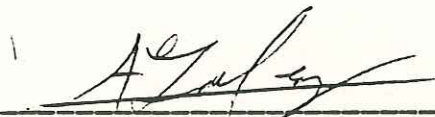


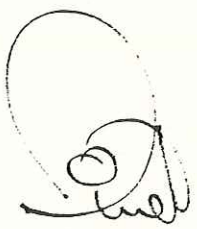
VARIACION DE LA ENERGIA DE OLEAJE
EN AGUAS SOMERAS

TESIS
QUE PRESENTA:

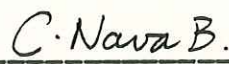
ALEJANDRO JOSE AYARZAGOITIA PEREZ




Presidente de Jurado
M.C. Adolfo Gonzalez Calvillo



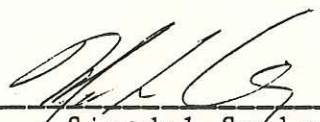
Sinodal Propietario
M.C. René Pinett Plasencia



Sinodal Propietario
M.C. Cuauhtemoc Nava B.



Sinodal Suplente
M.C. Luis Fok Pun



Sinodal Suplente
Oc. Modesto Ortiz F.

enero de 1985

BIBLIOTECA CENTRAL ENSENADA

RESUMEN

En el presente estudio se desarrolla una serie de experimentos en un canal de laboratorio con el fin de estudiar los mecanismos más importantes que intervienen en la disminución de la energía del oleaje, cuando este se aproxima a aguas someras.

Durante los experimentos, se seleccionaron 3 tipos diferentes de pendiente de playa y varios períodos de olas entre 0.42 y 1.2 s. Se empleó un método de registro mediante fotografía con el que se obtuvieron las alturas de ola y las longitudes de onda.

Se comparan las alturas de ola y las varianzas entre la región cercana y la más alejada de la zona de generación. Estos a su vez se comparan con los que predicen diferentes teorías.

A partir de los análisis espectrales, de alturas de ola y de varianzas, se encuentra que en algunos casos el efecto de disminución de la profundidad puede ser importante, sin embargo en los períodos grandes es más importante la fricción afectando en menor grado la variación de la profundidad y la disminución de la pendiente.

Al aplicar el método de Grosskopf (1980) a los datos obtenidos en el canal experimental se lograron resultados confiables sólo para pendientes de playa de $1/40$ y mediante el método de conservación de potencia se encuentra que la disipación de la energía de olas aumenta con el período y decrece al disminuir la pendiente de la playa. Mientras que los datos obtenidos en los experimentos del canal demuestran disipación de energía a medida que la ola avanza la teoría de Stokes muestra un aumento de energía. En todos los casos, la disipación por fricción es predominante sobre el efecto de disminución de la profundidad tanto para los experimentos con fricción simulada como sin ella.

A MIS PADRES

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis fue posible gracias al apoyo del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California, ya que forma parte del proyecto 'El Comportamiento del Oleaje en las Costas de Baja California y el Mar de Cortez', así mismo como al apoyo del M.C. Francisco J. Ocampo Torres y del M.C. Adolfo Gonzalez Calvillo.

El agradecimiento más sincero a todos los maestros y amigos que colaboraron a la realización de este estudio, especialmente a la Dra. Elizabeth Crellana, por sus puntuales comentarios.

INDICE GENERAL

1	INTRODUCCION.....	1
2	ANTECEDENTES.....	4
3	OBJETIVOS.....	9
4	MATERIALES Y METODOS.....	9
4.1	MATERIALES.....	9
4.2	DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	10
4.3	TOMA DE DATOS.....	12
4.4	PROCESAMIENTO DE DATOS.....	19
4.5	VARIANZA.....	21
4.6	VARIACION DE LA ALTURA DEL OLEAJE.....	24
4.7	TECNICAS DE COMPARACION ENTRE LAS TEORIAS.....	26
5	RESULTADOS.....	28
5.1	ESPECTRO DE NUMERO DE ONDA.....	28
5.2	VARIACION DE LA ALTURA.....	34
5.3	VARIANZAS.....	44
5.4	PREDICCIONES DE ALTURA DE OLA POR EL METODO DE.....	54
5.5	COMPARACIONES.....	59
6	DISCUSIONES.....	64
6.1	ESPECTRO DE NUMERO DE ONDA.....	64
6.2	VARIACION DE LA ALTURA DEL OLEAJE.....	65
6.3	VARIANZA.....	66
6.4	PREDICCIONES DE ALTURA DE OLA.....	67
6.5	COMPARACIONES.....	68
7	CONCLUSIONES.....	71
8	BIBLIOGRAFIA.....	73

1 INTRODUCCION

El estudio de la variación de la altura del oleaje que se aproxima a la costa tiene gran importancia tanto científica como económica por su aplicación en los diferentes campos de la oceanografía, ingeniería costera, procesos litorales, obras portuarias, protección de playas y estructuras en costa.

La fricción y disminución de la profundidad son las causas que contribuyen en mayor porcentaje a la variación de la altura del oleaje durante su aproximación a aguas poco profundas hasta antes de romper y es bien conocido que actúan sobre todo el espectro de número de onda. Se han obtenido algunas estimaciones de la importancia de estos mecanismos suponiendo una representación cuadrática de la fricción dada por Jonsson (1965) y por medio del análisis de Bretshneider y Reid (1954), que es una extensión del trabajo de Putnam y Johnson (1949) con el propósito de desarrollar fórmulas y gráficas que faciliten el cómputo de los cambios en la altura de la ola que resultan de los efectos combinados de fricción, percolación y refracción junto con el efecto directo de disminución de la profundidad.

Hay mecanismos que pueden ser muy importantes en la variación de la altura de las olas como lo reportan Shemdin et al. (1980), y Hsiao y Shemdin (1980), entre otros: fricción en el fondo, transformación de la altura de la ola por disminución de la profundidad (someramiento), movimiento inducido por la ola en el fondo, filtración (percolación), refracción e interacción ola-ola, estos mecanismos pueden ser de importancia en situaciones particulares.

Las suposiciones para las teorías matemáticas que estos autores usan son:

- a) la reflexión de la ola es insignificante.
- b) El tren de olas es monocromático.

El caso a) es fácil de conseguir en el laboratorio con tipos de playas de poca pendiente, pero en el caso b) es difícil conseguir una frecuencia constante de las olas incidentes en los experimentos de laboratorio, pues las olas son generadas con armónicos secundarios producidos por los generadores, difíciles de eliminar aún cuando se haya tomado gran cuidado en la generación. Las corrientes generadas por la ola, que a veces no son consideradas en la teoría, pueden ser un aspecto importante en la

disipación de energía de las olas (Stiassnie y Peregrine, 1980). Este mecanismo asociado a las corrientes puede aportar un 1% de la disipación y por lo tanto disminución de la altura de la ola, é incluir sus efectos en la predicción no sería cosa trivial.

Con este trabajo se pretende realizar un estudio en laboratorio de algunos de los mecanismos que afectan el espectro de número de onda, cuantificar las variaciones en la altura del oleaje debidas a los diferentes mecanismos y compararlos con los cambios que predicen diferentes teorías.

Este estudio es parte del proyecto EL COMPORTAMIENTO DEL OLEAJE EN LAS COSTAS DE BAJA CALIFORNIA Y EL MAR DE CORTEZ que se viene llevando a cabo en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas, cuyo fin es la aplicación de los resultados obtenidos a los datos de campo que se están obteniendo en la costa este de Baja California.

2 ANTECEDENTES

En base a los datos obtenidos de JONSWAP (Joint North Sea Wave Program), diferentes autores como Barnett et al. (1969) llegan a resultados satisfactorios en la predicción de oleaje en aguas someras en el mar del sur de China. Le Méhauté et al. (1968) realizaron una serie de experimentos de laboratorio con el fin de establecer las características principales de las olas en aguas poco profundas y tratar de simularlos mediante las diferentes teorías de olas. Se compararon los resultados experimentales con las predicciones de altura de oleaje de diferentes teorías, incluyendo aquellas comunmente usadas en ingeniería como las de Airy y Stokes, encontrando que ninguna resultó de exactitud a excepción de la teoría cnoidal de Keulegan y Patterson (1940) para el rango de longitudes de onda estudiadas. Hasselmann et al. (1973), Shemdin et al. (1980) y otros, han desarrollado trabajos sobre los mecanismos de transformación de oleaje en particular en aguas de profundidad finita. De entonces a la fecha este tema ha adquirido mayor importancia como sujeto de investigación con logros que se resumen en los trabajos de Stiassnie y Peregrine (1980) y Grosskopf (1980).

Putnam y Johnson (1949) desarrollaron una teoría para la pérdida de la energía de la ola por fricción en el fondo que se traduce en disminución de altura cuando la ola se aproxima a la costa, hasta poco antes de la rompiente y muestran por medio de ejemplos numéricos que dicha reducción puede ser hasta del 30% aproximadamente en playas con muy poca pendiente. La disminución de la altura está asociada a la velocidad de las partículas de agua en el fondo. Las partículas describen un movimiento horizontal hacia adelante y hacia atrás con respecto a la dirección en que la ola avanza. El movimiento horizontal es generado por la ola a su paso y es obstaculizado por el roce con el fondo. El rozamiento de las partículas de agua con el fondo es mayor cuando la rugosidad del fondo aumenta.

El mecanismo de fricción en el fondo es el más estudiado de los mecanismos de interacción con el fondo y es dominante sobre los demás mecanismos de disipación cuando el suelo está compuesto por arena de diámetro 0.1-0.4 mm donde la poca permeabilidad evita la filtración, y la fricción granular previene el comportamiento de flujo viscoso.

El esfuerzo cortante del fondo se define comunmente como:

$$\tau = C_f \rho |U| U$$

donde ρ es la densidad del agua, U es la velocidad orbital en la frontera con el fondo, y C_f un coeficiente de fricción. El efecto de fricción con el fondo se observa desde que la profundidad es menor que $L/2$, donde L es la longitud de onda. Para encontrar el coeficiente de fricción se utiliza el diagrama de Jonsson (1965) a partir de diferentes condiciones de rugosidad del fondo.

Stiassnie y Peregrine (1980) presentan un estudio matemático de la disminución de la altura de las olas que viajan hacia la costa sobre una playa que disminuye lentamente en profundidad. En su análisis hacen uso de dos métodos de predicción de altura de las olas, uno para trenes de olas (Cokelet 1967) que es una extensión de la aproximación de Stokes y otro para ondas 'largas' (Longuet-Higgins y Fenton 1974), que se basa en la solución de la onda solitaria, por medio de los cuales observan una disminución en la altura de la ola cuando esta llega a aguas poco profundas hasta un punto en el cual la altura de la ola comienza a aumentar cerca de la zona de rompiente. Los resultados de Stiassnie y

Peregrine representan una buena aproximación al comportamiento real del perfil de la ola, aún cuando ninguno de los dos métodos incluyen disipación.

El mecanismo de transformación de olas también ha sido estudiado por diversos autores como Le Méhauté y Webb (1964), Mash (1964), y Koh y Le Méhauté (1966). El método de conservación de potencia es uno de los métodos aproximados para el cálculo de la transformación de un tren de olas que se propaga en dirección a la costa y las diferencias entre éstos investigadores se deben a las diferentes aproximaciones consideradas para el tren de olas. Una de las aproximaciones es la de una ola lineal progresiva, en este caso el coeficiente de disminución de profundidad es H_i/H_0 , que es función de la profundidad adimensional d/L y puede ser encontrado en la mayoría de los libros de texto en Hidráulica o Ingeniería Costera (Shore Protection Manual, 1980), donde: H_i es la altura de ola en el i ésimo orden de aproximación (H_i corresponde a la aproximación lineal y H_0 la altura de las olas en aguas profundas), d es la profundidad y L la longitud de onda.

Tomando la teoría de olas de 3er orden de Stokes

(Skjelbreia y Hendrickson 1960), Le Méhauté y Webb (1964) calcularon la transformación de la altura de las olas y sus resultados indican un coeficiente de disminución de la profundidad (H_1/H_0) mayor que el predicho por la teoría lineal donde la desviación se incrementa con el aumento de la altura de ola para aguas profundas, lo que indica que es necesario poner cuidado al aplicar la teoría lineal y que es necesario más trabajo para encontrar un coeficiente de disminución de profundidad más uniforme.

Koh y Le Méhauté (1966) trabajaron con la teoría de oleaje de 5to orden de Stokes (Skjelbreia y Hendrickson 1960) y concluyen que esta es la mejor predicción para aguas relativamente profundas ($d/L < 0.25$), no así para aguas muy someras ($d/L < 0.01$) en que la mejor aproximación será la de la teoría lineal y para una profundidad intermedia la aproximación de la teoría de 3er orden es la mejor.

3 OBJETIVOS

Diseñar un experimento para estudiar en el laboratorio los efectos de fricción y de disminución de la profundidad sobre el espectro de número de onda. Cuantificar la variación de la altura del oleaje, y comparar los resultados con la teoría de Stokes y de conservación de potencia (Shore Protection Manual, 1979).

4 MATERIALES Y METODOS

4.1 MATERIALES

El equipo que se utilizó para la realización de los experimentos y el procesamiento de registros fue:

- 1.- Canal de Olas
- 2.- Cámaras fotográficas Nikon F3 c/tripie
- 3.- Reglas y estadales
- 4.- Digitizador TEKTRONIX 450
- 5.- Sistema de computación PRIME 750 y PRIME 400.
- 6.- Materiales diversos como madera, estructuras de aluminio, redes, etc.

