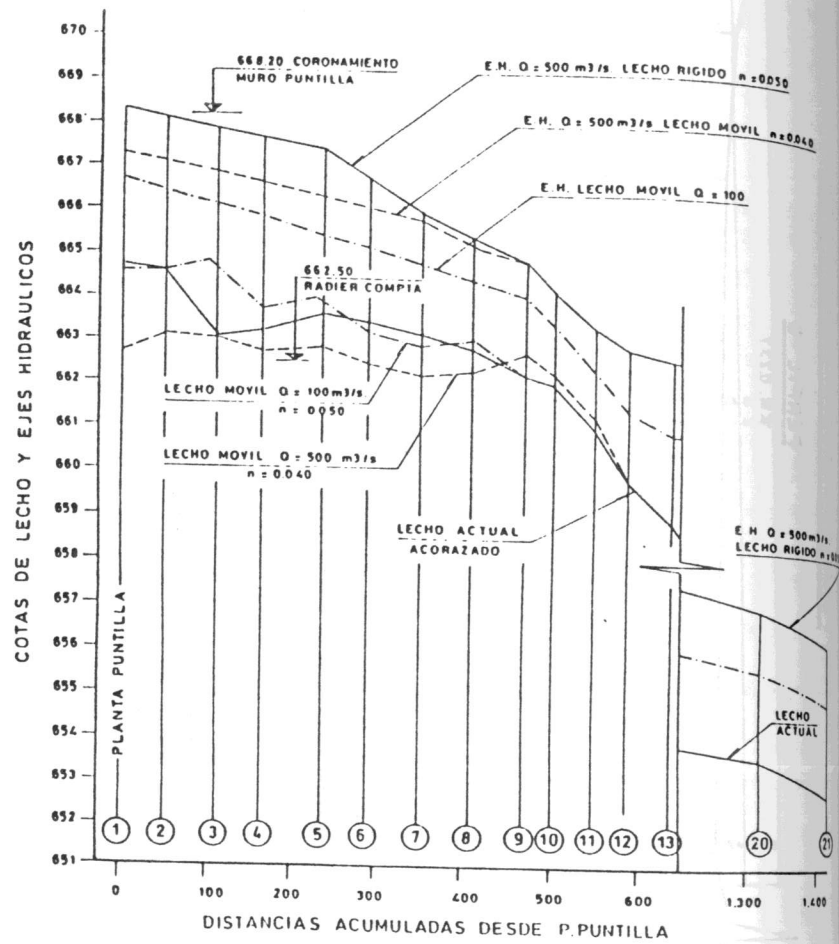


RIO MAIPO
SECTOR : PLANTA PUNTILLA - LAS ANIMAS

FIGURA 3



1:4

TEMA 2

HIDRAULICA FLUVIAL Y MARITIMA

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
IX CONGRESO NACIONAL

SOCAVACION EN TORNO A PILAS FUNDADAS EN LECHOS
QUE EXPERIMENTAN ACORAZAMIENTO

Luis Ayala Riquelme, Ph. D. (1)
Alexis Lillo de la Cruz (2)

RESUMEN

Se presenta y analiza los resultados obtenidos de un estudio experimental sobre socavación al pie de pilas cilíndricas de sección circular, insertas en un lecho móvil constituido por un sedimento de granulometría gruesa y extendida. Los ensayos se llevaron a cabo imponiendo condiciones en el umbral del arrastre incipiente o próximo a éste, para el lecho no perturbado, con el fin de generar acorazamiento y máxima socavación en torno a las pilas.

Del análisis de los resultados se concluye que el acorazamiento del lecho actúa como factor reductor de la socavación pero al mismo tiempo hace depender el fenómeno del número de Froude del escurrimiento, en contraposición a lo que sucede con lechos finos uniformes en condiciones de transporte incipiente. Sobre la base de los antecedentes presentados se proponen relaciones de cálculo de la socavación para lechos que experimentan acorazamiento.

