosión por abrasión como una desintegración progresiva de una estructura hidráulica debido al impacto y rozamiento de un cuerpo de mayor dureza que el hormigón sobre la superficie de éste.

En las estructuras hidráulicas la abrasión es causada por el flujo de agua que transporta, arena, gravas, bolones y bloques subredondeados, lo que implica la pérdida paulatina de la superficie del hormigón llegando a provocar grandes daños.

En este trabajo se realiza una recopilación del comportamiento de algunos materiales frente a la erosión por abrasión que se produce en estructuras hidráulicas.

Entre los materiales analizados se destacan por su buena resistencia a la abrasión por erosión, en los ensayos realizados según la ASTM C 1138, los hormigones de alta resistencia (sobre 700 kg/cm²), los adoquines de piedra (granitos sanos o basaltos sanos) y el producto MasterTop 1182 C de Basf.- The Chemical Company.

¹ Ingeniero Civil, Edic Ingenieros Ltda. - mail: lalvarado@edic.cl

² Ingeniero Civil , Consultorías en Obras de Hormigón - mail: hzabalet@entelchile.net

1. INTRODUCCIÓN

El Comité 210 del ACI (American Concrete Institute) define la erosión por abrasión como una desintegración progresiva de un sólido debido al impacto y rozamiento de un cuerpo de mayor dureza que el hormigón sobre la superficie de éste.

En las estructuras hidráulicas la abrasión es causada por el flujo de agua que transporta, arena, gravas, bolones y bloques subredondeados, lo que implica la pérdida paulatina de la superficie del hormigón llegando a provocar grandes daños.

A nivel mundial los daños provocados por la erosión por abrasión de superficies de hormigón afectan a estructuras hidráulicas, tales como, canales, bocatomas, túneles de desvío de presas, pilas de puentes y disipadores de energía provocando cuantiosos costos de reparación y mantención. En Chile los principales daños se producen en los radieres de las barreras móviles de las bocatomas y en las obras que conducen relaves.

En este trabajo se realiza una recopilación del comportamiento de algunos materiales frente a la erosión por abrasión que se produce en estructuras hidráulicas.

2. CARACTERIZACIÓN DEL FENÓMENO

Volkart y Franco, 2004, definen la abrasión que afecta a las superficies de hormigón de las estructuras hidráulicas (canales, bocatomas, túneles de desvío de presas, etc) como la erosión superficial producida por las partículas presentes en el escurrimiento.

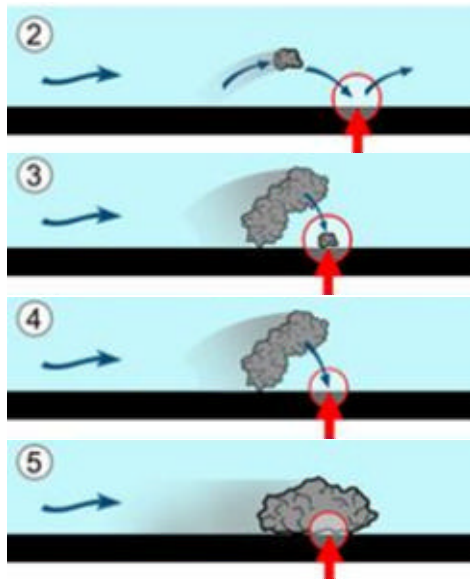
Los parámetros que gobiernan la hidro-abrasión, en superficies de hormigón de estructuras hidráulicas, por orden decreciente, se indican a continuación:

- Velocidad del agua
- Velocidad de las partículas
- Tamaño de las partículas
- Grado de dureza de las partículas
- Concentración de las partículas
- Ángulo de impacto respecto de la superficie de hormigón
- Forma de las partículas

La Figura 1 muestra un conjunto simplificado de posibilidades de daño, siendo importante distinguir entre el roce y el impacto.



- 1.- Las partículas pequeñas dan lugar a un gran número de solicitaciones por impacto o roce



2.- Mientras mayor es la velocidad del flujo, partículas de mayor tamaño son arrastradas y pueden ser levantadas para luego impactar el fondo.

