

FIG. 4 DEFINICION DE PLANOS EN UNA LADERA NATURAL

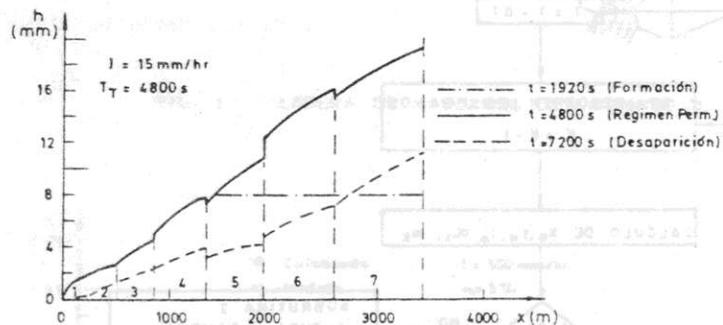


FIG 5 PERFILES DE FLUJO SUPERFICIAL

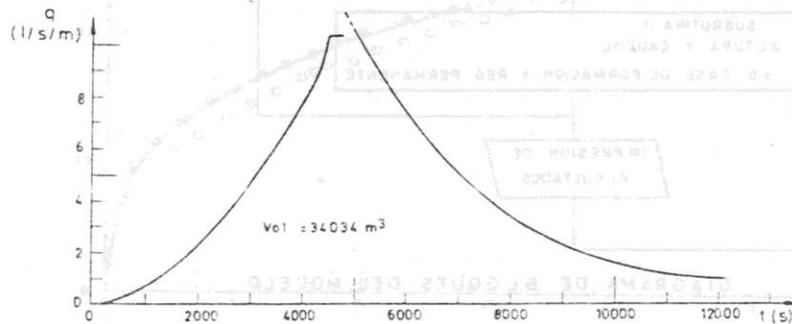


FIG 6 HIDROGRAMA DE SALIDA PLANO 7

### DESGASTE EN MAQUINAS HIDRAULICAS QUE OPERAN CON MEZCLAS SOLIDO-LIQUIDO: CASO DEL ALABE DE UNA TURBINA

Andrés Hohlberg R. (1)

Bernardo Domínguez C. (2)

Pedro Pablo Errázuriz D. (1)

## RESUMEN

En este trabajo se analizan los mecanismos de desgaste producidos por la corrosión y erosión en los escurrimientos bifásicos de mezclas sólido líquido y los principales criterios experimentales existentes para evaluar la tasa de abrasión.

Se estudia además en forma experimental el desgaste producido en un álabe de una turbina Pelton expuesta al flujo de una mezcla sólido líquido de material de granulometría fina para distintos tipos de recubrimiento. Los resultados de los ensayos permiten concluir que los principios generales analizados son aplicables a elementos de turbomáquinas, y también que en el caso de recubrimientos de goma natural el desgaste es despreciable. Por lo tanto es técnicamente factible el uso de piezas móviles adecuadamente diseñadas y protegidas en turbinas para generación de energía.

(1) Ing. Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile.

(2) Dr. Ing., Profesor Esc. Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.

## 1.- INTRODUCCION

La utilización de máquinas hidráulicas, bombas y turbinas, en flujo de mezclas sólido líquido presenta algunas dificultades debido principalmente a fenómenos de abrasión que desgastan rápidamente las diversas partes de estas turbomaquinarias.

Este fenómeno es muy importante en los concentrados y relaves de cobre, lo que ha impedido hasta hoy, el uso de turbinas para recuperar energía en diferentes minas donde existen características topográficas adecuadas para producir energía eléctrica usando las mencionadas máquinas.

Dadas las aplicaciones que son posibles de preveer en Chile, se ha estimado conveniente realizar estudios experimentales, (Errázuriz, P. y Holhberg, A., 1984) en condiciones de similitud hidráulica, de álabes de turbinas Pelton. Dado que se ha visto que es recomendable el recubrimiento de los diferentes elementos de las bombas y turbinas, el estudio contempla experiencias comparativas de álabes sin recubrir y recubiertas en diferentes tipos de gomas naturales o sintéticas.