(1) Ingeniero Civil, Profesor Titular del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

(2) Ingeniero Civil, ex-Ayudante de Investigación del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

INTRODUCCION

La socavación en torno a pilas insertas en lechos que se acorazan es un fenómeno cuya cuantificación tiene particular importancia en el diseño hidráulico de puentes y otras estructuras que requieren fundarse en cauces fluviales constituidos por sedimentos de granulometría gruesa y extendida, especialmente en nuestro país. No obstante ello, su conocimiento en la actualidad es bastante limitado porque se dispone de escasa información acerca de las características del fenómeno, derivado ello del hecho que los esfuerzos de investigación se han concentrado principalmente en los lechos finos uniformes (arenosos).

El acorazamiento o pavimentación de un lecho, que consiste en el engrosamiento de sus capas superficiales debido al arrastre selectivo por tamaños de sus partículas, depende tanto de las características granulométricas del sedimento como de las propiedades del flujo. Estas últimas alteran la composición de tamaños de la superficie del lecho, situación que no se da en el caso de los sedimentos uniformes. De ahí que la socavación, que es producto de un desequilibrio local entre la capacidad erosiva de la corriente y la tasa de transporte de sedimento desde aguas arriba, quede condicionada en el caso de lechos gruesos graduados por las propiedades granulométricas del sedimento, esperándose en consecuencia diferencias significativas con respecto a los lechos finos uniformes.

El presente trabajo tiene por objeto reportar los resultados obtenidos en un estudio experimental desarrollado por los autores en el laboratorio del Centro de Recursos Hidráulicos, destinado a investigar la socavación al pie de pilas cilíndricas circulares fundadas en un lecho grueso graduado bajo condiciones de transporte incipiente (Ayala y Lillo, 1989). Sobre la base de los antecedentes presentados, se formulan recomendaciones de cálculo de la socavación máxima con acorazamiento, con fines de diseño hidráulico de fundaciones de pilas.

ANTECEDENTES DEL FENOMENO

El estudio de la socavación en torno a pilas insertas en un lecho de granulometría gruesa uniforme o extendida ha sido abordado analizando el efecto que tiene el tamaño y dispersión granulométrica sobre el fenómeno, tomando como referencia la socavación de lechos finos uniformes.

En relación a la influencia del tamaño del sedimento, las investigaciones realizadas han concluido que la socavación disminuye apreciablemente dependiendo del valor que toma la razón diámetro de la pila al diámetro sedimento b/D_{50} . Ayala y Martín (1980) propusieron considerar los sedimentos como gruesos cuando $b/D_{50} < 30$, en tanto Raudkivi y Ettema (1983) definen como lechos muy gruesos aquellos con $b/D_{50} < 8$, gruesos con este parámetro entre 8 y 30, intermedio entre 30 y 130 y finos sobre 130. Sobre este último límite, la socavación alcanzaría magnitudes iguales a la de lecho fino. Con respecto al efecto del acorazamiento, Raudkivi y Ettema concluyen que éste se traduce en una reducción de la socavación con respecto a lechos uniformes, que depende sólo de la dispersión granulométrica (σ_g). En la Tabla 1 se indica los valores propuestos por estos autores para el factor de corrección K_g que afecta a la socavación de un lecho uniforme para llevarla a socavación de un lecho graduado.

TABLA 1: FACTOR DE CORRECCION K_g DE RAUDKIVI ETTEMA (1983)

σ_g	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
K_g	1.0	0.92	0.66	0.43	0.30	0.19	0.15

