



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería

ANALISIS DE LOS EFECTOS DE CAVITACION EN ESTRUCTURAS HIDRAULICAS

LEONEL H. OCHOA ALEJO

TRABAJO

Presentado a la División de Estudios de
Posgrado de la

FACULTAD DE INGENIERIA

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

como requisito para obtener
el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA

(HIDRAULICA)

CIUDAD UNIVERSITARIA, D.F. MARZO DE 1986.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

0846

RESUMEN

Se analizan los efectos de cavitación que se presentan en cuatro tipos de estructuras hidráulicas: a) Compuertas, b) Tanques disipadores, c) Salida de túneles y, d) Cubetas deflectoras; no se incluye el análisis de túneles vertedores por decisión del jurado de examen.

El análisis se divide básicamente en dos partes. En la primera parte se presenta y revisa el estado del arte actual de las técnicas de predicción y de los métodos de protección, los cuales se utilizan cuando ocurre este fenómeno de cavitación; esta parte se complementa con un resumen de los efectos que se han producido y detectado en algunas estructuras hidráulicas construidas. En la segunda parte se proponen procedimientos de diseño por cavitación para cada una de las estructuras analizadas y se dan cuatro ejemplos para ilustrar su aplicación; también se incluyen en esta parte las conclusiones y recomendaciones generales.

A MI ESPOSA, A YETEL
Y A MAMA.

"Si voy en contra de la corriente
es porque conozco una más profun-
da".

Vladimir Ilich Ulianov "Lenin".

INDICE.

Pag.

1.-	INTRODUCCION.	2
2.-	CONCEPTOS TEORICOS.	5
	2.1. Naturaleza del fenómeno.	5
	2.2. Tipos de cavitación.	7
	2.3. Mecanismo del daño	9
3.-	DAÑOS OCURRIDOS EN ESTRUCTURAS HIDRAULICAS.	10
	3.1. Atrás de compuertas.	10
	3.2. Tanques disipadores.	14
	3.3. Salida de túneles.	16
	3.4. Cubetas deflectoras.	17
4.-	MÉTODOS DE PREDICCIÓN Y PROTECCIÓN.	19
	4.1. Predicción.	20
	4.1.1. Irregularidades.	20
	4.1.2. Bloques.	24
	4.1.3. Materiales inadecuados de las superficies.	27
	Comentarios.	27
	4.2. Protección.	34
	4.2.1. Acabado de las superficies.	34
	4.2.3. Aireación del flujo.	35
	4.2.3. Elementos supercavitantes.	36
	4.2.4. Concreto común más resistente.	38
	4.2.5. Concretos impregnados de polímeros.	38
	4.2.6. Concretos con fibras.	37
	4.2.7. Resinas epóxicas.	41
	4.2.8. Blindajes.	43
	Comentarios.	43

	Pag.
5.- PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS HIDRAULICAS.	46
5.1. Atrás de compuertas.	48
5.2. Tanques disipadores.	49
5.3. Salida de túneles.	50
5.4. Cubetas deflectoras	51
6.- EJEMPLOS.	53
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	57
7.1. Conclusiones.	57
7.2. Recomendaciones.	59
7.3. Estudios futuros.	60
BIBLIOGRAFIA.	61
TABLAS.	65
FIGURAS.	73

RECONOCIMIENTOS:

*A mis hermanos, maestros, al Instituto de Ingeniería, y a la
D.E.P.F.I. (Secciones de Hidráulica).*

CAPITULO I

1. Introducción.

El fenómeno de cavitación es importante por la consecuencia de sus efectos. Estos pueden clasificarse en tres categorías:

- 1) efectos que modifican la hidrodinámica del flujo (interrupción o rotura de la continuidad del escurrimiento).
- 2) efectos que producen daño (erosión) sobre las superficies de las fronteras sólidas del escurrimiento.
- 3) efectos extraños (ruido, vibración) que pueden o no estar acompañados por modificaciones al flujo o daños a las fronteras sólidas -- del escurrimiento.

Desafortunadamente, la cavitación sin control puede producir resultados serios y a veces hasta catastróficos en las estructuras hidráulicas.

El problema de daño por cavitación en estas estructuras no es nuevo. Desde 1930, fecha en que fueron notados los primeros daños (ref. 12), se ha

presentado constantemente en canales vertedores, tanques disipadores, -- atrás de compuertas, en la salida de túneles y en cubetas deflectoras.

Este trabajo está enfocado principalmente hacia los efectos que producen daño por erosión en estructuras hidráulicas, exceptuando vertedores, -- y tiene como objetivo el obtener procedimientos de diseño contra cavitación en dichas estructuras.

En el capítulo II, se dan algunos conceptos teóricos respecto al fenómeno de cavitación y sus efectos.

En el capítulo III se describen los principales daños que se han presentado en estructuras hidráulicas, que funcionaron o que están en operación. Esta experiencia permite tener presente cuáles son los elementos más vulnerables a la cavitación, con objeto de corregirlos en diseños futuros.

Los métodos reportados para determinar el índice de cavitación incipiente, σ_c , (parámetro comúnmente utilizado para representar los efectos de cavitación) se exponen brevemente en el capítulo IV; se da también un resumen de los métodos para proteger una estructura contra cavitación. Se incluyen varios comentarios respecto a la aplicabilidad de los métodos.

En el capítulo V se indican algunos procedimientos de diseño con el fin de dar lineamientos para proyectar y/o revisar cuatro tipos de estructuras hidráulicas.

Finalmente, en los últimos dos capítulos, se resuelven cuatro ejemplos para ilustrar los procedimientos de diseño antes mencionados, se dan las conclusiones y recomendaciones que se consideran las más importantes de este trabajo, y se proponen algunos estudios que podrían realizarse en un

futuro para entender, predecir y proteger las estructuras hidráulicas con
tra la cavitación.

CAPITULO II

2. Conceptos teóricos.

2.1. Naturaleza del fenómeno y parámetros.

La cavitación es un fenómeno dinámico que consiste en la formación y el colapso subsecuente de cavidades o burbujas llenas de vapor de agua; estas burbujas se forman en lugares en que, por cualquier circunstancia, la presión local desciende a valores iguales o menores que la presión de vaporización del líquido.

Las principales variables que afectan el carácter de la cavitación en líquidos fluyendo, son la geometría de las fronteras sólidas, la velocidad y la presión del flujo, y la presión de vaporización del agua. Otras variables que pueden causar variaciones significativas son las propiedades del líquido (viscosidad, tensión superficial), contaminantes disueltos y la condición de las superficies (grietas, rugosidad, etc.).

Hasta ahora no ha sido posible incluir todas estas condiciones en un pa

rómetro que cuantifique los efectos de cavitación. Sin embargo, en la práctica es común usar un parámetro básico obtenido de condiciones de similitud elementales, y analizar los efectos de las otras variables por separado.

El parámetro fundamental que describe el fenómeno es el índice de cavitación, σ , dado por:

$$\sigma = \frac{h_p - h_v}{\frac{V^2}{2g}} \quad \text{-----} \quad (2.1)$$

donde:

h_p = carga de presión en la zona de interés, en m.

h_v = carga de vaporización del líquido, en m.

$\frac{V^2}{2g}$ = carga de velocidad en la zona de interés, en m.

Los valores de la carga de vaporización, h_v , versus temperatura del agua, se encuentran graficados en la figura 2.1.

El parámetro adimensional σ , también llamado número de Thoma, caracteriza un determinado estado de desarrollo de la cavitación y puede ser considerado como el cociente entre las fuerzas que se oponen a la rotura de la continuidad del escurrimiento y las fuerzas que favorecen esa rotura.

En este trabajo distinguiremos dos tipos de índices, a saber:

σ = índice de cavitación correspondiente a las condiciones del escurrimiento en estudio.

σ_i = índice de cavitación incipiente que caracteriza la aparición de cavitación en diferentes formas de estructuras hidráulicas y para diferentes situaciones de funcionamiento.

Para estimar la posibilidad de que en un determinado punto de una obra se presente cavitación, es necesario obtener experimentalmente el índice de cavitación incipiente, σ_i , para condiciones similares, y compararlo con el índice de cavitación, σ , que pueda presentarse durante la operación. Si:

$\sigma < \sigma_i$ habrá cavitación

$\sigma > \sigma_i$ no habrá cavitación

2.2. Tipos de cavitación.

Se consideran los siguientes: (ref. 13)

1. cavitación viajera
2. cavitación fija
3. cavitación vorticosa
4. cavitación vibratoria

A continuación se explica brevemente cada uno de estos tipos.

2.2.1. Cavitación viajera.

Está compuesta por cavidades o burbujas transitorias que se forman en el líquido y se mueven con él mientras se expanden, contraen y colapsan. Tales cavidades transitorias aparecen en los puntos de baja presión de una frontera sólida o en el interior del líquido.

2.2.2. Cavitación fija.

Se refiere a la situación en que el flujo del líquido se desprende de la frontera rígida de un cuerpo sumergido, para formar una cavidad unida a la frontera. Se ha observado que el líquido adyacente a la cavidad contiene -

muchas cavidades viajeras pequeñas.

La cavidad fija puede crecer y colapsarse cíclicamente; la longitud máxima que se alcanza depende del campo de presión que se tenga.

Los dos tipos de cavitación anteriores son comunes en escurrimientos con obstáculos o desalineamientos en la frontera rígida.

2.2.3. Cavitación vorticosa.

En este tipo de cavitación, las cavidades se establecen en los núcleos de los vórtices que se forman en zonas de cortante alto. La cavitación aparece como cavidades viajeras o fijas.

Una forma de cavitación vorticosa puede ser la que se origina por la separación de la capa límite en una esfera. Otro ejemplo es el flujo alrededor de bloques deflectores de tanques disipadores.

2.2.4. Cavitación vibratoria.

Es otro tipo importante de cavitación en donde las fuerzas que causan la formación y el colapso de las cavidades se deben a series continuas de variaciones de presión en el líquido. Estas variaciones de presión son generadas por una superficie sumergida que vibra en dirección normal a su cara. Esta superficie puede ser vibrada intencionalmente (transductores colocados para producir trenes de ondas) o sin intención (efecto secundario de la operación de una máquina).

Los problemas de cavitación en estructuras hidráulicas tienen que ver con los tres primeros tipos de cavitación descritos; el último aparece más bien en problemas con máquinas hidráulicas. Sin embargo, cuando en las es

estructuras hidráulicas existen compuertas vibrando por acción del flujo, - puede darse el caso de cavitación vibratoria, si las variaciones de presión generadas por ellas ocurren con amplitud y frecuencia grandes.

2.3. Mecanismo del daño.

El colapso de las cavidades es diferente para cada tipo de cavitación, - pero en general, ésta se inicia cuando las cavidades están en una región - donde la presión local es superior a la presión de vapor del líquido. El colapso de las burbujas da origen a presiones muy elevadas ocasionando - fluctuaciones de presión, vibraciones, ruidos y acciones de choque de una gran intensidad. En la fig. 2.2 se muestran algunos modelos de colapso. - Cuando las fuerzas resultantes de impacto exceden a las fuerzas de cohesión interna del material de las superficies, se verifica su ruptura, a la cual se le da el nombre de "erosión de cavitación". La erosión puede deberse también a una acción prolongada de un escurrimiento con cavitación provocando sollicitaciones de fatiga resultantes de la acción repetida del fenómeno. En este trabajo se reconoce que si hay cavitación, hay daño es decir, se usará el índice de cavitación incipiente, T_i , para indicar si se presenta o no el daño.

Se concluye que un mejor conocimiento de la situación de cavitación en un escurrimiento conducirá a un mejor análisis y, por consiguiente, a resultados más confiables. Asimismo, serán más adecuados los medios de protección contra los posibles daños que ésta ocasione.

CAPITULO III

3. Daños ocurridos en estructuras hidráulicas.

Los daños ocurridos en estructuras hidráulicas que se citan en la literatura técnica son muy extensos; en este capítulo se describen únicamente aquellos que se consideran más ilustrativos para los fines de este trabajo: atrás de compuertas, en tanques disipadores, en la salida de túneles y en cubetas deflectoras.

3.1. Atrás de compuertas.

Todos los tipos existentes de compuertas en conductos a presión regulan el flujo cambiando su área transversal. En estas condiciones casi toda la carga de presión es convertida en energía cinética. En cargas altas esto conduce a velocidades grandes en la abertura, ocasionando así cavitación. Las compuertas deslizantes se usan comúnmente para reparar unidades o para casos de emergencia, sin embargo, la simplicidad constructiva y la

hermeticidad de las compuertas deslizantes han hecho atractiva la posibilidad de utilizarlas como reguladoras.

Los perfiles de velocidad observados inmediatamente aguas abajo de las compuertas reguladoras indican una interrupción de la capa límite turbulenta normal, que es reestablecida más adelante (fig. 3.1). Las velocidades altas hacen que las ranuras-guía, para estas compuertas, sean altamente vulnerables a cavitación y frecuentemente sean erosionadas las superficies de concreto que se encuentren aguas abajo de ellas. Ningún daño por cavitación ha sido experimentado donde la capa límite turbulenta se reestablece.

Otro daño ocurre también en las esquinas formadas por la plantilla y las paredes de la descarga (ref. 29). Esto hace pensar que en los lados de las compuertas parcialmente abiertas se desarrolla un flujo con vórtices. El vórtice puede existir en, o cerca de las esquinas formándose una región de baja presión favorable para cavitación.

Las compuertas radiales, que no requieren ranuras, son ampliamente utilizadas en obras hidráulicas. Las investigaciones llevadas a cabo han demostrado que cuando la compuerta radial opera con descargas a la atmósfera no existe la posibilidad de daños por cavitación. El origen de la cavitación tiene lugar solamente en los asientos del sello y en las hendiduras del sello en el caso de fugas (ref. 9). Las razones de las fugas o filtraciones desarrolladas son diferentes: constructivas, defectos de fabricación, etc.

Vinnong (ref. 28) reportó dos casos donde la cavitación parece ser la causa dominante del daño.

Caso A: Se formó un vaso nuevo para una planta hidroeléctrica pero la presa fue terminada un par de años antes que la casa de máquinas. El agua colectada en este vaso se dejó salir a través de la descarga de fondo para abastecer a otra planta localizada aguas abajo, que necesitaba más agua. Esto provocó que en la descarga de fondo ocurrieran daños por cavitación.

El desarrollo del daño es difícil de reconstruir debido a que gran parte del revestimiento de acero (15 mm. de espesor) fue arrancado, desapareciendo dentro del río abajo del túnel de salida. Además de la cavitación, la vibración ha sido involucrada debido a que muchos pernos de los rieles de deslizamiento han sido desatornillados por dicha vibración. Los daños se muestran en la fig. 3.2. La pila en el centro del túnel entre las -- compuertas tiene el peor daño, probablemente debido a la velocidad no-uniforme justo en el frente de la compuerta. La "cavitación por ranura" del tipo investigado por Ball (ref. 4) se pudo ver claramente. Sin embargo, los hoyos grandes en la pila y en el piso del túnel no pueden ser explicados tan fácilmente. Lo más probable, al parecer, es que los agujeros debidos a la cavitación por ranura causaron una nueva separación del flujo, y, como resultado, una capa de cortante de vórtices cavitantes comenzó una nueva zona de cavitación sobre la pila más abajo.

Caso B: Este arreglo de compuerta es similar al caso A, sólo que la carga hidráulica es de 85 m. El conducto de la hidroeléctrica fue usado debido a una avería extrema. Solamente una compuerta fue usada por un corto -- tiempo, pero el daño por cavitación ocurrió en el recubrimiento de acero (16 mm. de penetración); en la fig. 3.3 se muestran los daños. Esto es -- "cavitación por ranura", estimulada primero por la aceleración del flujo-

local ocasionando baja-presión sobre la nariz de la pila y, después, por la falta de aire.

Otro daño de cavitación en la obra de toma de la presa KINZIA fue estudiado por Schmitt (ref. 26). La obra tiene seis conductos, cada uno controlado por dos compuertas deslizantes (servicio y emergencia); hay otros dos conductos, uno en cada extremo de la toma, con las mismas características que las anteriores pero en un nivel superior. El daño en los conductos fue notado en el recubrimiento de concreto inmediatamente aguas abajo del metal empotrado de la ranura, alcanzando profundidades aproximadas hasta de 20 cm (fig. 3.4). En la referencia se muestran fotografías de los daños.

En la fig. 3.4 se observa que el metal empotrado inmediatamente aguas-abajo de los sellos-tope de contención, tiene una esquina abrupta en todo el "rebajo", desde el tope de entrada hasta el punto de transición recta. La esquina abrupta no fue redondeada porque se consideró que el "rebajo" proporcionaba la protección necesaria contra cavitación.

Todos los datos indicaron que la ranura fue la causa del daño. Las corrientes bajo esta ranura intersectan a aquellas que entran al conducto; el resultado es una zona de baja presión causada por estos dos chorros de alta velocidad que crean severa turbulencia en toda la cubierta inmediatamente aguas abajo de la ranura de contención abierta.

Otros ejemplos de daños por cavitación atrás de compuertas están dados por Ball (ref. 4) en las presas Palisadas, Libby, Locky Peak y Brazee - También la Bureau of Reclamation ha experimentado este tipo de daños en

las superficies de concreto de varios proyectos, Wagner (ref. 29).

3.2. Tanques disipadores.

Es común en la práctica usar bloques de choque para establecer el resalto hidráulico dentro del tanque disipador. Estos accesorios aumentan la turbulencia y a causa de las altas velocidades del flujo en los bloques sumergidos se producen daños por cavitación. Usualmente los bloques se colocan en dos o tres hileras dentro del tanque.

La cavitación causa erosión en el concreto, no solamente en los elementos, sino también en sus vecindades inmediatas: sobre el piso detrás de los bloques.

En 1963 fue hecha una inspección para determinar las condiciones del concreto en el tanque de la presa V.I. Lenin Volga, Inozentsev (ref. 12). El tanque contiene dos filas de bloques en forma de pirámide truncada y dispuestos alternadamente.

La presencia de la destrucción sobre los elementos, así como en el fondo del tanque atrás de los bloques, excluye la suposición de que los daños fueron causados por el impacto de cuerpos flotantes o por el empuje dinámico del agua. Un análisis de las posibles causas de destrucción condujeron a la conclusión de que la erosión fue el resultado de la cavitación. La destrucción ocurrió principalmente sobre los bloques localizados en medio; los daños tuvieron hasta 60 cm. de profundidad. Para algunos bloques, más del 60% de las superficies laterales fueron erosionadas y el refuerzo expuesto se deformó. La presencia de gran cantidad de grava extraída del

concreto fue una característica de la zona de cavitación sobre las caras internas. Este hecho hace suponer que la erosión por cavitación en concreto comienza en la zona de contacto aglomerante-agregado y consiste en la destrucción del aglomerante, debilitamiento de la unión de los granos de arena en el conglomerado, lavado del mortero y de las partículas del agregado de cuarzo. Las fotografías de los daños causados en los bloques se muestran en la ref. 12.

La máxima profundidad de erosión ocurrió en el sitio de una junta hecha pobremente (interrupción del colado). Esta junta fue la sección más débil sobre la cara lateral del bloque debido a la escasa adherencia del concreto viejo con el nuevo. La baja resistencia del concreto contra cavitación se demuestra también por las condiciones de los daños en donde están colocadas las varillas de refuerzo.

Unos cuantos casos de destrucción por cavitación fueron notados sobre las losas de las paredes de las pilas y estribos. La causa de la cavitación aquí fue la rugosidad en las juntas verticales entre las losas o entre la curvatura de la superficie y su unión, y por los bloques junto a la pared del estribo. Una erosión ligera ocurrió también sobre el piso del tanque en ciertos lugares; el daño en este caso ocurrió atrás de los bloques.

Un caso especial de daños en tanques disipadores es el sistema de descarga incorporado a la presa Clywedog, en el Reino Unido, Thomas (ref. 27). En este sistema existen dos chorros descargando dentro de unas cámaras de disipación de energía cuyos conductos están sumergidos por un control aguas abajo. La fig. 3.5 indica el arreglo general.

Las dos cámaras fueron probadas en un período de 750 hrs. durante el — cual se realizaron observaciones de la acción de la onda en el colchón hidráulico y de las características de gasto-elevación de la descarga. En este período de pruebas, las cámaras funcionaron sin ventilación. Posteriormente se detectaron picaduras intermitentes en el concreto de la cubierta de una cámara con profundidades de dos pulgadas, y un área circular de tres pies de radio en un punto a diez pies aguas abajo de la nariz de la descarga. En el caso de la segunda cámara no hubo daño significativo. Estos daños se deben a que en el extremo aguas arriba de la cámara se crea una presión sub-atmosférica y las presiones transitorias superimpuestas sobre ésta, crean una condición de cavitación.

3.3. Salida de túneles.

En la salida de túneles de obras de descarga frecuentemente existe una ampliación brusca. Estos cambios de sección pueden ser considerados casos especiales de escalones a favor del flujo, pero con la característica de — que aquéllos son usualmente más grandes que estos.

Un daño típico de cavitación a la salida de túneles es el experimentado en la presa Miranda, Portugal; Inozentsev (ref. 12). En esta presa de 80 m de altura hubo un considerable daño al concreto en la unión entre el portal de salida del conducto ancho y el túnel de descarga durante los ocho meses que estuvo en servicio; en la fig. 3.6.a. se muestra esquemáticamente la erosión causada. Sobre las bases de pruebas realizadas en un modelo, se — decidió cambiar la geometría de la unión de la salida y usar un recubrimiento de acero (10 a 20 mm. de espesor). Una vista general de la repara

ción se muestra en la fig. 3.6.b . Tal reparación se hizo dos veces, pero las dos veces el recubrimiento fue arrancado y el concreto severamente erosionado, fig. 3.6.c.

Un caso que puede ser considerado dentro de este tipo de estructuras es el de la presa Grand Coulee, Quintela (ref, 20) y Ball (ref. 4). Esta tiene un cono de acero en la salida; la reducción de 2.59 m crea una presión hacia aguas arriba.

En la transición de la salida (acero del cono a concreto de la superficie) se tiene un desalineamiento. Este cambio abrupto fue suficiente para inducir daños por cavitación. En la fig. 3.7 se muestra el arreglo general de la descarga y la localización del daño ocurrido.

3.4. Cubetas deflectoras (salto de ski)

Un método común para descargar agua excedente en presas altas es utilizar cubetas deflectoras (salto de ski). En algunos casos la lámina de agua se rompe por medio de bloques deflectores instalados en la salida de la cubeta para disminuir la socavación en el canal de salida (trampolín sumergido estriado). La instalación y operación de tales estructuras ha demostrado que los bloques y las áreas adyacentes a ellos son destruidos por la acción del flujo. La naturaleza de los daños indica que la cavitación juega un papel importante en esta destrucción. Los estudios hechos por Lgalov, et. al. (ref. 15) establecieron que las principales causas de la destrucción pueden ser:

- a) La presencia de filos en la unión de las superficies superior y lateral de los bloques.

- b) La presencia de secciones mal alineadas en la unión entre las caras laterales de dos bloques y la superficie de la cubeta, justo a la entrada del estrangulamiento, entre los bloques deflectoras.
- c) La presencia de defectos constructivos sobre las superficies del bloque. Este es el más peligroso, especialmente si su paramento está orientado contra el flujo.

Los bloques deflectores en algunas ocasiones se colocan como auxiliares a la entrada de los tanques disipadores. Un caso de daño por cavitación en este tipo de bloques es citado por Quintela (ref. 21), y corresponde a la descarga de la presa Novosibirsk. En la fig. 3.8.a. se muestran en forma esquemática las erosiones observadas en 1962, tres años después de su operación. Las erosiones se localizaron en la superficie de concreto que está detrás del paramento vertical. La causa del daño fue interpretada de la siguiente manera: detrás de los bloques deflectores se presentan vórtices en forma de herradura (fig. 3.8.b). Tales vórtices se desprenden de los bloques provocando depresiones que originan cavitación.

Se concluye que la experiencia que se tiene con daños provocados por cavitación en estructuras hidráulicas es extensa y variada. Es conveniente tener en cuenta esta experiencia para los diseños futuros, ya que con frecuencia se subestima el efecto de la cavitación ignorando que éste puede conducir a destrucciones en las estructuras hidráulicas al grado de poner en peligro toda la obra.

CAPITULO IV

4. Métodos de predicción y protección.

Hay tres razones fundamentales de diseño responsables de los daños por cavitación en estructuras hidráulicas:

1. Forma irregular de las superficies que definen las fronteras del escurrimiento (rugosidad, escalones, inclinaciones, desaliniamientos, protuberancias, juntas de unión, ranuras).
2. Elementos estructurales tales como: bloques deflectores y de choque, cambios de sección transversal (contracciones y expansiones).
3. Materiales inadecuados de las superficies (concretos pobres, resistencias bajas, adherencias deficientes, recubrimientos inapropiados).

Frecuentemente los daños se desarrollan por la acción combinada de los factores antes mencionados.

4.1. Predicción.

La predicción de daño por cavitación depende de la determinación del índice de cavitación incipiente, σ_i , que se obtiene con experimentación. Generalmente estos estudios de laboratorio se realizan tomando en cuenta elementos aislados o elementos dentro de una estructura en particular (compuertas, tanques, túneles, cubetas deflectoras). Las observaciones de campo en prototipo permiten también definir a σ_i .

A continuación se da un resumen de los resultados obtenidos por algunos autores.