3 y 4.- Solicitaciones por impacto del material que rueda por el fondo.

5.- Solicitación de roce provocada, entre otras condiciones, por una superficie de fondo lisa.

Figura 1: conjunto simplificado de posibilidades de daño

3. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE ALGUNOS MATERIALES

3.1. EXPERIENCIAS REALIZADAS EN LABORATORIO

3.1.1 Experiencias realizadas por José Francisco Cerda

Francisco Cerda (1976) realizó experiencias de desgaste de algunos materiales usados en la protección de radiers de bocatoma. En las pruebas se utilizaron probetas de aproximadamente 15x 15 cm, las que fueron sometidas a un sandblasting normalizado mediante un chorro (lanzado por vía seca) de arena del río Polcura, cuya granulometría fluctuaba entre malla 4 ($d = 4,76 \text{ mm}$) y malla 200 ($d = 0,074 \text{ mm}$). Los ensayos se fundaron, en general, en la norma ASTM C418-68

En el Cuadro 1 siguiente se indican los resultados de la resistencia a la abrasión, en forma relativa, asignando el valor 1,0 al hormigón simple.

Cuadro 1: Índice de resistencia a la abrasión, Cerda, J.F. (1976)

Material	Índice
Acero	300
Goma	150
Piedra	12,7
Hormigón con Kemox.	3,4
Hormigón con fibra.	2,2
Colma CPA Piso.	1,8
Colma Dur Piso.	1,6

Material	Índice
Colma CPA	1,3
Hormigón simple.	1,0
Hormigón con granallas.	0,9
Madera.	0,9
Kemox A.	0,7
Kemox B.	0,7

3.1.2 Experiencias realizadas por la Compagnie Nationale du Rhone.

Las barreras de las bocatomas de la Compagnie Nationale du Rhone, en el río Rhone, presentaron problemas de erosión intensa, provocada por abrasión e impacto. Para efectuar, pruebas de impacto y de abrasión que reprodujeran las condiciones que se presentan en las barreras se desarrollaron las siguientes máquinas.

- Máquina para ensayo de abrasión (Figura 2). La probeta esta inmersa en un estanque con agua y es sometida a un chorro de agua cargada con arena silícica. El ángulo del chorro es de 45°.

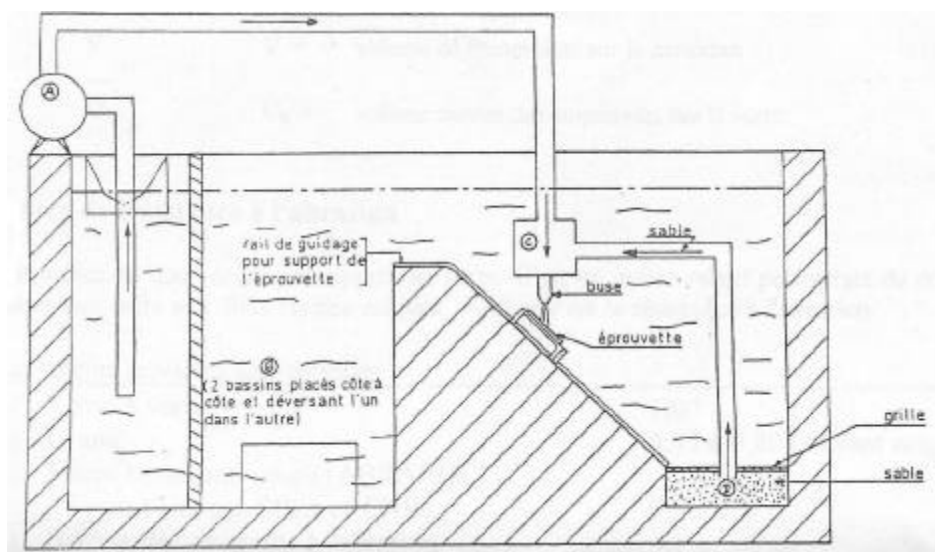


Figura 2: Máquina de ensayo de hidro-abrasión

Cuadro 2: Índice de resistencia a la abrasión según la Compagnie Nationale du Rhone.