El efecto conjunto del tamaño del sedimento y de la dispersión granulométrica bajo las hipótesis de sedimento natural y efectos viscosos despreciables, puede expresarse a través de relaciones adimensionales del tipo siguiente:

$$s/b = f(h/b, F, b/D_{50}, \sigma_g) \quad (1)$$

donde s representa la socavación, b el diámetro de la pila, h la altura de escurrimiento, F el número de Froude del escurrimiento, D_{50} el diámetro 50% que pasa del sedimento y σ_g la desviación estándar geométrica de la curva granulométrica. En el caso de lechos finos uniformes, cuando se alcanza el umbral de arrastre crítico, la socavación toma su valor máximo, quedando la relación anterior como sigue:

$$sm/b = f'(h/b) \quad (2)$$

Cuando el lecho es grueso uniforme, la socavación máxima anterior depende además de b/D_{50} . En el caso de lechos graduados, la influencia que tiene σ_g en el fenómeno es relativa a dos aspectos. En primer lugar, al producirse un movimiento selectivo de las partículas, iniciándose éste por las fracciones de menor tamaño, se produce un engrosamiento superficial del lecho y de la fosa socavada, constituyéndose ello en un factor reductor de la socavación comparada con un lecho fino a igualdad de condiciones. En segundo lugar, el transporte incipiente está asociado a cada fracción que se encuentra en el umbral del movimiento, por lo que no es posible hablar de una condición única de arrastre crítico lo que dificulta la definición un tamaño de referencia.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Instalación Experimental. Los ensayos experimentales se llevaron a cabo en el canal de sedimentos del laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile cuyas características principales aparecen indicadas en la Fig. 1. Se trata de un canal de 17.5 m de longitud útil y 1.7 m de ancho en el que es posible colocar una camada de sedimento para conformar un lecho móvil inclinado (0 - 1% de pendiente) de unos 10 cm de espesor, salvo el sector central donde se ubica la zona de observación de los fenómenos de socavación, en la cual el fondo del canal se encuentra rebajado en la forma de una fosa de 4 m de largo por 0.45 m de profundidad.

La alimentación del canal se realiza por medio de una bomba de $Q_{máx}=140$ lt/s cuya tubería de impulsión descarga en una

cámara aquietadora ubicada en el extremo de aguas arriba del canal. En el extremo opuesto se localiza una fosa para la retención de los sedimentos que pudieran ser arrastrados del lecho y una clapeta para el control de los niveles del canal.

Pilas y Sedimento del Lecho Empleados. En el estudio se emplearon solamente pilas cilíndricas de sección circular de los siguientes diámetros: 2.7 cm, 3.6 cm, 5.4 cm, 9.0 cm, 17.7 cm y 21.0 cm. Además se utilizó un sedimento único para conformar el lecho, fabricado a partir de 11 clases de distinto tamaño con la finalidad de conseguir una dispersión granulométrica adecuada al estudio de acorazamiento. En la Fig. 2 se muestra la curva granulométrica del sedimento fabricado cuyas características principales son: $D_{16}=17.0$ mm, $D_{50}=6.0$ mm, $D_{84}=2.2$ mm y $\sigma_g=2.78$.

Condiciones de Experimentación. Las variables hidráulicas independientes del fenómeno estudiado, son el caudal y la pendiente, y el régimen de escurrimiento impuesto, el régimen uniforme. El objetivo específico que se tuvo presente para fijar las condiciones de experimentación fue conseguir socavación en torno a las pilas sin superar o alcanzando el umbral de arrastre crítico por fracciones granulométricas en el lecho no perturbado. Se llevaron a cabo 4 series de experiencias (108 ensayos) correspondientes cada una de ellas a una pendiente del lecho y a un rango de caudales, cuyo límite superior determina condiciones de arrastre crítico o próximo a él.

Procedimiento Experimental y Toma de Datos. Cada ensayo se realizó siguiendo un procedimiento similar al que se describe a continuación. En primer lugar se preparaba el lecho, mezclándolo para asegurar la máxima homogeneidad del sedimento y luego se procedía a alisarlo para darle la pendiente que correspondía. Una vez instalada la pila y protegido su entorno, para evitar socavación prematura, se proseguía con el llenado del canal, ahogando el escurrimiento desde aguas abajo, hasta que se tenía fijado el caudal del ensayo. Una vez verificado que las condiciones de