## 2.- MECANISMOS DE DESGASTE EN FLUJO SOLIDO-LIQUIDO

Los dos principales fenómenos que afectan el desgaste son la corrosión electro-química y la erosión mecánica. Ambos mecanismos actúan simultáneamente y con un cierto grado de dependencia.

**El mecanismo de corrosión**

La corrosión es un fenómeno electro-químico de óxido-reducción, mediante el cual los materiales de las paredes internas del equipo o tuberías, principalmente metales, se oxidan. Los óxidos formados son removidos por el flujo, lo que acelera la corrosión, debido a que se elimina la capa protectora sobre el material.

Este mecanismo se aumenta por la presencia de agentes oxidantes, tales como oxígeno, ácido u otros iones disueltos como halógenos, sulfatos o cianuros (Wasp et al., 1977).

Para el caso del hierro, metal más utilizado en estas máquinas se puede explicar el fenómeno de corrosión, como una disolución inicial anódica de hierro, seguida generalmente por la precipitación de hidróxido de hierro, el que posteriormente se puede volver a oxidar.

El moho formado es un mal conductor, por lo tanto un mal cátodo para la

reducción de oxígeno. La reducción de oxígeno está controlada por su difusión a través del óxido. Por ejemplo, una película de 2 mm de moho agrega una resistencia al menos 60 veces mayor que la que tendría sin ésta (Postlethwaite, 1976).

Otro factor que influye en la corrosión es el pH de la mezcla transportada. A menor pH se produce mayor corrosión por la presencia de ácidos que favorecen la reducción del oxígeno. Con pH alto se producen picaduras debidas a la formación de compuestos pasivos como la magnetita ( $Fe_3O_4$ ) o ( $Fe_2O_3$ ) que inicialmente se adhiere a las paredes, pero posteriormente por ser un buen conductor, produce un flujo eléctrico, lo que provoca las picaduras.

Para determinar el grado máximo de corrosión en ausencia de una capa protectora, en una mezcla aireada, se puede utilizar el procedimiento propuesto por Postlethwaite, (1976).

Para el control de la corrosión, los métodos más usados son: (Wasp, 1977).

- \* Protección anódica con inhibidores de oxidación tales como cromatos o nitratos.
- \* Protección catódica, galvánica o eléctrica.
- \* Condicionamiento químico de la solución, mediante control del pH y eliminación de oxígeno.
- \* Recubrimiento o forrado interior con gomas o plásticos.

**El mecanismo de erosión**

La abrasión o erosión mecánica de una superficie de material resulta de la acción dinámica de partículas sobre ella.

Para su mejor comprensión, Bitter (1963) divide el fenómeno en dos mecanismos:

- El desgaste producido por choques repetitivos que vencen la capacidad elástica del material, desprendiéndole partículas. Este se puede evaluar de acuerdo a la energía requerida para remover partículas de la superficie, la que es igual a:

$$W_D = \frac{1}{2} \frac{(M \cdot V \sin \alpha - K)^2}{\epsilon} \quad (1)$$

- El desgaste debido a la componente de velocidad paralela a la superficie produce acción de corte o de roce de partículas que vale:

$$W_{C1} = \frac{1}{2} \frac{M (V^2 \cos^2 \alpha - K_1 (V \sin \alpha - K)^{3/2}}{P} \quad (2)$$

cuando la velocidad horizontal se hace cero.  
o bien:

$$W_{C2} = \frac{2 MC(V \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{V \sin \alpha}} (V \sin \alpha - C \frac{(V \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{V \sin \alpha}}) \quad (3)$$

cuando la velocidad no se anula después del choque.

El desgaste total por erosión está dado por la suma de los dos efectos, es decir:

$$W_T = W_{C1} + W_D$$

o también

$$W_T = W_{C2} + W_D \quad (4)$$

A partir de estas expresiones se pueden construir gráficos del desgaste versus el ángulo de incidencia de las partículas sobre la superficie.