4.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El canal de olas es la parte principal de este experimento por lo que se da una descripción detallada de este.

El canal es un 'estanque' (fig. 1) con dimensiones de 13.5 m x 0.3 m x 0.5 m y paredes de cristal de 1.5 cm de espesor. Este canal se encuentra en el laboratorio de Oceanografía Física de la Escuela Superior de Ciencias Marinas.

Con el fin de simular los fenómenos físicos de interés para este estudio se construyó una playa de madera de 12 m de largo la cual, por medio de unos sujetadores, se puede subir ó bajar para simular mayor ó menor pendiente.

La rugosidad se varió introduciendo mallas de tejido conocido. En la bibliografía no se encuentra citado otro medio de simular fricción que no sea con arena colocada dentro del canal, sin embargo, al introducir una red de hilos de grueso conocido, suponemos una misma relación de fricción dado que para encontrar el factor de fricción, lo

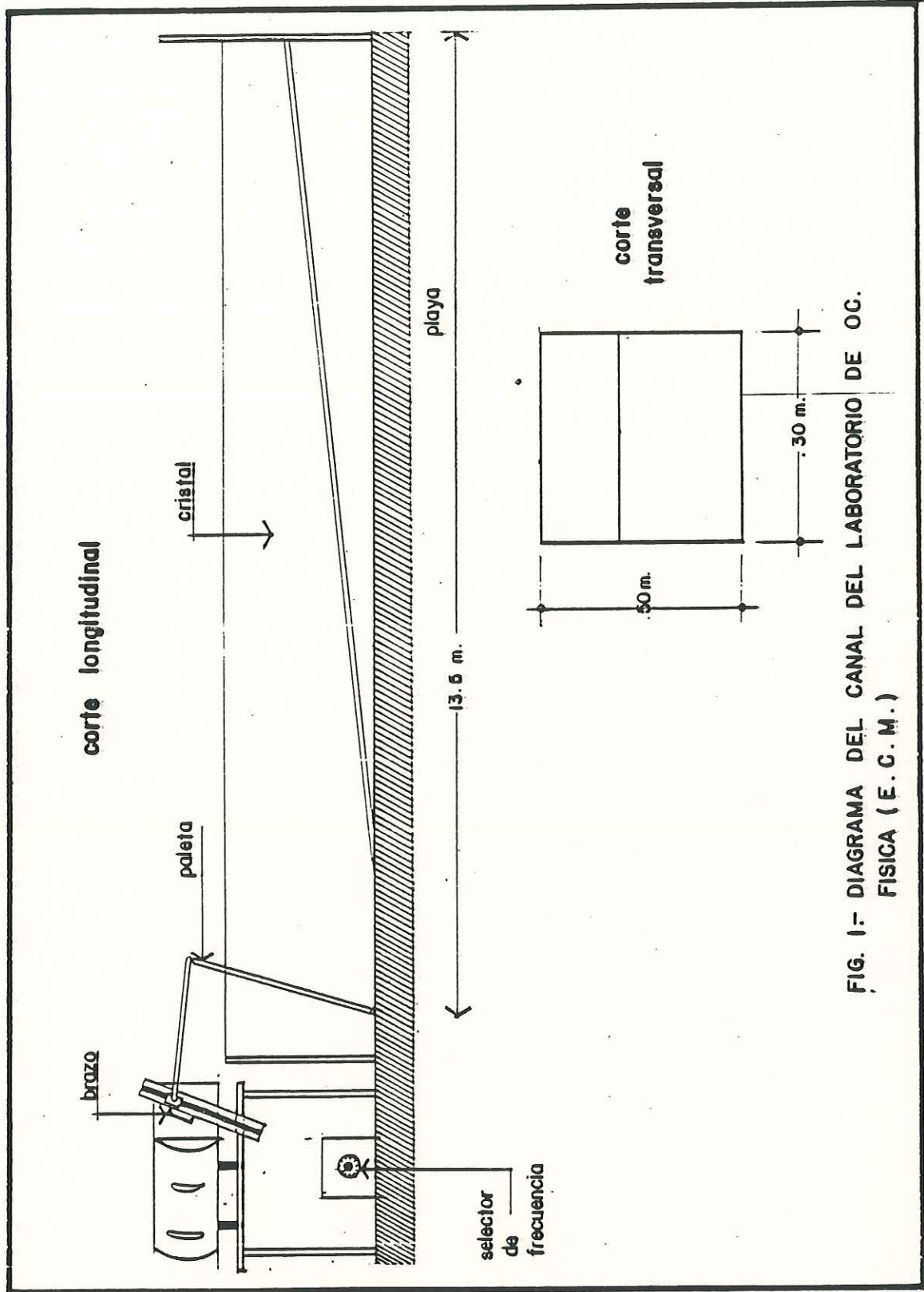


FIG. 1:- DIAGRAMA DEL CANAL DEL LABORATORIO DE OC.
FISICA (E. C. M.)

único que se toma en cuenta con respecto al tipo de suelo, es el tamaño de grano.

El oleaje se genera por medio de un motor eléctrico colocado en un extremo del canal que mueve una paleta generando con ello el oleaje. Las características del oleaje pueden ser variadas mediante un regulador de voltaje que aumenta o disminuye el número de revoluciones por minuto del generador. El brazo de palanca regula la amplitud de las olas (de manera no lineal).

4.3 TOMA DE DATOS

En la figura 2 se muestra un diagrama que indica la secuencia con que se llevó a cabo el trabajo.

Se realizaron experimentos para dos tipos de rugosidad con las tres pendientes de playa ($1/50$, $1/40$ y $1/33$) y para períodos de las olas entre 0.4 y 1.2 seg. Los tipos de rugosidad empleados fueron: uno simulando fricción casi nula con la playa de madera cubierta con una capa lisa de pintura, y otro incluyendo una red con hilos de 0.83 mm para simular mayor fricción.

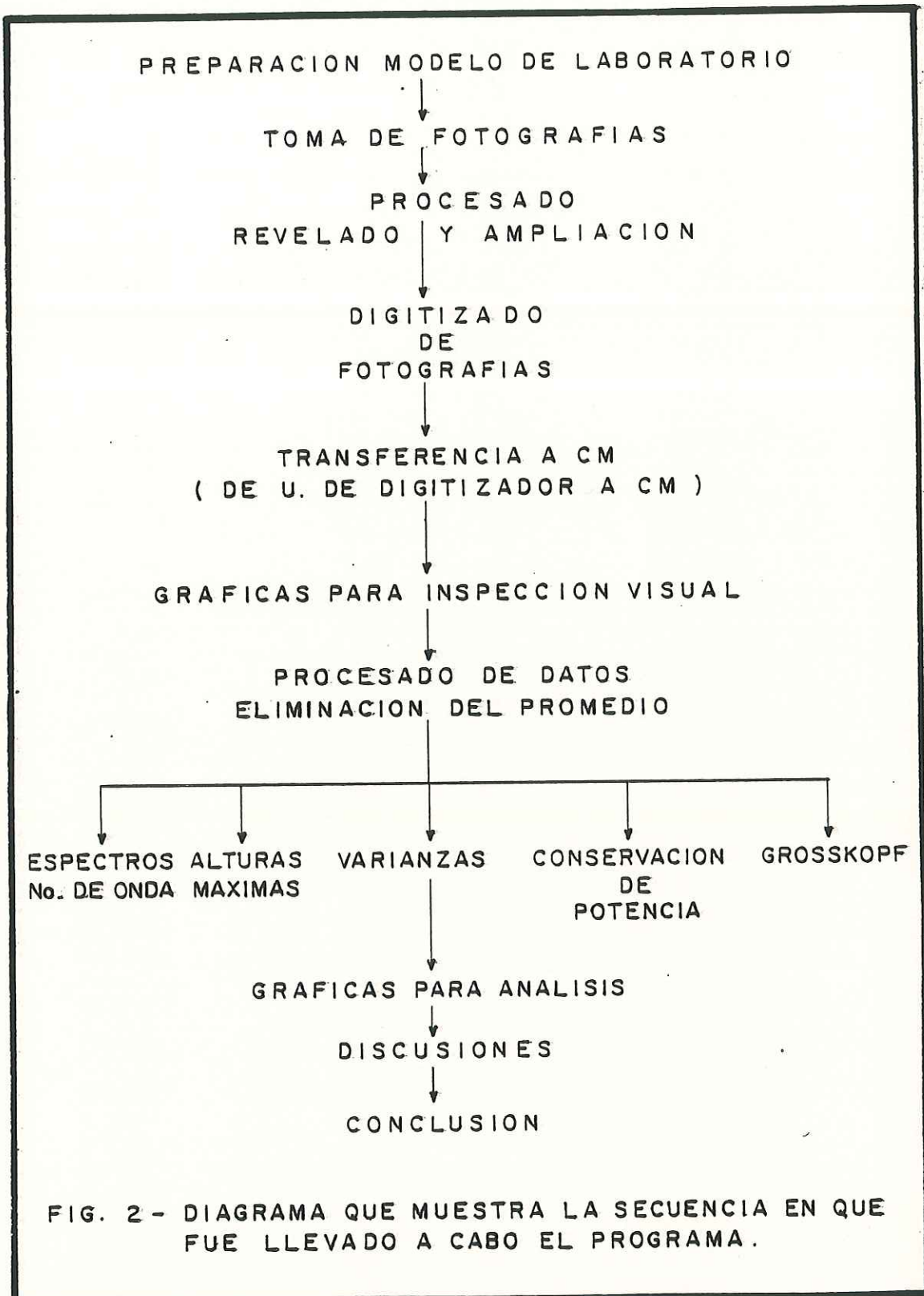


FIG. 2 - DIAGRAMA QUE MUESTRA LA SECUENCIA EN QUE FUE LLEVADO A CABO EL PROGRAMA.

En la tabla I se resúmen los 40 experimentos realizados y la correspondiente altura en cm de ola promedio en la región más cercana al generador. En esta tabla T es el período de la ola en segundos y B el brazo de palanca en centímetros.

Con el fin de obtener toda una secuencia de la trayectoria de la ola a lo largo del canal se tomaron fotografías. Se puede abarcar gran parte del tren de olas generado y obtener directamente la variación del perfil en función de la distancia. A pesar de ser un método relativamente sencillo es muy poco usado.

Se buscó que la cámara abarcara la mayor distancia posible a lo largo del canal sin que hubiera problemas por una deformación en los extremos de la foto. Esto se logró usando un lente de 35 mm a una distancia del canal de aproximadamente 2.5 m. Cada foto abarca una extensión del tren de olas de 3.00 m de longitud aproximadamente. En la figura 3 se muestra como un ejemplo, dos de las fotografías obtenidas en donde se puede observar el estado de referencia en la parte superior y la casi nula deformación de la imagen en los extremos.

TABLA I .- Alturas promedio en cm cerca del generador para los experimentos realizados en el canal de olas donde: T, es el periodo en segundos y B, el brazo de palanca del generador de olas en cm.

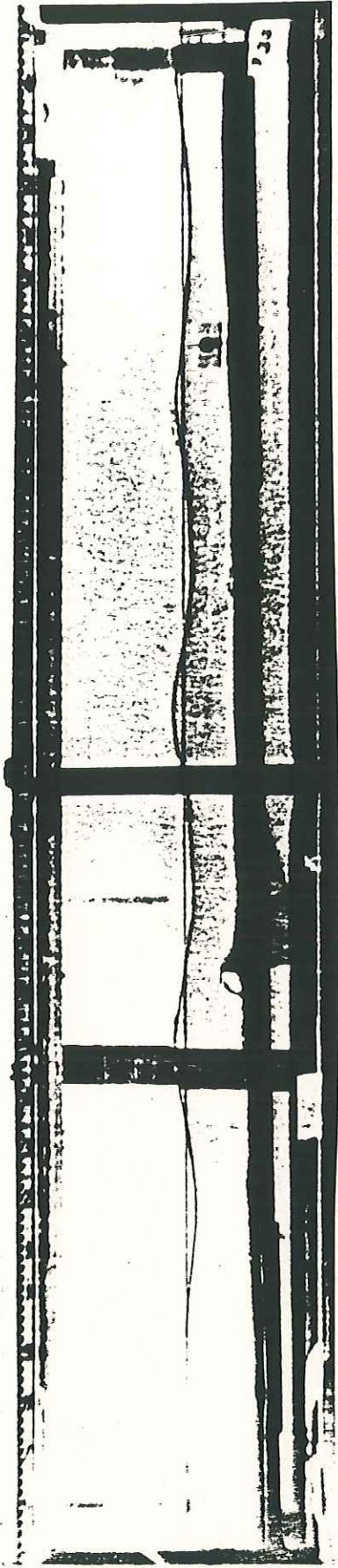
SIN FRICCION

		PENDIENTE 1/50			PENDIENTE 1/40			PEND 1/33
T(s) \ B(cm)	10	15	20	10	15	20	20	
0.42	3.5	3.6	3.1					
0.6		3.9	3.5	6.0				
0.7	2.7	4.2	3.9	6.5	6.8			
0.8				7.2	7.7	7.9	4.4	
1.0					6.4	6.7	6.1	
1.2					5.2		3.9	