experimentación eran las correctas y ya alcanzado el régimen uniforme de escurrimiento, se retiraba las protecciones en torno a la pila y se daba por iniciada la observación del proceso, anotando a intervalos de tiempo prefijados, las profundidades de socavación. Las experiencias terminaban cuando se alcanzaba la estabilización temporal del proceso (no antes de 2.5 hrs. ni después de 4.5 hrs. de iniciado cada ensayo), previa medición del eje hidráulico y verificación de la uniformidad y profundidad del escurrimiento. Al término de la experiencia se procedía a sacar una muestra del lecho con el fin de analizar la granulometría de sus capas superiores. Para este objeto se diseñó un muestreador especial que permitía, mediante un dispositivo especial, obtener 4 muestras de unos 7 mm de espesor equivalentes aproximadamente a 1, 2, 3 y 4 veces el D_{50} del sedimento del lecho.

PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

La información obtenida del estudio experimental se refiere principalmente a tres aspectos: profundidad máxima de socavación, evolución temporal del proceso y variación de la composición granulométrica o acorazamiento del lecho. En el presente trabajo se aborda sólo el primero de estos aspectos.

a) Influencia del Número de Froude

Como se ha señalado anteriormente la socavación puede ser expresada en términos de la relación adimensional (1), la cual deja explícitamente establecida la dependencia de la socavación con la velocidad media del escurrimiento (a través de F), dependencia que se da en lechos finos uniformes, como se ha explicado, sólo hasta que se alcanza la condición de arrastre incipiente del lecho no perturbado, que coincide con la de máxima socavación.

En el caso de lechos de granulometría extendida la situación es radicalmente diferente a la anterior porque al existir distintas fracciones de tamaño de sedimento, su susceptibilidad al movimiento bajo la acción de la corriente es también distinta. Por lo mismo, no es posible definir un umbral del movimiento indepen-

diente de la fracción que corresponda, además que al producirse un arrastre selectivo cuando las fracciones mayores no se mueven, ocurre el acorazamiento o pavimentación del lecho debido al engrosamiento de las capas superficiales de éste. Reconociendo estas dificultades, los ensayos se realizaron para cada pila y pendiente de fondo, aumentando progresiva y escalonadamente el caudal hasta que el movimiento de las fracciones más gruesas se fuera haciendo paulatinamente evidente, sin que ello significara una perturbación visible del lecho. De esa forma se recorrió una "banda de arrastre crítico" haciendo observaciones de la socavación y acorazamiento del lecho, teniendo certeza que hacia el extremo superior de la banda (tendiendo al arrastre generalizado) se estaría alcanzando una condición de socavación similar a la máxima de lechos finos uniformes.

La determinación de la máxima socavación se realizó graficando los parámetros s/b en función de h/b cuidando de mantener aproximadamente constante el número de Froude (F). Para ello los datos se agruparon en 5 clases de F y luego se procedió a trazar envolventes superiores para cada clase. En la Fig.3 a) y e) se muestran los resultados obtenidos y en la Fig.4 aparecen graficadas las envolventes de socavación máxima (s) en conjunto con dos relaciones experimentales propuestas para lechos finos uniformes.

La observación más relevante que puede hacerse de estos gráficos es con respecto a la dependencia de la socavación adimensional con F . Este hecho puede explicarse físicamente por el aumento local de la capacidad erosiva del vórtice en torno a la pila al aumentar la velocidad del escurrimiento, lo que hace posible remover fracciones más gruesas en la fosa, aunque en el lecho no perturbado estas mismas fracciones se mantienen inmóviles. En tal caso se tiene una situación como la que se describe para lechos finos uniformes cuando no se ha alcanzado todavía la condición de arrastre crítico en el lecho no perturbado, con la salvedad que en el caso en estudio tal situación compromete sólo

a una parte de las fracciones granulométricas del lecho siendo ello además, distinto para cada velocidad.

b) Influencia del Tamaño Relativo del Sedimento

Como se ha señalado anteriormente, es un hecho reconocido que la socavación en un lecho constituido por sedimento fino uniforme no depende del tamaño relativo de éste (b/D_{50}), en tanto en el caso de sedimentos gruesos uniformes existe tal dependencia. Respecto de sedimentos gruesos graduados no existen antecedentes.