### 3.- ANTECEDENTES EXPERIMENTALES DEL DESGASTE EN TURBO MAQUINAS

Los estudios experimentales realizados en diferentes materiales han arrojado la siguiente relación de predicción del desgaste en función de las variables más relevantes.

i) Relaciones con la velocidad:  
( $W \propto V^n$ )

Exponente n	Investigador	Referencia
1,5 - 3,0	Varios	(Kawashima, 1978)
3,0	Wasp	(Wasp, 1977)
2,0	Bitter	(Bitter, 1963)
1,08-4,39	Salazar	(Salazar, 1980)
3,0	Gandhi	(Gandhi, 1975)
2,1 - 2,9	Link	(Postlethwaite, 1976)

ii) Relaciones con la concentración de sólidos:

$W \propto C_v$ (0,82 - 1,0)	Varios	(Kawashima, 1978)
$W \propto C_v^{1,0}$ ( $C_v$ 30%)	Jackson	(Salazar, 1980)
$W \propto C_v^{2,0}$	Hrbek	(Salazar, 1980)
$W \propto C_v$ para $C/Ca \ll 0,5$	Wasp	(Wasp, 1977)

Ca concentración de sólidos al centro de la tubería.  
C concentración a 8% del diámetro del tope.

iii) Relaciones con el tamaño de partículas:

Esta relación es más importante que la sugerida por el análisis de Bitter.		
$W \propto d^{0,75-1,00}$	Varios	(Kawashima, 1978)
$W \propto d^{0,75}$	Bergeron	(Salazar, 1980)
$W \propto d^{1,00}$ ( $0,1 < d < 1mm$ )	Hrbek	(Salazar, 1980)

Estudios más recientes, han comparado las propiedades antiabrasivas de ciertos materiales resistentes, los que se pueden observar en la tabla siguiente (Jacobs, 1984):

Material	Grado de desgaste (mm/año)	Vida esperada para recubrimiento de 5 (mm)(años)
Goma (dureza 35)	0,13	38
Cerámica de alúmina	0,15	33
Acero Ni-Hand	0,19	26
Poliuretano (dureza 70)	0,20	25
Poliuretano (dureza 73)	0,22	22
Goma (dureza 56)	0,35	14
Poliétileno de alta densidad	0,67	7
PVC no plastificado	1,27	4
Acero inoxidable	1,29	4
Acero (A 106)	1,57	3
Polipropileno	1,59	3

#### 4- EXPERIMENTACION DE UN ALABE DE UNA TURBINA PELTON

La experimentación de desgaste se realizó en álabes tipo Pelton y con el objeto de lograr desgaste apreciables, se optó por ensayos de desgaste acelerados.

Estos ensayos se realizaron colocando un álabe fijo frente al chorro, en la misma posición que tendría en la turbina (Fig. 1). Esta disposición acelera el desgaste debido a dos efectos: el primero es el aumento de la velocidad relativa del chorro con respecto a la paleta, que en el caso de funcionamiento óptimo es la mitad de la velocidad del chorro. El otro efecto es que el impacto lo recibe siempre una sola paleta, es decir, el tiempo de impacto aumenta en forma proporcional al número de paletas de la turbina.

Los ensayos de desgaste se realizaron en 3 álabes, uno de fierro fundido sin recubrimiento y los otros dos con recubrimientos de goma de dureza 35 y 55 escala durometer. Estos recubrimientos inicialmente eran de un espesor de 4 mm y área de 122 cm<sup>2</sup>.

La concentración utilizada durante los ensayos de desgaste fue de un 35% en peso de sólidos.