CON FRICCION

		PENDIENTE 1/50			PENDIENTE 1/40			PEND 1/33
T(s) \ B(cm)	10	15	20	10	15	20	20	
0.42	4.7	4.4	4.3					
0.6		5.5	5.3	5.0				
0.7	5.3	6.9	5.8	7.4	6.6			
0.8				6.2	9.0	8.1	4.2	
1.0					7.2	7.8	5.7	
1.2					5.2		4.8	

a)



b)

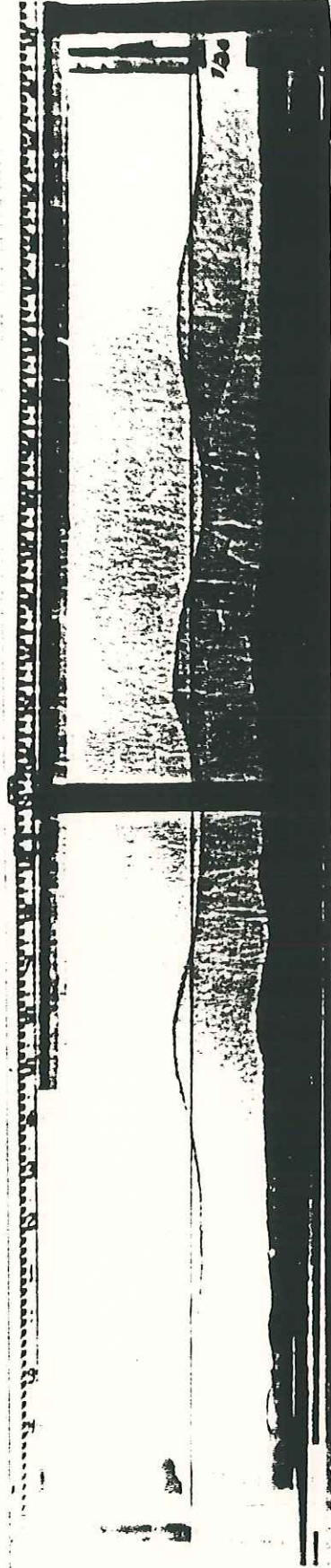


Figura 3.- Fotografias de uno de los experimentos en dos regiones del canal: a) cerca del generador, b) lejos del generador.

Una vez seleccionada la frecuencia del oleaje y el brazo de palanca, la fotografía se tomó poco después de hacer funcionar el generador (10-15 seg), es decir después de que el oleaje se estabilizó, y antes de que hubiera efectos considerables de reflexión.

En los experimentos con menor pendiente de playa se tomaron fotografías en 3 lugares diferentes del canal con el objeto de abarcar toda la trayectoria de la ola. En el experimento de mayor pendiente se completó el total del trayecto de la ola con dos fotografías. Para el experimento con pendiente media fue posible abarcar la secuencia con dos fotografías, una al inicio de la trayectoria y otra al final.

Durante el desarrollo de los experimentos, se contó con una sola cámara, lo que impedía tomar las fotografías en las diferentes regiones del canal en forma simultánea, por lo que en una posición de la cámara se hacían todas las variaciones de período y brazo de palanca (amplitud de la ola). Posteriormente se procedía a mover la cámara de lugar y repetir las condiciones.

No fue posible tomar más que un juego de fotografías

por cada experimento, por lo que, desde este momento asumimos que son representativas, sin menospreciar los errores a que esta suposición puede dar lugar.

El identificado de la fotografía se logró colocando una tarjeta en una esquina del cristal donde están escritos el número del selector de frecuencia y la longitud del brazo de palanca.

Para facilitar la digitización y procesamiento de los datos, se colocó un cordón que marca el nivel del agua en el canal cuando esta se encuentra en reposo.

Las fotografías reveladas se amplificaron a 24x5cm (fig. 3) y la digitización se realizó por medio de un digitizador electrónico propiedad del CICESE que puede determinar la posición de la superficie del agua en forma de coordenadas X e Y en unidades arbitrarias con un error de ± 0.0127 mm en fotografía, equivalentes aproximadamente a ± 0.16 cm reales.

Una vez almacenados los datos en la memoria de la microcomputadora, fueron transferidos a la PR1ME 750 para su procesamiento.

4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos del digitizador fueron transformados a cm y después graficados con el fin de hacer una revisión visual y las correcciones pertinentes en su caso. En la figura 4 se muestra un ejemplo de las gráficas, en donde estan incluidas las fotografías tomadas en las tres regiones del canal.

El procesamiento de los datos consistió en la obtención de los espectros por medio de la transformada rápida de fourier (TRF), que por ser datos de altura contra distancia, al espectro obtenido se le llama espectro de número de onda, de tal manera que para cada 200 datos se obtuvo un espectro de número de onda.

Físicamente el espectro de número de onda $S(k)$, representa la distribución de energía en el dominio de número de onda y se define como la transformada de Fourier de la función de autocorrelación (Bendat y Piersol, 1973).

La autocorrelación, $R(z)$, de una serie de datos unidireccional $\eta(x)$, se define como el promedio de su producto consigo mismo desfasado una distancia z sobre el

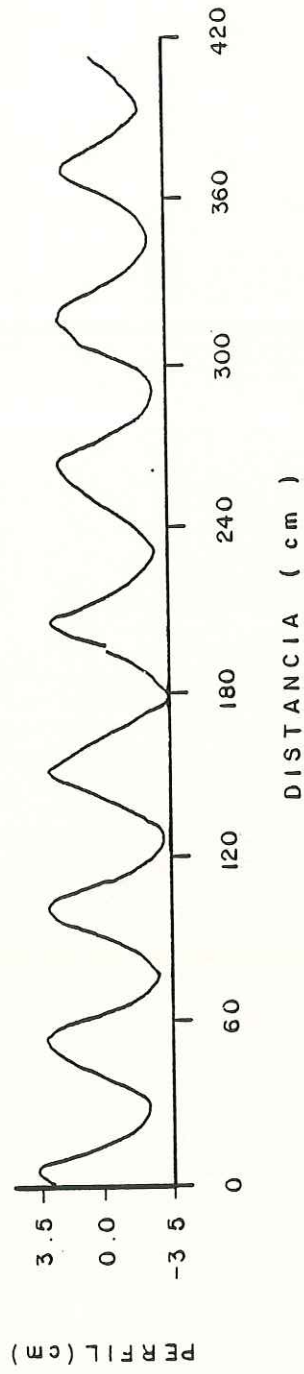


FIG. 4- PERFIL TIPOICO DE LA OLA DESPUES DE DIGITIZADA Y CORREGIDA A CENTIMETROS (LA GRAFICA CORRESPONDE AL EXPERIMENTO $T = 0.7s$ $B = 15$ cm Y $M = 1/40$ CON FRICCIÓN DE LA TABLA I)

intervalo de observaciones, y se denota como:

$$R(z) = 1/L \int_0^L \eta(x) \eta(x+z) dx$$

Consecuentemente el espectro de número de onda de una serie espacial $\eta(x)$ está dada por:

$$S(k) = \int_{-\infty}^{\infty} R(z) \exp[-i 2kz] dz$$

Puesto que la autocorrelación $R(z)$, es una función simétrica en el dominio del espacio z , es común considerar al espectro definido solo en los números de onda positivos.

4.5 VARIANZA

La varianza de la serie está dada por:

$$\sigma^2 = \lim_{L \rightarrow \infty} 1/L \int_0^L [\eta(x) - \bar{\eta}(x)]^2 ; \quad \bar{\eta} = 0$$

Esto es, la intensidad de cualquier proceso estocástico puede ser descrito en términos del valor cuadrático medio el cual es simplemente el promedio de los valores cuadrados de su comportamiento y está dado por η^2 . Es

común pensar en una serie de valores físicos como una combinación de una componente estática y una fluctuante. La componente estática puede ser descrita por el valor medio, el cual es simplemente el promedio de todos los valores y está dado por $\bar{\eta}$ y la componente dinámica es la varianza (σ^2), la cual es el valor cuadrático medio de las desviaciones con respecto a $\bar{\eta}$, por lo que da una idea de la energía del oleaje.

Aunque la generación del oleaje en el canal de olas nos hace suponer un proceso determinístico, las características del canal, la playa y la paleta con que se genera el oleaje, provocan armónicos secundarios y así lo reportan Stiassnie y Peregrine (1980) al comparar sus resultados con los de Hansen y Svendsen (1979), por lo que al analizar nuestros datos, asumimos características de un proceso estocástico.

Se empleó un programa de computación en base a la Transformada Rápida de Fourier (TRF) para estimar los espectros de número de onda de cada uno de los registros de las olas. Mediante esta información se estima la longitud de onda predominante para cada registro.

Los espectros fueron estimados con 100 bandas a partir de $N=200$ datos; los que después de sustraerseles el promedio son aumentados a 256 que es la potencia de 2 más cercana.

Se utilizó un número de bandas igual a $N/2$ para obtener una estimación lo más cercana posible de la longitud de la ola y no la cantidad exacta de su energía por banda. Una idea de la energía total de las olas, se obtiene mediante la estimación de la varianza del registro.

Se utiliza $1/L$ en vez de k pero se le sigue llamando número de onda.

El intervalo Δx entre los datos varia entre 1.25 y 1.32, por lo que la 'frecuencia de Nyquist' (No. de Nyquist ó $NNyq$) se calcula a partir de:

$$NNyq = 1/2\Delta x$$

y la longitud de onda se calcula particularmente para cada experimento por medio de cada Δx .

4.6 VARIACION DE LA ALTURA DEL OLEAJE

A los datos del perfil de las olas, se les resto el promedio y mediante un programa de computación, se encontraron las amplitudes promedio de las olas.

Las amplitudes promedio encontradas en cada fotografía, fueron multiplicadas por dos para encontrar la altura de ola promedio sobre toda la región.

Con el fin de tener un modelo de comparación, se implementó un programa de computación de predicción de alturas de ola basada en los valores de los coeficientes de fricción y de disminución de la profundidad (shoaling). El programa tiene como datos de entrada la altura de la ola al inicio (H_1), el período de la ola, la pendiente de la playa y la profundidad al inicio y al final de la trayectoria.

El decaimiento es simulado por medio de la ecuación dada por Grosskopf (1980) y proporciona como resultado la altura de la ola en cualquier punto:

$$H_2 = K_s H_1 \left(C_f \frac{H_1}{m T^2} + 1 \right)^{-1}$$

donde H_1 , es la altura de la ola en la región cercana al generador; C_f es el coeficiente de fricción dado en el diagrama de Jonsson(1965); m , es la pendiente de la playa; K_s , es el coeficiente de disminución de la profundidad que está dado por:

$$K_s = \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \left[1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh\frac{4\pi d}{L}} \right]^{-\frac{1}{2}}$$

y por ultimo el parametro θ se encuentra a partir de las gráficas que presenta Grosskopf (1980). Grosskopf calcula θ a partir de los datos obtenidos por dos boyas que miden altura de oleaje, las dos colocadas en una línea perpendicular a la costa, sobre un fondo impermeable y de pendiente constante, encontró que el método aplicado corresponde con los datos especialmente cuando se presenta un espectro angosto y con un solo pico. Sin embargo, Grosskopf encontró que el método tiene un error grande cuando en la zona de estudio se encuentran estructuras hechas por el hombre (rompeolas, muelles, etc.) o la batimetría es muy irregular.

El coeficiente de fricción se obtiene del diagrama de Jonsson(1965) y Kamphius(1975) en función del número de Reynolds

$$Re = \frac{U_b A}{\nu}$$

donde ν es la viscosidad del agua; U_b , una velocidad típica, dada por la velocidad horizontal máxima de las partículas en el fondo, y esta dada por

$$U_b = \frac{\pi H}{T \operatorname{senh} \frac{2\pi d}{L}}$$

A es una longitud típica, dada por el desplazamiento horizontal de las partículas de agua:

$$A = \frac{H}{2 \operatorname{senh} \frac{2\pi d}{L}}$$

la rugosidad relativa es igual a A/δ_s , donde δ_s es igual al diámetro promedio de las irregularidades del fondo.

4.7 TECNICAS DE COMPARACION ENTRE LAS TEORIAS

Con el fin de estudiar más de cerca la variación de la altura de las olas generadas en el laboratorio, se implementó un programa de computación, (utilizando la teoría de Stokes de 3er orden) que es la que recomienda Koh y Le Méhauté (1966).

Puesto que la teoría de Stokes no incluye disipación, sino únicamente disminución de la profundidad, las alturas de las olas al final de la playa deben ser mayores que al principio de ésta. Se hicieron las siguientes comparaciones a partir del método de conservación de potencia:

- 1.- Porcentaje de variación de la energía del oleaje por cambio de profundidad; comparando la energía de la ola estimada mediante la teoría de Stokes de 3er orden al principio y al final de la playa.
- 2.- Porcentaje de variación de energía del oleaje; comparando la energía estimada con la teoría de Stokes de 3er orden al principio y al final de la playa, utilizando en la teoría de Stokes las longitudes de onda obtenidas a partir de los espectros.
- 3.- Porcentaje de variación de energía del oleaje ocurrido realmente, a partir de los datos obtenidos en el canal (por medio de las fotografías), al principio y al final de la playa.