4.1.1. Irregularidades en las superficies.

Arndt (ref. 2) presenta dos relaciones empíricas: una para irregularidades aisladas y otra para distribuidas. Con esta clasificación, y con los datos de experimentos de otros autores, propone para irregularidades aisladas la siguiente expresión:

$$\sigma_i = C \left(\frac{d}{\delta} \right)^m \left(\frac{V_d \delta}{\nu} \right)^n \quad \text{----- (4.1)}$$

donde:

d = altura de la irregularidad, m.

V_d = velocidad del escurrimiento al nivel de la discontinuidad, m/s.

δ = espesor nominal de la capa límite, m.

ν = viscosidad cinemática, m^2/s .

C, m, n = coeficientes que dependen de la forma de la irregularidad, adimensionales.

La expresión (4.1) es válida en el rango $0 < \frac{d}{\delta} \leq 5$; para $\frac{d}{\delta} > 5$ los

valores de σ_i obtenidos están del lado de la seguridad.

Las geometrías de las irregularidades se muestran en la tabla 4.1. En esta misma tabla se dan los valores de C , m y n , y la expresión para calcular el valor de S que interviene en la ecuación (4.1).

Para irregularidades distribuidas propone la siguiente expresión (obtenida por Arndt e Ippen en 1968):

$$\sigma_i = C_f 16 \quad \text{--- (4.2)}$$

donde:

C_f = coeficiente local de fricción, adimensional.

El valor de C_f puede ser obtenido con la siguiente ecuación:

$$C_f = 0.0493 \left(\frac{x}{\epsilon} \right)^{-0.304} \quad \text{--- (4.3)}$$

donde:

x = distancia al inicio de desarrollo de la capa límite, m.

ϵ = valor de la rugosidad absoluta, m.

Ball (ref. 4) presenta una sistematización de los diferentes tipos más comunes de irregularidades, acompañada de esquemas de localización de los daños por cavitación, fig. 4.1. Este autor presenta también los resultados de un programa de investigación experimental para determinar el límite de velocidad correspondiente a la formación de cavitación en tres tipos diferentes de irregularidades, fig. 4.2; se incluye también en esta figura una curva obtenida por la "Corps of Engineers".

Echávez (ref. 7) simplificó la ley dada por Arndt e Ippen para irregularidades distribuidas (superficies rugosas), utilizando un enfoque estadís

tico para considerar la desigualdad de las protuberancias en superficies de concreto y la velocidad a una distancia igual al tamaño de la rugosidad equivalente de Nikuradse. El valor para σ_i resulta igual a 0.44, — aunque en la práctica se ha encontrado un intervalo $1.2 \leq \sigma_i \leq 2.2$ para estas superficies.

Por otro lado recomienda valores del índice de cavitación incipiente para varias geometrías de irregularidades aisladas, tabla 4.2; en la tabla se incluyen las recomendaciones para superficies rugosas. Una comparación entre valores de σ_i obtenidos en sus experimentos, con condiciones muy parecidas a las del prototipo, y los que obtuvieron tres autores, le permitieron deducir que el índice de cavitación incipiente es relativamente independiente del tamaño de la irregularidad, más no de su forma.

Falvey (ref. 8) hace referencia a los datos colectados por Colgate (1977) y por Jin (1980). Estos datos no fueron obtenidos con capa límite y, por lo tanto, los resultados son conservadores. Ellos establecieron que para relaciones (b/d) mayores que 5, el índice de cavitación incipiente está dado por:

$$\sigma_i = 1.8 \left(\frac{b}{d} \right)^{-0.7} \quad \text{----- (4.4)}$$

Para relaciones menores que 5, el índice es función de la altura del es calón, d , fig. 4.3.

Galperin, et. al. (ref. 9) prepararon recomendaciones para prevenir — riesgos por cavitación en elementos de estructuras hidráulicas, obtenidas de los estudios realizados en cámaras de alta velocidad para irregularida

des aisladas orientadas contra el flujo. Para determinar σ_i utilizaron la velocidad del escurrimiento al nivel de la irregularidad. En la fig. 4.4 se muestran los valores de σ_i para tres tipos diferentes de irregularidades. Recomiendan no usar pendientes α mayores que 30° , puesto que - para estas pendientes, el valor de σ_i se hace constante e igual que para una irregularidad rectangular ($30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$; $\sigma_i = 1.76$).

Lisenko, et. al. (ref. 16) investigaron cargas de cavitación incipiente para diferentes perfiles de elementos de sello en compuertas deslizantes, - fig. 4.5. La carga incipiente, h_i , ha sido determinada para presiones detrás del sello cercanas a una atmósfera (1 m. de columna de agua).

Quintela, et. al. (ref. 21) presentan un resumen de los métodos obtenidos por Plyushin, et al. (1976), Osholkov, et. al. (1979) y Galperin, et. al. (1977).

a) Plyushin, et. al.- definen una gráfica con los resultados de ensayos relativos al inicio de la cavitación provocada por irregularidades en descargas de excedencias a superficie libre. Esta gráfica permite cuantificar la altura de la irregularidad en función de la inclinación cuando aparece la cavitación, fig. 4.6.

b) Osholkov, et. al.- designan un "parámetro de erosión de cavitación", σ_i^* , para irregularidades del tipo escalón con inclinación. Este parámetro difiere del índice de cavitación incipiente por caracterizar situaciones cuando se inicia el proceso de erosión por cavitación en superficies de concreto. La fig. 4.7 muestra los valores que resultaron de los ensayos; la velocidad y la presión son obtenidas al nivel del escalón.

c) Galperin, et. al.- con los resultados de Plyushin, et.al. y Ball obtuvieron los índices σ_c para escalones de distintas alturas y diferentes valores de inclinación, fig. 4.8.

También expone los estudios de Galperin, et. al. (1977) para determinar la influencia que ejercen los diferentes parámetros geométricos y la capa límite en los índices de cavitación incipiente cuando en los escurrimientos existen ranuras. Galperin, et. al. (1977) proponen que el σ_c se calcule con las curvas de la fig. 4.9.

Zharov, et. al. analizaron las condiciones para la formación de cavitación en flujo con irregularidades-tridimensionales sobre la superficie de de un modelo de vertedor. Para obtener resultados confiables, las pruebas se realizaron con irregularidades aisladas y con grupos de irregularidades, variando en altura (d) o en inclinación (α), fig. 4.10. Ellos encontraron que las partes de las irregularidades con más posibilidad de inducir cavitación son las esquinas y los filos del frente. Los valores del índice de cavitación incipiente, σ_c , para este caso, están dados en la fig. 4.11; la curva se puede representar por la ecuación: $\sigma_c = 1.8 \sin \alpha$. Finalmente, para incluir un margen de seguridad en la predicción de σ_c , recomiendan la relación: $\sigma_c = 2 \sin \alpha$, (ref. 30).

4.1.2. Bloques.

Galperin, et. al. (ref. 10) obtuvieron el desarrollo de la erosión por-cavitación vs. tiempo de operación observando los bloques de choque de un proyecto existente (Presa Lenin Volga; inciso 3.2). En la fig. 4.12 se —

presenta la evolución en 600 hrs. de la profundidad máxima de erosión observada en cada bloque; esto permite predecir el volumen posible de concreto erosionado en casos similares. El índice de cavitación incipiente, σ_i , para este caso, resultó igual a 2.1.

Igalov, et. al. (ref. 15) realizaron ensayos hidráulicos con bloques de flectores y construyeron la curva que relaciona a σ_i con el cociente entre radio de redondeo de las caras, r , y el ancho de los bloques, B , fig. 4.13. Las zonas dañadas en los separadores fueron las mostradas en la fig. 4.14. Aunque redondeando las caras de atrás se disminuye el índice σ_i , no se elimina la cavitación por la irregularidad.

Miller (ref. 18) describe un método para obtener el índice de cavitación incipiente, σ_i , en ampliaciones bruscas. Este método está basado en la corrección a la ampliación para un orificio equivalente. En la fig. 4.15 se muestran las curvas deducidas.

Provorova, et. al. (ref. 19) condujeron una serie de investigaciones en relación a los índices de cavitación incipiente para tres geometrías de bloques de choque (trapezoidal, triangular y poligonal), colocadas en varias posiciones dentro de un tanque disipador, y con diferentes grados de sumergencia del salto hidráulico. El inicio de cavitación se determinó mediante dispositivos ultrasónicos colocados encima de los bloques; la fig. 4.16 muestra el arreglo general de los distintos bloques, así como los resultados de σ_i . El bloque más desfavorable a la erosión es el de forma triangular; le sigue el poligonal y por último el trapezoidal, que es el que da mayor resistencia.

El incremento de sumergencia del salto, $n_s = y/y_2$, disminuye el índice σ_i

para un mismo tipo de bloque; fig. 4.17 (Y_1 y Y_2 están indicados en esta figura). Otro parámetro que afecta a σ_i es la relación l/z , donde: l es la distancia entre el bloque y el inicio del salto, y $z = Y_2 - Y_1$, es la diferencia de conjugado mayor y menor del salto sin bloque. Este último efecto se muestra en la fig. 4.18; se ve que conforme la relación l/z se incrementa, los valores de σ_i decrecen, pero en un cierto valor permanece constante. En todos los casos la erosión ocurrió sobre los estribos laterales.

Quintela, et. al. (ref. 21) hacen referencia a los resultados obtenidos por Galperin, et. al., de las erosiones por cavitación en los bloques deflectores de la presa Mamanski y dos ensayos hidráulicos posteriores. En la fig. 4.19 se encuentran graficados los resultados.

Rosarov, et. al. (ref. 24 y 25) examinaron varios bloques de choque — y deflectores montados en tanques y en túneles de cavitación. El desarrollo e inyección de cavitación fue investigado por medio de transductores ultrasónicos. La fig. 4.20 muestra los valores de σ_i , así como las zonas de erosión observadas en los bloques 1 a 7; la localización de erosión en los modelos coincide con la de los prototipos.

Utilizando las curvas entre la intensidad de erosión por cavitación en bloques de choque, h_e , y el grado de cavitación $\sigma/\sigma_i = \beta$, deducen tres rangos de desarrollo de erosión:

1. Cavitación inicial ($0.7 \leq \beta \leq 1.0$).
2. Cavitación desarrollada ($0.2 \leq \beta \leq 0.7$).
3. Supercavitación ($\beta \leq 0.2$).

Con algunas variaciones en los límites de β , esta relación de rangos

es válida para todas las formas geométricas de bloques y para todas las fronteras del flujo. Conforme las velocidades crecen, la zona de cavitación desarrollada se desplaza hacia valores de β más grandes.

4.1.3. Materiales inadecuados de las superficies.

Galperin, et. al. (ref. 9, 10) obtuvieron una relación experimental $M = f(V_i, C)$ que permite especificar las características de resistencia del concreto hidráulico para la construcción de estructuras, o para proveer medidas de seguridad de concentración de aire necesario, tomando en cuenta las condiciones hidráulicas específicas de la estructura y el límite permisible de velocidad, V_i , correspondiente a la inyección de cavitación. Esta relación se muestra en la fig. 4.21, donde M es la resistencia a compresión del concreto.

Inozentsev (ref. 12) hizo un intento para sistematizar los datos sobre la composición y el esfuerzo del concreto sujeto a cavitación por medio de recubrimientos. La información sobre la composición y las propiedades de concretos usados en algunas estructuras se dan en la tabla 4.3; también se describen los sitios donde han ocurrido daños y la velocidad del escurrimiento. Esta información la recopilaron de datos de presas, de la literatura técnica y de inspecciones de campo.

Comentarios.

Es muy importante entender las limitaciones de las leyes básicas de escala, puesto que mucha de la información acerca de los efectos de cavitación está deducida experimentalmente. La cuestión de efectos de escala de

cavitación ha sido considerada por muchos autores. Desafortunadamente una gran parte de la evidencia experimental está basada en datos de laboratorio obtenidos en un rango limitado de variables independientes.

En el diseño de estructuras hidráulicas, operando con cavitación, es necesario establecer modelos adecuados o leyes que sean capaces de extrapolar con confianza los datos del modelo al prototipo. La similitud dinámica requiere que los efectos de viscosidad, gravedad y tensión superficial estén en relación única en cada condición de cavitación. En otras palabras, una condición de cavitación está adecuadamente reproducida solamente si - los valores de los números de Reynolds (R), Froude (F) y Weber (W), - así como el índice σ , tienen valores particulares de acuerdo a una única relación entre ellos mismos.

Entre los factores que producen efecto de escala cuando se presenta la cavitación, están:

- a) tiempo de retraso o histéresis en la inyección.
- b) inyección en flujos contantes (efectos de capa límite y turbulencia).
- c) rugosidad de la superficie en las fronteras.
- d) influencia de la gravedad.
- e) efectos termodinámicos.

Se han realizado numerosos ensayos para demostrar la influencia de estos efectos y se ha demostrado que los resultados obtenidos en algún estudio experimental que se desea hacer puede estar sujeto a errores (ref. 3 y 13).

De esta manera resulta conveniente hacer una comparación entre los métodos expuestos para conocer el alcance de cada estudio y su aplicabilidad en los diferentes tipos de estructuras hidráulicas para seleccionar el —

más apropiado a las condiciones de un problema particular.

El análisis y la comparación de los estudios expuestos no son muy alentadores. Es difícil realizar una comparación, primero por la cantidad de variables que intervienen en el problema y, segundo por las condiciones — tan particulares que estudia cada autor. Sin embargo, un análisis cuantitativo es necesario.

Lo primero que se ocurre hacer es obtener, por medio de análisis dimensional, relaciones adimensionales que involucren a las variables físicas del fenómeno, de tal forma que se tengan gráficas con parámetros comunes a todos los métodos.

Para el caso de irregularidades se dedujo una relación del tipo $\sigma/\sigma_c = f(\mathbb{R}, h/d)$ donde σ_c es el índice de cavitación incipiente, \mathbb{R} es el número de Reynolds para la altura, d , de la irregularidad, y h es la carga del agua; se pensó que esta relación podría arrojar resultados comparativos. Por efectos de sencillez, se seleccionó una irregularidad simple: escalón en contra del flujo; los resultados se muestran en la fig. 4.22. Se puede apreciar en la fig. que la viscosidad influye notablemente para velocidades pequeñas (del orden 8 m/s), haciendo que los métodos conduzcan a resultados muy diferentes. Se nota también que para velocidades altas (del orden 30 m/s, comunes para que se presente cavitación), el error en usar — uno u otro método disminuye hasta el grado de obtener resultados prácticamente iguales. Es recomendable tener presente esta observación para diseño.

Si analizamos los resultados para irregularidades tipo escalón con inclinación, observamos de las curvas dadas por Falvey (ref. 8) fig. 4.3, — que para relaciones (b/d) menores que 5, el índice de cavitación varía —

con la altura del escalón. Esta relación límite corresponde a ángulos de 11.3° ; es decir que, para ángulos mayores que 11.3° , el índice σ_i será dependiente de la altura del escalón. En este caso el índice σ_i crece paralelamente conforme se aumenta la altura del escalón. Estos resultados están de acuerdo con los presentados por Galperin (ref. 21) fig. 4.8 (datos obtenidos de Plyushin y Ball) en donde se indica la variación del índice σ_i con el ángulo y la altura del escalón. Se ve en la figura que para ángulos pequeños (aprox. 10°) las curvas tienden a unirse indicando la independencia de la altura del escalón.

Por otro lado Zharov (ref. 30) fig. 4.11, Oskolkov (ref. 21) fig. 4.7, y Galperin (ref. 9) fig. 4.4, están en contradicción con lo anterior ya que solamente obtienen una curva para cualquier valor del ángulo de inclinación del escalón.

Se ha construido la curva de la fig. 4.23, obtenida con los resultados de Galperin (ref. 21) y Zharov (ref. 30) para analizar esta contradicción. Se ve en la fig. que las curvas de uno y otro autor no coinciden. Aunque parece haber una tendencia de igualdad alrededor de la curva correspondiente a una altura de escalón de 3 mm, no se puede decir que en una altura de escalón determinada, ambos métodos arrojarán resultados iguales, ya que esta tendencia quizá se deba a una coincidencia en el ajuste de datos hecho por Zharov. En las curvas no se visualiza la causa de la diferencia de resultados y por lo tanto no se puede decir con certeza cuál de los dos métodos es el más confiable. Se recomienda entonces mantenerse del lado de la seguridad diseñando con el índice σ_i que resulte mayor.

Otro aspecto que es importante comentar es el de irregularidades tridi

mensionales y bidimensionales. Los resultados de Zharov (ref. 30) comparados con los de Galperin (ref. 9) indican la importancia que tienen los estudios de laboratorio; por un lado, Galperin encuentra que el valor de σ_i no cambia y se mantiene constante para un cierto valor de inclinación, y por otro lado Zharov demuestra lo contrario. Aquí se muestran claramente los errores que se pueden involucrar al realizar un experimento si no se sistematizan correctamente las variables que intervienen en el fenómeno de cavitación.

Un resumen de los métodos para determinar σ_i en irregularidades, se da en la tabla 4.4 .

En el caso de bloques, la comparación se vuelve aún más difícil por la escasez de datos y porque las condiciones de cada estudio son todavía más particulares. Para estos métodos no se logró obtener ninguna relación confiable por los efectos de forma tan complejos que intervienen en cada bloque. Por consiguiente, los límites de aplicación de estos estudios son obvios y sólo se recomienda, para fines de diseño, comparar los bloques de los métodos con los del diseño particular que se tenga y obtener por características similares el índice de cavitación incipiente, σ_i . Una ayuda recomendable también, es ampliar los resultados de Rosanov (ref. 24 y 25) para otras dimensiones de un mismo tipo de bloque; por ejemplo, en la fig. 4.24 se muestran curvas que relacionan $\sigma/\sigma_i = f(Fr, h/d)$, donde Fr es el número de Froude, obtenido como se indica. Entonces para valores de d, h, V y una cierta geometría dados, se obtiene σ/σ_i ; despejando se puede encontrar a σ_i .

Los resultados de Galperin (ref. 21) fig. 4.19 de la presa de Mamanski,

cambiarán para otra dimensión de bloques deflectores, siendo únicamente válidos para las especificaciones de éstos.

El método expuesto por Provorova (ref. 19) es quizá uno de los mejores desde el punto de vista de análisis de estructuras hidráulicas. Este criterio está enfocado a determinar los efectos de cavitación en un tanque - disipador valorando los efectos de emergencia, localización de bloques, etc. Aunque sólo se realizó para tres tipos de geometrías de bloques, su valor radica precisamente en que sus resultados se pueden utilizar para fines de diseño de un arreglo general de una estructura.

De la misma manera que en el caso de irregularidades, se obtuvo la tabla 4.5 que resume los métodos expuestos para bloques.

Por lo que respecta al cálculo de las características de los materiales sujetos a cavitación, los estudios se han enfocado principalmente a determinar la resistencia de estas superficies, siendo casi nulos los estudios que relacionen esta resistencia con las geometrías y variación de los esfuerzos. La información que existe sobre este aspecto, es escasa y muy particular; por ejemplo, de los dos métodos propuestos, sólo uno puede utilizarse para "diseñar" (Galperin ref. 9), el otro es más bien representativo de la experiencia para casos especiales y se podrá utilizar únicamente para fines comparativos cualitativos (Inozentsev ref. 12).

Se observa en la fig. 4.21 que las resistencias requeridas para que no ocurra falla en el concreto, correspondientes a una velocidad de 20 m/s - ó más, velocidad común en estructuras sujetas a cavitación, son de más de 400 kg/cm² cuando no se incluye aire, y disminuye conforme la concentra-

ción de aire se incrementa. Si comparamos este valor con las resistencias de la tabla 4.3, observaremos claramente que para estas velocidades, las resistencias oscilan entre 130 y 300 kg/cm^2 , que son menores que la requerida de 400 kg/cm^2 ; esto confirma la concordancia de las conclusiones de ambos autores.

Conviene, por lo tanto, considerar los resultados de la tabla 4.3 y fig. 4.21 para el diseño y/o revisión de estructuras futuras.

Se han incluido los valores de resistencia de concreto que actualmente se están utilizando en estructuras hidráulicas; los datos fueron obtenidos de la presa "El Caracol" que está construyendo C.F.E. Se observa que estos valores son inferiores a la resistencia de erosión, aunque se aclara que hay que tomar en cuenta que esta resistencia no es el único factor determinante en la erosión por cavitación. De cualquier manera, no debe desecharse la posibilidad de que estas obras fallen por el simple hecho de la resistencia baja del concreto, y convendrá en todo caso hacer un análisis más amplio. Por ejemplo, de las curvas de la fig. 4.21 observamos que — con concentraciones del 8% de aire y velocidades entre 20 y 22 m/s, la resistencia requerida del concreto disminuye hasta 190 kg/cm^2 . Entonces, — en este caso, la presencia de erosión dependerá también de la cantidad de aire que pueda incluir el flujo en condiciones de operación. Adicionalmente a la concentración de aire, puede suceder que la erosión llegue a ser producto de un procedimiento constructivo inadecuado, ausencia de control de calidad de materiales, etc.

4.2. Protección.

La protección de una estructura hidráulica contra la erosión por cavitación se puede hacer de dos maneras:

- a) disminuyendo los esfuerzos provocados por cavitación con:
 - acabado de superficies
 - aireación del flujo
 - elementos supercavitantes
- b) aumentando la resistencia de la superficie con:
 - concreto común más resistente
 - concretos impregnados de polímeros
 - concretos con fibras
 - resinas epóxicas
 - blindajes

La protección de una estructura particular, obviamente podrá hacerse — utilizando uno o varios métodos a la vez, dependiendo del problema en cues ti ón.

A continuación se describen las características de cada una de estas so luc iones.

4.2.1. Acabado de superficies.

Consiste en establecer especificaciones de acabado en las superficies de manera que se puedan impedir los efectos de cavitación resultante de las irregularidades. Estas especificaciones deben referirse al tamaño y tipo de irregularidad permisible de manera que no existan efectos de cavitación. Así, para una dimensión y tipo de irregularidad permisible, se deben remover o rebajar las irregularidades que excedan esta dimensión. En la tabla 4.6 se dan algunas especificaciones propuestas por Osholkov y Semerkov - (ref. 21).

Las condiciones de acabado impuestas pueden resultar extremadamente restrictivas, y, por consiguiente, de ejecución difícil.

Conviene hacer la aclaración de que esta solución no da garantías contra los efectos de irregularidades que aparezcan posteriormente como consecuencia del ataque químico, de agentes climáticos, de la abrasión por transporte de sólidos y de choques occidentales de cuerpos sobre la superficie. Son ejemplo de este tipo de irregularidades los depósitos de carbonato de calcio y las grietas debidas a variaciones térmicas.

4.2.2. Aireación del flujo.

El aireamiento del flujo para proteger una superficie contra erosión de cavitación provocada por irregularidades, constituye una de las más notables innovaciones.

La aireación del flujo en la zona próxima a la pared, amortigua la violencia de la implosión y evita que las burbujas de vapor de agua y aire -mezclado reduzcan en forma violenta el volumen.

En los escurrimientos a superficie libre, la introducción del aire puede hacerse naturalmente a través de la superficie, o mediante dispositivos que se designan "aireadores".

La penetración de aire a través de superficie libre de escurrimiento — hasta la superficie inferior, está limitada a valores bajos de gasto unitario, \dot{q} (Quintela, et. al. ref. 21). Surge entonces como solución adoptar los aireadores para introducir aire al escurrimiento.

Los aireadores consisten en ranuras, escalones y deflectores que se colocan cerca de las zonas expuestas a cavitación; por ejemplo, en compuer-

tas, se colocan inmediatamente aguas abajo de ella (Beichley, ref. 5).

La experiencia en el uso de estos dispositivos aireadores es amplia; sin embargo, no se ha establecido una solución general. Por esta razón, cada problema deberá ser estudiado con ensayos de laboratorio y aplicando los criterios que se han seguido en otros proyectos.

Entre los principales factores que se deben obtener al diseñar un aireador están: la longitud que protege, las características de su funcionamiento (inicio de aireación, rango de gastos para los que no trabaja y eficiencia), la localización dentro de la estructura, dimensiones y geometría.

En las referencias 4, 5, 7, 9, 10, 20, y 21 se dan algunas soluciones por medio de este tipo de protección. En la tabla 4.7 se resumen estos tipos de aireadores usados, así como la estructura que protegen en cada caso.

4.2.3. Elementos supercavitantes.

En bloques de choque y deflectores pueden adoptarse formas especiales que se llaman "bloques supercavitantes". Estos bloques tienen una forma tal que provocan la separación del flujo y, por consiguiente, el alejamiento del foco de cavitación lejos de la superficie de la estructura.

Este principio está basado en numerosas observaciones sobre el proceso de erosión por cavitación y se ha confirmado por los resultados de muchas investigaciones. Una de estas investigaciones es la realizada por Rosanov et. al. (refs. 24 y 25), y en la cual realizaron observaciones visuales -

del flujo y mediciones de la intensidad de fluctuaciones de presión hidrodinámica para diferentes valores de $\beta = \sigma/\sigma_c$, en la zona de separación-aguas abajo de deflectores y de compuertas parcialmente abiertas; ellos encontraron que, no solamente en las etapas de cavitación inicial ($0.7 \leq \beta \leq 1.0$) sino también en la etapa de supercavitación ($\beta \leq 0.2$), la zona de formación y desintegración de burbujas de cavitación prácticamente no hacía contacto directamente con las superficies de las fronteras sólidas del flujo, y tal contacto ocurría solamente en el caso de la cavitación desarrollada ($\beta = 0.6$). Las investigaciones de Rosanov et. al. confirman que para que no se obtenga una zona de erosión intensa en cualquier valor de β , basta con profundizar el fondo inmediatamente aguas abajo del deflector o aumentar su altura, puesto que el contacto directo entre las burbujas de cavitación y la superficie sólida, es precisamente la causa de intensa erosión.