Material	Índice
Vidrio (testigo)	1,00
Granito	0,35 a 0,80
Hormigón antidesgaste (ABRAROC)	0,30 a 0,50
Hormigón muy resistente a la abrasión	~ 1
Hormigón resistente a la abrasión	~ 2
Hormigón corriente B25 con gránulos silícico calcáreos	2 a 3
Hormigón poco resistente	3 a 4
Hormigón mediocre	>4
Acero y fierro fundido	0,02 a 0,04

- Máquina para el ensayo de impacto o choque. Permite, mediante una bola de 7 cm de diámetro y 1 kg de masa, golpear una probeta desde 1 m de altura, a razón de 15 golpes por minuto. El ensayo dura 75 minutos.

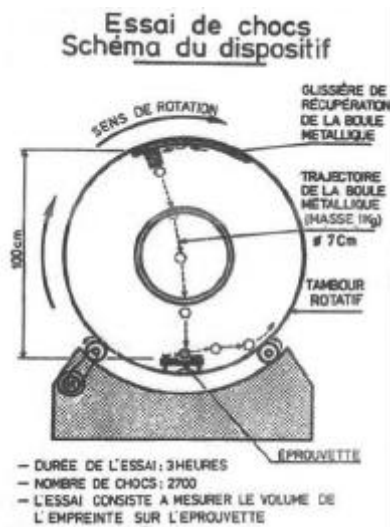


Figura 3: Máquina de ensayo de impacto o choque

Cuadro 3: Índice de resistencia al impacto

Material	Volumen del hoyo (cm ³)	Índice
Granito	<100	1,00
Hormigón muy resistente	<150	<0,67
Hormigón antidesgaste (ABRAROC)	175	0,57
Hormigón resistente	150 a 250	0,67 a 0,40
Hormigón corriente B25	250 a 400	0,40 a 0,25
Hormigón mediocre	>400	>0,25

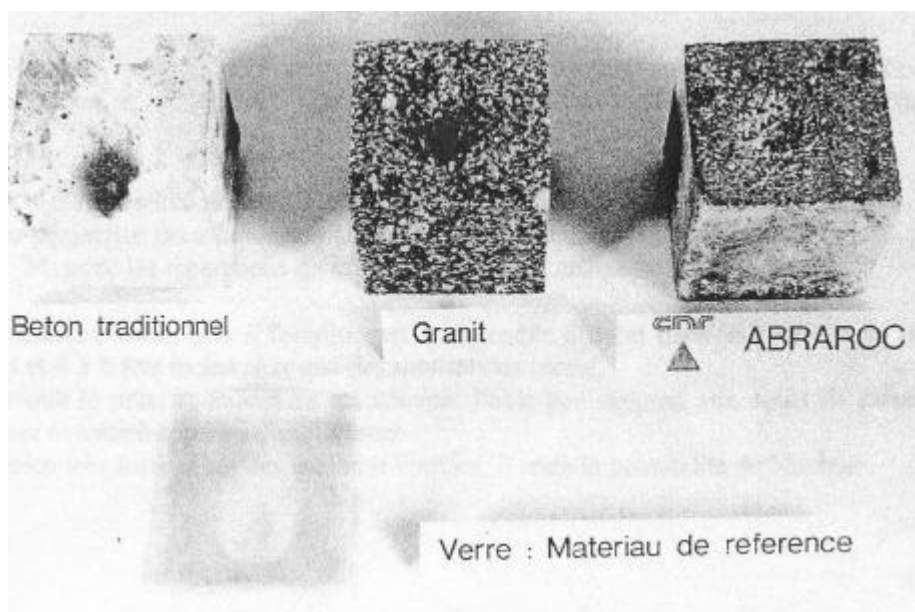


Figura 4: Probetas ensayadas y material de referencia

3.1.3 Experiencias realizadas bajo la norma ASTM C 1138

La norma ASTM C 1138 (Determinación de la resistencia a la abrasión bajo agua) mide la resistencia a la abrasión de una probeta de hormigón de 12" de diámetro y 4" de altura colocada bajo agua.