5 RESULTADOS

Los 40 experimentos analizados proporcionaron más de 19200 datos, a partir de los cuales se estimaron los espectros de número de onda para cada uno de los experimentos en dos regiones: una al inicio de la playa y otra al final de ésta.

5.1 ESPECTRO DE NUMERO DE ONDA

En la fig. 5 se muestra un ejemplo típico de los espectros donde se puede observar un corrimiento de la región de máxima densidad espectral, hacia los números de onda mayores: es decir, la longitud de la onda muestra una disminución cuando la ola se aproxima a aguas de menor profundidad. En las gráficas de la figura 6, se observa el corrimiento de la banda de número de onda a medida que la ola avanza hacia la playa. Cada gráfica representa un mismo período y pendiente de playa y la diferencia entre una y otra curva es la amplitud del brazo de palanca del generador de olas denotado por B10, B15, ó B20 y si el experimento se realizó con fricción, se incluye una F. En algunos casos, a partir de un espectro angosto cerca de la zona de generación, se observa un ensanchamiento en el

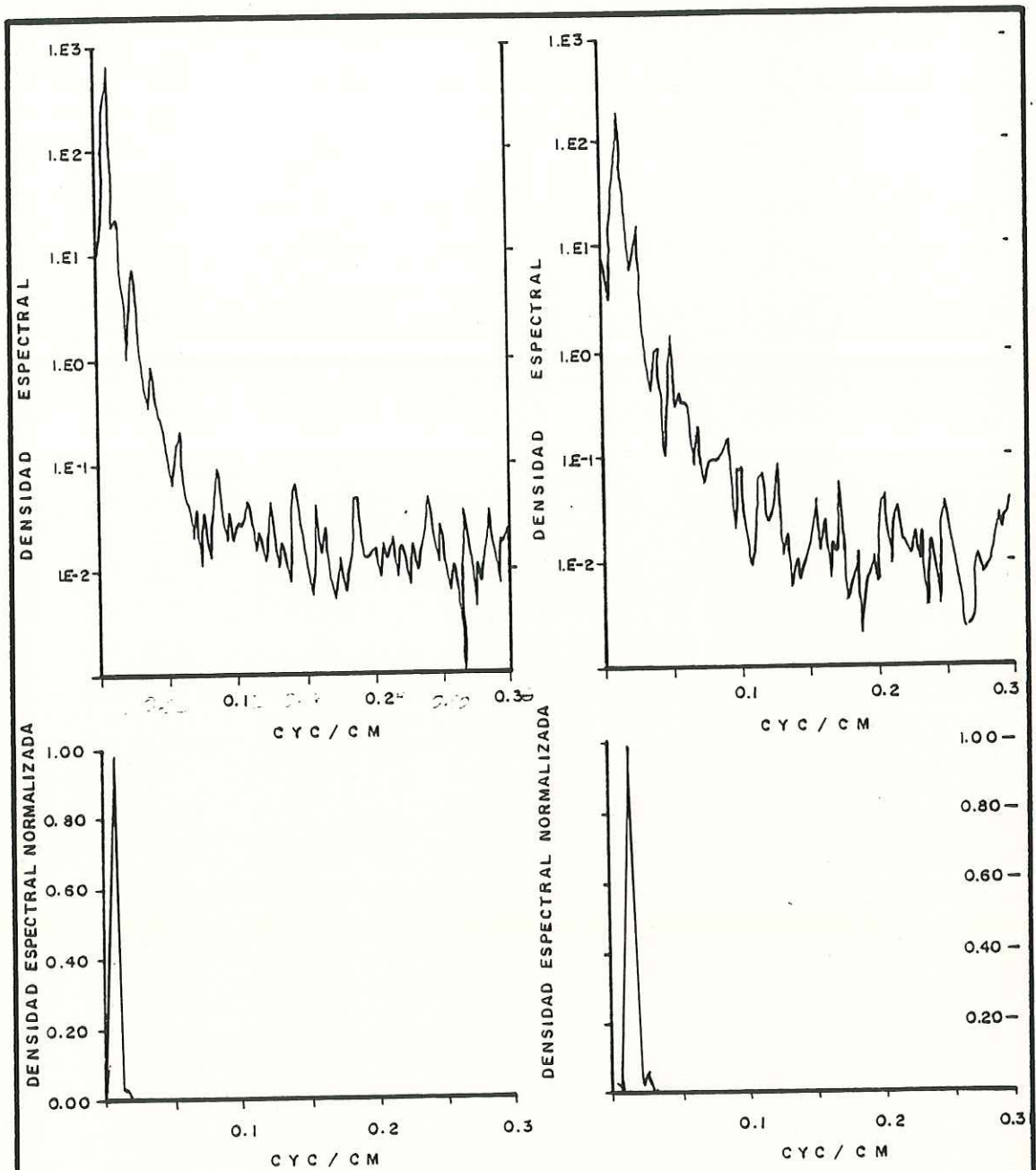
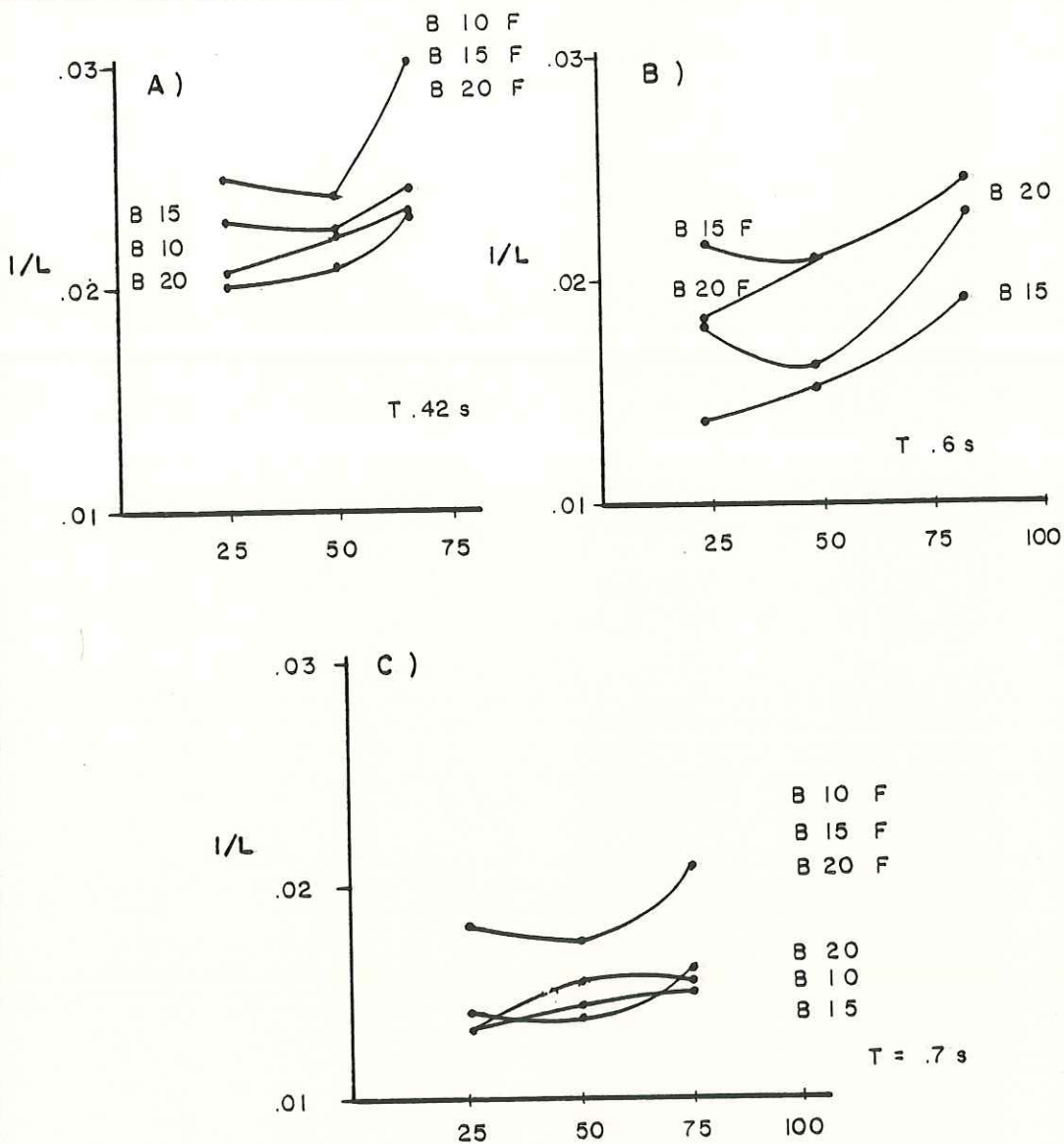
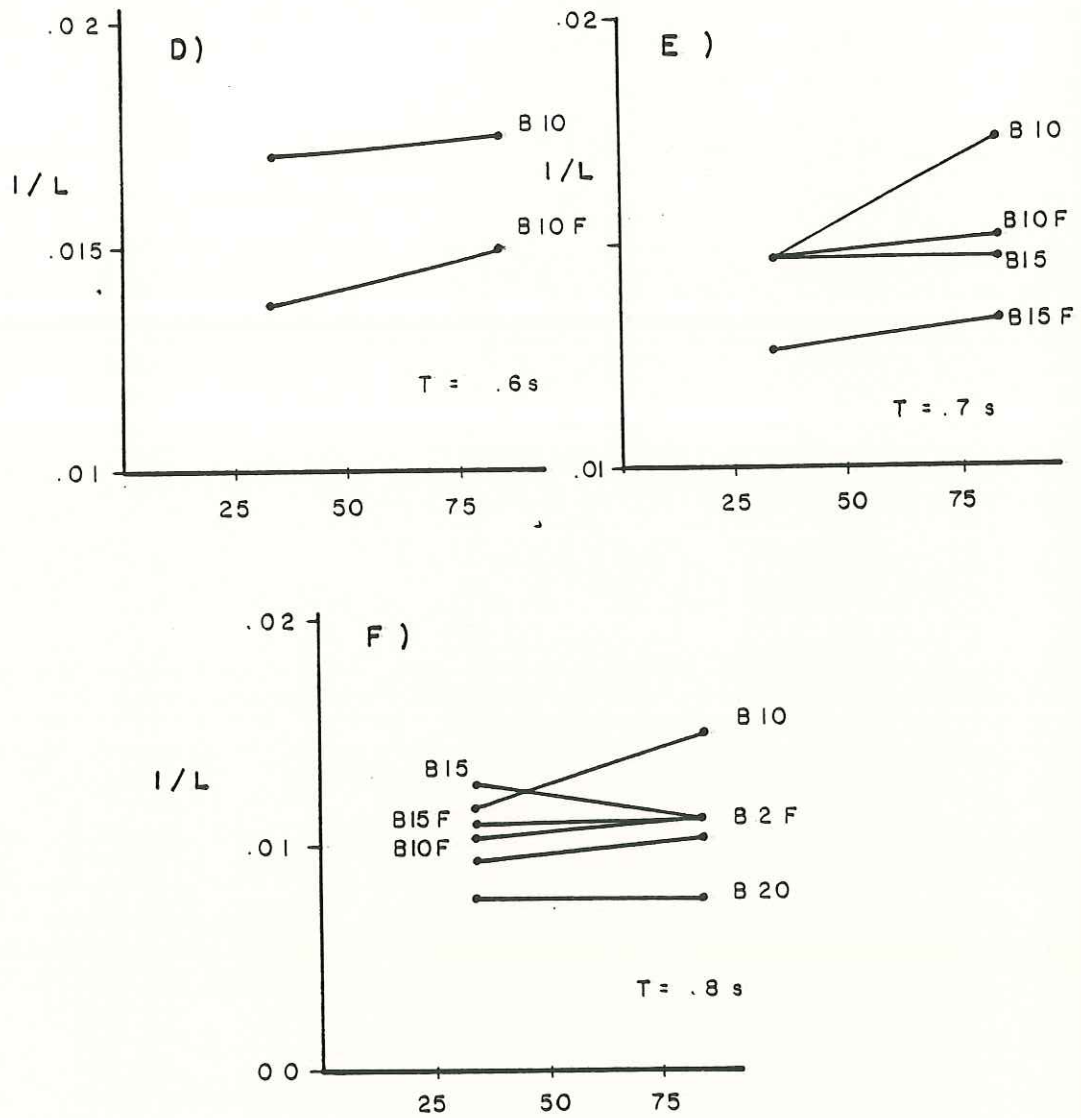


FIG.5 - ESPECTROS TÍPICOS DE NÚMERO DE ONDA DE LAS SERIES; ARRIBA, ESPECTROS EN DOS LUGARES EN EL CANAL; ABAJO, LOS ESPECTROS NORMALIZADOS DE LOS MISMOS. IZQUIERDA, CERCA DEL GENERADOR; DERECHA, CERCA DE LA PLAYA.