Los bloques 8 a 12 de la fig. 4.20 son bloques supercavitantes estudiados por Rosanov et. al. (ref. 25); ellos redondearon las esquinas entre las caras de los bloques y encontraron que así disminuye significativamente el índice de cavitación incipiente, σ_c , (fig. 4.25).

Otro tipo de elementos supercavitantes estudiados por Rosanov, et. al. (ref. 24) se muestran en la fig. 4.26. Aquí se ilustran elementos recomendados que pueden ser colocados en compuertas para trasladar el foco de cavitación lejos de las paredes y del piso (deflectores y sellos).

Es importante notar que introducir aire en las zonas de los elementos supercavitantes aumenta la seguridad contra la ocurrencia de erosión por-

cavitación. Sin embargo, estos elementos pueden trabajar satisfactoriamente también sin aireación.

4.2.4. Concreto común más resistente.

La forma más sencilla de proteger una estructura contra erosión por cavitación es aumentar la resistencia del concreto común por medio del efecto de la relación agua-cemento: a mayor relación agua-cemento se tendrá menor resistencia. En la fig. 4.27 se presentan curvas esfuerzo-deformación para distintas relaciones. Otros factores que permiten incrementar la resistencia son: mejor calidad de los agregados, mayor capacidad de adhesión del cemento, estricto control de construcción, etc.

4.2.5. Concretos impregnados de polímeros.

La utilización de este tipo de concretos se basa en el hecho de la naturaleza porosa del concreto común. Los poros reducen la resistencia mecánica porque disminuyen el área de aplicación de la carga efectiva, provocando concentración de esfuerzos, y reducen la durabilidad porque permiten la penetración de agentes externos agresivos.

De esta forma los poros son rellenados con polímeros obteniendo un concreto de baja porosidad. Un concreto impregnado de polímeros contiene usualmente de 6 a 7 % de polímeros en peso (ref. 21).

La colocación de este concreto requiere un secado del concreto común endurecido, una difusión de monómero (metacrilato de metilo, termoplástico) de baja viscosidad a través de la estructura porosa abierta, y la polime-

nación del monómero *in situ*.

El recubrimiento con polímeros para protección contra cavitación ha sido usado recientemente en la construcción y reparación de estructuras hidráulicas (ref. 12 y 21), sin embargo, este tipo de recubrimiento tiene la desventaja de resultar relativamente costoso, además, no se conoce mucho acerca de su comportamiento con la edad.

4.2.6. Concretos con fibras.

El concreto con fibras contiene cemento, agregados finos y gruesos, — y fibras de acero discontinuas. Las mallas continuas, tejidos y barras — largas no son considerados como elementos a utilizar en este tipo de concretos.

El parámetro frecuentemente adoptado para caracterizar una fibra es el parámetro de forma, definido por el cociente entre su largo y el diámetro equivalente, entendiéndose por diámetro equivalente el diámetro de un círculo con un área igual a la de la sección transversal de la fibra.

Las fibras de sección circular tienen, en general, diámetros comprendidos entre 0.25 y 0.75 mm. Las de sección rectangular presentan espesores de 0.15 a 0.40 mm. y anchos de 0.25 a 0.90 mm.

Cualquiera que sea el método a seguir, es necesario garantizar una distribución uniforme de las fibras, de manera que no se formen vacíos durante la mezcla.

Para la fabricación de este tipo de concretos se dan las recomendaciones siguientes, de acuerdo a A.C.I., 1974, (ref. 21):

- el parámetro de forma debe tener un valor mayor que 100 para garantizar la mezcla uniforme.
- el porcentaje en volumen de fibras de acero debe ser inferior a 2 %.
- la dimensión de los agregados no debe exceder 9.5 mm.

Algunas dosis generalmente adoptadas en la fabricación de concreto con fibras de acero son:

- Cemento..... 330 a 560 Kg/m³
- Relación agua/cemento..... 0.4 a 0.6
- Dimensión máxima de agregados..... 9.5 mm.
- Fibras de acero..... 0.5 a 2 % (en volumen) (40 Kg/m³ a 157 Kg/m³).

El concreto con fibras ha revelado un buen comportamiento en la construcción de juntas de obras de descarga, donde el concreto común ha sido erosionado por la acción de cavitación.

Otras dosis utilizadas en las reparaciones de superficies erosionadas - por la acción de cavitación, en las estructuras de descarga de tres presas, están dadas en la tabla 4.8 (ref. 21).

Echávez, et. al. (ref. 32) realizaron ensayos en condiciones de cavitación en dos tipos de concretos reforzados con fibras de acero. Probaron dos refuerzos metálicos, uno con fibras planas de sección rectangular, y el otro con fibras cilíndricas.

Las características de la mezcla y de las fibras usadas en las pruebas, se dan a continuación:

- Cemento tipo III..... 432 Kg/m³
- Fibras metálicas..... 80 Kg/m³
- Agua..... 173 Kg/m³
- Arena de río..... 884 Kg/m³

- Grava de río (tamaño máximo 19 mm)..... 817 Kg/m³
- Revenimiento..... 3-4 cm.
- Resistencia a compresión..... 496-533 Kg/cm²
- Resistencia a tensión (prueba brasileña)..... 43 Kg/cm²
- Módulo de elasticidad..... 307 000 Kg/cm²
- Fibra rectangular: (10.53mm x 0.23mm x 25.3mm)
 - Densidad relativa.....7.21
 - Esbeltez (long./diámetro equiv.).... 58
 - % de fibras en volumen.....1.10
- Fibra circular: ($\phi = 0.47$ mm, $l = 24.5$ mm)
 - Densidad relativa.....7.51
 - Esbeltez (long./diámetro equiv.).... 52
 - % de fibras en volumen..... 1.06

En la tabla 4.9 se muestran los resultados en forma esquemática. Echávez, et. al. concluyeron que los concretos reforzados con fibras de acero tienen una erosión inicial más rápida que el concreto normal, pero después de cierto tiempo se estabiliza el daño y continúa evolucionando igual que en el concreto normal. Debido al poco número de pruebas (una prueba para cada tipo de fibra), no les fue posible detectar diferencias entre los concretos reforzados con fibras planas y con fibras de sección circular.

4.2.7. Resinas epóxicas.

Las resinas epóxicas son resinas sintéticas de baja retracción, cuya estructura depende de la naturaleza de la reacción usada para producirlas. La aplicación de esta resina ha sido frecuente bajo forma de argamasas y de revestimientos (pinturas de protección).

El concreto de resina epóxica está constituido por una mezcla sin cemento de resina y agregados más o menos finos y químicamente estables. Este con-

creto es prácticamente impermeable, tiene excelente adhesión en bases secas y elevada resistencia a la cavitación.

Como principales desventajas están la alta deformabilidad, la limitación a temperaturas altas y el elevado costo de este concreto.

Se considera que la utilización de resinas epóxicas es eficaz en superficies sometidas a bajas temperaturas. También son bastante ventajosas en las zonas de lig: entre concretos antiguos y nuevos, recubrimiento de grietas, y en las zonas donde las blindajes se desligan del concreto.

Echávez, et. al. (ref. 33) estudiaron el comportamiento de recubrimientos hechos con cinco resinas epóxicas sobre concretos normales, bajo condiciones de cavitación. Los ensayos se hicieron en el canal de alta velocidad del Instituto de Ingeniería. Se utilizó una boquilla capaz de dar velocidades próximas a 30 m/s, y se probaron cinco probetas de concreto de 35 x 20 x 8 cm., sobre los que se aplicaron las resinas para ensayar. Las pruebas consistieron en poner en operación el canal de alta velocidad, registrar los tiempos en que se despegaban algunas de las resinas y observar y medir los daños que se presentaban tanto en las resinas como en el concreto en tres diferentes tiempos: una, tres, y ocho horas de iniciada la prueba. Durante los ensayos se mantuvo un gasto de 0.377 m³/s, una velocidad media de 28.6 m/s y un tirante de 0.075 m. En la tabla 4.10 se muestra un esquema de los ensayos y resultados más importantes que se obtuvieron. Ellos concluyeron que, de las cinco resinas ensayadas, la más resistente a la cavitación fue la SIKASTIX 360 (Blanca), aunque para placas delgadas muestra mala adherencia al concreto; la resina NAPKO 5682 (Verde claro) mostró mejor adherencia pero presenta daños en forma de po-

rosidades que crecen con el tiempo; la resina NAPKO MEX (Verde oscuro) de fabricación nacional, tiene menor resistencia a la erosión y menor adherencia que la de fabricación estadounidense. Las dos resinas restantes: - AEX-1325 (Amarilla) y COLMASOL (Transparente) no la recomiendan para ser usada en recubrimientos donde haya probabilidades de cavitación; una por su menor resistencia y la otra por ser una especie de barriiz, insuficiente para proteger la superficie.

4.2.8. Blindajes.

Los blindajes son placas de acero que se colocan en las zonas expuestas a erosión por cavitación, como es el caso de tramos de descargas profundas en que se instalan compuertas.

Los blindajes de acero no ofrecen una garantía absoluta en relación a la acción de cavitación. Vinnogg (ref. 28) presenta dos casos (mencionados en el inciso 3.1) en que las placas de acero, de 15 mm, de espesor, fueron arrancadas y transportadas hacia aguas abajo. Por otro lado Inozentsej (ref. 12) describe la reparación con placas de acero a la salida de un túnel y la erosión posterior debida al efecto de estas placas.

Este tipo de protección tiene el inconveniente de ser costoso y difícil de ligar con el concreto (problemas térmicos, riesgos de vibración y falla por fatiga).

Comentarios.

Conviene exponer algunas ideas en cuanto a la aplicabilidad práctica y a la comparación entre los métodos de protección contra cavitación.

Es necesario tener presente siempre que cualquier estructura hidráulica se debe diseñar para que no ocurra cavitación. Sin embargo, este diseño, en algunos casos, no es factible puesto que puede conducir a situaciones bastante complicadas y caras. Este hecho conduce a pensar en algún tipo de protección contra la acción de cavitación.

Definitivamente, la protección de una estructura implica también un costo adicional al diseño original, pero se debe tratar de elegir la alternativa que tenga el costo mínimo. Esto no siempre es posible debido a que la alternativa más barata no necesariamente es la más confiable en cuanto a su funcionamiento y protección.

En la fig. 4.28 se presentan los resultados de los ensayos realizados por la "U.S. Corps Engineers", 1976 (Quintela, ref. 21). Estos ensayos tuvieron como objetivo determinar la resistencia, bajo la acción de cavitación, de distintos concretos. Se incluyó una losa de concreto común para comparar las resistencias. Como puede verse, los concretos especiales alcanzan profundidades de erosión mucho menores que el concreto común: del orden de 3 veces en concreto con fibras de acero; y de 2.5 para concreto impregnado con polímeros. Es importante notar que un factor que influye bastante en estos materiales es el tiempo de operación, incrementándose la erosión conforme aumenta éste. Esta limitación no aparece en protecciones con aireadores, elementos supercavitantes y rebajo de irregularidades. Pero por otro lado estos últimos siempre tienen un grado de incertidumbre relativamente mayor en su funcionamiento, y esto les hace ser más peligrosos si ocurre cavitación; además, será necesario realizar ensayos de laboratorio más rigurosos.

Se recomienda plantear la posibilidad de combinar los métodos para lograr una alternativa más funcional y económica; por ejemplo, en compuertas se puede introducir un aireador y recubrir la superficie más vulnerable a erosión por cavitación.

Se concluye que los métodos para proteger superficies de estructuras hidráulicas contra la acción de cavitación aumentan considerablemente la seguridad de que el daño no se presente. La elección del método estará sujeta principalmente a consideraciones de tipo técnico y económico.

CAPITULO V.

5. Procedimientos de diseño para estructuras hidráulicas.

El daño por cavitación que se presenta en estructuras hidráulicas depende de cada arreglo particular que se tenga y de las condiciones hidráulicas — existentes. Esto hace difícil la generalización de una metodología para atacar el problema. Por consiguiente, los procedimientos de diseño presentados aquí servirán únicamente como lineamientos para proyectar o revisar cualquier estructura donde sea probable la presencia de cavitación.

El procedimiento general consiste en calcular el índice de cavitación, σ , debido a un escurrimiento dado y asociado a una cierta característica responsable del daño (irregularidad, bloques, materiales, etc.), y compararlo con el índice de cavitación incipiente, σ_i , que corresponde a esa característica. En el caso de que se esperen daños ($\sigma < \sigma_i$) o ($M = f(V_i, C) < \text{resistencia concreto}$), se debe seleccionar la protección que parezca más adecuada.

Para la determinación del índice del escurrimiento, σ , se recomienda seguir el criterio propuesto por Echávez (ref. 7), en donde las velocidades se deben calcular a una distancia igual a la altura de la irregularidad. Al usar estas velocidades se toma en cuenta el perfil de velocidad en la zona pegada a la pared, que es la que provocaría la cavitación que daña a la superficie. En la tabla 4.2 se indican las velocidades a utilizar en el caso de irregularidades. Para el caso de bloques se recomienda utilizar la velocidad a la altura, d , del piso (Rosanov, ref. 24 y 25).

Las ecuaciones que se utilizan para calcular las velocidades V_k y V_d son:

$$\frac{V_d}{V^*} = 5.6 \log \frac{d}{K} + 3.2 \quad \text{----- (5.1)}$$

donde:

K = rugosidad equivalente de Nikuradse (fig. 5.1).

V_d = velocidad del agua a la altura d , m/s.

V^* = velocidad al cortante, m/s.

se puede encontrar que la velocidad a la altura K

$$V_k = 8.2 V^* \quad \text{----- (5.2)}$$

y la relación entre la velocidad a la altura d y K es

$$\frac{V_d}{V_k} = 0.68 \log \frac{d}{K} + 1. \quad \text{----- (5.3)}$$

La velocidad V_k se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{V_k}{V} = \frac{1.68}{0.33 + \log \frac{x}{K}} \quad \text{----- (5.4)}$$

donde:

V = velocidad media, m/s.

χ = distancia al inicio de desarrollo de la capa límite, m.

El índice de cavitación está dado por:

$$\sigma = \frac{h_p - h_v}{\frac{V_d^2}{2g}} \quad \text{--- (5.51)}$$

donde:

g = aceleración de la gravedad, m/s².

h_v = carga de vaporización del líquido, m. (fig. 2.1)

h_p = carga de presión en la zona de interés, m.

Hasta aquí hemos visto los métodos para determinar los índices, σ y σ_i , y algunos métodos para proteger las estructuras hidráulicas contra cavitación. Se dan en seguida los procedimientos de diseño por cavitación para compuertas, tanques disipadores, salida de túneles y cubetas deflectoras. Se ha tomado como base la experiencia de daños localizados en las presas y los arreglos que comúnmente se utilizan en este tipo de estructuras.

5.1. Compuertas.

La erosión por cavitación en este tipo de estructuras ocurre frecuentemente en obras de toma con descarga profunda superiores a 15 m (ref. 16). El fenómeno ocurre principalmente en la zona de compuertas y es necesario revisar los siguientes elementos:

1. Ranuras.- Están localizadas en las compuertas de emergencia

y de operación normal. Las ranuras son más peligrosas cuando permanecen las compuertas parcialmente abiertas, por lo tanto, es necesario valuar los índices σ y σ_i para varias relaciones de abertura. En estos casos se utilizan las curvas de las fig. 4.9 y valores de las tablas 4.1 y 4.2 para encontrar σ_i .

2. Filo de la compuerta.- Se debe verificar esta zona porque en ella se separa el flujo causando intensa erosión en las paredes aguas-abajo de la compuerta. Para valuar el índice de cavitación incipiente, σ_i , se utiliza la curva de la figura 5.2 ya que toma en cuenta las ranuras de deslice de la compuerta.
3. Sellos.- Otro aspecto importante es la revisión de los sellos de compuertas; el índice se determina con la fig. 4.5. (σ_i)
4. Estructuras auxiliares.- En el caso de existir filos y esquinas agudas por la instalación de estructuras especiales (rejillas, guías metálicas, etc.), debe revisarse la posibilidad de ocurrencia de erosión por cavitación en las superficies cercanas a estos. Para obtener σ_i en estos casos, se debe recurrir a utilizar curvas de irregularidades con geometrías similares a ellos.
5. Deflectores.- Si se colocan deflectores se puede revisar por medio de las tablas 4.1 y 4.2.

5.2. Tanques disipadores.

Una vez realizado el diseño hidráulico del tanque disipador con bloques de choque y/o deflectores, se debe revisar el efecto de la cavitación.

El valor del índice de cavitación incipiente se determina por medio de los valores presentados para bloques de la manera siguiente:

1. se compara la geometría de los bloques con la de los métodos expresos y se escoge la geometría más parecida.
2. se construyen las curvas $\sigma/\sigma_i = f(F, h/d)$ para ese bloque, dando valores de F y (h/d) y obteniendo la velocidad V_d y h_p a la altura, d , del bloque.
3. se obtiene el valor de h_p/d , F y σ , para las condiciones del escurrimiento y con las curvas se encuentra σ_i .

Adicionalmente a lo anterior, y cuando sea posible, se deben analizar los efectos de cavitación, por sumergencia y por localización de los bloques, con las figuras 4.17 y 4.18.

5.3. Salida de túneles.

Para determinar la posibilidad de erosión en la salida de túneles se deben verificar:

1. la ampliación brusca.- se propone utilizar el procedimiento siguiente:

→ se determina B_1/B_2 y se encuentra C_n con la fig. 4.15.

→ se calcula la relación $D_1/D_2 = B_1/C_n B_2$.

→ con el valor de D_1/D_2 se entra a la gráfica de la fig. 4.15 y se determina la velocidad incipiente, V_i , que corresponde al índice σ_i .

2. las irregularidades que se forman a la salida, tales como es-

calones, ranuras por juntas de construcción, cimbras mal colocadas, etc. se analizan con los métodos correspondientes a estos elementos.

5.4. Cubetas deflectoras.

En este tipo de estructuras se revisan los bloques deflectores que se encuentran a la salida de la cubeta. El procedimiento propuesto para bloques de choque también se puede utilizar aquí. Si se desea colocar bloques con esquinas redondeadas, como los estudiados por Legalov (ref. 15), el diseño se hace proponiendo valores de r/B hasta que el índice de cavitación incipiente resulte menor que el de las condiciones de escurrimiento; con esta relación se obtiene la combinación de r y B que se considere más apropiada.

Un efecto importante es el de la curvatura vertical, donde deberá hacerse la corrección:

$$h_p = h_{p.LINEAL} + \frac{h_0}{g} \frac{V^2}{R} \quad \text{----- (5.6)}$$

donde:

h_0 = profundidad del agua, medida perpendicularmente al piso, m.

g = aceleración de la gravedad, m/s^2 .

$h_{p.LINEAL}$ = carga de presión sin curvatura, m.

V = velocidad media del escurrimiento, m/s .

R = radio de la curvatura de la línea de corriente (prácticamente igual a la del piso de la obra), m.

El signo (+) se utiliza en curvas cóncavas (cubetas deflectoras); el signo (-) para curvas convexas.

Los procedimientos de diseño que se han planteado son útiles porque permiten señalar los criterios a seguir, pero no debe olvidarse que su uso dependerá de las necesidades de cada proyectista.

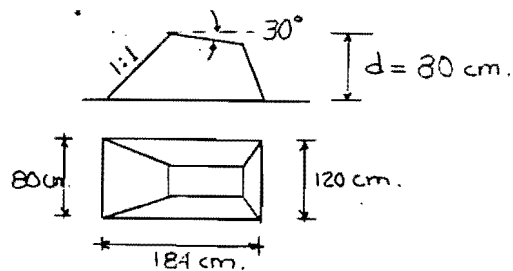
CAPITULO VI.

6. Ejemplos.

En este capítulo se resuelven 4 ejemplos para ilustrar los procedimientos descritos en este trabajo.

6.1. Ejemplo No. 1.- Análisis de un tanque disipador.

En un tanque disipador se tienen bloques de choque del tipo I (fig. 4.20). Determinar la posibilidad de erosión por cavitación para una velocidad local $V_x = 8$ m/s y una carga de presión de 4.5 m. Las dimensiones del bloque son:



TOMAR :

$$K = 0.5 \text{ mm.}$$

$$h_v = -9.75 \text{ m.}$$

$$(\sigma_c) = 2.1 \text{ (BLOQUE DE ROSANOV, REF. 24)}$$

Solución.

Para $V_k = 8 \text{ m/s}$; se obtiene que:

$$V_d = \left(0.68 \log \frac{0.8}{0.0005} + 1 \right) 8 = 25.4 \text{ m/s}$$

También:

$$F = \frac{V_d}{\sqrt{g h_p}} = \frac{25.4}{\sqrt{(9.81)(4.5)}} = 3.82$$

$$\sigma = \frac{h_p - h_v}{V_d^2 / 2g} = \frac{4.5 - (-2.75)}{(25.4)^2 / 19.62} = 0.43$$

Entonces:

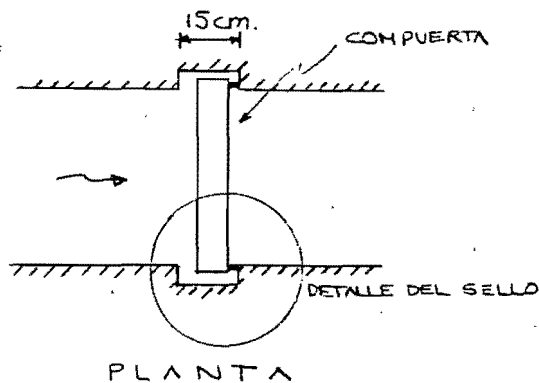
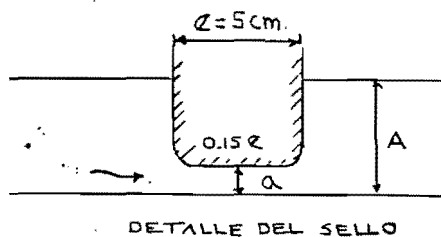
$$\sigma_i = (0.43)(\sigma_i)_{\text{ROSAHOV}} = (0.43)(2.1) = 0.9$$

Finalmente:

$$\sigma < \sigma_i \quad \therefore \text{habrá erosión.}$$

En este problema no fue necesario construir las curvas σ/σ_i por tratarse de una revisión.

6.2. Ejemplo No. 2.- En una compuerta deslizante se tienen dos ranuras verticales de 15 cm. de ancho. Para evitar fugas se han colocado sellos como los mostrados abajo. Determinar si la erosión por cavitación se presentará para una carga de presión igual a 40 m; la relación de sellado es $a/A = 0.35$.



Solución.

Con la relación $\Delta/A = 0.35$ se entra directamente a la curva IV de la fig. 4.5 y se encuentra el valor $h_i = 10$ m.

Entonces: $h_i < h \therefore$ habrá cavitación.

6.3. Ejemplo No. 3.- En la salida del túnel se construyó una ampliación. Si el diámetro aguas arriba de la salida mide 3m. y aguas abajo 4.5 m., de terminar la posibilidad de erosión por cavitación si la carga de presión justo en la ampliación es de $h_p = 2.5$ m, con velocidad de 10 m/s, $h_v = -2.75$ m.

Solución.

Calculando

$$\sigma = \frac{h_p - h_v}{\frac{v^2}{2g}} = \frac{4.5 - (-2.75)}{\frac{100}{19.62}} = 2.79$$

Por otro lado, con $3/4.5 = 0.67$, encontramos $C_n = 0.81$ con la fig. 4.15.

Luego:

$$\frac{0.67}{0.85} = 0.83$$

Con este valor encontramos con la fig. 4.15 que

$$V_i = 13.5 \text{ m/s}$$

Entonces

$$\sigma_i = \frac{14.25}{\frac{(13.5)^2}{19.62}} = 1.53$$

Como $\sigma_i < \sigma$ no habrá daño.

6.4. Ejemplo No. 4.- Calcular el radio, r , mínimo para que no se presente daño por cavitación en los bloques deflectores ($B = 60$ cm.) que se encuentran a la salida de una cubeta deflectora con radio de curva verti-

cal de 90 m. La velocidad en ese punto es $V_d = 17.2$ m/s, la velocidad media $V = 19$ m/s, la carga de presión correspondiente es $h_{p_{LWEAL}} = 1.8$ m., y la profundidad del agua es $h_o = 2.1$ m. Considera un factor de seguridad de 1.4.

Solución.

El efecto de la curvatura vertical es de:

$$h_p = 1.8 + \frac{2.1}{9.81} \frac{(19)^2}{90} = 2.66 \text{ m.}$$

Luego:

$$\sigma = \frac{2.66 - (-2.75)}{\frac{(17.2)^2}{19.62}} = 0.82$$

Después:

$$\sigma_i = \frac{0.82}{F.S.} = \frac{0.82}{1.4} = 0.59$$

Con $\sigma_i = 0.59$ y la curva de la fig. 4.13 se obtiene $r/B = 0.006$

$$\therefore r = (0.006)(60) = 0.36 \text{ cm.}$$

¡Prácticamente nulo!

CAPITULO VII.

7. Conclusiones y recomendaciones.

7.1. Conclusiones.

1) Un mejor conocimiento de la situación de cavitación que se tenga en un escurrimiento, conducirá a un mejor análisis y, por consiguiente, a mejores resultados predictorios. Asimismo, serán más adecuados los medios de protección contra los posibles daños que ésta ocasione.