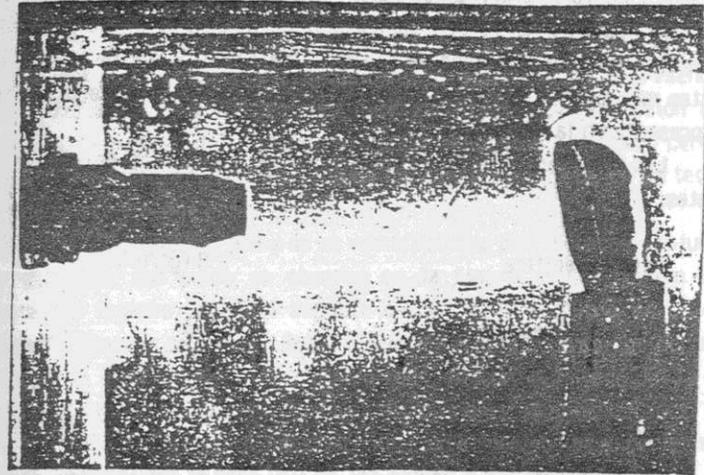


FIG. 1. Instalación de sistema de desgaste acelerado

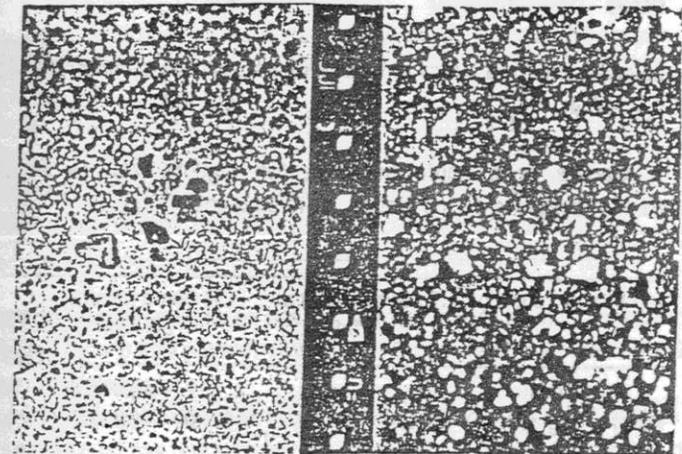


FIG. 2. Partículas sólidas observadas al microscopio



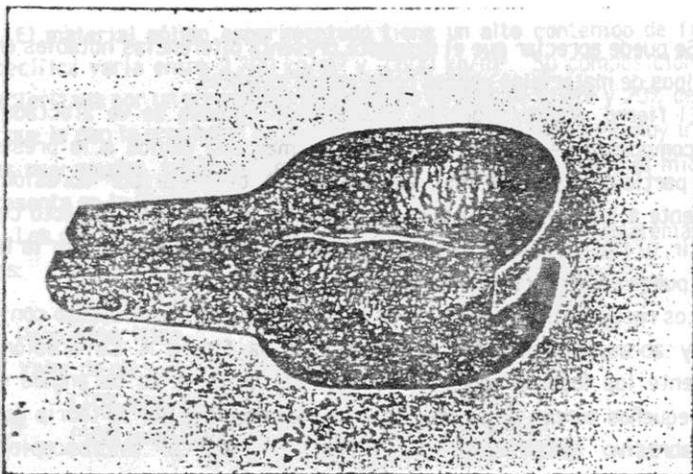


FIG. 3. Alabe sin recubrimiento desgastado

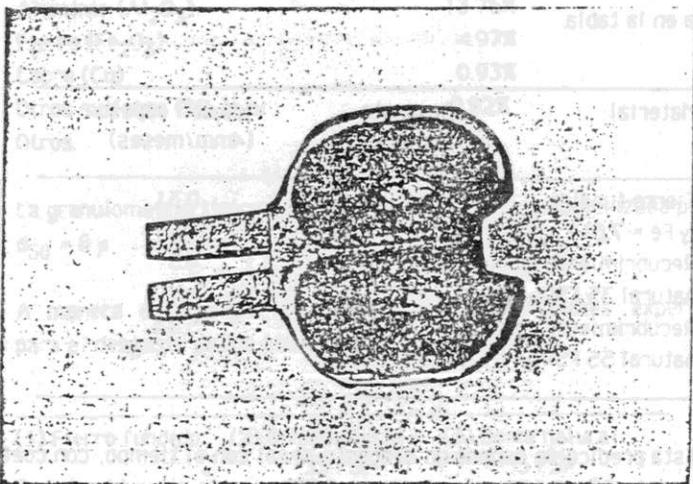


FIG. 4. Alabe recubierto desgastado

Material	Modelo		Prototipo	
	Desgaste (mm/año)	vida útil (años)	Desgaste (mm/año)	vida útil (años)
Fierro	16,08	0,25	32,15	0,12
Goma (35 FSP)	1,16	3,45	2,33	1,71
Goma	0,86	4,67	1,71	2,34

## 5.- CONCLUSION

De la experimentación realizada se puede concluir que los mecanismos y criterios sobre desgaste analizados principalmente para tuberías son aplicables para el caso de las máquinas hidráulicas y sus partes expuestas a la abrasión.