La probeta, una vez cumplido un tiempo de curado de 28 días se coloca, en el fondo, de un tanque metálico también cilíndrico de 12" de diámetro interno y de 4" de altura (Figura 5). Sobre la cara de la probeta se colocan 70 kg de esferas metálicas y se llena el tanque con agua hasta 6,5" sobre la parte superior de la probeta.

El agitador gira a una velocidad de 1200 ± 100 rpm y las mediciones se realizan cada 12 hrs hasta completar 6 ciclos (72 hrs).

Los resultados se expresan bajo la sigla ADA (Average Depth of Abrasión), definida como, $ADA = \text{Pérdida de volumen total} / \text{Área expuesta}$.

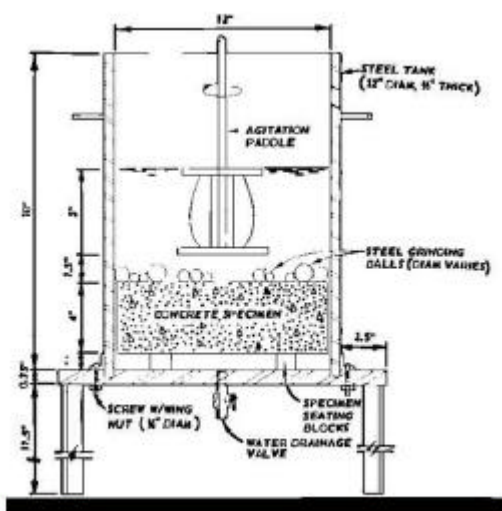


Figura 5: Máquina de ensayo para Norma ASTM C 1138

3.1.4 Experiencias realizadas para la reparación de las pilas de hormigón del puente Alfonso López Pumarejo en Barranquilla, Colombia.

El hormigón de las pilas de los puentes, que queda bajo agua, puede estar sometido durante su vida útil a solicitaciones abrasivas muy importantes que pueden llegar a comprometer el acero de refuerzo de la estructura.

En el caso del puente "Alfonso López Pumarejo" el espesor del recubrimiento se había reducido a la mitad. Se realizaron una serie de ensayos, bajo la norma ASTM C 1138 para identificar, entre otras posibilidades, el tipo de hormigón a usar en la reparación. Se ensayaron 3 probetas, de

hormigón convencional, con diferentes resistencias a la compresión. En el cuadro siguiente se indican los resultados obtenidos a las 72 hrs

Cuadro 4: Probetas ensayadas con diferentes resistencias a la compresión

Probeta	Resistencia a 28 días kg/cm ²	ADA (espesor medio) mm
A	206	14,5
B	275	11,3
C	343	8,2

3.1.5 Experiencias realizadas en la Technical University of Szczecin de Polonia

Horszczaruk E., 2005, reporta el ensayo de 3 probetas, de hormigón con silica fume (microsílice), con diferentes resistencias a la compresión. En el cuadro siguiente se indican los resultados obtenidos a las 72 hrs.

Cuadro 5: Probetas ensayadas por Horszczaruk, E. (2005)

Probeta	Resistencia a 28 días kg/cm ²	ADA (espesor medio) mm
C1	958	2,46
C2	898	2,55
C3	742	6,16

3.1.6 Experiencias realizadas para la reparación del disipador de energía de la presa de Kinzua.

ACI 210. 1R-94. reporta el ensayo de 4 probetas, con diferentes resistencias a la compresión. En el cuadro siguiente se indican los resultados obtenidos a las 72 hrs.

Cuadro 6: Probetas ensayadas para la reparación del disipador de la presa Kinzua

Probeta	Tipo de hormigón	Resistencia a 28 días kg/cm ²	ADA (espesor medio) mm
C1	Convencional	390	6,80
C2	Convencional	520	6,30
C3	Con silica -fume	790	2,80
C4	Con silica -fume	950	2,25

3.1.7 Resumen de las experiencias realizadas bajo la norma ASTM C 1138

En la Figura 6 se grafica la tendencia del ADA (Average Depth of Abrasion) en función de la resistencia a la compresión simple del hormigón.