2) La experiencia que se tiene con daños provocados por cavitación en presas es extensa y variada. Estos daños se localizan atrás de compuertas, en tanques disipadores con bloques de choque y deflectores, en la salida de túneles y en las cubetas deflectoras.

3) Las tres razones fundamentales de diseño que son responsables de los daños por cavitación en estructuras hidráulicas son: a) forma irregular de las superficies que definen la frontera del escurrimiento; b) elementos es

estructurales tales como bloques deflectores y de choque, cambios de sección transversal, etc.; c) materiales inadecuados de las superficies.

4) Es difícil realizar una comparación entre los estudios expuestos, primero por la cantidad de variables que intervienen en el problema, y segundo, por las condiciones tan particulares que estudia cada autor; la comparación es más difícil en bloques que en irregularidades porque las condiciones de cada autor son todavía más particulares.

5) Los estudios para el cálculo de las características de materiales sujetos a cavitación se han enfocado principalmente a determinar la resistencia de estas superficies; los estudios que relacionan estas resistencias con las geometrías y la variación de esfuerzos en el desarrollo de cavitación, son prácticamente nulos.

6) Las resistencias de concretos de estructuras dañadas por cavitación, para velocidades de 20 m/s o más, son menores de 400 kg/cm² (resistencia requerida para que no ocurra erosión, ref. 9.10). Se podría pensar que aumentando las resistencias de los concretos usados en los elementos de estructuras se evita la erosión por cavitación, pero no debe olvidarse que existen otros factores que determinan la presencia del daño.

7) La protección de una estructura hidráulica contra cavitación, puede realizarse aumentando la resistencia de la superficie (concretos especiales, resinas, blindajes) o disminuyendo los esfuerzos de cavitación (acabado de superficies, aireación, elementos supercavitantes). Los métodos expuestos para proteger superficies de estructuras hidráulicas contra la acción de cavitación, aumentan considerablemente la seguridad de que el daño no se presente. La elección del método estará sujeta a consideraciones de tipo técnico y económico.

8) Los procedimientos presentados en este trabajo se deben tomar únicamente — como lineamientos a seguir para proyectar o revisar cualquier estructura hidráulica por cavitación.

9) Para la determinación del índice de cavitación incipiente se recomienda — utilizar la velocidad a una distancia de la pared igual a la altura, d , de la irregularidad o elemento.

7.2. Recomendaciones.

1) Para diseños futuros, es conveniente tener en cuenta la experiencia con daños provocados por cavitación en presas, ya que con frecuencia se subestima este efecto ignorando que puede conducir a destrucciones en las estructuras hidráulicas al grado de poner en peligro toda la obra.

2) En escalones contra el flujo se puede apreciar que la viscosidad influye notablemente para velocidades pequeñas (del orden de 8 m/s); la influencia disminuye en velocidades del orden de 30 m/s y el error en usar uno u otro método — de predicción disminuye. Se recomienda tener presente esta observación para diseño.

3) Como ayuda de diseño para bloques se recomienda construir las curvas

$$\sigma/\sigma_i = f(F, h/d).$$

4) Cuando exista más de un método para predecir a σ_i de un elemento, es recomendable mantenerse del lado de la seguridad, calculando σ_i con cada método y tomando como índice representativo el de mayor valor.

Se recomienda plantear la posibilidad de combinar los métodos de protección — para lograr una alternativa más funcional y económica.

- 5) En el caso de cavitación provocada por ranuras en compuertas, es necesario evaluar los índices Γ y Γ_c para varias relaciones de abertura.
- 6) En tanques disipadores se deben analizar los efectos de cavitación por surgencia y localización de los bloques en el tanque.
- 7) Un efecto importante que se debe introducir en cubetas deflectoras es el de la curvatura vertical de la superficie.

Estudios Futuros.

Resta por último decir que convendría no terminar el análisis presentado aquí, ya que hay varios estudios que se muestran prometedores. Un estudio en el que aún falta mucho por hacer es el del uso de elementos supercavitantes. Por ejemplo, Kriutchenko, et al. (ref. 14) experimentaron un estabilizador de vórtices para disminuir las vibraciones que causan cavitación en las compuertas. Las mediciones realizadas mostraron que en presencia del estabilizador, el chorro del flujo debajo de la compuerta queda aislado de la zona de estancamiento detrás de la compuerta; ésta es la razón principal de las reducciones de presión y vibración de las compuertas.

Respecto a las irregularidades, bloques de choque y deflectores, Rosanov (ref. 24) ha demostrado que el puliriento de esquinas de estos elementos disminuye la erosión por cavitación; sin embargo, el rango de geometrías experimentado es todavía pequeño.

REFERENCIAS.

1. Abdul Khader M.H., Suresh Rao H., "Cavitation in Stilling Basin Appurtenances", Proc. 14 Th. Congress I.A.H.R. vol. 5, Paris, p.p. 73-76 (1971).
2. Abelev A.S., Kartelev B.G., Plakmotrikov Iv., "Investigation of Relative Cavitation Resistance of Materials and Protective Coatings and Development of Measures Against Cavitation Erosion of Hydraulic Structure Elements", Proc. 14 Th. Congress I.A.H.R. Vol. 5, Paris pp 69-72 (1971).
3. Arndt R.E., "Cavitation in Fluid Machinery and Hydraulic Structures", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 3 1981, Public. Van Dike Milton pp 273-328.
4. Ball J.W., "Cavitation from Surface Irregularities in High Velocity", Journal of Hydraulics Division, 102, HY9 ASCE SEP. 1976, pp 1283-1297.
5. Beichley G.L., King D.L., "Cavitation Control by Aeration of High-Velocity Jets", Journal of Hydraulics Division, 101, HY7 ASCE Jul. 1975 pp 829-846.
6. Chivashvili B.M., "Studies of Hydrodynamical Pressure Pulsation and Working out of Methods of Affluent for Nonvacuum and Noncavitation Shapes of

- Spillway Inlets*", Proc. 14 Th. Congress IAHR Vol. 5 Paris, pp 65-68.
7. Echávez G., "Cavitación en Vertedores", Instituto de Ingeniería, UNAM, 415, Feb. 1979.
 8. Falvey H.T., "Predicting Cavitation in Tunnel Spillways", *Water Power and Dam Construction*, Vol. 34, 8, Aug. 1982, pp 13-15.
 9. Galperin R.S., et. al., "Cavitation in Elements of Hydraulics Structures and Methods of Controlling it", Proc. 11 Th. Congress IAHR, Vol. 1 Leningrad 1965, pp 726-732.
 10. Galperin, R.S., et. al., "Hydraulic Structures Operation Under Cavitation Conditions", Proc. 14 Th. Congress IAHR Vol. 5 Paris pp 45-48 (1971).
 11. Hamilton W.S., "Preventing Cavitation Damage to Hydraulic Structures", *Water Power and Dam Construction*, Vol. 36, 1, Jan 1984 pp 42-45.
 12. Inozemtsev Y.P., "Cavitation Destruction of Concrete and Protective Facings Under Natural Conditions", Proc. 11 Th. Congress IAHR, Vol. 1 Leningrad, 1965, pp 35-42.
 13. Krapp R.T., Dayly J.W., Hamitt F.G., Cavitation, Ms. Graw Hill-Book Co. N.Y. (1970).
 14. Kriutchenko G.I., et. al., "Improvement of Cavitation Characteristics of High-Head Valves and Gates", Proc. 14 Th. Congress IAHR Vol. 5 Paris 1971 pp 49-52.
 15. Lgalov V.V., Tsedrov G.N., "Investigation of the Causes of Destruction of the Separators of a Ski-Jump Spillways of High-Dam", Proc. 11 Th. Congress IAHR, Vol. 1, Leningrad 1965, pp 654-656.
 16. Lisenko P.E., Belev V.D., Chepajhin G.A., "Decrease in Cavitation Erosion Intensity for High-Head Gate by Using the Supercavitating Structures", Proc. 14 Th. Congress, IAHR, Vol. 5, Paris, pp 41-44 (1971).

17. Lyne D.K., "Air Demand in High-Head Regulated Outleted Works", Proc. 14 Th. Congress IAHR, Vol. 5, Paris, pp 77-80, (1971).
18. Miller S.D., Internal Flow Systems, London 1978.
19. Provorova T.P., Zharov N.I., "Critical Cavitation Parameters for Baffles of Various Shapes", Fluid Mechanics-Soviet Research Vol. 7.6, Nov-Dec 1978, pp 127-135.
20. Quintela A.C., "Flow Aeration to Prevent Cavitation Erosion", Water Power and Dam Construction, Jan. 1980, pp 17-22.
21. Quintela A.C., Matias C.R., "Protecção contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas", Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Memoria No. 539, Lisboa 1980.
22. Rangas Wami N., "Cavitation Induced by Turbulence in Stilling Basin", Journal of Hydraulics Division, HY4, ASCE Apr. 1980, pp 616-619.
23. Ripken J.F., Hayakawa N., "Cavitation in High-Head Conduit Control Dissipators", Journal of Hydraulics Division HY1, Jan. 1972, pp 239-256.
24. Rozanov N.P., et. al., "Use of Supercavitating Elements of Spillway Hydraulic Structures", Proc. 11 Th. Congress IAHR, Vol. 1, Leningrad 1965, pp 733-737.
25. Rozanov N.P., et. al., "Cavitation Test on Baffles Piers and Bucket Splitters on Spillway Hydraulic Structures", Proc. 14 Th. Congress IAHR Vol. 5, Paris pp 57-60.
26. Schmitt R.W., "Cavitation Damage at Kinzua Dam, Allegheny Reservoir", Proc. 14 Th. Congress IAHR Vol. 5, Paris, pp 97-114 (1971).
27. Thomas I.E., "Cavitation Control in an Energy Disipation Structure", Proc. 14 Th. Congress IAHR Vol. 5, Paris, pp 115-119 (1971).

28. Vinnogg L., "Cavitation High-Head Leaf-Gates", Proc. 14. Th. Congress IAHR, Vol. 5, Paris, pp 81-86 (1971).
29. Wagner W.E., Jabara M.A., "Cavitation Damage Downstream from Outlet Work-Gates", Proc. 14 Th. Congress IAHR Vol. 5, Paris, pp 93-96 (1971).
30. Zharov N.I., Kudryashov G.V., "Cavitation in Flow Around Three-Dimensional Projections on Spillways Surfaces", Fluid Mechanics-Sovietic Research, Vol. 6, 3, May-Jun 1977, pp 118-125.
31. USAR, Diseño de presas pequeñas, Bureau of Reclamation CECSA, 1980.
32. Echávez A.G., Arreguín C.F., "Comportamiento en recubrimientos de concreto bajo excitaciones turbulentas y de cavitación", informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, nov. 1976, México D.F.
33. Echávez A.G., Arreguín C.F., "Comportamiento de varias resinas epóxicas bajo excitaciones turbulentas y de cavitación", informe interno del Instituto de Ingeniería, UNAM, sep. 1976, México D.F.

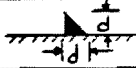




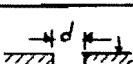
IRREGULARIDAD	m	n	C	OBSERVACIONES
	0.361	0.196	0.152	$\frac{\delta}{X} = 0.08 \left(\frac{X}{E} \right)^{-0.233}$ <p>donde:</p> <p>X = DISTANCIA AL INICIO DE DESARROLLO DE LA CAPA LIMITE, m.</p> <p>E = RUGOSIDAD ABSOLUTA, m.</p>
	0.344	0.267	0.041	
	0.439	0.298	0.0108	
	0.632	0.451	0.00328	
	0.737	0.550	0.00117	
	0.041	0.510	0.000314	

TABLA 4.1. RESULTADOS DE ARNDT (2); VALORES DE m, n, C.




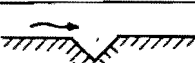


IRREGULARIDAD	VELOCIDADES DONDE VALUAR	σ_i
	V_d	2.1
	V_k	1.1
	V_k	1.5
	V_k	1.6
	V_d	1.4
	V_d	1.6
<p>SUPERFICIES RUGOSAS:</p> <p>A) PARA $0 < K < 5$ mm. $\left\{ \begin{array}{l} \text{SUPERFICIE CON ACABADO DE CONCRETO. } \sigma_i = 1.3 \\ \text{SUPERFICIE CON ACABADO DE CIMBRA (\perp \text{ AL FLUJO}). } \sigma_i = 1.8 \end{array} \right.$</p> <p>B) PARA $5 < K \leq 10$ mm. $\left\{ \begin{array}{l} \text{SUPERFICIE CON ACABADO DE CONCRETO. } \sigma_i = 1.5 \\ \text{SUPERFICIE CON ACABADO DE CIMBRA. } \sigma_i = 2.2 \end{array} \right.$</p> <p>DONDE:</p> <p>K = RUGOSIDAD EQUIVALENTE DE LA SUPERFICIE O DE LA ALTURA DE LOS ESCALONES POR LA CIMBRA.</p> <p>V_d = VELOCIDAD A LA ALTURA DEL ESCALÓN.</p> <p>V_k = VELOCIDAD A LA ALTURA K.</p>		

TABLA 4.2. VALORES DEL INDICE σ_i PARA IRREGULARIDADES, ECHAVEZ (Ref. 7).

ESTRUCTURA (PRESA)	PAÍS	LUGAR DE DESTRUCCIÓN	RESISTENCIA DEL CONCRETO (Kg/cm ²)	VELOCIDAD DEL FLUJO (m/s)
V.I. Lenin Volga Station	URSS	Bloques de choque	160 - 170	18 - 21
		Vertedor de carga profunda	—	18
Bratsk Station	URSS	Conductos profundos	300	30
Bukhtarma Station	URSS	Unidades de compuerta	172 - 184 222	25 - 30
Boneville	USA	Pilas y bloques del vertedor	130	18 - 21
			185	
			260	
Suphung	China	Fronte del vertedor	51 - 192	30 - 40
Lucky Peak	USA	Unidades de compuerta	—	37
Bull Shoal (repair)	USA	Delantal	—	25
El Caracol (VER NOTA)	MEX. (*)	Deflectores, pilas, can. de des	300	—
		Desfogue, tomas, can. de llamada	200	—
<p>NOTA:</p> <p>Datos incluidos en la tabla y obtenidos en la C.F.E. de la presa El Caracol, actualmente en construcción.</p> <p>(*) No están destruidas.</p>				

TABLA 4.3. RESISTENCIAS DE CONCRETOS EN PRESAS Y EN ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS.


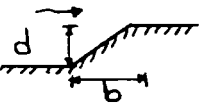
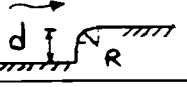
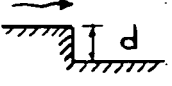
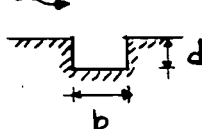
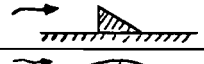
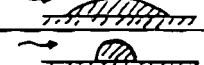
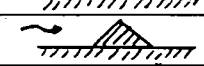
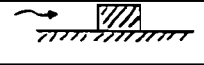
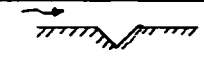
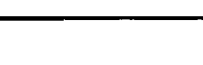
GEOMETRÍA	AUTOR (REF.)	FIGURA	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL
	BALL (4)	4.2	Velocidad media permisible vs. carga h_p y altura del escalón
	ECHAVEZ (7)	Tabla 4.2	Velocidad a la altura del escalón; V_s
	BALL (4)	4.2	Velocidad vs. carga h_p y ángulo del escalón
	GALPERIN(9)	4.4	Velocidad en la interface
	PALVEY (8)	4.3	Velocidad fuera de la capa límite (conser.)
	PLYUSHIN(21)	4.6	Velocidades entre 35 y 40 m/s en obra de excedencia
	GALPERIN(21)	4.8	Obtenido de Ball y Plyushin
	OSKOLKOV(21)	4.7	σ_i^* = Inicio de erosión
ZHAROV (30)	4.11	$\sigma_i = \text{sen } \alpha$; IRREG. TRID.	
	BALL (4)	4.2	Velocidad vs. presión absoluta h_p , relaciones de R y r .
	U.S. ARMY CORPS OF ENGINEER(21)	4.2	Variación de σ_i con la altura d
	ECHAVEZ (7)	Tabla 4.2	Velocidad a la altura k, V_k
	ARNDT (2)	Tabla 4.1	Aisladas y distribuidas
	ECHAVEZ (7)	Tabla 4.2	Velocidad a la altura k, V_k
	GALPERIN(21)	4.9	$\sigma_i = K_1 K_2 K_3 \sigma_i'$
	+ ARNDT (2)	Tabla 4.1	Aisladas y distribuidas en función de m, c, n, s, d
			
	* ECHAVEZ(7)	Tabla 4.2	Velocidad a la altura k, V_k
			
	o GALPERIN(9)	4.4	Velocidad en la interface
			

TABLA 4.4. IRREGULARIDADES.

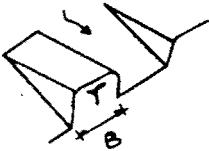
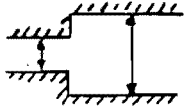
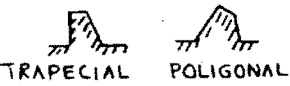

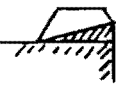
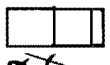
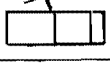
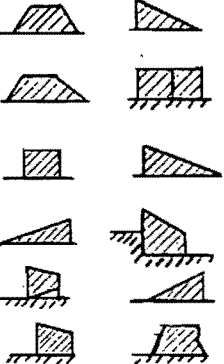
GEOMETRÍA	AUTOR (REF.)	FIGURA	CARACTERÍSTICA PRINCIPAL
BLOQUES DE CHOQUE : PRESA LENIN-VOLGA	GALPERIN (10)	4.12	Evolución de la profundidad máxima de erosión en el tiempo
 BLOQUES DEFLECTORES	IGALOV (15)	4.13	Relación de σ_i y el cociente r/B
 AMPLIACIÓN BRUSCA	MILLER (18)	4.15	Basado sobre la corrección a la ampliación para un orificio equivalente
 TRAPEZIAL POLIGONAL  TRIANGULAR BLOQUE DE CHOQUE	PROVOROVA (19)	4.16 4.17 4.18	Variación y efectos de σ_i con: <ul style="list-style-type: none"> + SUMERGENCIA η_s + RELACIÓN l/z + ÁNGULO α
BLOQUE DEFLECTOR   	QUINTELA(21) GALPERIN(21)	4.19	Variación de σ_i vs. α en los bloques deflectores de la presa Mamanski
	ROSANOV (24,25)	4.20	Índices críticos de bloques deflectores y de choque. - Velocidad correspondiente a la primera altura conjugada.

TABLA 4.5. BLOQUES Y AMPLIACION.

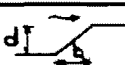
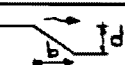
CARGA h_p (m)	ALTURA DE LA IRREGULARIDAD d (mm)	INCLINACIÓN DE ESCALONES		
		IRREGULARIDAD TRANSV.		IRREGULARIDAD LONGITUDINAL
				
40	5	—	—	—
a	5 a 10	1:4	1:8	1:2
	10 a 20	1:8	1:10	1:3
50	20 a 40	1:12	1:14	1:3
60	2,5			
	2,5 a 5	1:7	1:11	1:2
	5 a 10	1:14	1:18	1:3
a	10 a 20	1:16	1:20	1:3
	20 a 40	1:20	1:24	1:3
70				
80	10 a 20	1:32	1:38	1:4
a	20 a 40	1:36	1:42	1:4
100				

TABLA 4.6. INCLINACIÓN DE ESCALONES PARA IMPEDIR EROSIÓN POR CAVITACIÓN (Osholter, 21).

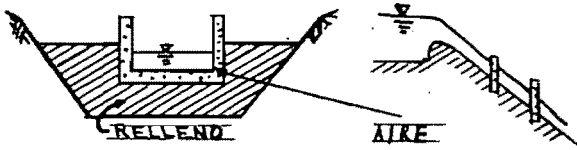
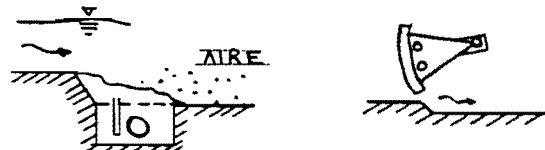

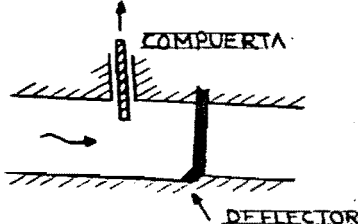
AUTOR (REFERENCIA)	PRESA	GEOMETRÍA	ESTRUCTURA PROTEGIDA
GALPERIN (10,9)			Vertedor a superficie libre
			Atrás de compuertas
WAGNER (29)	GRAND COULEE		Salida de túnel (unión)
BALL (4)	PALISADES		Atrás de compuertas

TABLA 4.7. TIPOS DE AIREADORES COMUNES.

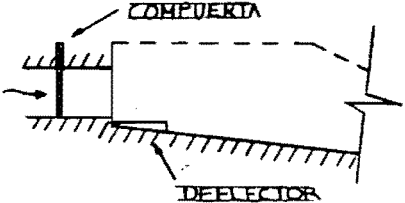

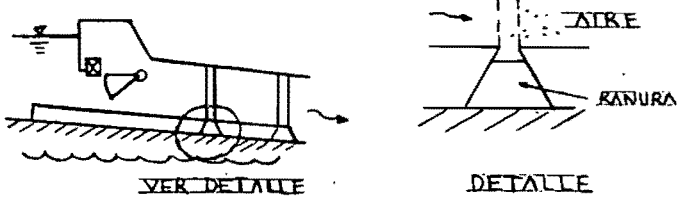
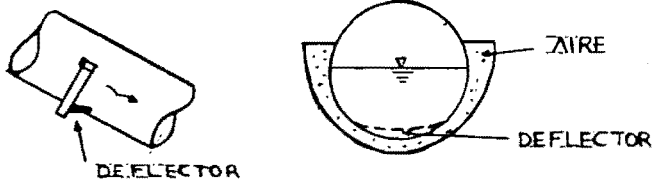
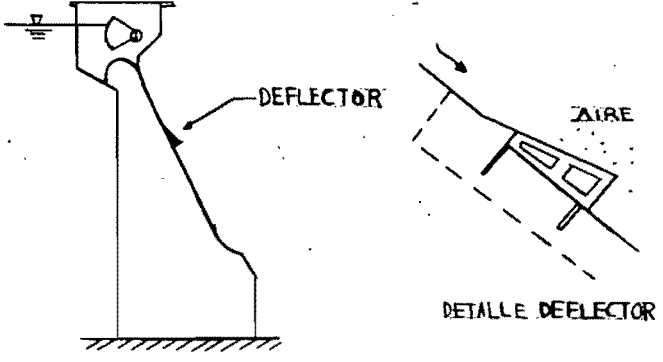
AUTOR (REFERENCIA)	PRESA	GEOMETRÍA	ESTRUCTURA PROTEGIDA
BALL (4)	PUEBLO		Atrás de compuertas
BALL (4)			Túneles
QUINTELA (20, 21)	CALACUCCIA		Vertedor a superficie libre
YELLONTAIL			Túneles
BRATSK			Vertedores a superficie libre

TABLA 4.7. (Continuación).

PRESAS (REFERENCIA)	ELEMENTOS				
	CEMENTO	FIBRAS	AGREG. FINOS	AGREG. GRUESOS	(AGUA/ CEMENTO)
	Kg/m ³	K/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	% EN VOLUMEN
LOWER MONUMENTAL (KADEN, 1974)	504	131(*)	1102 (6.4 mm)	806 (9.5 mm)	0.43
LIBBY (SCHRADER, 1976)	432	80(**)	881 ()	817 (19mm)	0.40
TARABELA (LOWE VI, 1979)	439	72	1031 ()	943 (19mm)	0.42-0.45

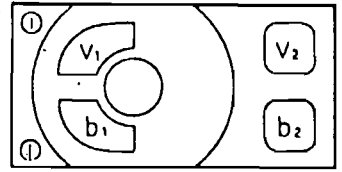
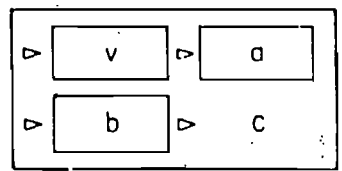
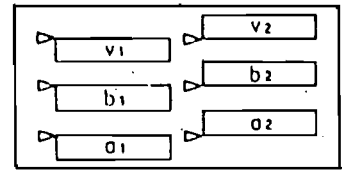
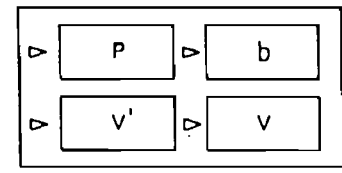
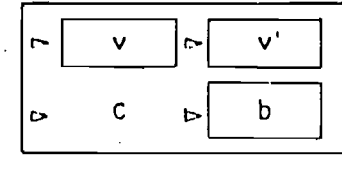
* FIBRAS CON 25 MM. DE LARGO Y 0.4 MM. DE DIÁMETRO
 ** FIBRAS CON 25 MM. DE LARGO

TABLA 4.8. PROPORCIONES UTILIZADAS EN REPARACIONES DE SUPERFICIE EROSIONADAS.