En caso de ser necesario cuantificar las tasas de erosión de piezas especiales es necesario sin embargo recurrir a ensayos experimentales.

Las experiencias realizadas en álabes de turbinas Pelton muestran que, para mezclas sólido-líquido con material de granulometría fina, el desgaste depende del tipo de recubrimiento del álabes siendo despreciable en algunos casos. Específicamente, en los casos ensayados, la goma material 55 FSP resultó ser muy resistente a la abrasión.

Los resultados anteriores muestran que con un diseño adecuado y con materiales de recubrimiento especiales es técnicamente factible el uso de piezas móviles en turbinas expuestas a la erosión provocada por mezclas sólido-líquido de materiales de granulometría fina. Esto abre nuevas perspectivas en las investigaciones destinadas a recuperar energía mediante turbinas en el transporte de relaves de la minería chilena.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración prestada por la Organización de Estados Americanos O.E.A. para desarrollar, en conjunto con el Centro de Investigaciones Minera y Metalúrgica, el proyecto en el cual se inserta el presente trabajo.

Expresan además su reconocimiento a las empresas Duratec S.A. Y Vulco S.A. por su colaboración en el equipamiento utilizado en la fase experimental.

#### REFERENCIAS

- BITTER, J.C.A. "A Study of erosion phenomena" Wear N°6, pp. 5-21, 1963.
- ERRAZURIZ, P. y HOLMBERG, A. "Planta de experimentación en flujo sólido líquido: Estudio de la recuperación de energía mediante una turbina Pelton" Tesis de título Escuela de Ingeniería, Universidad Católica de Chile, 1984.
- GANDHI, R.L. "Control of Corrosion-Erosion in Slurry pipelines" 1st International Conference on the internal and external protection of pipes. Durham 1975.
- JACOBS, B.E. and JAMES, J.G. "The wear rates of some abrasion resistance materials. Paper G.3 Hydrotransport 9. BHRA 1984.
- KAWASHIMA, T. et al. "Wear of pipe for hydraulic Transport of solids. Paper E.3 Hydrotransport 5. BHRA 1978.
- POSTLETHWAITE, J. "Pipeline wear: Erosion-Corrosion and erosion" Solids Pipelining Course. BANFF, ALBERTA Canadá 1976.
- SALAZAR, A. "Desgaste por abrasión en tuberías que transportan minerales y relaves. CIMM. Santiago de Chile, 1980.
- WASP. E.J.; KENNY, J.P.; GANDHI, R.L. "Solid liquid flow slurry pipeline transportation" Trans. Tech. Publications. 1ª ed. 1977.

#### SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

#### VII CONGRESO NACIONAL

#### EJES HIDRAULICOS EN CANALES NO-PRISMATICOS CON

#### ENSANCHES Y ANGOSTAMIENTOS PAULATINOS

Luis Ayala Riquelme, Ph.D. (1)

Carolina Isensee Ugarte (2)

#### RESUMEN

En el presente trabajo se aborda el cálculo automático de ejes hidráulicos en canales no-prismáticos originados por secciones que determinan segmentos de canal sucesivamente convergentes y divergentes.

El trabajo incluye la derivación de la ecuación diferencial del eje hidráulico, la cual contiene términos adicionales debido a la no-prismaticidad del canal, y la descripción de un modelo numérico que permite resolver automáticamente la ecuación diferencial derivada, considerando las condiciones de borde impuestas externamente al sistema y aquellas "auto impuestas" por la geometría y condiciones de operación del canal.

La aplicación del modelo se ilustra mediante dos casos-ejemplos cuyos resultados ponen de relieve la influencia determinante que puede llegar a tener la no-prismaticidad del canal en el cálculo de los ejes hidráulicos en cauces naturales.

- (1) Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- (2) Ayudante de Investigación del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.