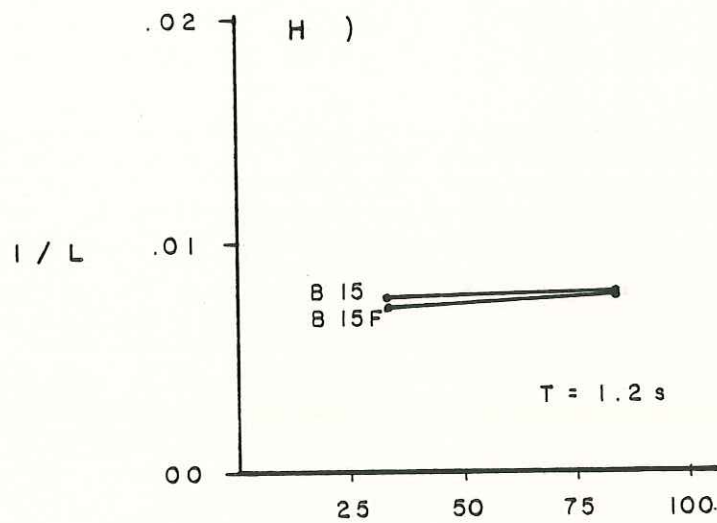
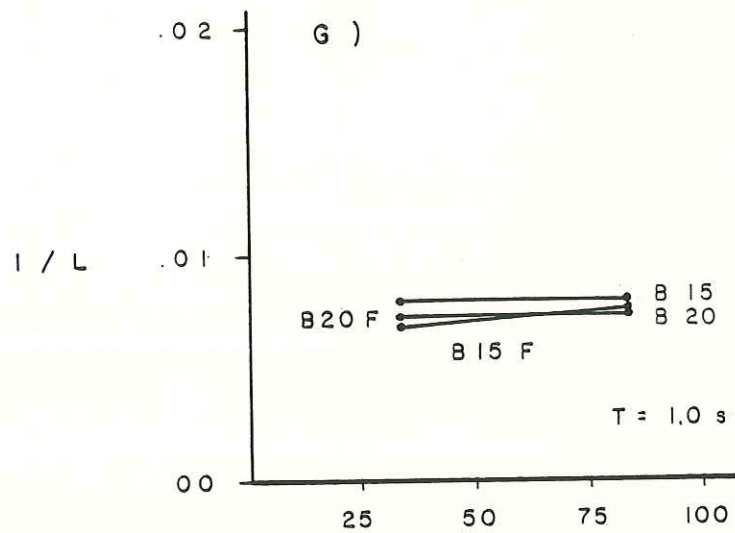
PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LA GENERACION

FIG. 6 - GRAFICAS DE $1/L$ CONTRA PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LOS ESPECTROS; PARA PENDIENTE $M = 1/50$, DONDE B ES EL BRAZO DE PALANCA DADO EN LA TABLA I Y F ES CUANDO EL EXPERIMENTO SE LLEVO A CABO CON - FRICCION .



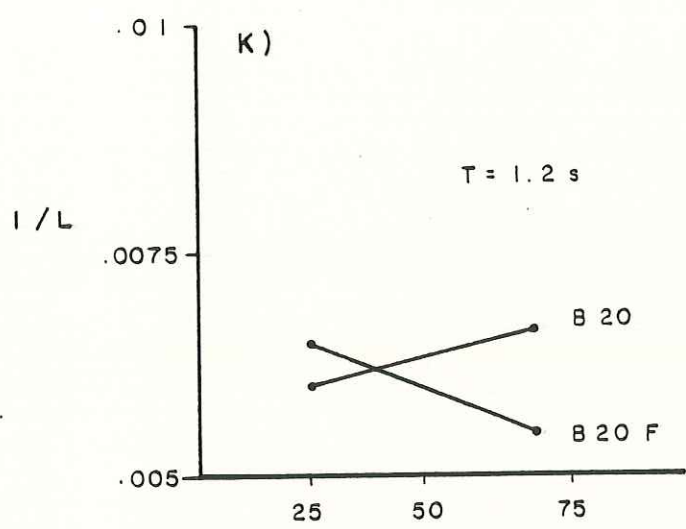
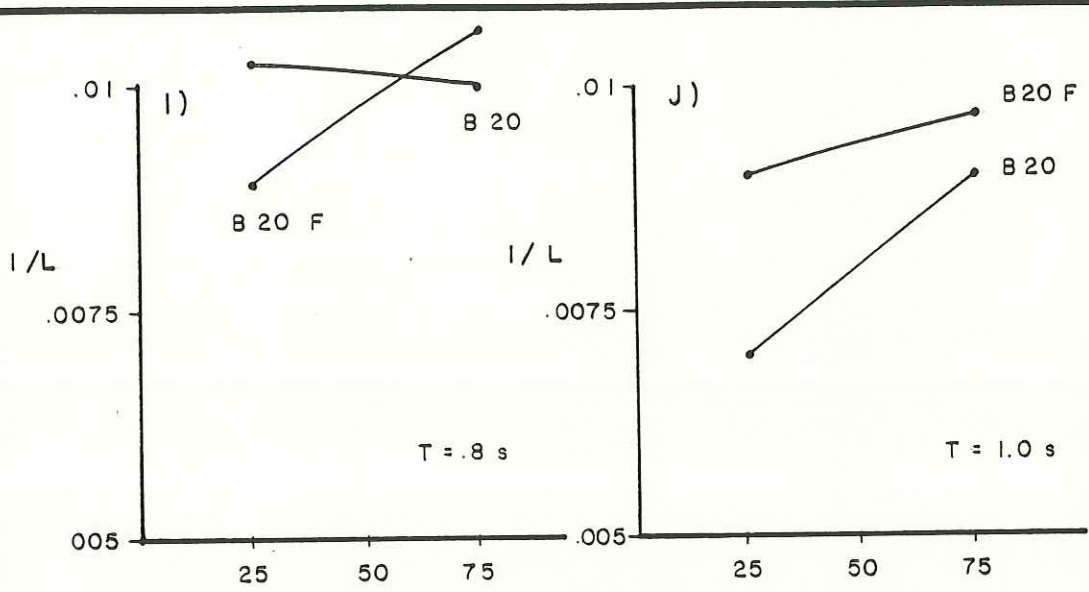
PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LA GENERACION

FIG. 6- GRAFICAS DE $1/L$ CONTRA PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LOS ESPECTROS PARA LA PENDIENTE $M = 1/40$, DONDE B ES EL BRAZO DE PALANCA Y F ES CUANDO EL EXPERIMENTO SE LLEVO A CABO CON FRICCIÓN.



PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LA GENERACION

FIG. 6 - GRAFICA DE I / L CONTRA PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LOS ESPECTROS PARA LA PENDIENTE $M = 1 / 40$, DONDE B ES EL BRAZO DE PALANCA Y F ES CUANDO EL EXPERIMENTO SE LLEVO A CABO CON FRICCIÓN.



PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LA GENERACION

FIG. 6- GRAFICAS DE $1/L$ CONTRA PORCIENTO DE RECORRIDO A PARTIR DE LOS ESPECTROS . PARA LA PENDIENTE $M = 1/33$, DONDE B ES EL BRAZO DE PALANCA Y F ES CUANDO EL EXPERIMENTO SE LLEVO A CABO CON FRICCIÓN.

espectro estimado en el punto más alejado de la zona de generación, correspondiente entre una y tres bandas (.01 a .03 cm^{-1}).

5.2 VARIACION DE LA ALTURA

En las figuras 7 a la 13, se presentan las gráficas de las alturas de la ola, en función de la distancia a lo largo del canal (el origen de cada trayectoria es diferente para cada fotografía). Estos resultados demuestran invariablemente una disminución de las alturas al disminuir la profundidad para los diferentes períodos y pendientes.

En las figuras 7, 8 y 9 que corresponden a la pendiente M_1 , sin y con fricción, y cada una a olas de un mismo período, se puede observar una mayor tendencia lineal entre las curvas de los experimentos sin fricción que en los mismos con fricción. Todas las curvas presentan mayor pendiente en el caso con fricción.

Las figuras 10, 11 y 12 corresponden a los experimentos con pendiente de playa $M_2=1/40$. En los casos sin fricción hay menor pendiente en la altura que en

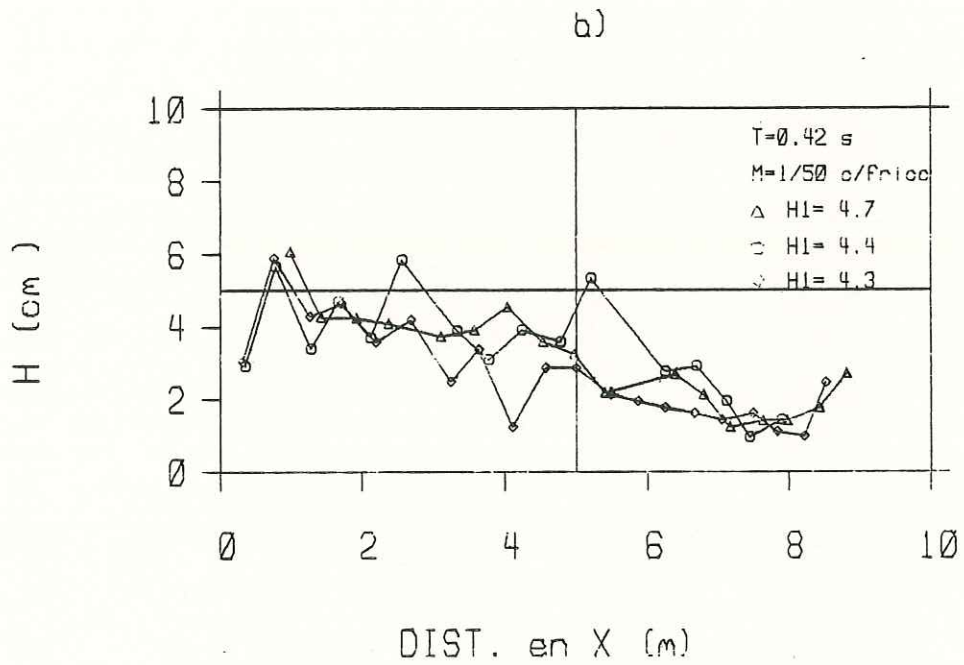
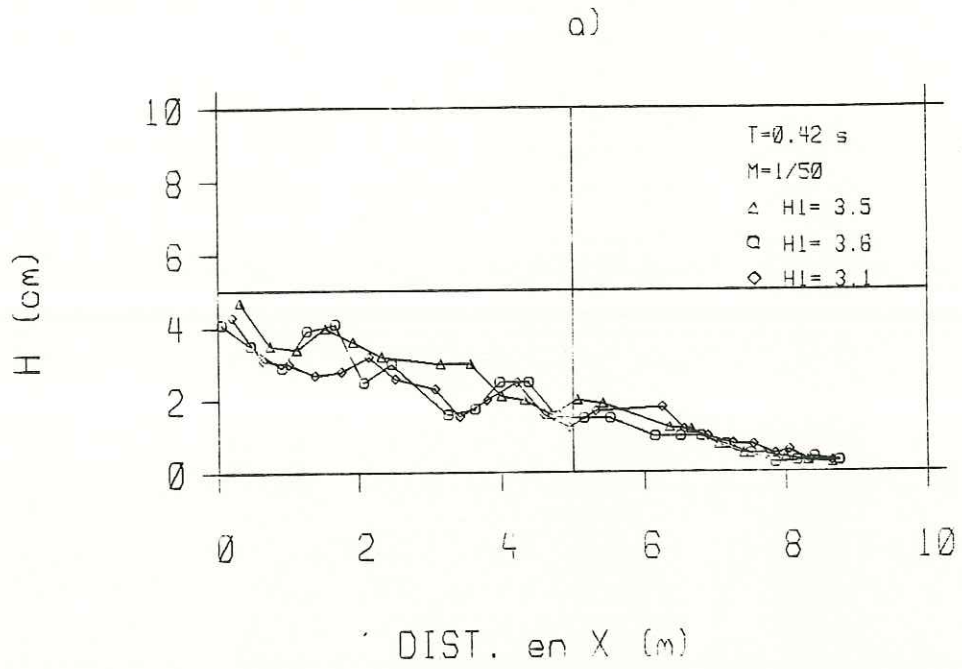


Fig. 7.- Alturas de ola para pendiente $M=1/50$ y período $T=0.42 \text{ s}$, a) sin fricción, b) con fricción.