PROBETA No.	ESQUEMA	DAÑOS	OBSERVACIÓN AL FINAL DE PRUEBA
1	▷ Concreto con fibras planas	Hrs. 0:30 Se notan porosidades 1:00 Se notan fibras en la zona dañada.	Daños apreciables
	▷ Concreto normal	5:00 Se notan porosidades	Daños apreciables
2	▷ Concreto con fibras cilíndricas	1:00 Se desprendieron varias fi- bras en la superficie y se inició el daño del concreto	Daños apreciables
	▷ Concreto normal	1:00 Se notan porosidades	Daños apreciables

TIEMPO DE ENSAYE : 8 Hrs.

TABLA 4.9. RESULTADOS DE PRUEBAS DE CONCRETOS CON FIBRAS (Echavez, 32).

N° prueba	Esquema	Identificación	Daños durante la prueba	Observaciones
1		v ₁ NAPKO 5682 v ₂ NAPKO 5682 b ₁ SIKASTIX 360 b ₂ SIKASTIX 360	{ 0:35 Despegamiento parcial 3:15 Desprendimiento total	Presenta porosidad Sin daños visibles Se rompe por partes Sin daños visibles
2		v NAPKO 5682 a AEX - 1325 b SIKASTIX 360 c Concreto	4:15 Se despegó totalmente Se dañó desde el inicio de la prueba	Daños locales ligeros Sin daños visibles Daños notables
3		v ₁ NAPKO 5682 v ₂ NAPKO 5682 b ₁ SIKASTIX 360 b ₂ SIKASTIX 360 a ₁ AEX - 1325 a ₂ AEX - 1325 Concreto	{ 1:00 Se despegó parte posterior 7:00 Se desprendió 5:00 Se despegó totalmente { 3:00 Se despegó parte posterior 6:00 Se desprendió { 1:00 Se despegó parte posterior 2:00 Se desprendió Se dañó desde el inicio de la prueba	Daños visibles Sin daños visibles Daños notables
4		p COLMA SOL b SIKASTIX 360 v' NAPKO 5682 v NAPKO MEX Concreto	3:45 Se despegó totalmente 1:15 Se despegó totalmente Se dañó desde el inicio de la prueba	Sin daños visibles Sin daños visibles Daños notables
5		v NAPKO 5682 v' NAPKO MEX c Concreto b SIKASTIX 360	5:15 Presenta daños locales Se dañó desde el inicio de la prueba 0:15 Se despegó totalmente	Sin daños visibles Daños locales Daños notables

Tiempo de ensaye en las cinco probetas: 8 horas

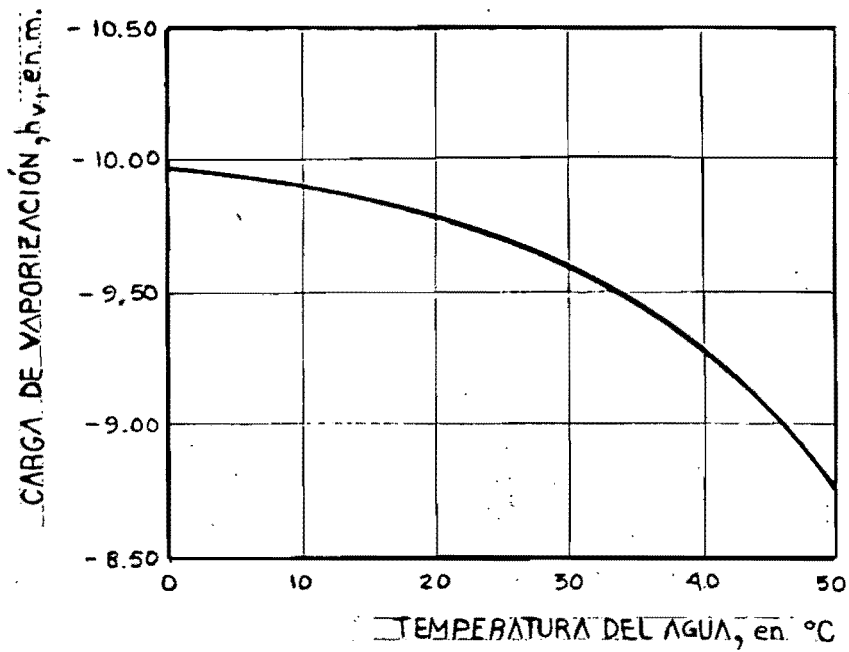


FIGURA 2.1. CARGA DE VAPORIZACION vs. TEMPERATURA DEL AGUA

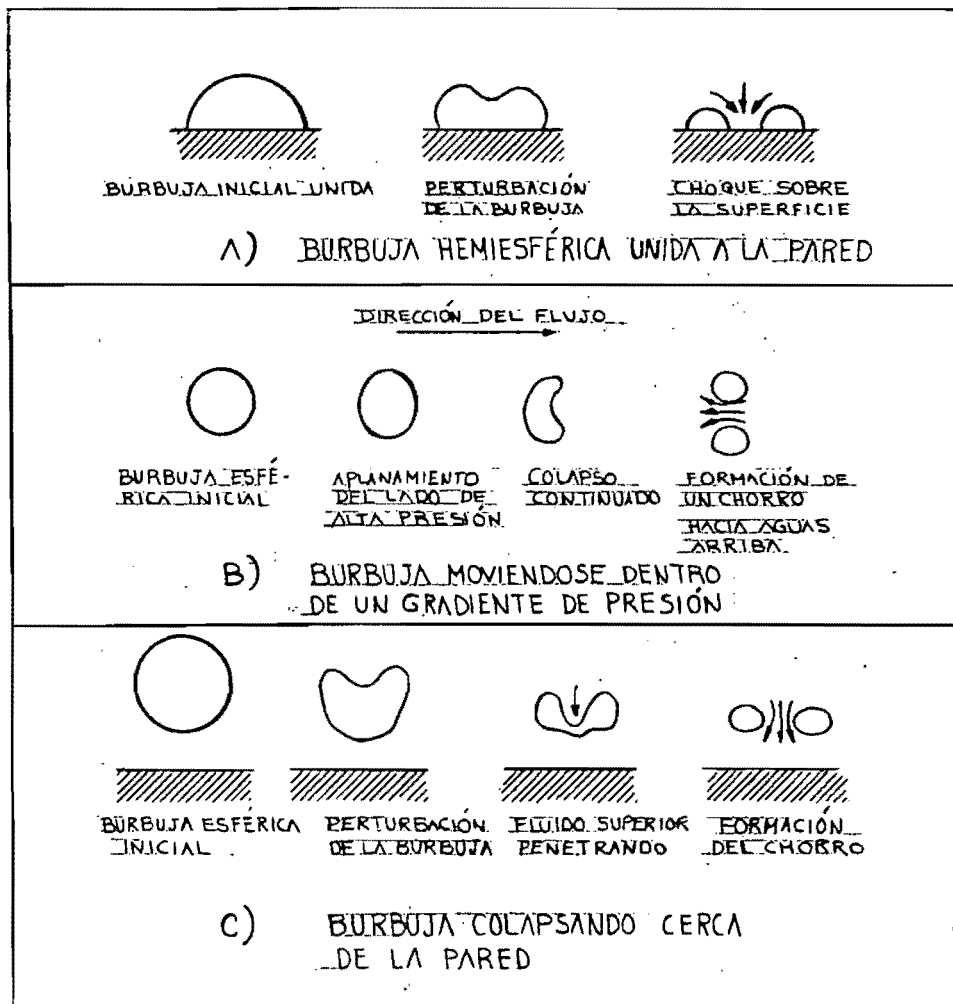


FIGURA 2.2. MECANISMO DEL DAÑO.

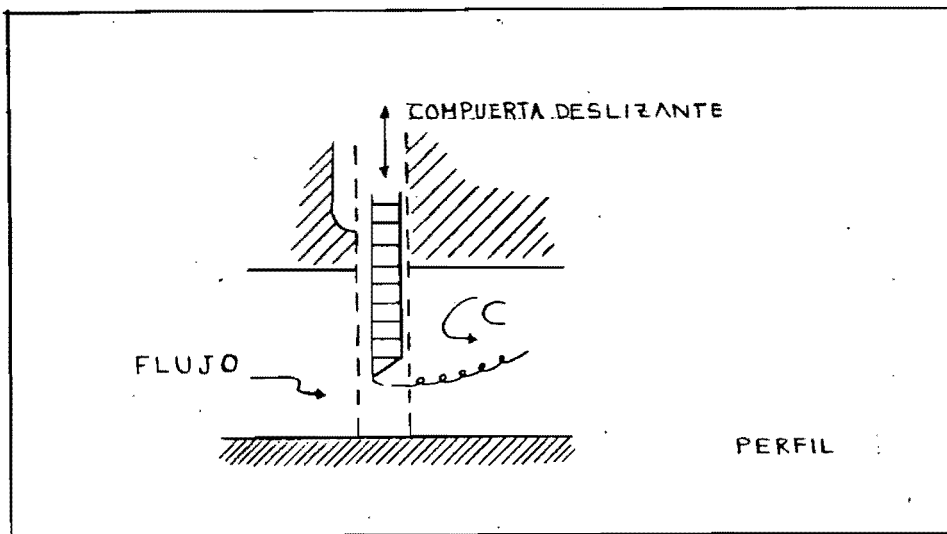


FIGURA 3.1. INTERRUPTON DE LA CAPA LIMITE TURBULENTA (completamente desarrollada) EN UNA COMPUERTA.

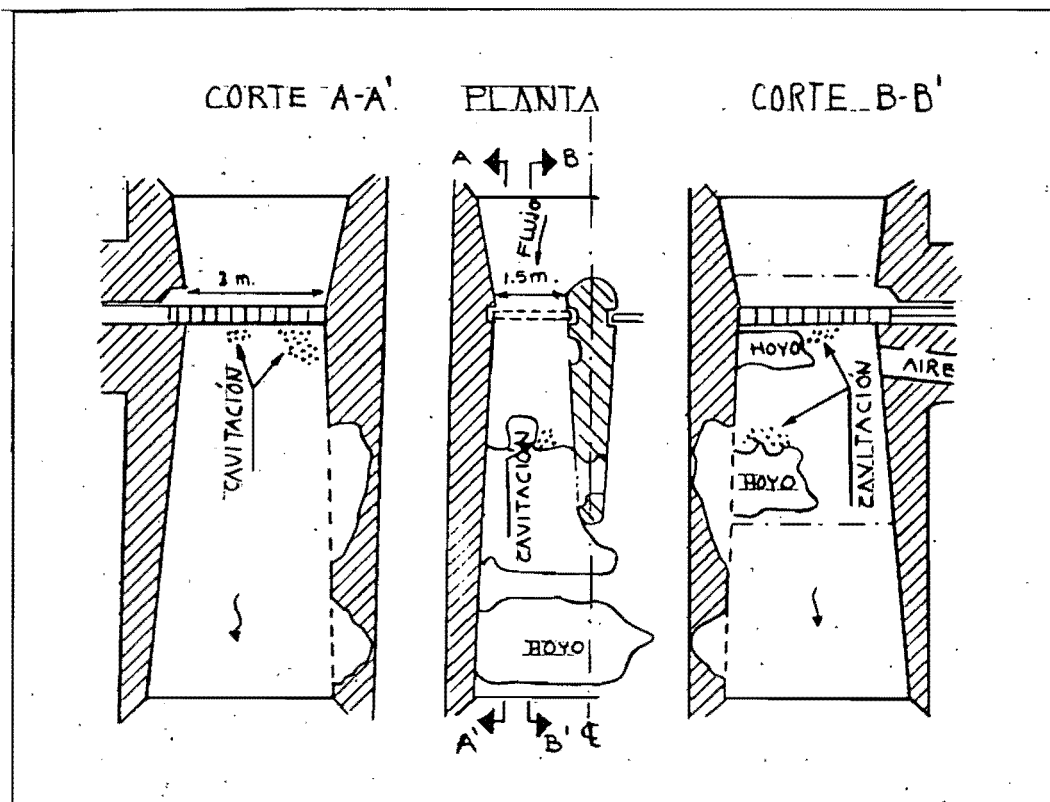


FIGURA 3.2. DAÑOS POR CAVITACION EN COMPUERTA (case A).

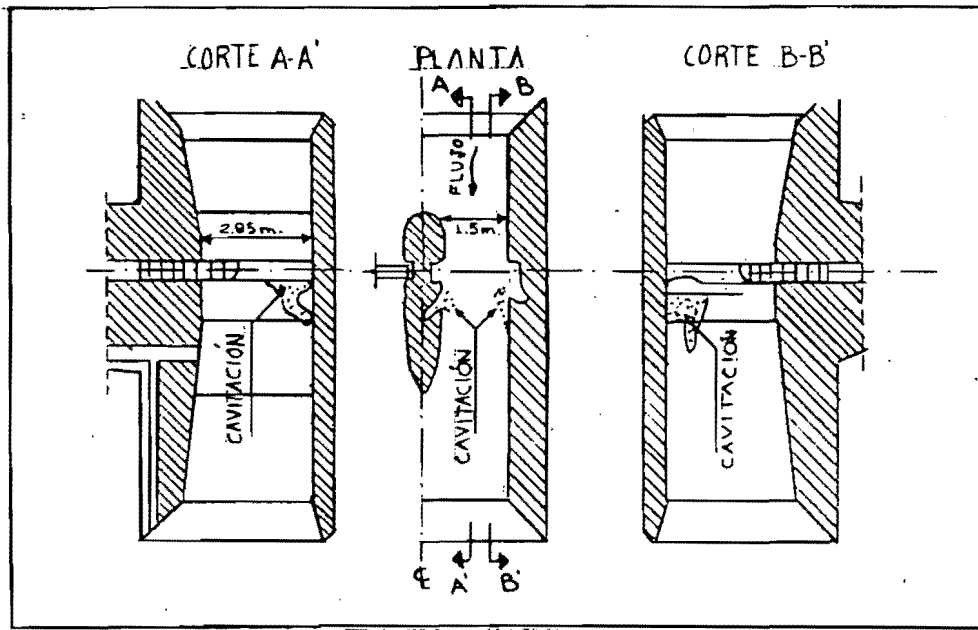


FIGURA 3.3. DATOS POR CAVITACION EN COMPUERTA (caso B).

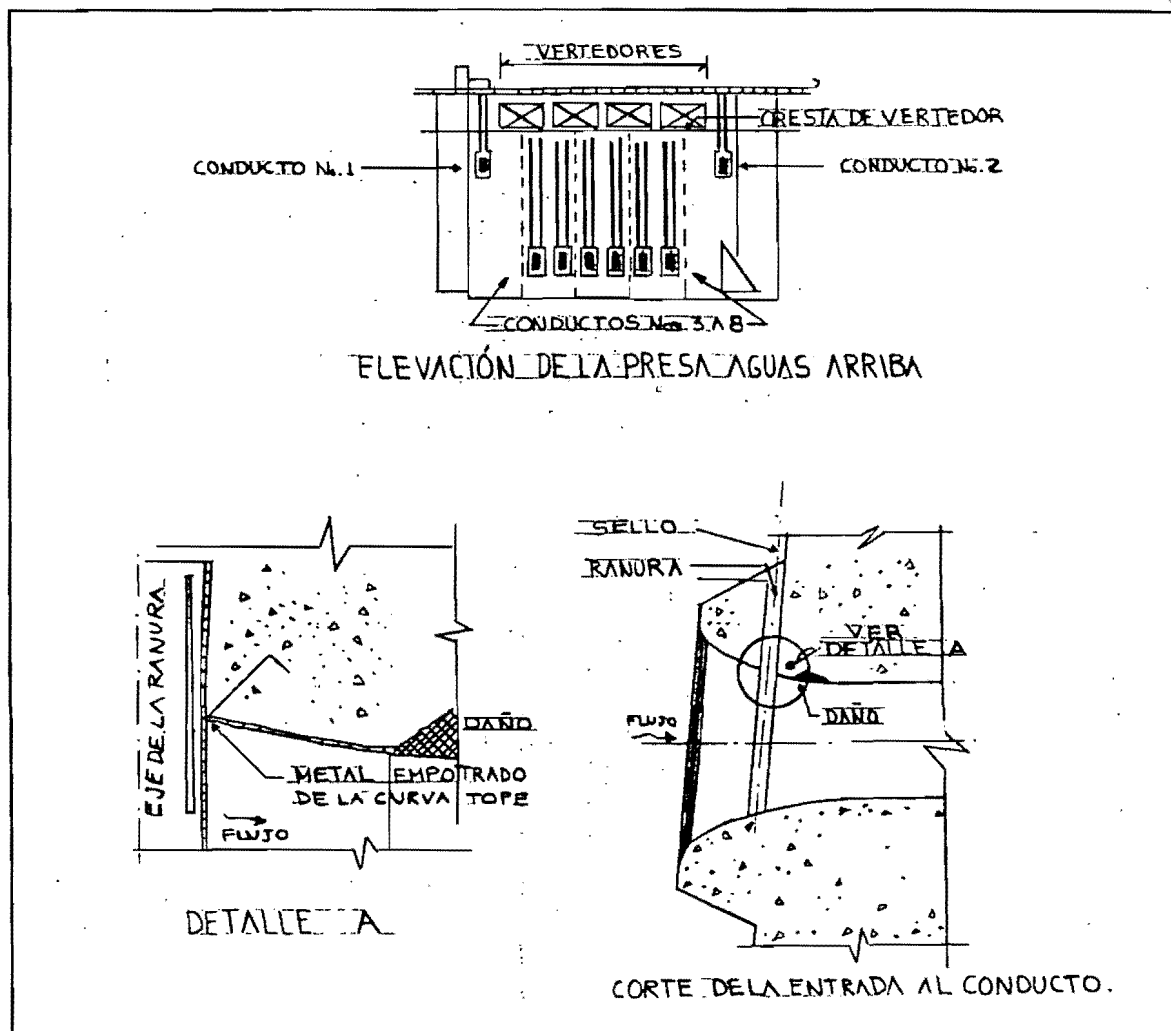


FIGURA 3.4. DATOS OBSERVADOS EN LA PRESA KANZAK.

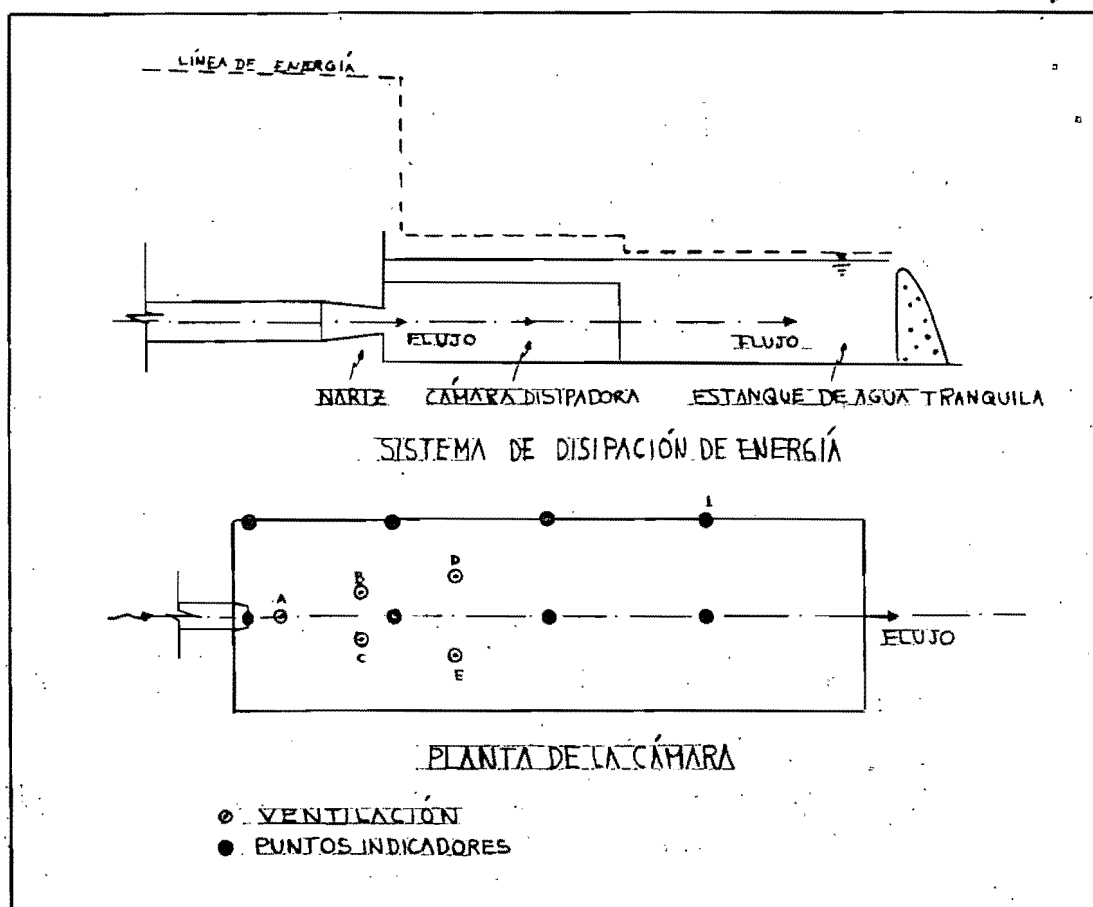


FIGURA 3.5. ARREGLO GENERAL DEL DISIPADOR (Presa Cuyedós).

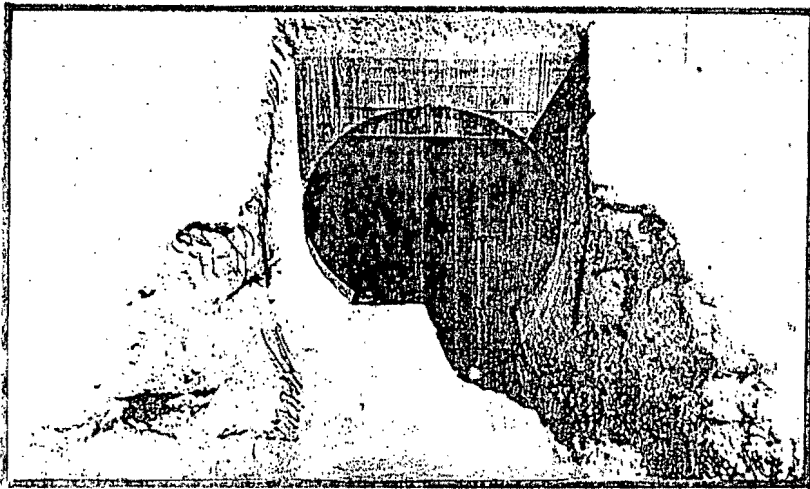


FIGURA 3.6.a. EROSION CAUSADA POR CAVITACION A LA SALIDA DEL TUNEL.

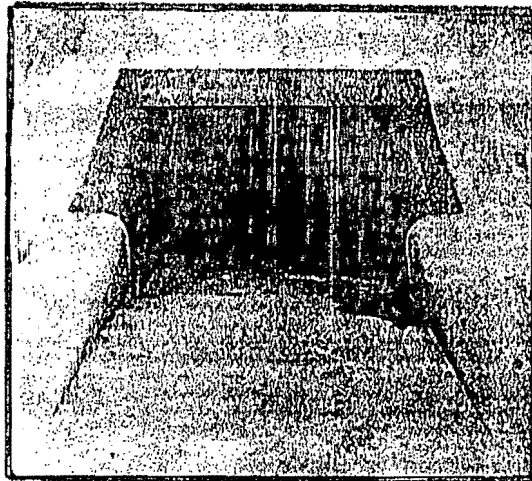


FIGURA 3.6.b. VISTA GENERAL DE LA REPARACION.



FIGURA 3.6.c. RECUBRIMIENTO ARRANCAO DESPUES DE LA REPARACION.

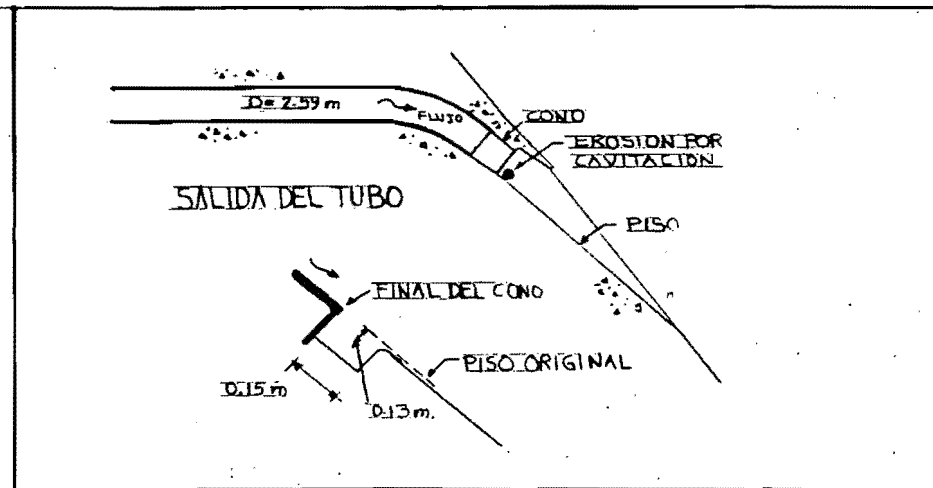


FIGURA 3.7. ARREGLO GENERAL DE LA DESCARGA CON UN CONO.