Para la elaboración de la información, se recurrió a las curvas envolventes presentadas anteriormente, asignándole a cada conjunto de datos, correspondientes a un valor de h/b relativamente constante, el valor de b/D_{50} y s/b respectivo. Los resultados de este proceso aparecen graficados en la Fig.5; en dicha figura se ha incluido las curvas de $h/b=cte.$ interpoladas de los datos originales. Esta figura permite visualizar que la razón s/b decrece con el parámetro b/D_{50} para cada rango de número de Froude, es decir, que si se considera una pila de diámetro b constante, a medida que se hace disminuir el tamaño del sedimento, (D_{50}), la socavación disminuiría. Esta conclusión, que aparentemente está en contradicción con lo que se conoce actualmente del comportamiento de lechos gruesos, debe sin embargo considerarse teniendo presente la dependencia de s/b con el parámetro de altura relativa h/b , ya que en la figura este parámetro también es variable. Con el fin de aclarar este aspecto del fenómeno, en la Fig. 6 se ha graficado la razón entre socavación en lecho grueso (s_g) y en lecho fino (s_f) en función de b/D_{50} , en conjunto con las curvas propuestas por Ayala y Martin (1980) para sedimento grueso uniforme. Los datos del presente estudio se han determinado considerando para s , tanto las relaciones de Laursen y Toch como la de Ayala y Niño y sólo los rangos extremos de F (1.0-1.1 y 0.6-0.7) para los tres valores h/b indicados en la Fig.5 ($h/b=1.5, 0.8$ y 0.6) con lo cual los rangos de h/D resultantes son similares a los de la investigación anteriormente señalada. Esta nueva información permite concluir que la razón s_g/s_f para el sedimento grueso graduado sería

diferente a la del sedimento grueso uniforme, definiendo para el primer sedimento una tendencia decreciente con b/D_{50} y opuesta a la del segundo. Esta diferencia de comportamiento no tiene una explicación física fundamentada con los datos del estudio, aunque es obvio que el acorazamiento del lecho y de la fosa socavada debe jugar un papel decisivo en el caso del sedimento graduado tanto en lo que se refiere a la magnitud de la socavación como al diámetro de referencia del sedimento.

No obstante lo anterior, es destacable el hecho que la variación de s_g/s_f con b/D_{50} dentro del rango graficado no sea tan significativa. Ello permite suponer que en este rango s_g/s_f es relativamente constante con b/D_{50} , sobre todo si se toma en cuenta la mucho mayor incidencia que se aprecia que tiene F en la razón de socavaciones. Aceptando esta suposición puede concluirse que la socavación máxima para sedimentos que se acorazan está dada por la relación siguiente cuya versión gráfica se influye en la Fig. 5:

$$s/b = \phi(h/b, F) \quad (3)$$

RELACIONES DE CALCULO DE LA SOCAVACION MAXIMA PROPUESTAS

Teniendo presente que el conocimiento de la socavación en lechos finos uniformes se reconoce hoy en día como razonablemente completo, lo mismo que las relaciones de cálculo derivadas de él, para fines de diseño resulta conveniente y útil referir el cálculo de socavación en lechos gruesos graduados al primer tipo de lechos a través de coeficientes o factores correctivos que tomen en cuenta los parámetros pertinentes del fenómeno. Con este objetivo y aceptando las conclusiones expuestas anteriormente, se ha calculado la razón entre socavación en lecho grueso graduado y lecho fino considerando la relación de Laursen y Toch incluida en la Fig. 4, procediéndose a definir el factor de corrección correspondiente:

$$K_{GG} = s_{GG}/s_f \quad (4)$$

donde K_{GG} es el factor que permite multiplicar la socavación en lecho fino uniforme (s_f) obtenida para una condición dada, para obtener la socavación en lecho grueso graduado (s_{GG}), como el del presente estudio. El resultado obtenido aparece graficado en la Fig. 7, de donde se puede apreciar que K_{GG} es función tanto de h/b como de F , aunque se percibe una clara tendencia a que dicho factor se haga constante para cada rango de F considerado, cuando h/b se aproxima o supera el valor 4.0. Dado que las curvas son crecientes con h/b , puede resultar aceptable introducir como coeficiente de corrección menos conservador aquel dado por los límites superiores que se deducen de la figura y que se consignan en la Tabla 2.

TABLA 2: VALORES DE $K_{GG}=s_{GG}/s_F$ PARA CALCULO

F	0.6 - 0.7	0.7 - 0.8	0.8 - 0.9	0.9 - 1.0	1.0 - 1.1
KGG	0.42	0.47	0.54	0.57	0.60

CONCLUSIONES

El estudio experimental presentado en este trabajo permite extraer las siguientes conclusiones:

- En lechos constituidos por sedimentos graduados la socavación máxima adimensional s/b , obtenida para condiciones de arrastre incipiente, resulta función tanto de h/b como del número de Froude. F , siendo la influencia de b/D_{50} poco significativa.
- El fenómeno aparece como distinto al de lechos finos y al de lechos gruesos uniformes, siendo las diferencias atribuibles al acorazamiento del lecho y de la fosa socavada. El acorazamiento tiende a reducir la socavación comparada con los lechos finos.
- Sobre la base de los antecedentes aportados resulta posible proponer un método de cálculo de la socavación para lechos gruesos graduados, definiendo un factor función de F y h/b que permite corregir la socavación de lechos finos uniformes, estimada con la relación de Laursen y Toch. Para $h/b > 4.0$ se

propone usar valores de este factor dependientes sólo de F que se dan en la Tabla 2.

BIBLIOGRAFIA

- Ayala L. y Lillo A., 1989, Influencia del Acorazamiento del Lecho sobre la Socavación Local al Pie de Pilas, Pub. CRH, Centro de Recursos Hidráulicos, Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile.
- Ayala L. y Martin J.M., 1980, Socavación Local al Pie de Pilas en Lechos de Granulometría Gruesa, Pub. CRH 80-21-I, Centro de Recursos Hidráulicos, Depto. de Ingeniería Civil, U. de Chile.
- Raudkivi A. y Ettema R., 1977, Effect of Sediment Gradation on Clear Water Scour, Journal of Hydraulics Division, ASCE, V ol. 103 N°HY10, Oct.
- Raudkivi A. y Ettema R., 1985, Scour at Cylindrical Bridge Piers in Armored Beds, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.11, N°4, Apr.

RECONOCIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y a FONDECYT que a través del Proyecto N°293/87 proporcionaron el financiamiento de la investigación reportada en este trabajo.