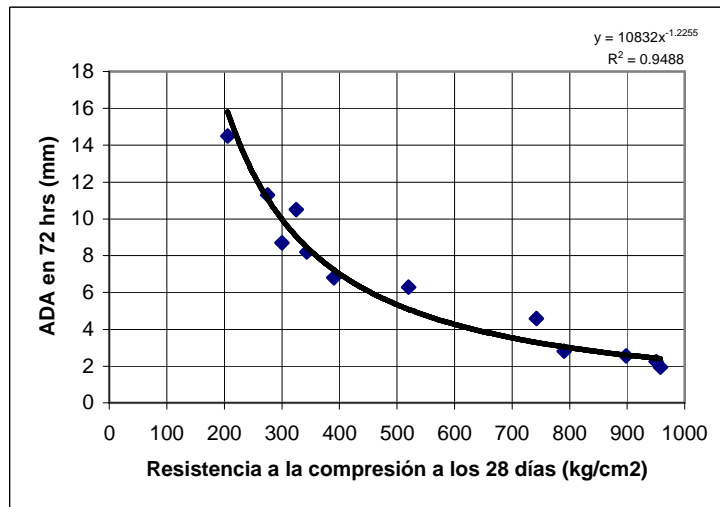


Figura 6: ADA a las 72 horas en función de la resistencia de compresión del hormigón

3.1.8 Experiencia en una probeta de granito

La probeta de granito, que se muestra en la Figura 7, presentó una pérdida de volumen de 0,4% después de 72 hrs de ensayo lo que equivale a un ADA de 0,4 mm. Como un antecedente referencial un granito como el de la probeta ensayada puede tener una resistencia a a compresión simple del orden de 2.000 kg/cm².



Figura 7: Probeta de granito sometida a ensayo de abrasión después de 72 horas

3.1.9 Experiencia en una probeta de hormigón recubierta con 15 mm de Mastertop 1182C

El producto MasterTop 1182 C de Basf es un mortero cementicio epóxico 100% sólido con agregado metálico para revestimiento de superficies sometidas a servicio pesado, abrasión e impacto. Posee rápida puesta en servicio, alta adherencia al hormigón de sustrato, y alta durabilidad. Provee los mayores niveles de resistencia a impacto y abrasión, y es resistente a la oxidación. Posee excelente resistencia química a una variedad de compuestos.

La probeta de hormigón convencional H25 recubierta con 25 mm de MasterTop 1182 C que se muestra en Figura 8b presentó una pérdida de volumen de 0,0 % después de 72 hrs de ensayo. Como referencia se incluye la probeta testigo de hormigón convencional H25 (300 kg/cm²) que presentó una ADA de 8,7 mm después 72 hrs de ensayo (Figura 8a).



**Figura 8 a: Probeta de hormigón H25
ADA= 8,7 mm**



**Figura 8 b: Probeta de hormigón revestida
con Master Top 1182C.
ADA = 0 mm**

3.2. EXPERIENCIAS U OBSERVACIONES REALIZADAS EN PROTOTIPOS

3.2.1. Desgaste observado en bocatomas ubicadas en la precordillera chilena

Cerda F, 1976 a partir de antecedentes verbales proporcionados por los ingenieros a cargo de bocatomas ubicadas en la precordillera chilena indica que es posible estimar las siguientes tasas de desgaste anual de radieres de barreras.

Cuadro 7: Tasas de desgaste estimadas en bocatomas precordilleranas chilenas

Bocatoma	Río	Radier vano Desripiador (mm/año)	Radier vano compuerta más solicitada (mm/año)
Central Chacayes	Cachapoal	2000-3000	30-70
Central Sauzal	Cachapoal	700-1000	10-50
Coya	Estero Coya	200-500	S/I
Central Queltehue	Río Maipo	50-150	5-10
Maule central Isla	Maule	50-100	5-10
Nueve Canales	Cachapoal	30-70	S/I

3.2.2. Desgaste medido en el túnel de la presa de Runcahez

Vicher, D. et Al, 1997, publicaron los antecedentes del túnel de desviación y de limpieza de sedimentos de la presa Rucavez (Suiza) que tiene una capacidad de 110 m³/s, velocidad media de 9 m/s y por el cual pasan partículas de 230 mm de D₅₀. Este túnel, opera 4 días al año y su radier revestido inicialmente con hormigón ha sufrido grandes daños por abrasión.