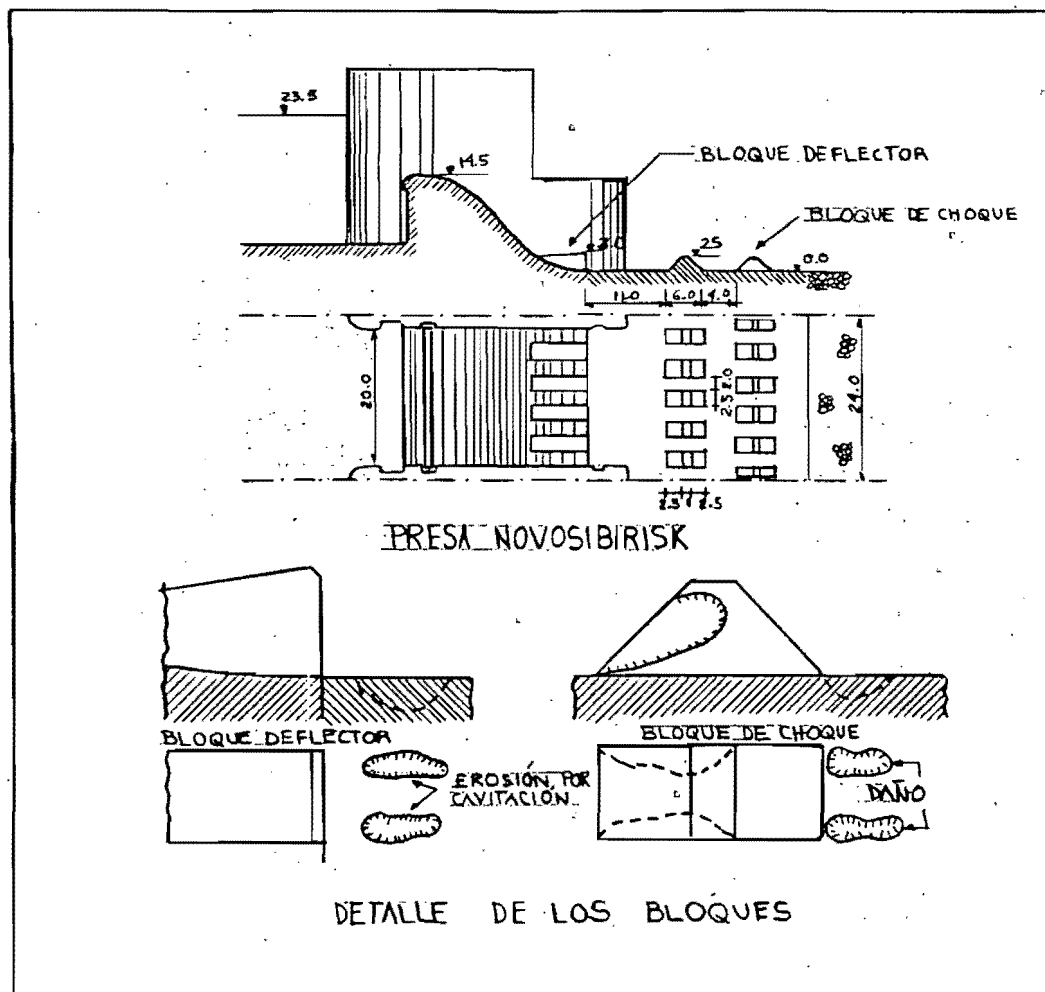


FIGURA 3.8. a. EROSIONES OBSERVADAS EN LOS BLOQUES DEL TANQUE DISIPADOR (1962).

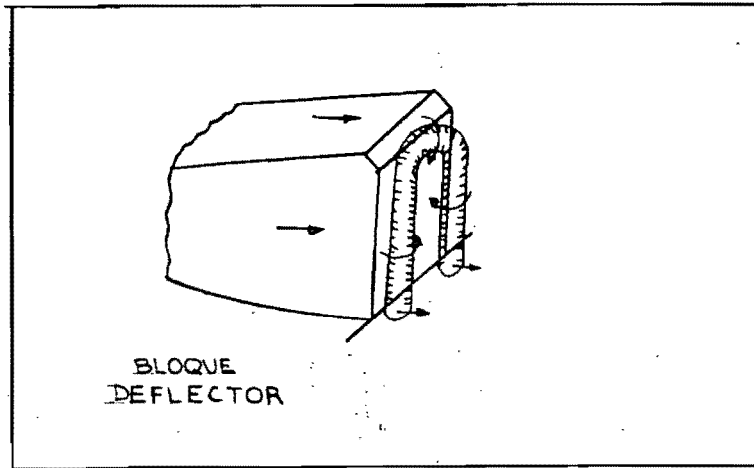


FIGURA 3.8.6. ESCURRIMIENTO Y FORMACION DE VORTICES EN EL BLOQUE DEFLECTOR.

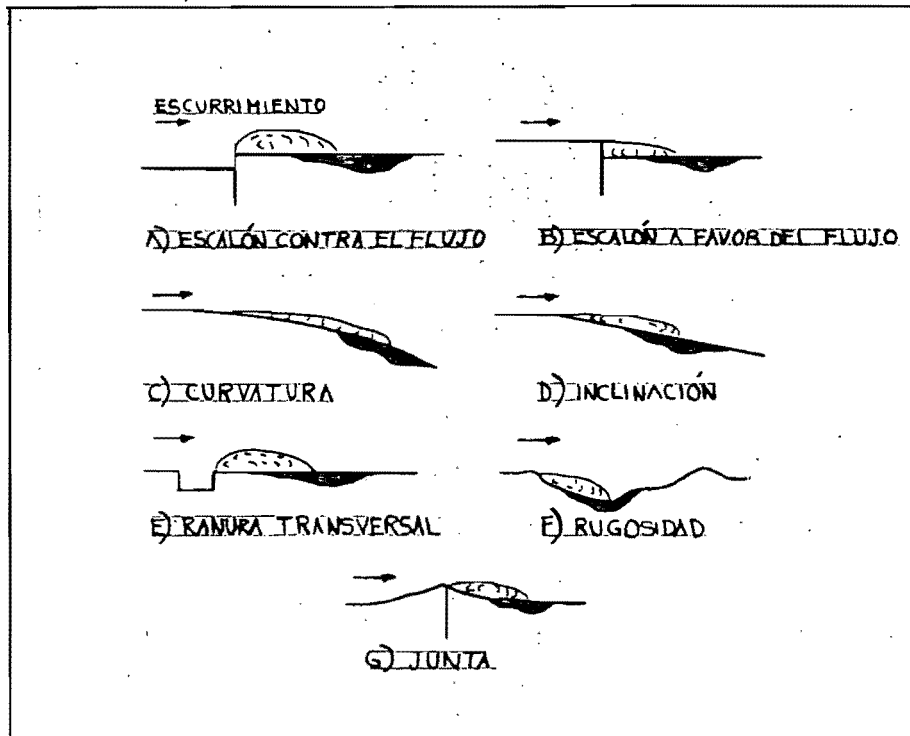


FIGURA 4.1. ESQUEMAS DE LOCALIZACION DE DATOS (Ball, 4).

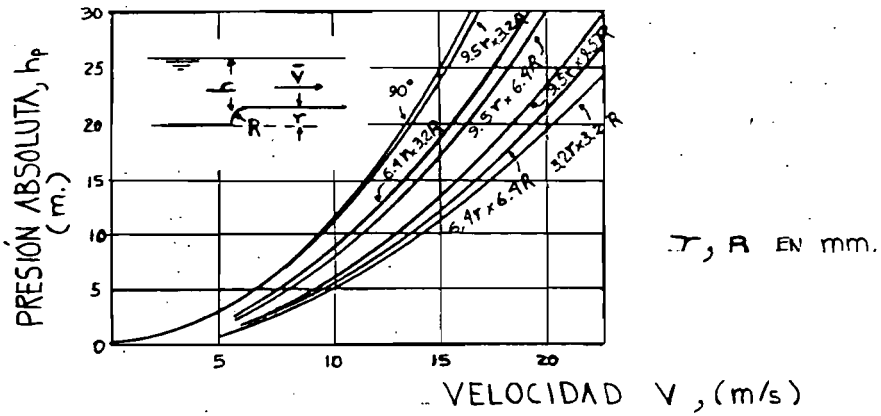
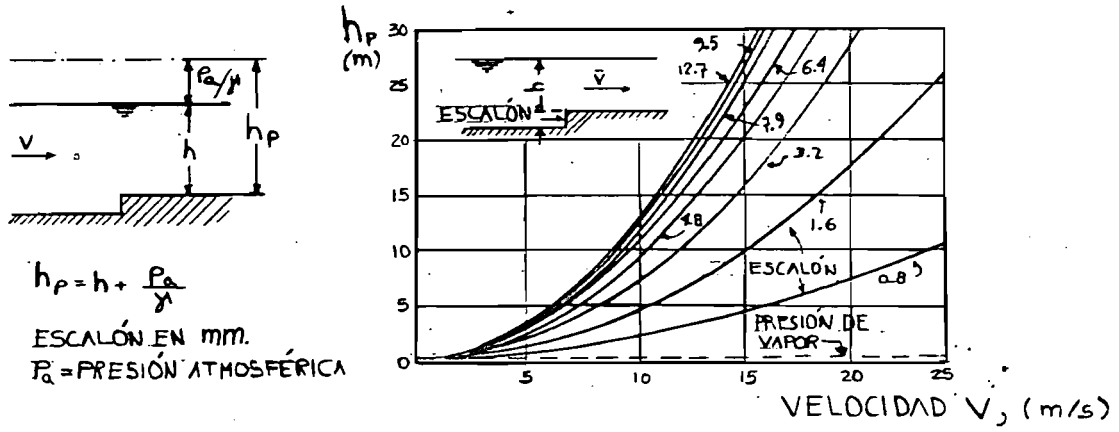


FIGURA 4.2. PRESIONES Y VELOCIDADES INCIPIENTES PARA ESCALONES (Ball, 4).

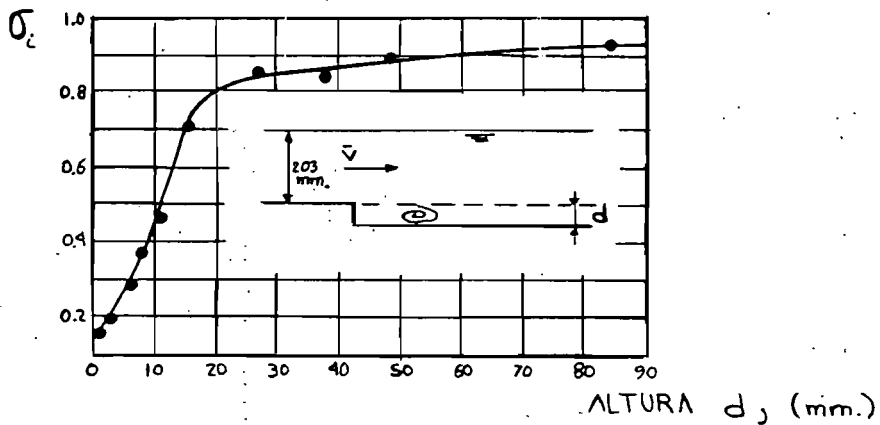
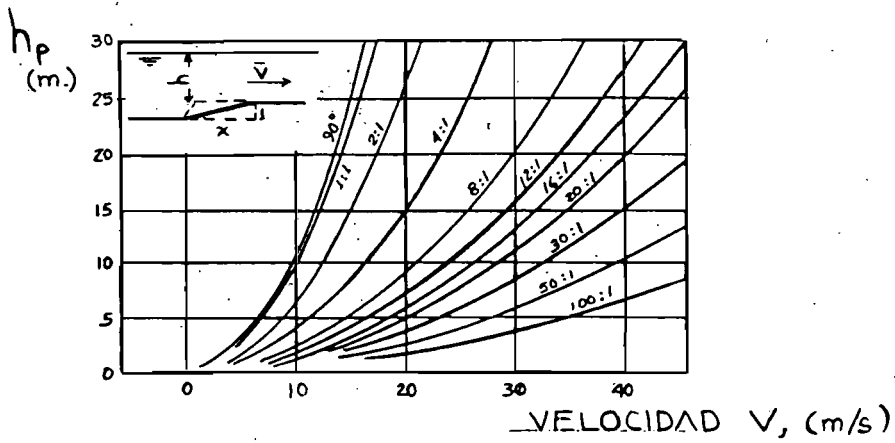


FIGURA 4.2. (Continuación) ARMY CORPS OF ENGINEERS.

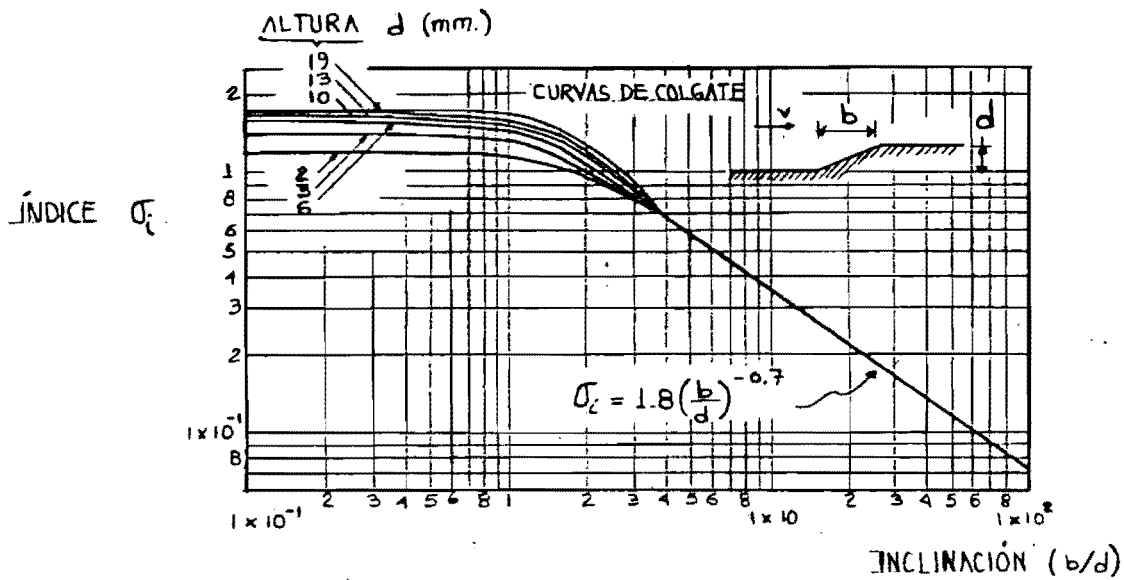


FIGURA 4.3. CAVITACION INCIPIENTE CONTRA INCLINACION DE ESCALON (Folvey, 8).

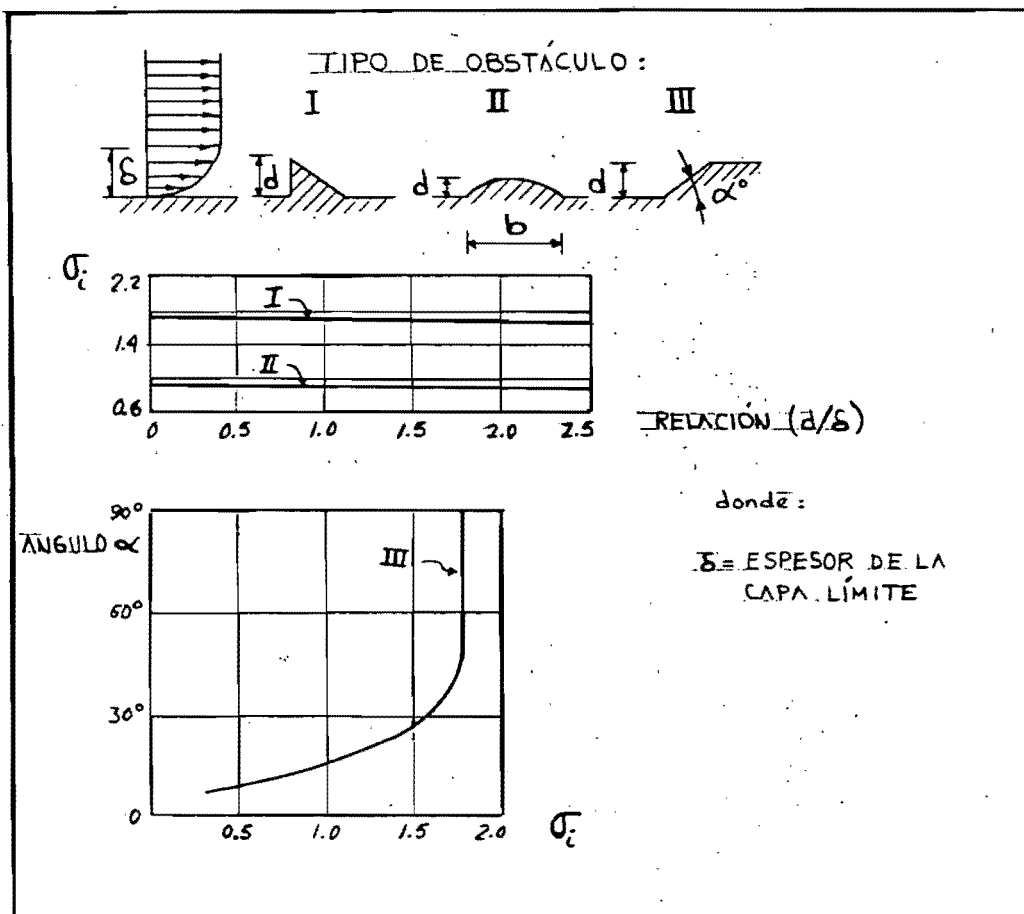


FIGURA 4.4. VALORES DE σ_c vs. ANGULO DE INCLINACION (Galperin, 9).

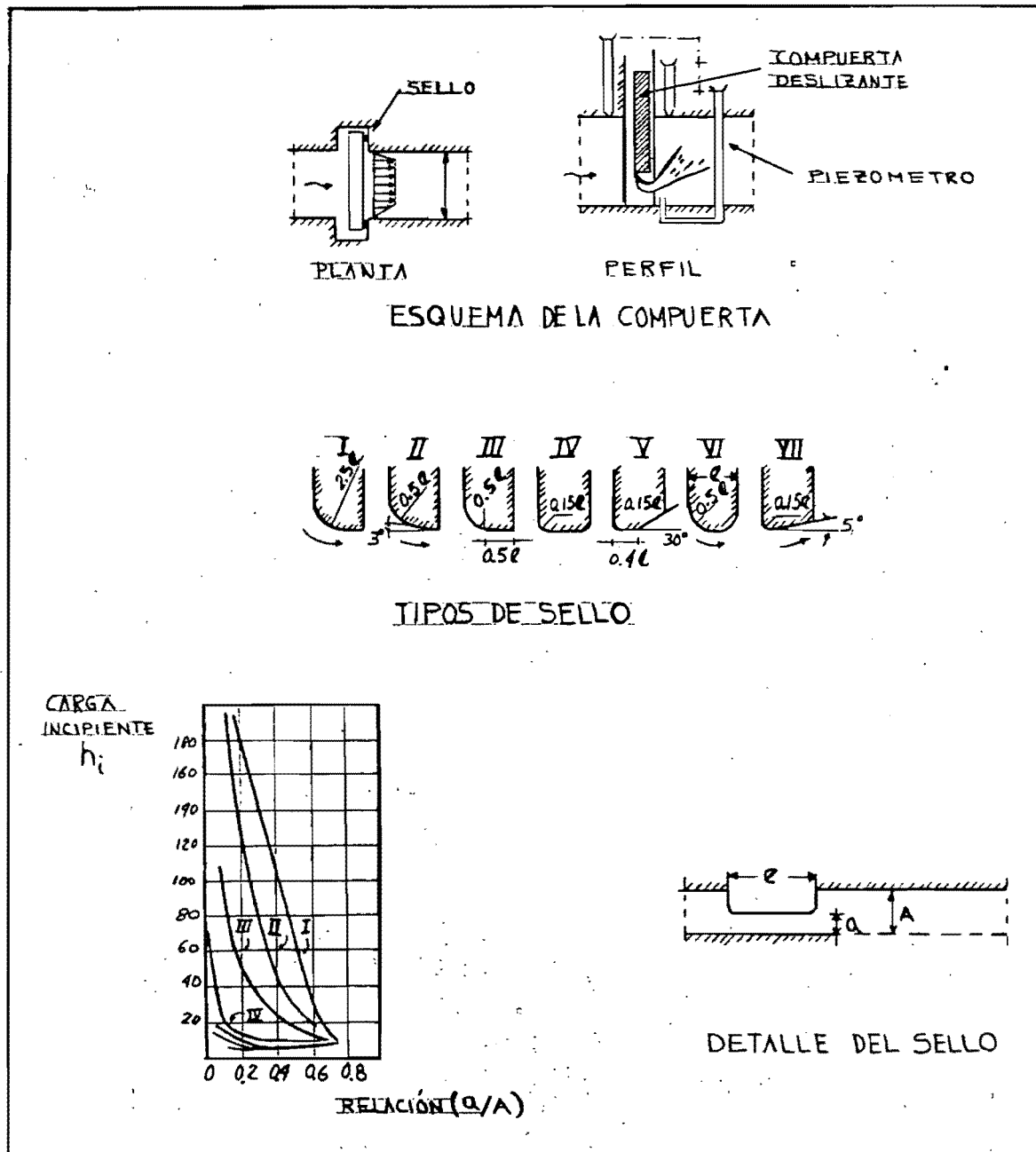


FIGURA 4.5. INDICES σ_c PARA SELLOS EN COMPUERTAS (Lisenko, 16).

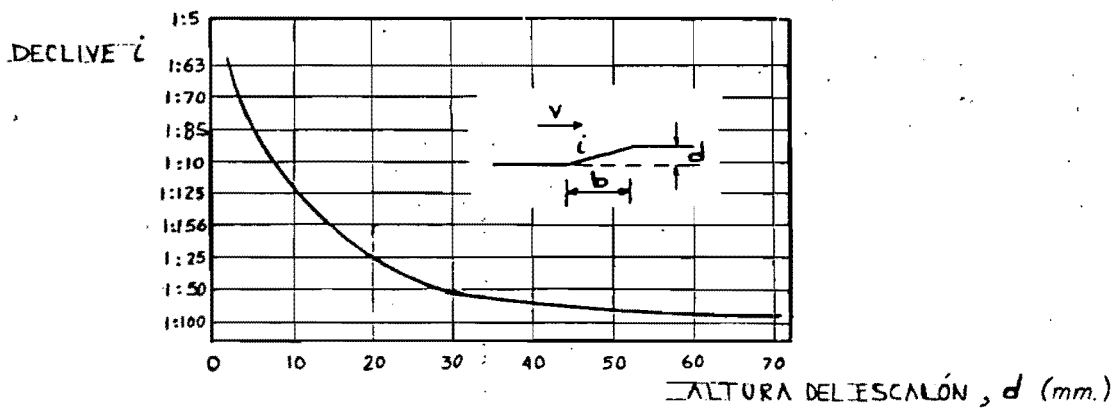


FIGURA 4.6. ALTURAS CRÍTICAS DE ESCALONES EN FUNCIÓN DE LA INCLINACIÓN PARA 35 a 40 m/s (Pérez, 21).

$\frac{d}{b}$	σ_i^*		
	IRREGULARIDAD TRANSVERSAL		IRREGULARIDAD LONGITUDINAL
1:2	0,73	0,77	0,40
1:3	0,70	0,74	0,30
1:4	0,67	0,71	0,23
1:6	0,61	0,66	—
1:10	0,52	0,57	—
1:14	0,45	0,49	—
1:18	0,39	0,43	—
1:22	0,34	0,38	—
1:26	0,31	0,34	—
1:30	0,28	0,31	—
1:34	0,25	0,28	—
1:38	0,23	0,26	—
1:40	—	0,24	—

FIGURA 4.7. RESULTADOS DE σ_i^* PARA (d/b) (Oskallov, 21).

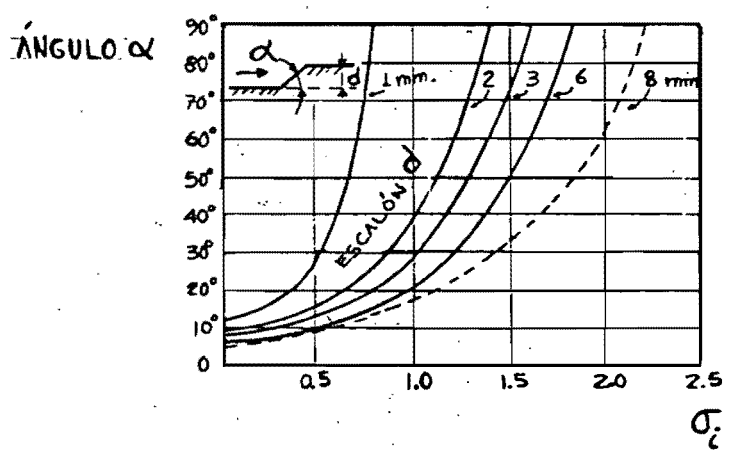


FIGURA 4.8. VALORES DE σ_i vs. INCLINACION α (Galperin, 21).