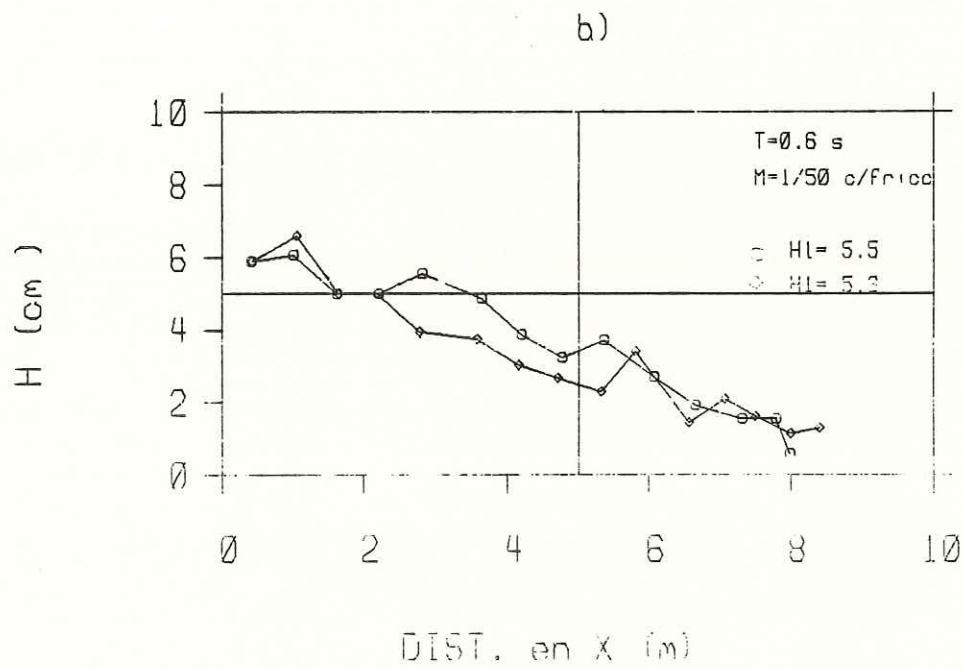
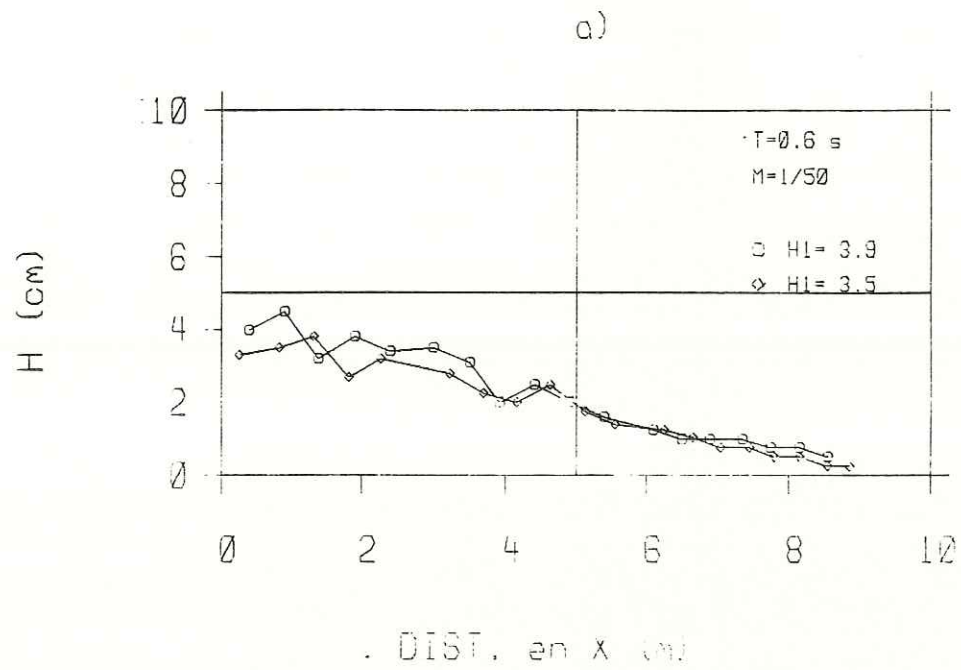


Fig. 8.- Alturas de ola para pendiente $M=1/50$ y periodo $T=0.6$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

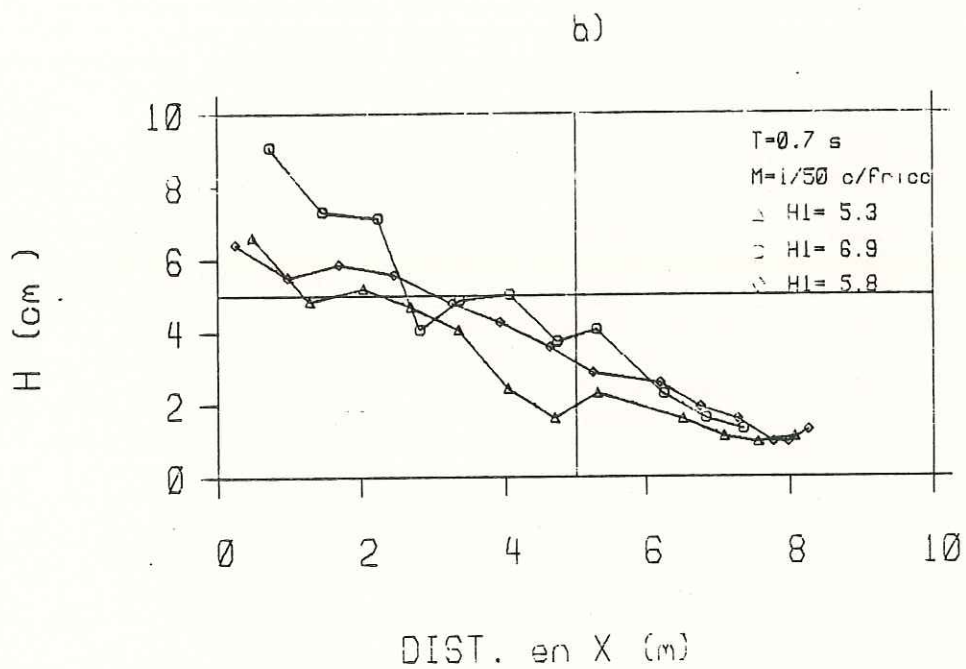
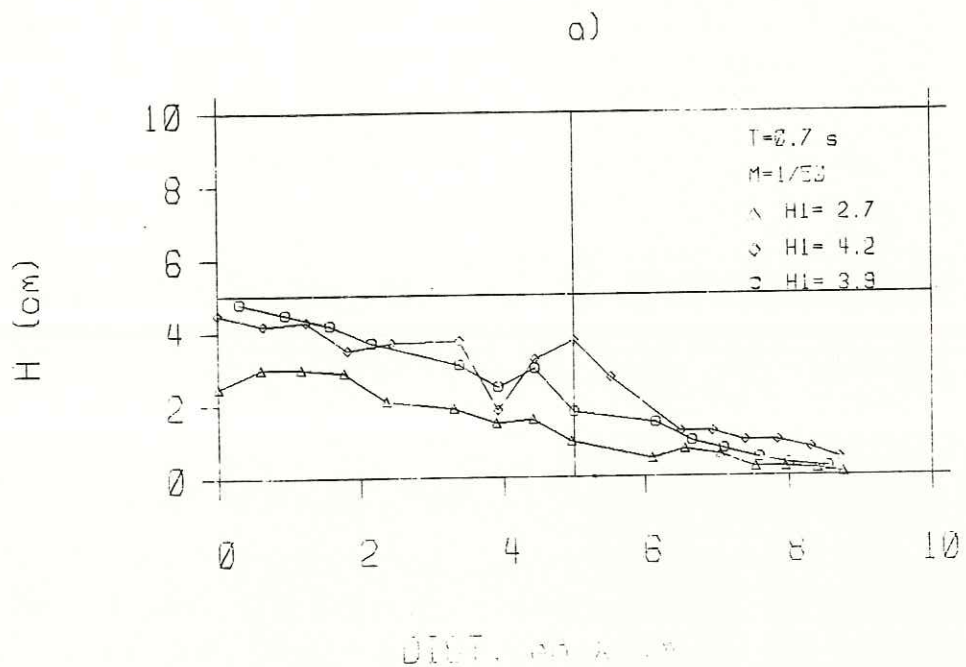


Fig. 9.- Alturas de ola para pendiente $M=1/50$ y periodo $T=0.7$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

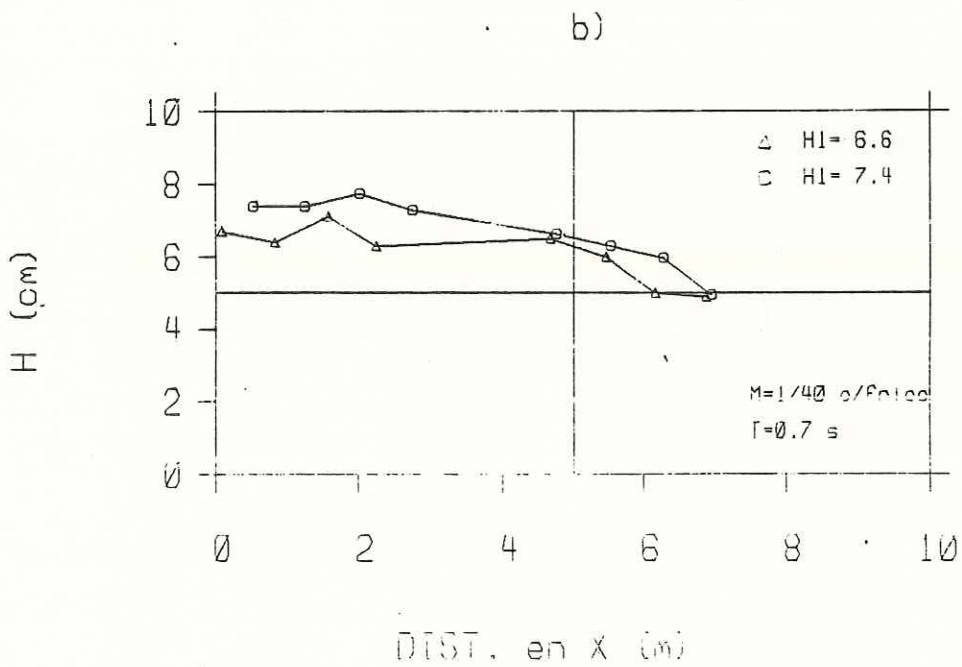
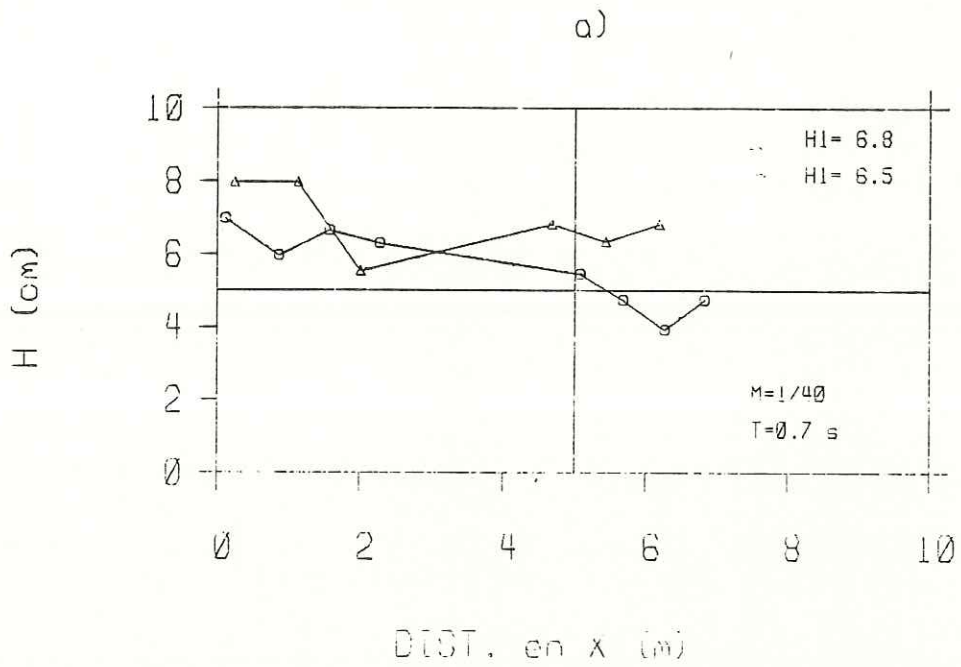


Fig. 10.- Alturas de ola para pendiente $M=1/40$ y periodo $T=0.7$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