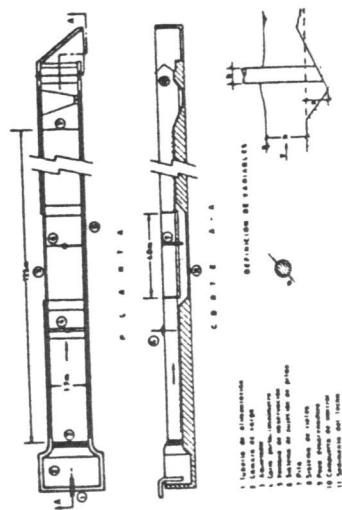


FIG 1 ESQUEMA DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL

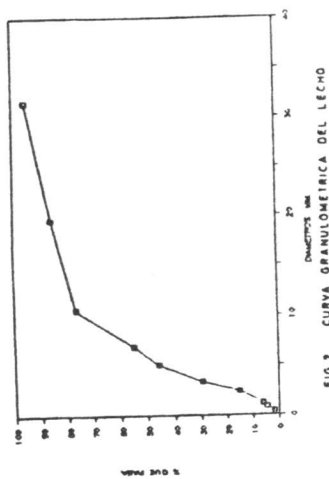


FIG 2 CURVA GRANULOMETRICA DEL LECHO

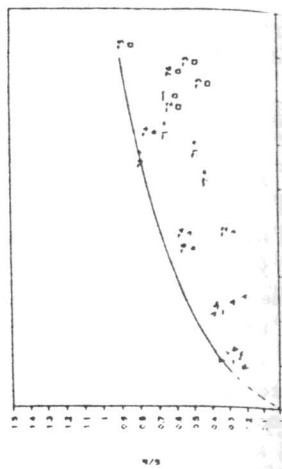
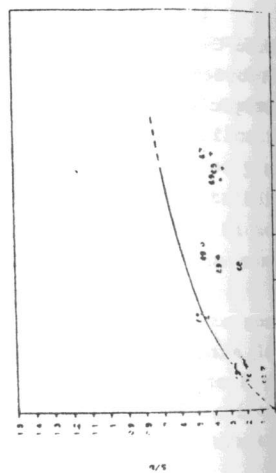