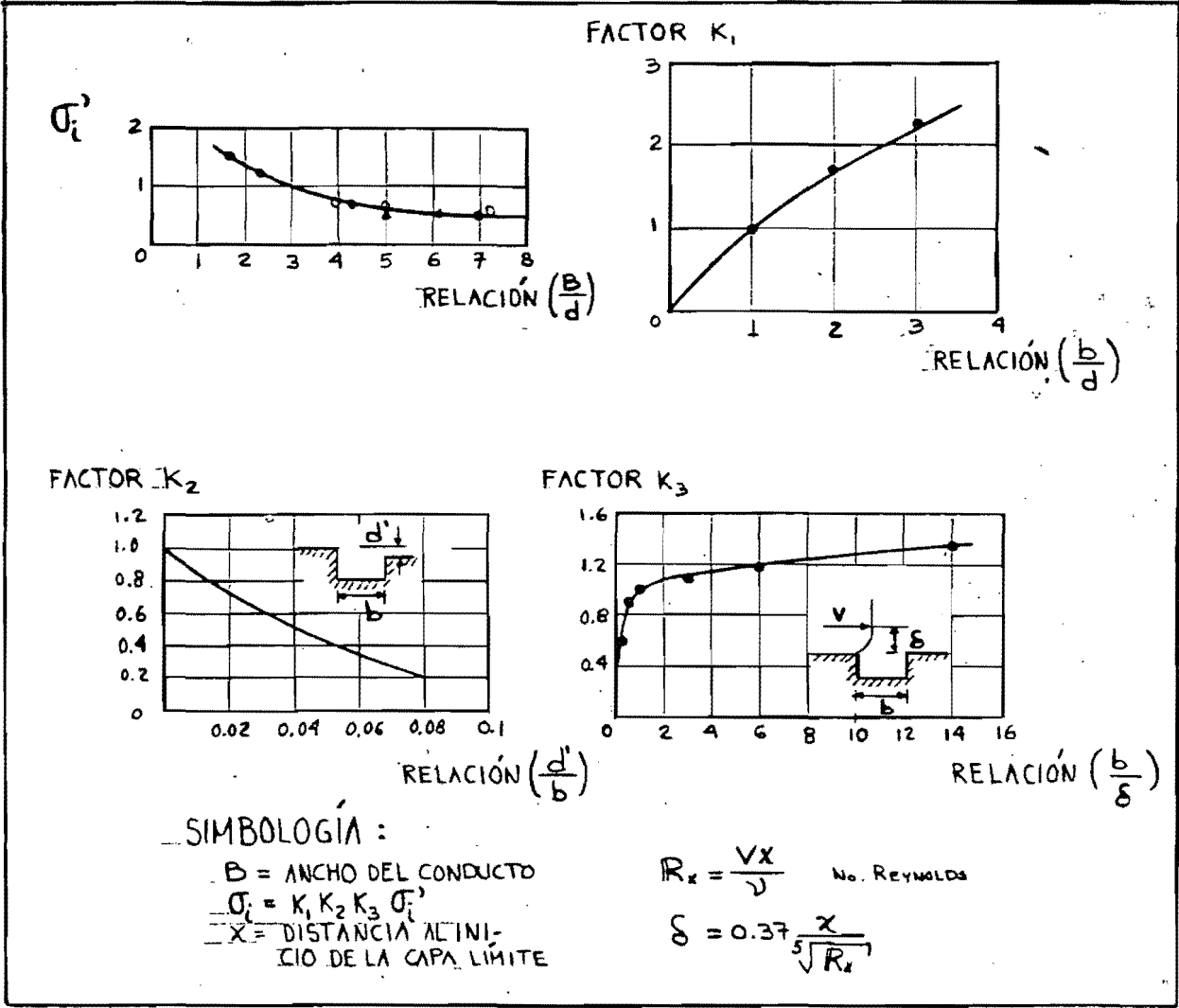
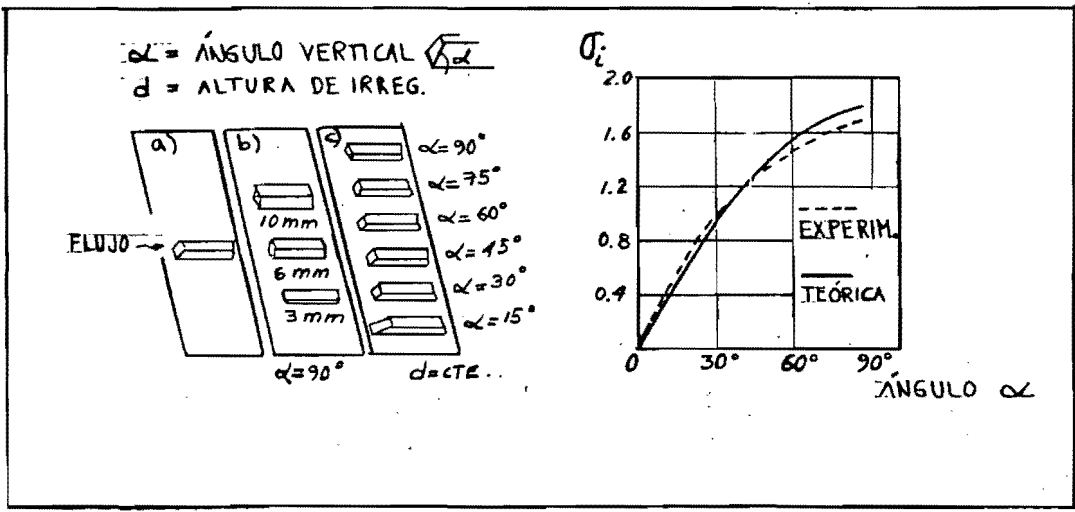


FIGURA 4.9. CURVAS PARA DETERMINAR σ_i (Galperin, 21).



FIGURAS 4.10 y 4.11 IRREGULARIDADES AISLADAS Y GRUPOS DE IRREGULARIDADES PARA DETERMINAR σ_i PARA VARIOS ANGULOS α (Zichav, 30).

PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EROSIÓN h_e (cm)

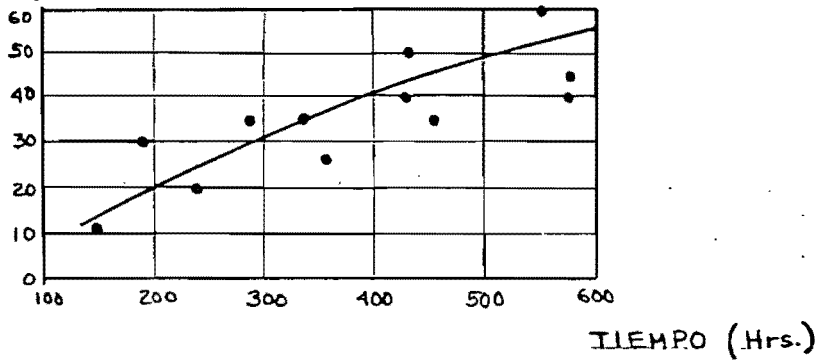


FIGURA 4.12. EVOLUCIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE EROSIÓN EN EL TIEMPO (Galperin, 10).

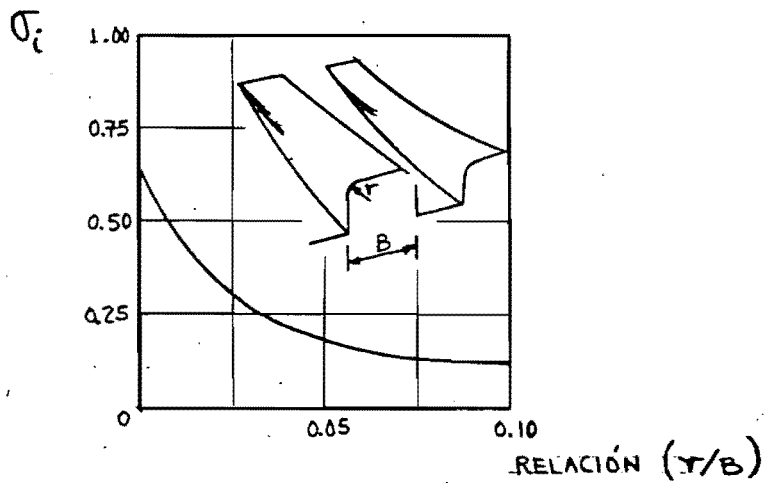


FIGURA 4.13. RELACION ENTRE σ_i y (τ/B) DE BLOQUES DISPERSORES (Lgalov, 15).

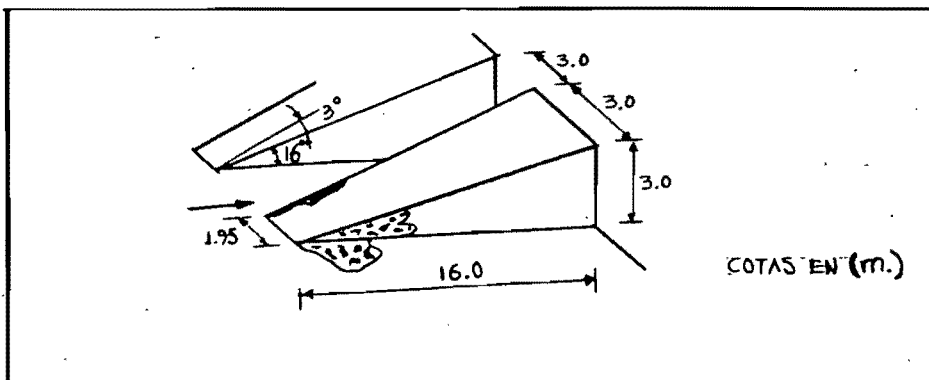


FIGURA 4.14. ZONAS DERRAMADAS EN LOS SEPARADORES.

RELACION ENTRE DIAMETROS ($\frac{D_1}{D_2}$)

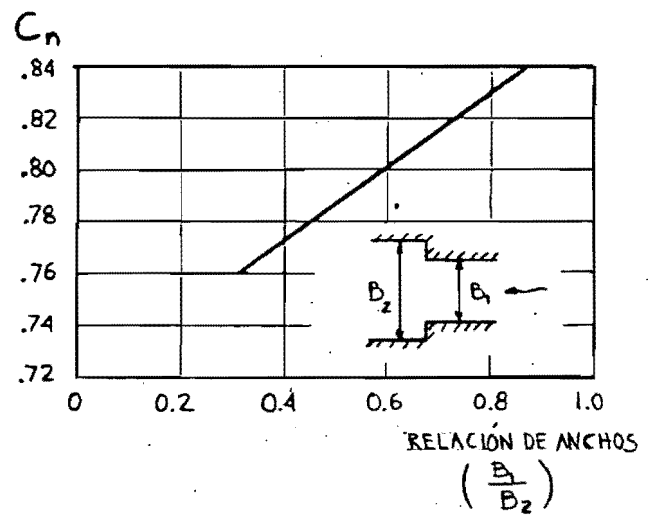
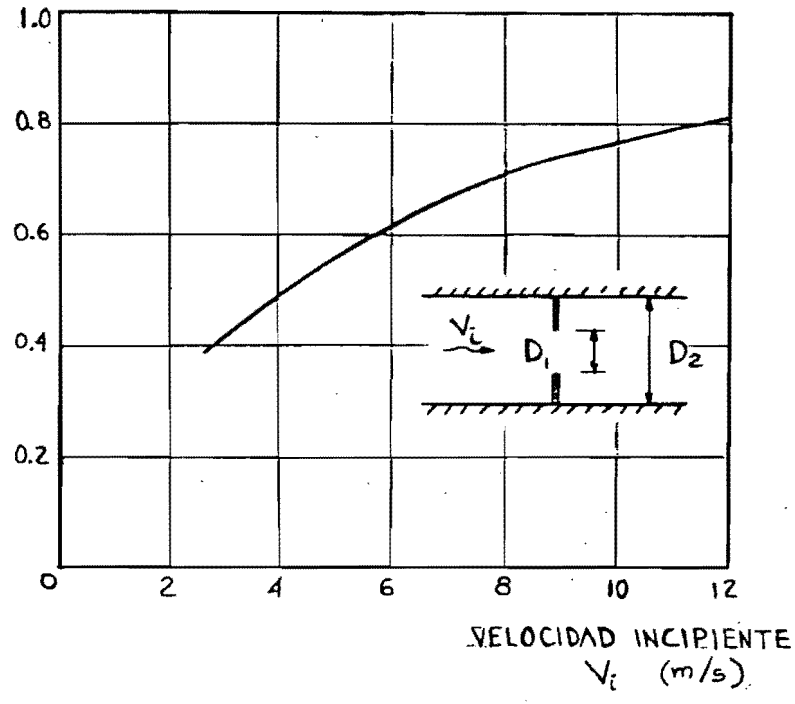


FIGURA 4.15. VELOCIDADES INCIPIENTES PARA AMPLIACIONES BRUSCAS (Miller, 191).

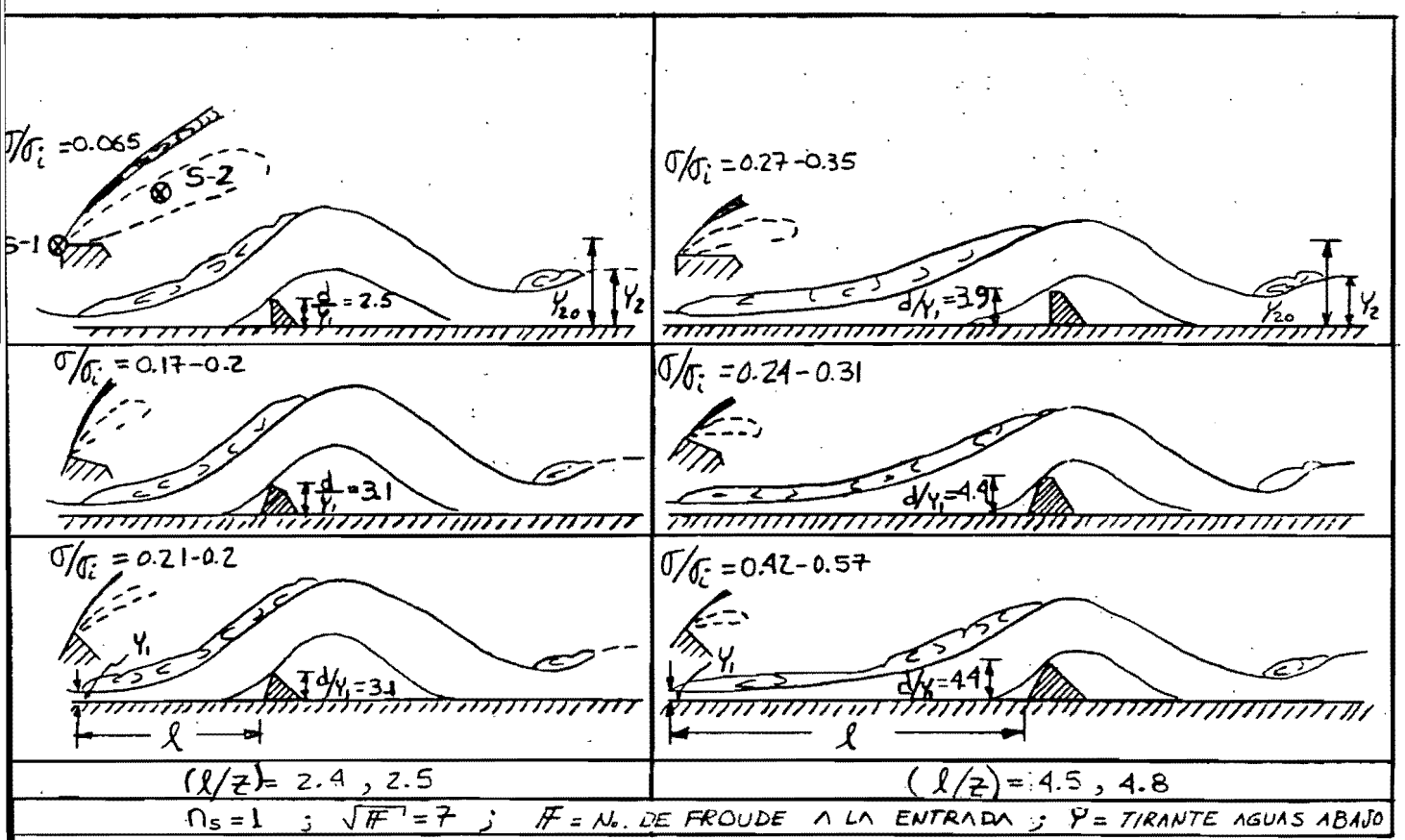


FIGURA 4.16. ARREGLO GENERAL DE LOS DISTINTOS BLOQUES (Pravaraova).

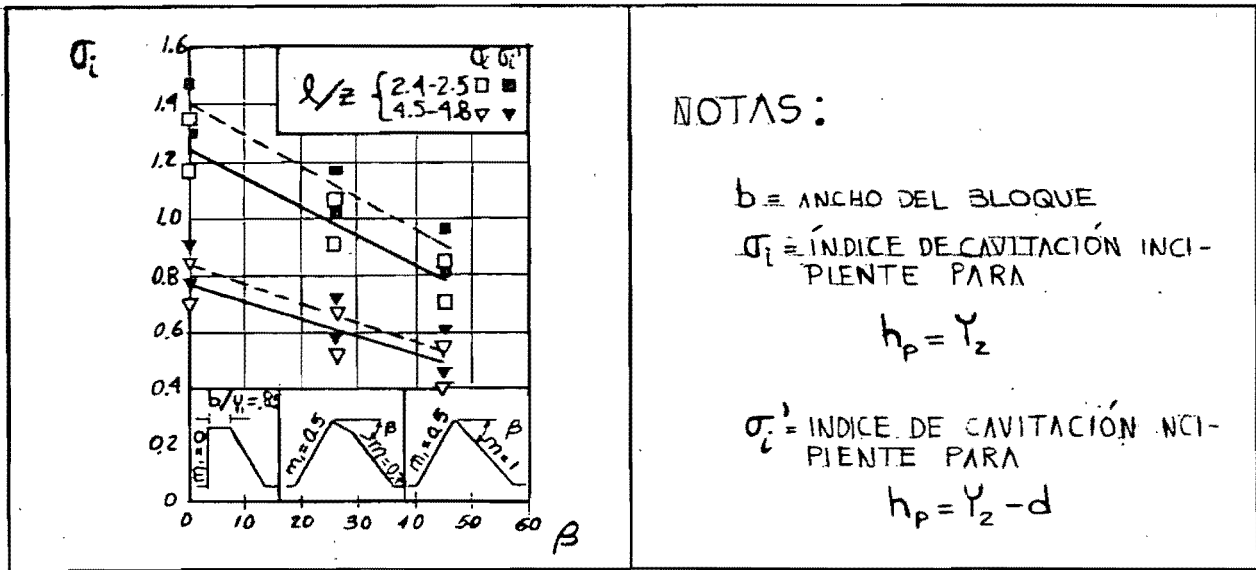


FIGURA 4.16. (Continuación).

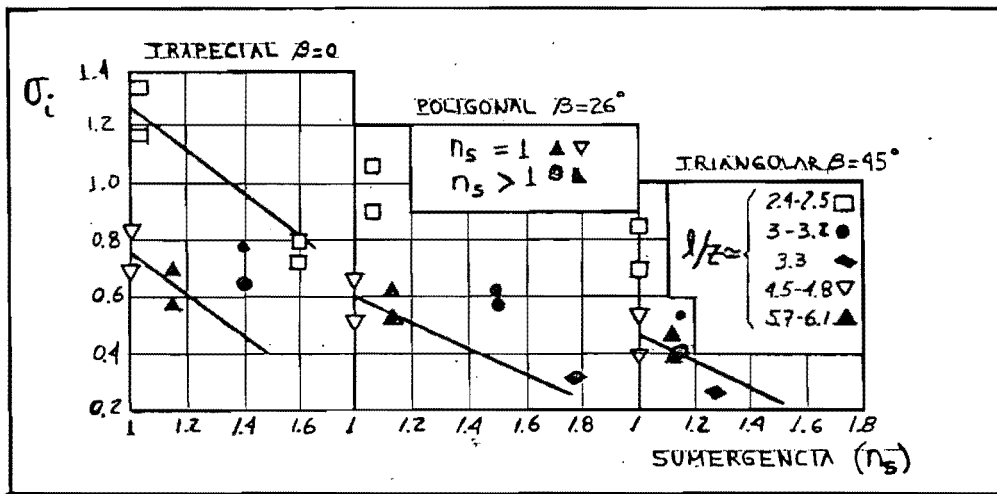


FIGURA 4.17 EFECTO DE LA SUMERGENCIA (Pronoyova, 19).

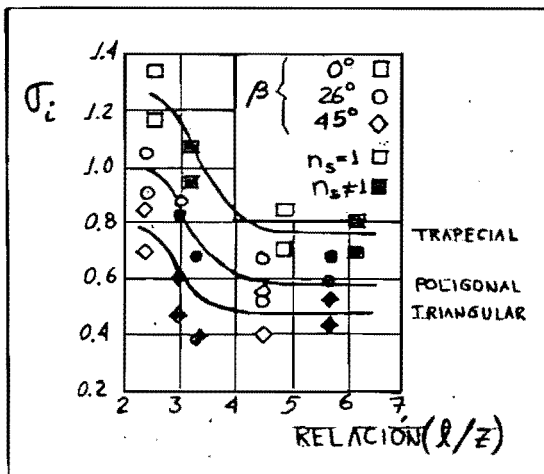


FIGURA 4.18 EFECTO DE LA LOCALIZACIÓN DE LOS BLOQUES (Pronoyova, 19).

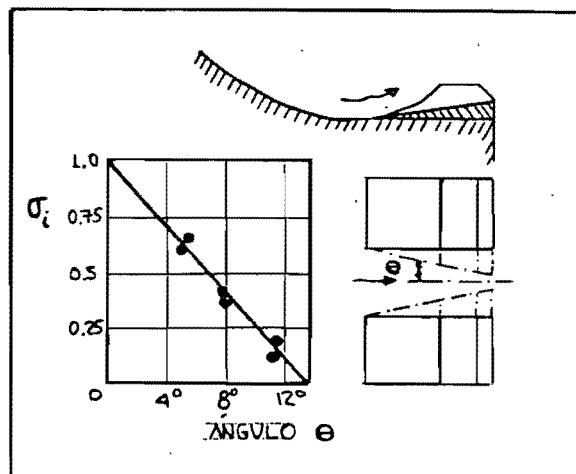


FIGURA 4.19. ÍNDICE σ_i DE BLOQUES DISPERSORES (Calperin, 21).

GEOMETRÍA	σ_i	GEOMETRÍA	σ_i	GEOMETRÍA	σ_i	GEOMETRÍA	σ_i
	2.1		1.9		0.68		0.75
	2.3		1.1		1.9		0.65
	2.2		2.1		0.8		1.8

FIGURA 4.20. VALORES DE σ_i y ZONAS DE EROSION PARA BLOQUES (Rosenov, 21, 25).

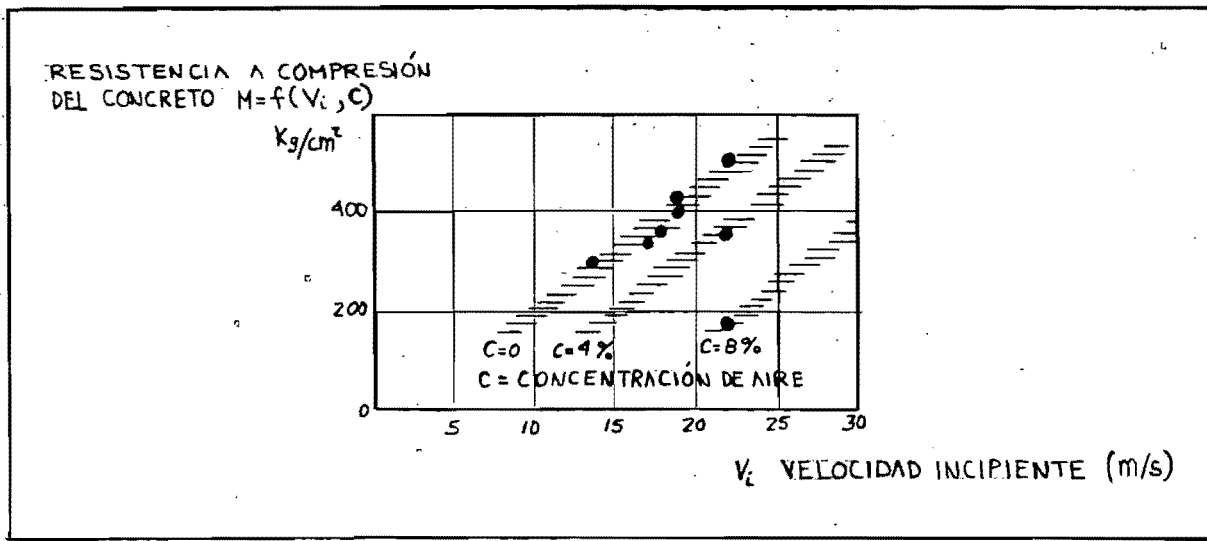


FIGURA 4.21. RELACION ENTRE RESISTENCIA, VELOCIDAD Y CONCENTRACION DE AIRE, (Galperin, 9, 10).