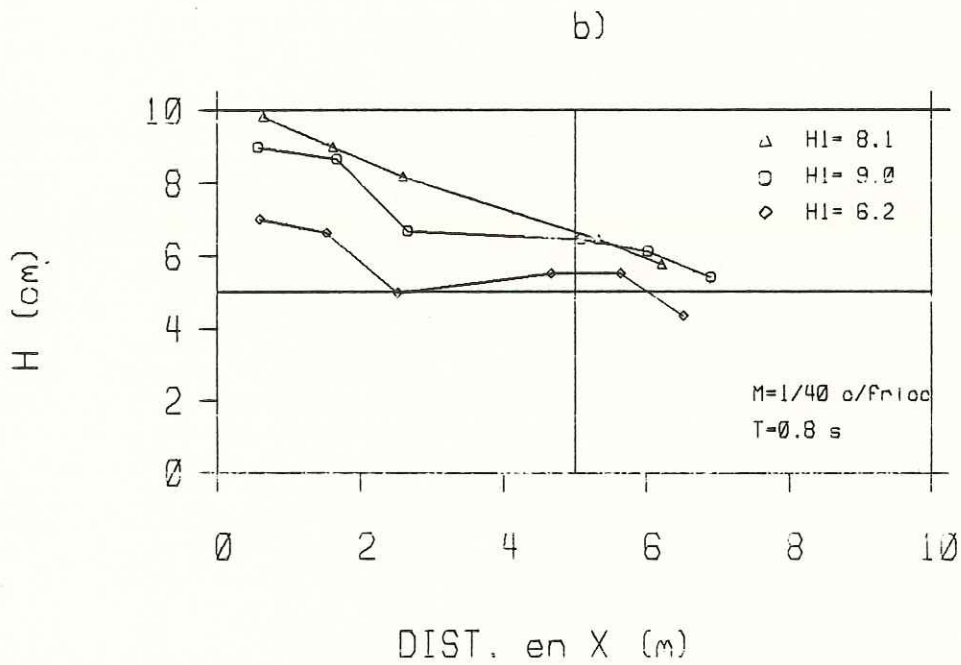
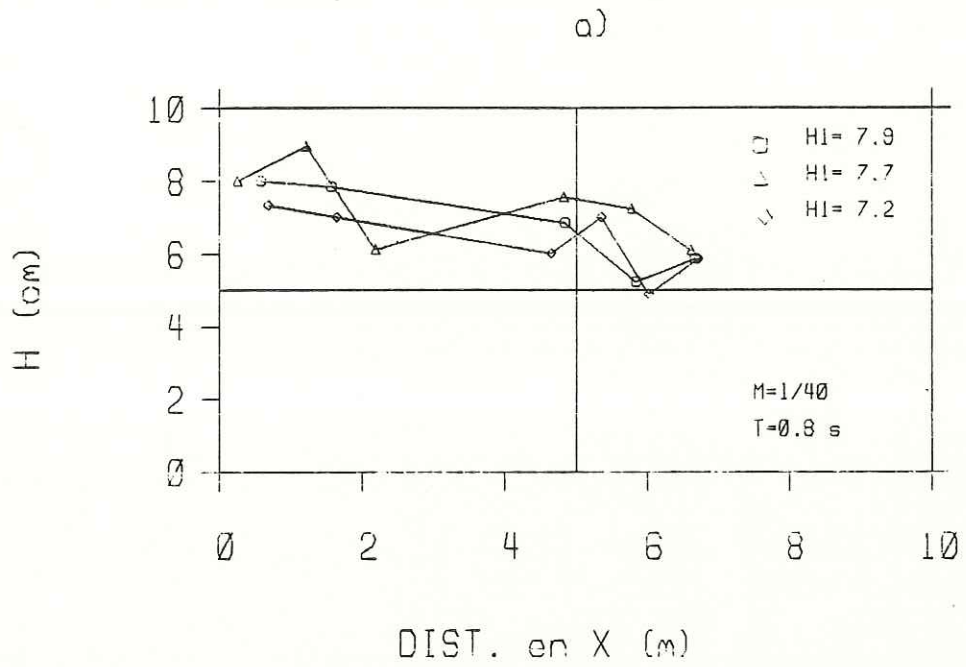


Fig. 11.- Alturas de ola para pendiente $M=1/40$ y periodo $T=0.8$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

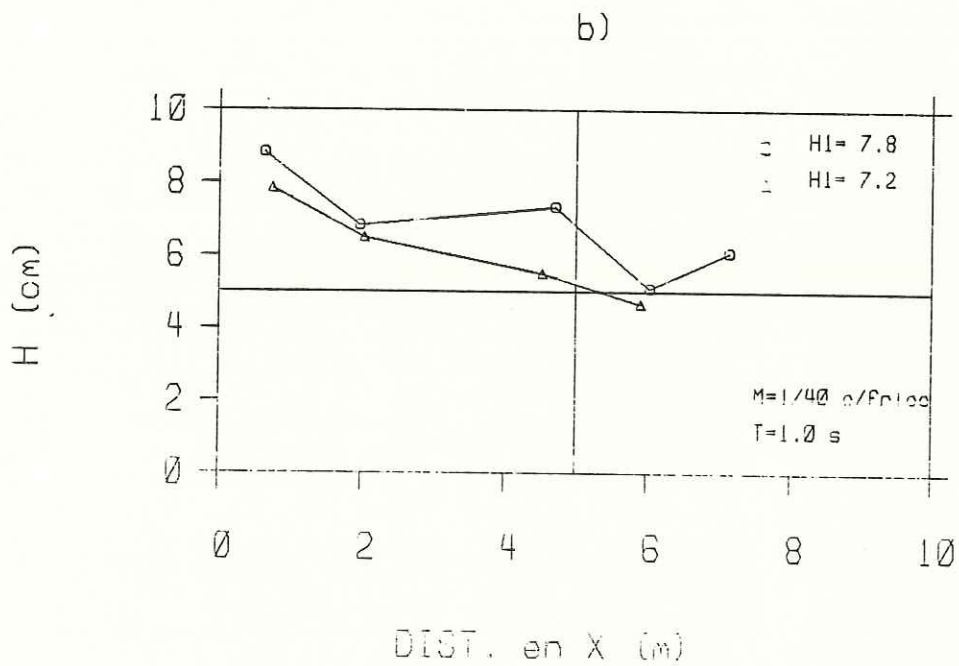
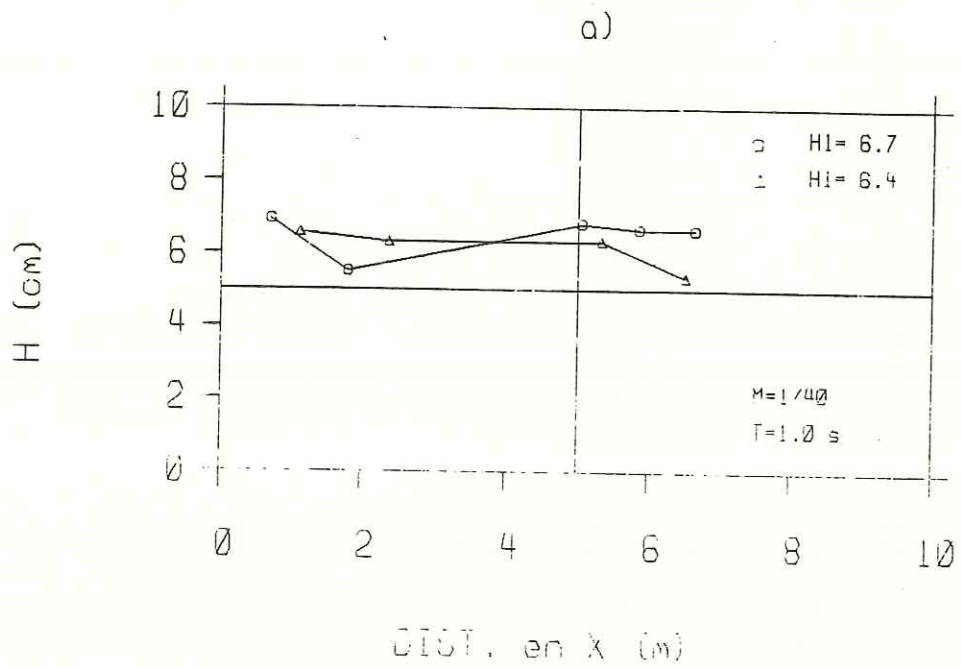


Fig. 12.- Alturas de ola para pendiente $M=1/40$ a) y b) para el periodo $T=1.0$ s sin fricción y con fricción resp. y c) y d) para los periodos $T=0.6$ y 1.2 s sin y con fricción respectivamente.

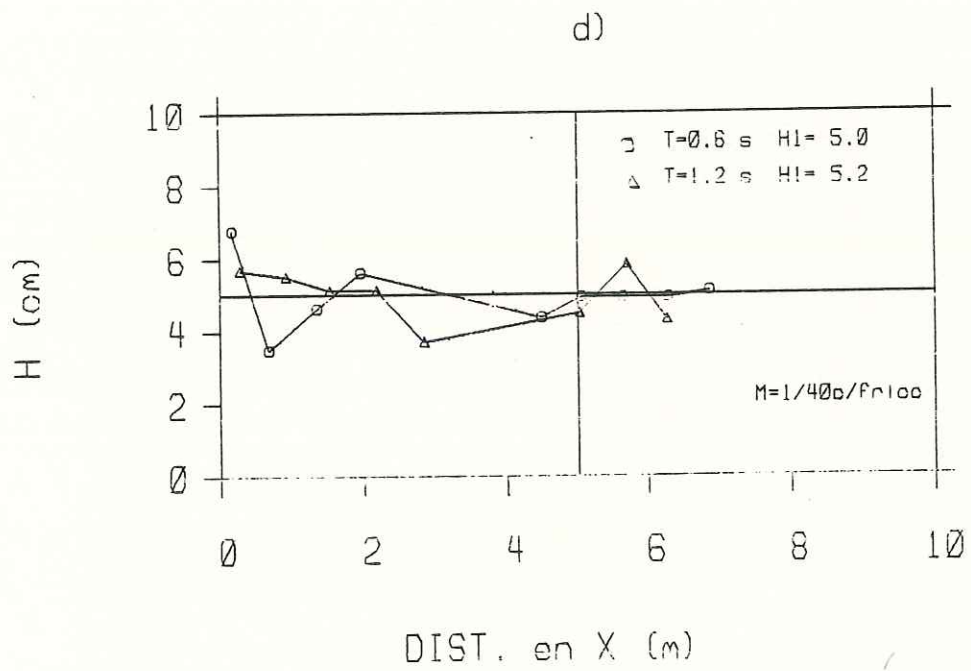
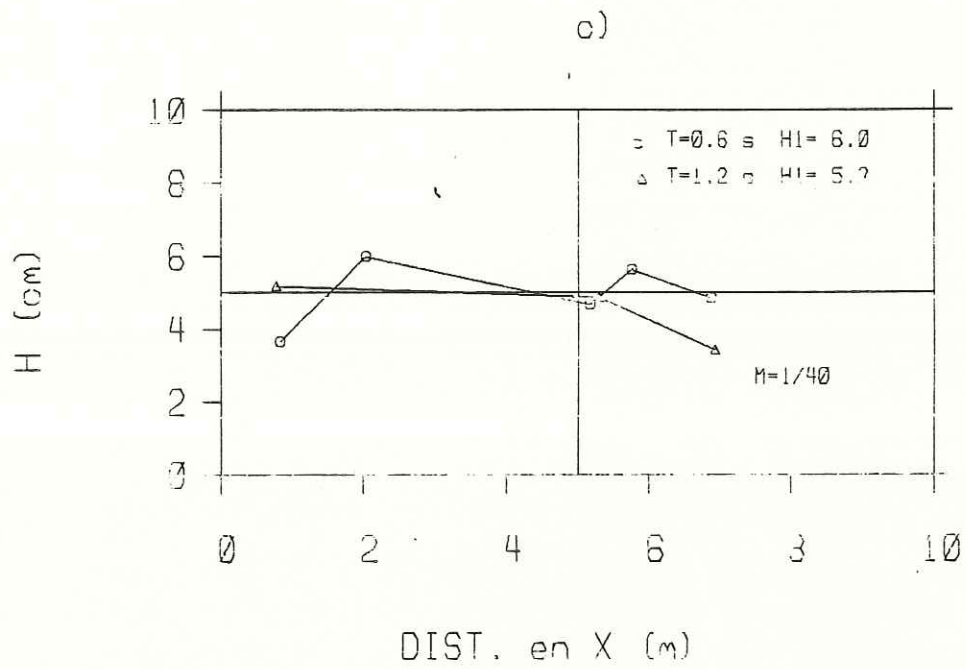


Fig. 12 ... Cont.

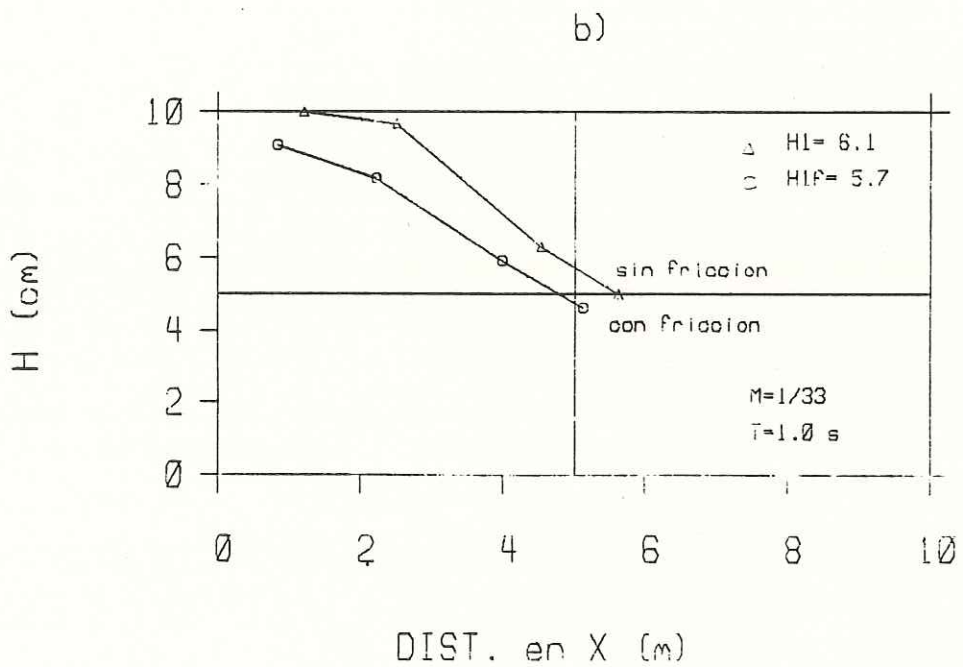
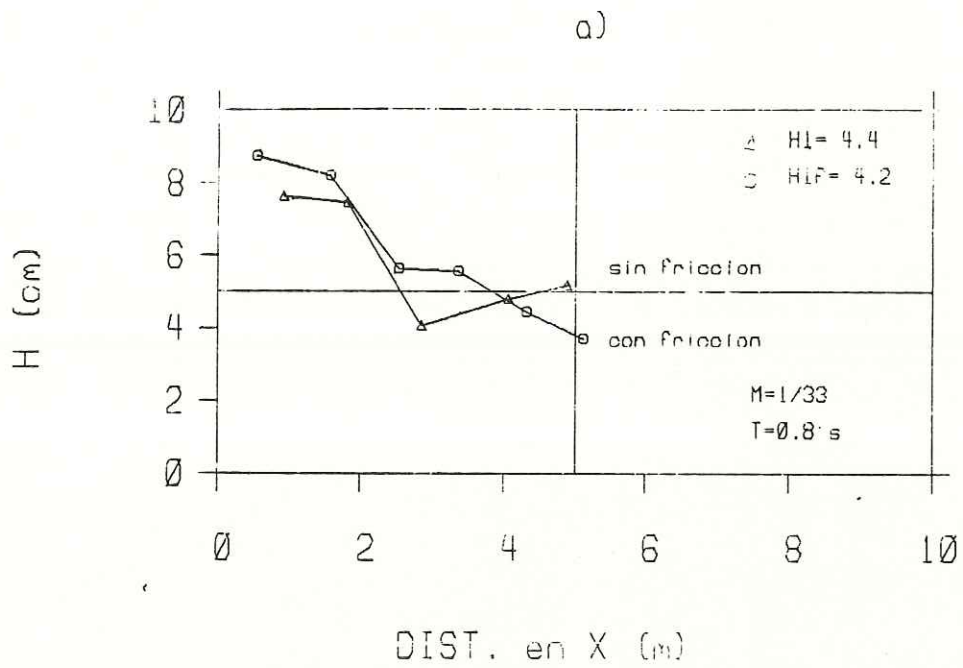