La reparación iniciada en 1993 contempló rellenar las socavaciones con hormigón y proteger todo el radier con adoquines de roca de poco espesor. En el radier se definieron 5 tramos de

prueba, de 10 m de largo y 3,8 m de ancho, separados por barras de acero. En ellos se colocaron revestimientos de diferentes tipos de hormigones con un espesor mínimo de 25 cm.

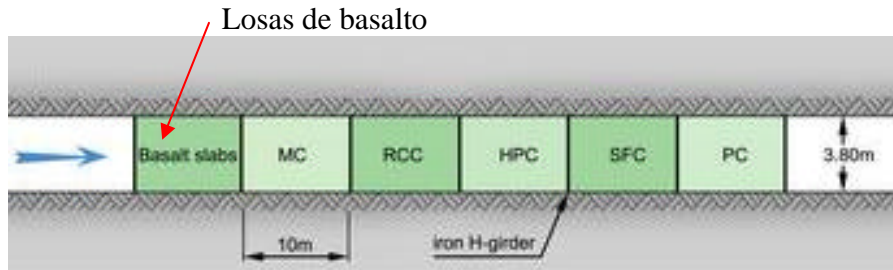


Figura 8: Tramos de prueba con separación de barras de acero

Los hormigones utilizados fueron los siguientes:

MC	hormigón con microsilito (860 kg/cm^2)
RCC	hormigón rodillado (560 kg/cm^2)
HPC	hormigón de alta resistencia (700 kg/cm^2)
SFC	hormigón con fibra de acero (960 kg/cm^2)
PC	hormigón con polímeros (670 kg/cm^2)

Jacobs F et all, 2001, muestra el siguiente gráfico (Figura 9) de las mediciones de erosiones medias efectuadas en el radier del túnel.