RELACION $\left(\frac{\sigma}{\sigma_i}\right)$

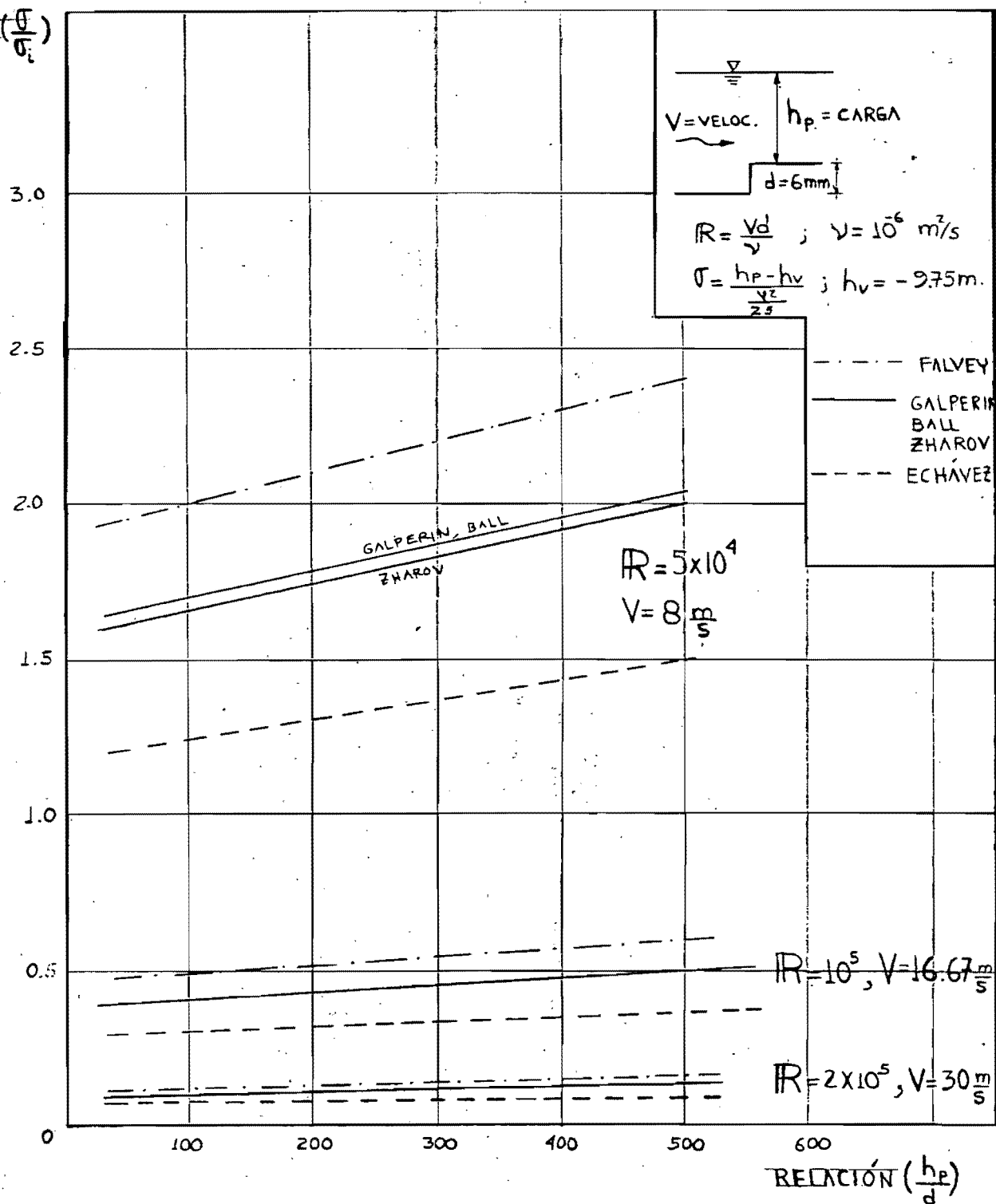


FIGURA 4.22. RELACIONES DE $\frac{\sigma}{\sigma_i} = f(R, h_p/d)$

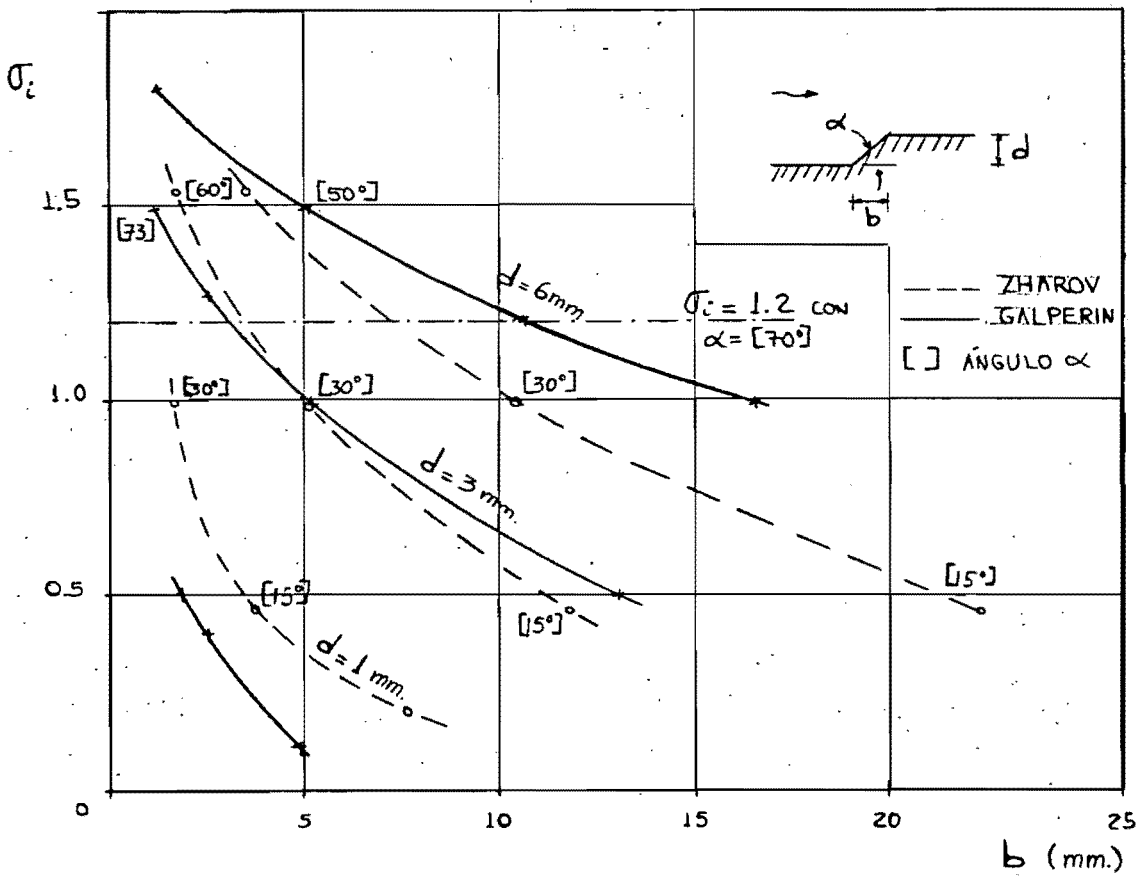


FIGURA 4.23 CURVAS DEDUCIDAS DE GALPERIN (Ref. 21) Y DE ZHAROV (Ref. 30).

RELACIÓN $(\frac{\sigma}{\sigma_c})$

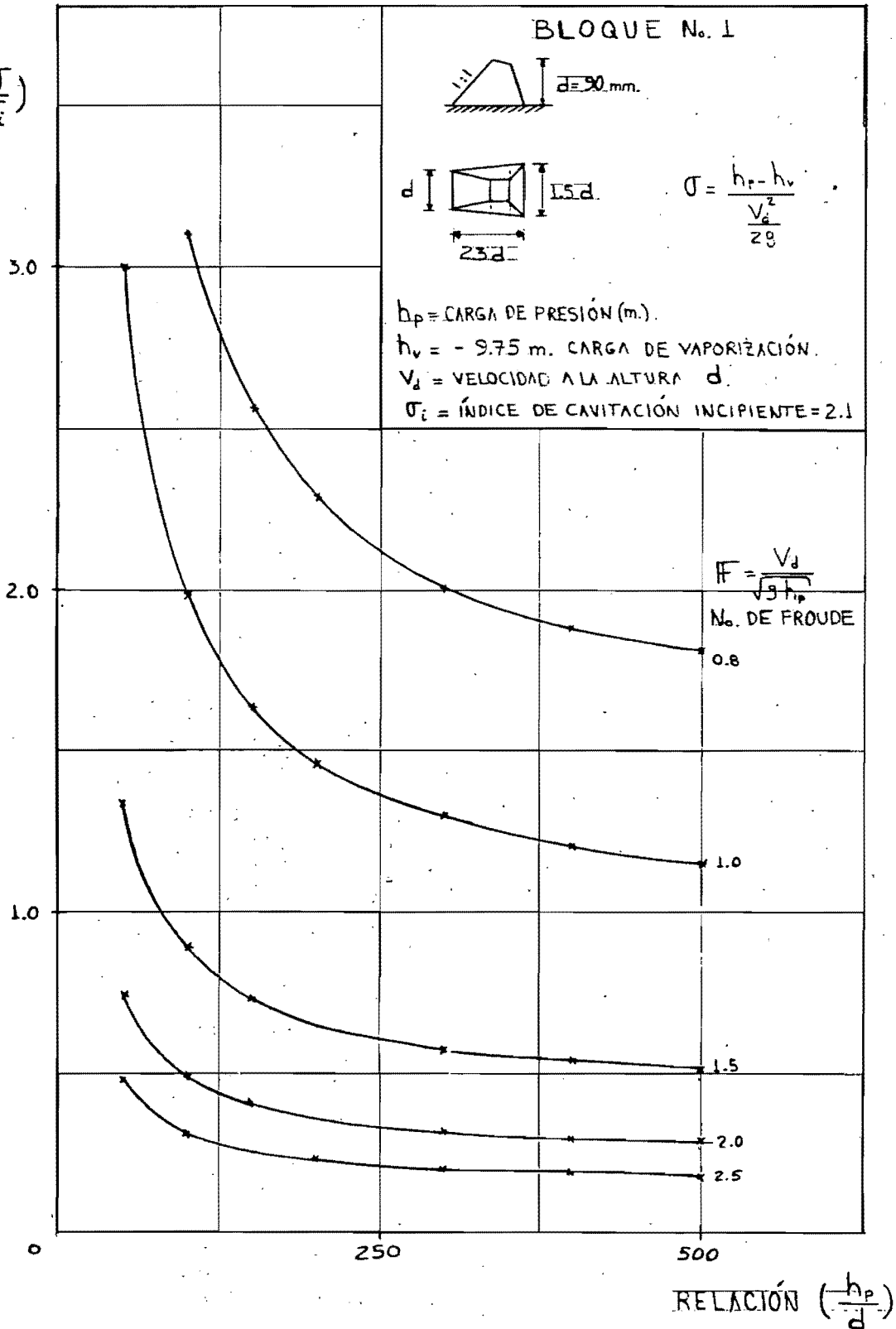


FIGURA 4.24. VARIACION DE (σ/σ_c) CONTRA (h_p/d) PARA DISTINTOS NÚMEROS DE FROUDE.

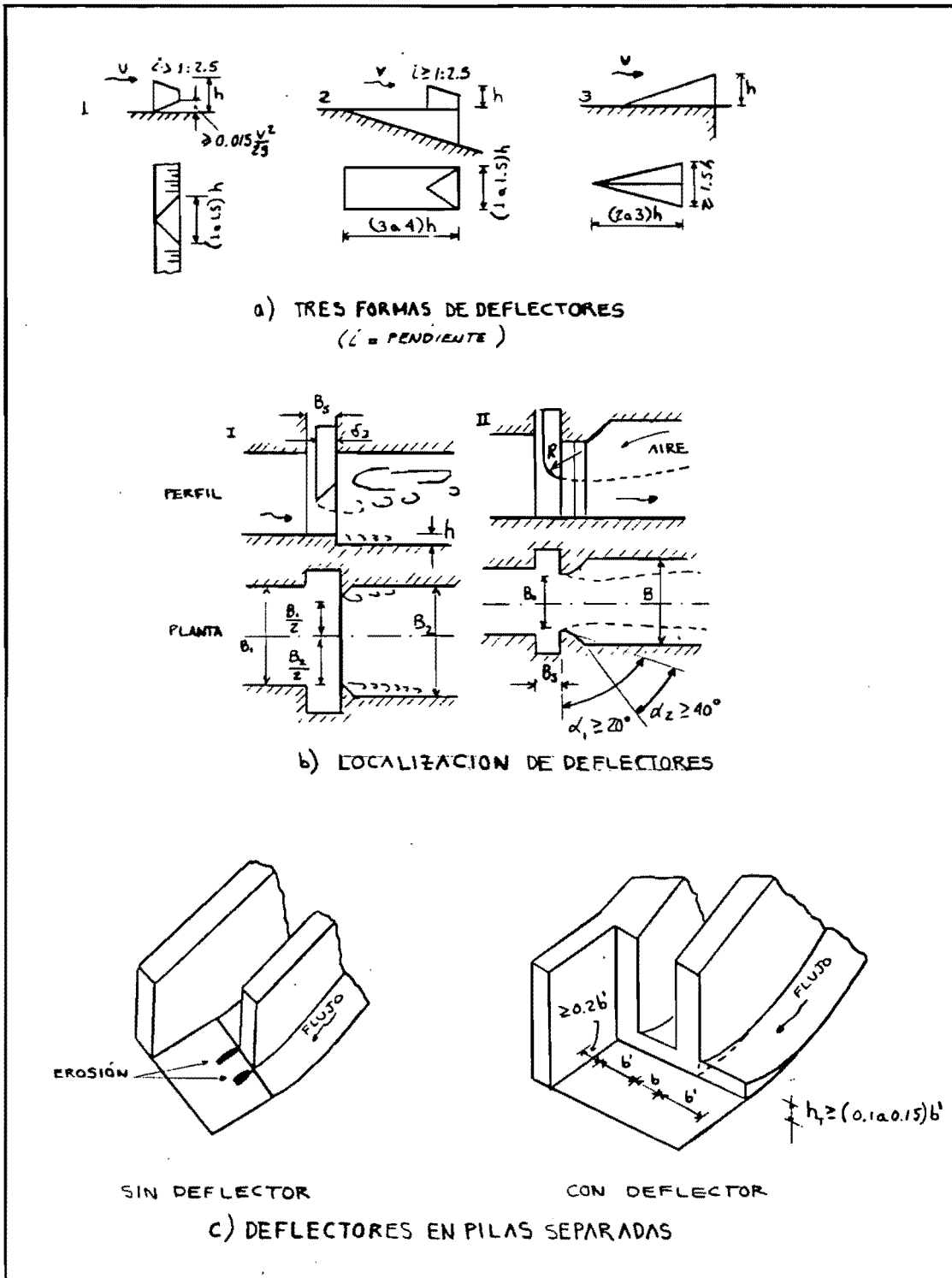


FIGURA 4.26 (Continuación)

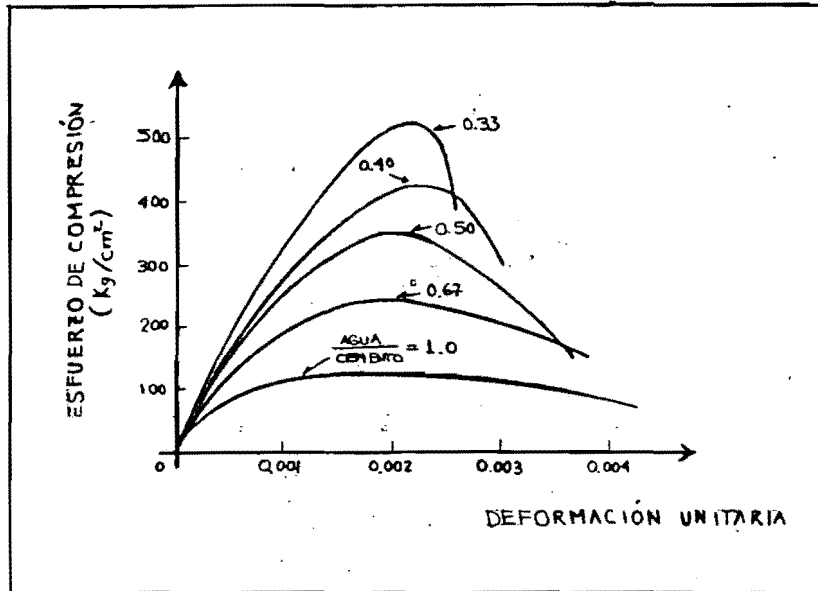


FIGURA 4.27. RELACION AGUA-CEMENTO Y RESISTENCIA DEL CONCRETO

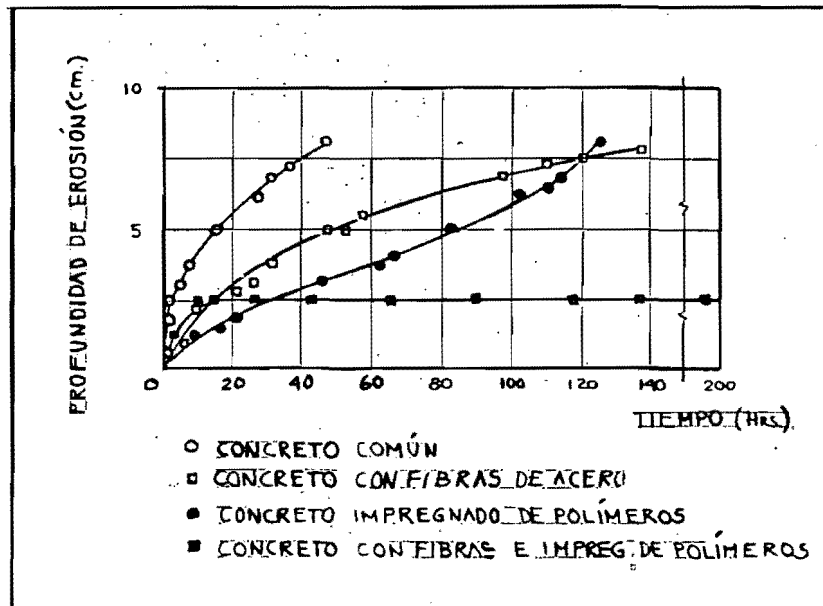


FIGURA 4.28. RESULTADOS DE ENSAYOS DE VARIOS MATERIALES.

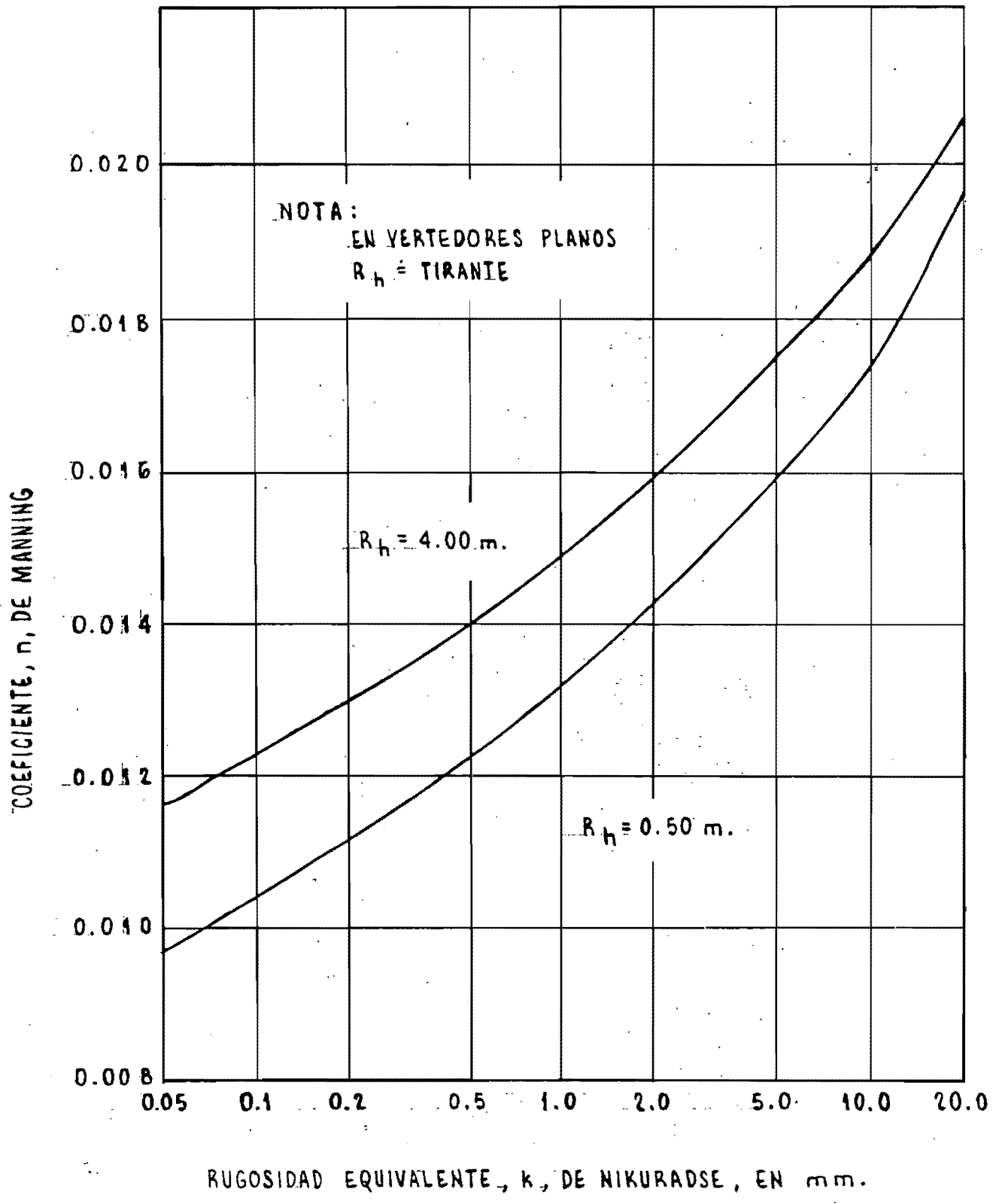


FIGURA 5-1. RUGOSIDAD EQUIVALENTE, K, DE NIKURADSE vs. COEF. DE MANNING, n

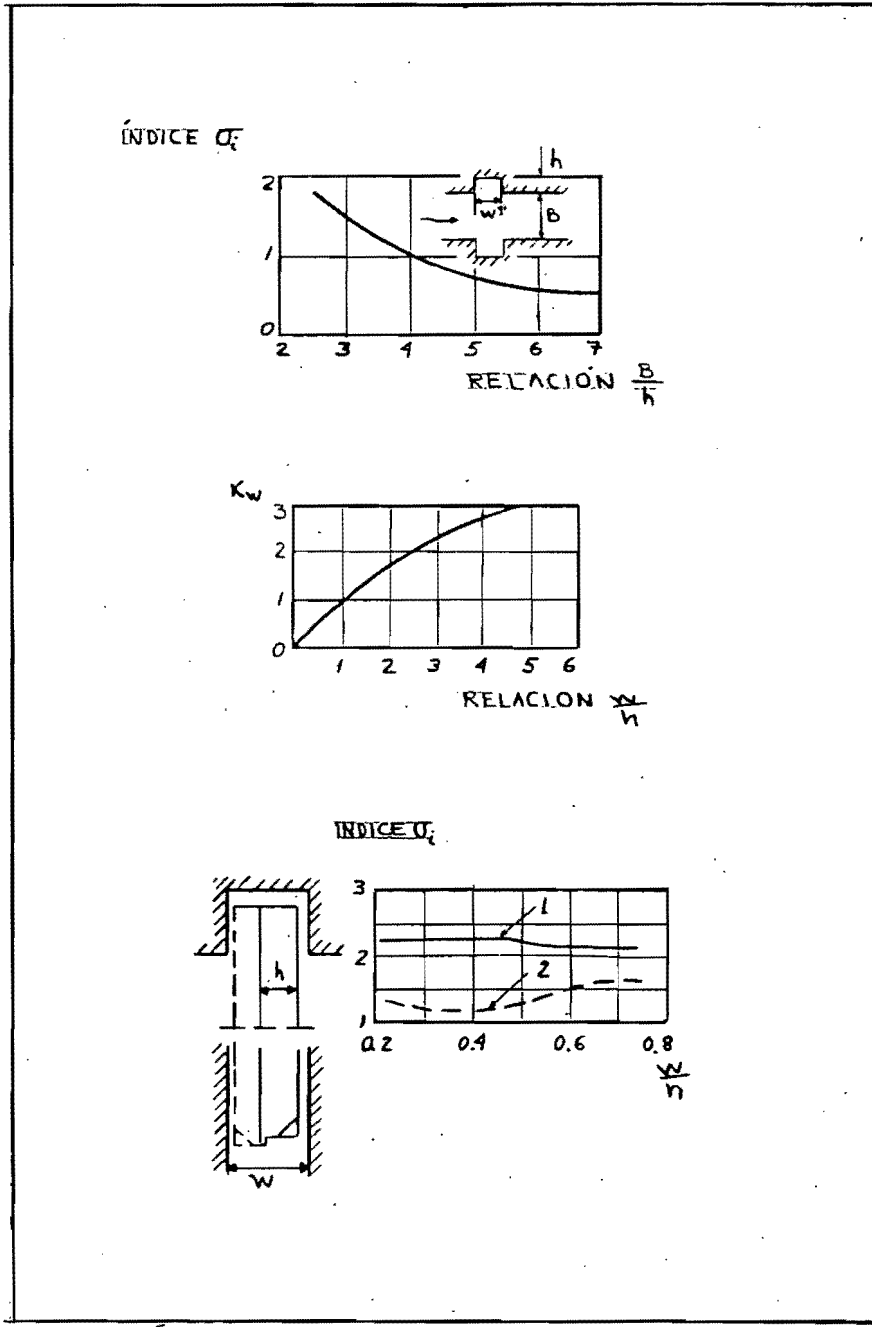


FIGURA 5.2. VALORES DE C_v EN FILOS DE COMPUERTAS (Galperin, ?)