FIG 3b SOCACION ADIMENSIONAL VS ALTURA ADIMENSIONAL

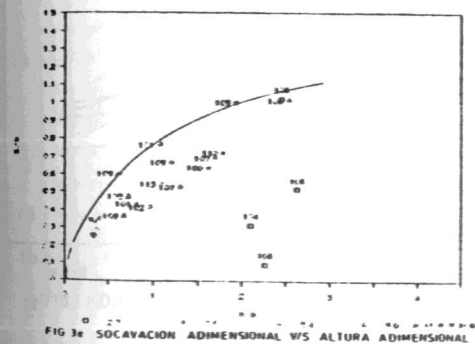


FIG 3c SOCACION ADIMENSIONAL VS ALTURA ADIMENSIONAL

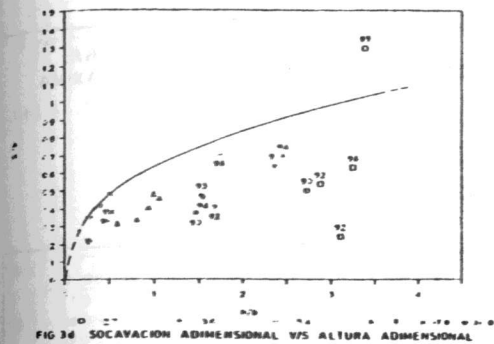


FIG 3d SOCACION ADIMENSIONAL VS ALTURA ADIMENSIONAL

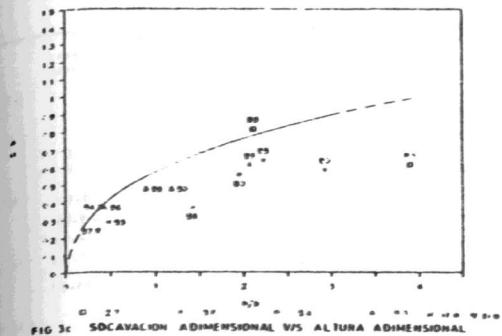


FIG 3e SOCACION ADIMENSIONAL VS ALTURA ADIMENSIONAL

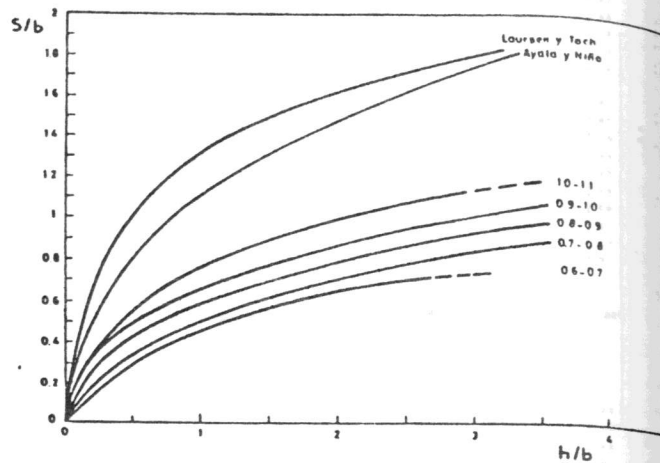


FIG. 4 ENVOLVENTES DE SOCAVACION MAXIMA

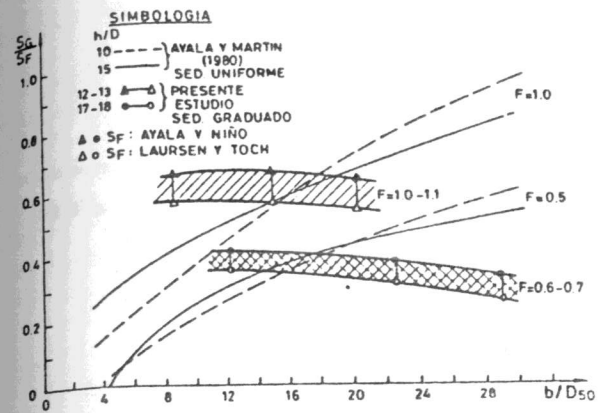


FIG. 6 RAZON ENTRE SOCAVACION MAXIMA EN LECHO GRUESO (S_g) Y EN LECHO FINO (S_f)

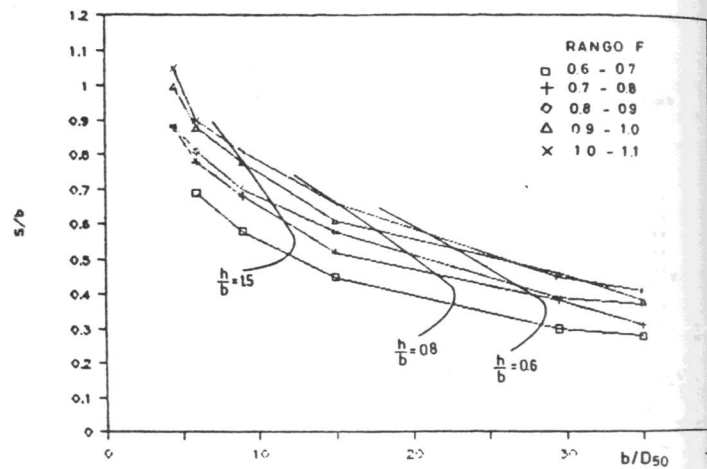


FIG. 5 ANALISIS DE DEPENDENCIA DE s/b CON b/D_{50}

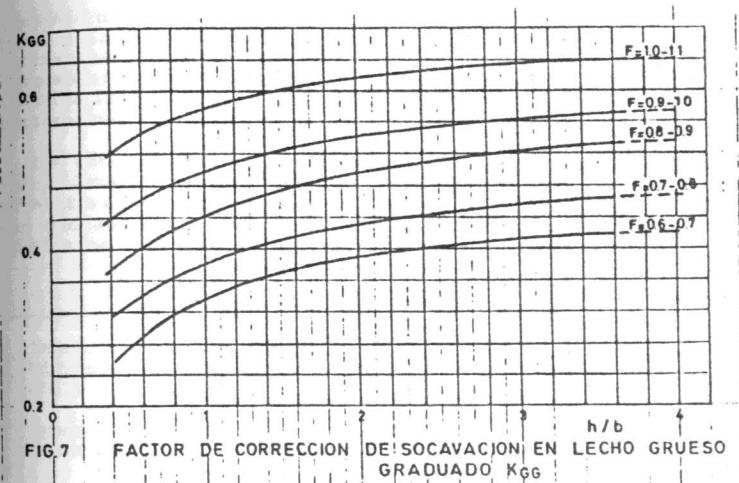


FIG. 7 FACTOR DE CORRECCION DE SOCAVACION EN LECHO GRUESO GRADUADO K_{gg}