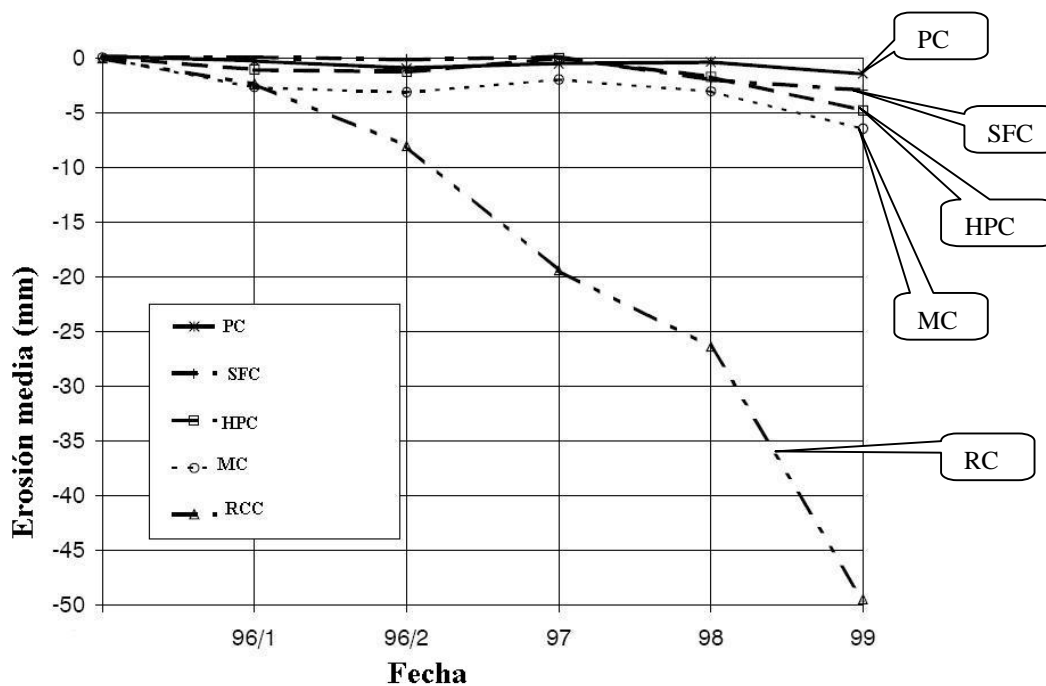


Figura 9: Mediciones de erosión efectuadas en el radier del túnel

3.2.3. Experiencia en la operación de la Bocatoma Cachapoal de la Central Sauzal

La bocatoma Cachapoal de la central hidroeléctrica Sauzal se ubica el río Cachapoal inmediatamente aguas arriba de la junta con el estero Coya. La barrera consta de un muro vertedor de 38,90 m de longitud, cuatro compuertas de descarga (N° 1 a 4) de 3,0 m de ancho y 4 compuertas desripiadoras (N° 5 a 8) de 2,50 m de ancho. El diseño original no contempló ningún revestimiento especial para aminorar el efecto de la erosión por abrasión de los radieres de las zonas de compuertas.

En 1958 se cambiaron totalmente los revestimiento de los radieres de las compuertas desripiadoras (N° 5 a 8) por los continuos deterioros sufridos en ellos. Los materiales utilizados se indican en el Cuadro 8.

Cuadro 8: Revestimientos de los radieres de la bocatoma Cachapoal de la central Sauzal

Vano N°	Material de revestimiento
5	Acero al manganeso
6	Goma Vulcoline pegada sobre plancha de acero blando
7	Acero blando, A37-24 ES
8	Acero blando sobre hormigón

En vista de los buenos resultados observados en los radieres de los vanos 7 y 8 y la gran diferencia de precios de los aceros, se colocó acero blando (A37-24 ES) sobre hormigón en los radieres de los 4 vanos desripiadores.

Según Cerda F, 1974, este tipo de protección duró hasta el año 1973.

8. CONCLUSIONES

Los ensayos resumidos en el punto anterior muestran resultados coherentes entre sí, especialmente los realizados según la norma ASTM C 1138 (Determinación de la resistencia a la abrasión bajo agua) permiten establecer el posible comportamiento del material a la abrasión.

Estos ensayos, realizados durante 72 horas bajo la mencionada Norma, muestran la siguiente secuencia:

- el ensayo de un revestimiento superficial con el producto Mastertop 1182 C de BASF presentó un índice ADA de 0,0 mm;
- el ensayo de una probeta de roca (granito) mostró un índice ADA de 0,4 mm. Este valor es menor que el índice mostrado por una probeta de hormigón con una resistencia de 900 kg/cm² (ADA 2,5 mm)
- el ensayo de una probeta de hormigón, con una resistencia a la compresión de 325 kg/cm², mostró un índice ADA de 8,7 mm.

Una mayor estadística de casos reales permitiría disponer de valores aplicables a un proyecto específico.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Basf-The Chemical Company (Chile) por los antecedentes proporcionados y la autorización para publicarlos.

REFERENCIAS

ACI Committee 210, 1994. Compendium of case histories on repair of erosion-damage concrete in hydraulic structures.

Cerda F, 1976. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Diseño de bocatomas implantadas en ríos con fuerte arrastre de sólidos.

Hermida G, 2001. Primeras Jornadas Iberoamericanas sobre Caracterización y normalización de materiales de construcción. Evaluación de diferentes alternativas de concretos y recubrimientos frente al ataque por abrasión hidráulica para la protección de las pilas del puente Alfonso Lopez Pumarejo (Baranquilla, Colombia).

Horszczaruk E., 2005. Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures. Wear 259.

Jacobs F et Al.,2001. Abrasion of concrete of hydraulic structures. Reports N° 168 of VAW (in German).

Perrier J, Fruchart F,1995- Comité National Suisse des grands Barrages. Experience de la Companie Nacional du Rhone (CNR) dans le domaine de l erosion (choc, abrasion).

Vischer D, et Al, 1997. Bypass tunnels to prevent reservoir sedimentation. ICOLD XIX Congress-Question 74, R.37.

Volkart ,J.. April 2004. Prevention is better than cure. International Water Power and Dam Construction.