Fig. 13.- Alturas de ola para pendiente $M=1/33$, a) período $T=0.8\text{ s}$ con y sin fricción, b) período $T=1.0\text{ s}$ con y sin fricción, c) período $T=1.22\text{ s}$ con y sin fricción.

c)

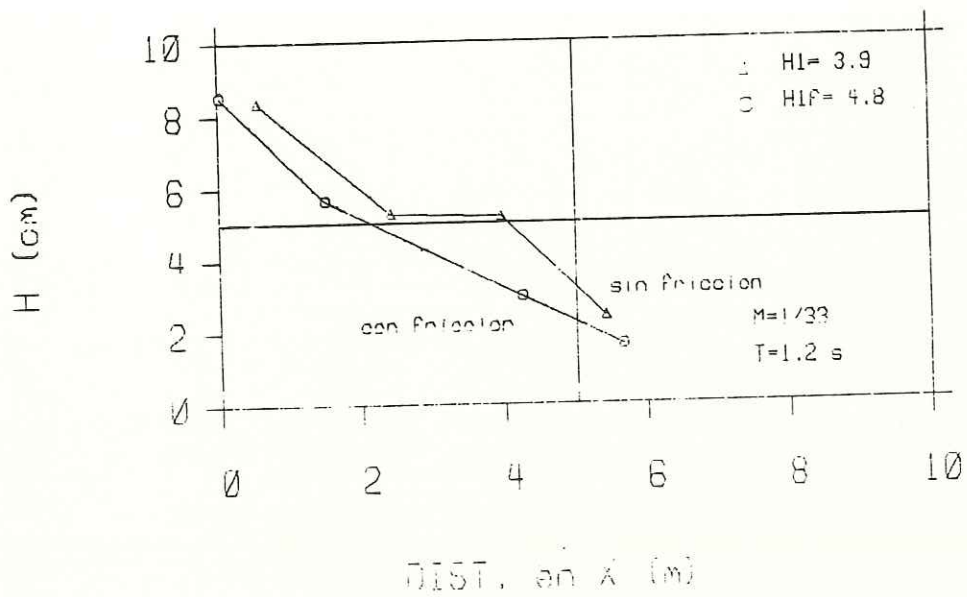


Fig. 13 ... Cont.

los que si hay fricción, excepto en el experimento con período $T=0.7$ seg, en el que la tendencia es muy semejante tanto en el caso con fricción como sin ella.

En los experimentos con pendiente $M_3=1/33$ (figura 13), las tendencias son muy semejantes con y sin fricción a excepción del experimento con período $T=0.8$ seg, donde el caso sin fricción presenta un aumento en la altura al final de la playa.

5.3 VARIANZAS

Las varianzas de las series para diferentes secciones en el canal (fotografías) se muestran en las figuras 14 a la 20, donde se puede observar para un mismo experimento la disminución de la varianza a menor distancia de la playa.

Estas gráficas de varianza presentan características semejantes a las de alturas de ola de los experimentos con pendiente $M_1=1/50$ en las que se observa un cambio aproximadamente constante en las varianzas de las diferentes olas a lo largo del canal (figuras 14, 15 y 16).

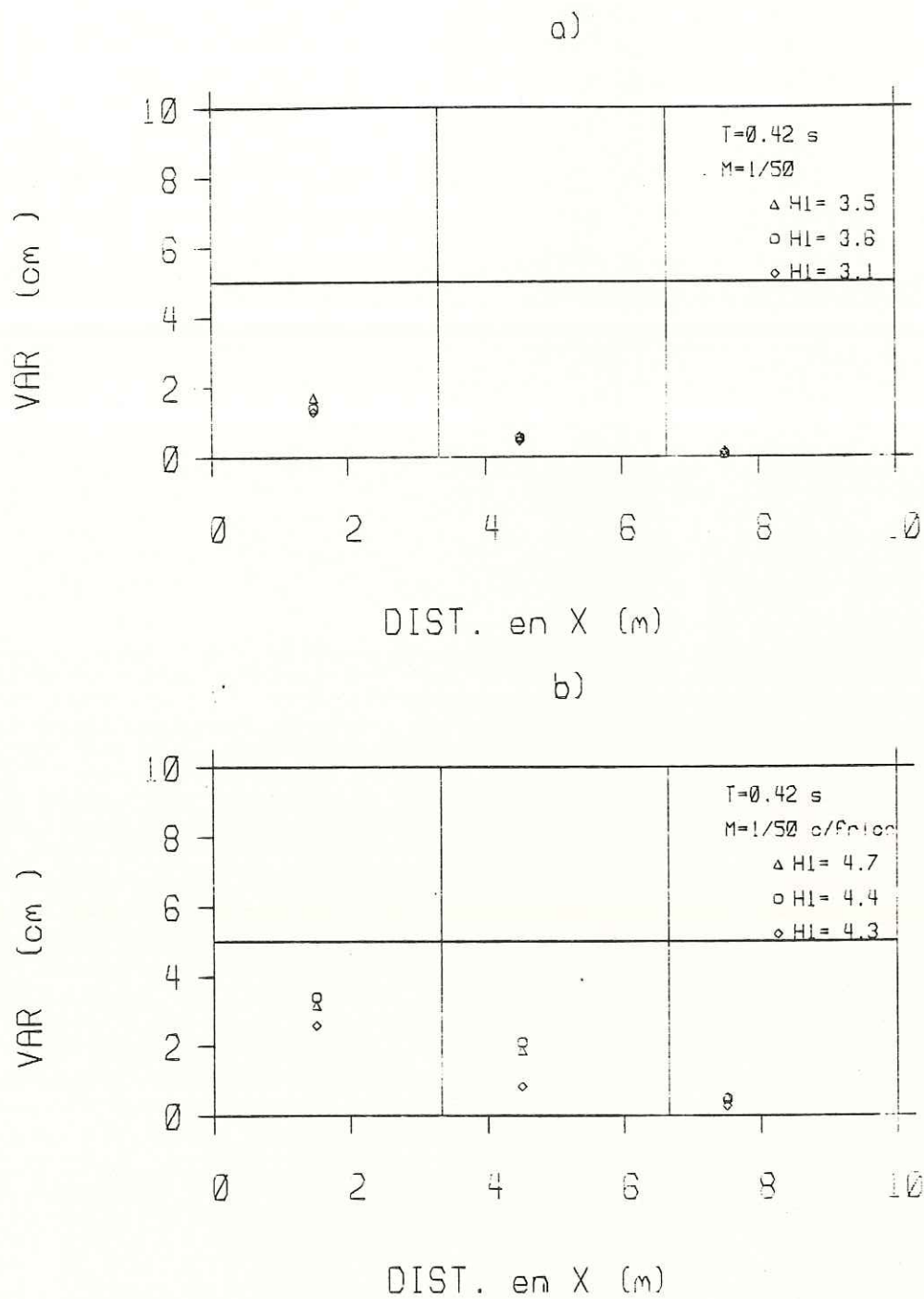


Fig. 14.- Varianza en 3 diferentes puntos del canal: cerca del generador, a la mitad y en la parte final de la trayectoria para la pendiente $M=1/50$ y periodo $T=0.42$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

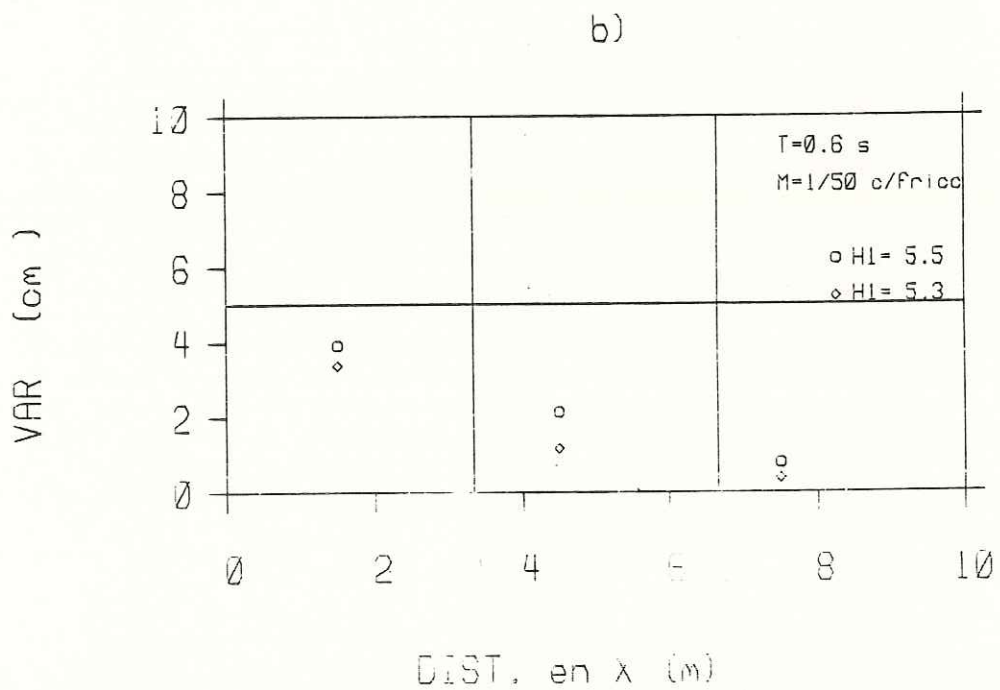
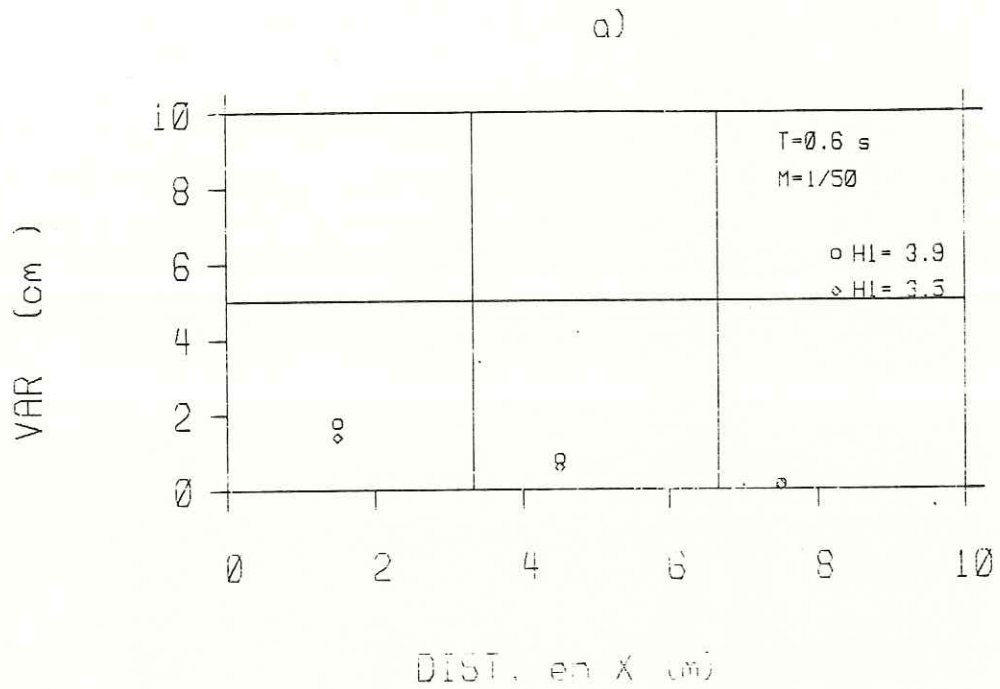


Fig. 15.- Varianza en 3 diferentes puntos del canal: cerca del generador, a la mitad y en la parte final de la trayectoria para la pendiente $M=1/50$ y periodo $T=0.6$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

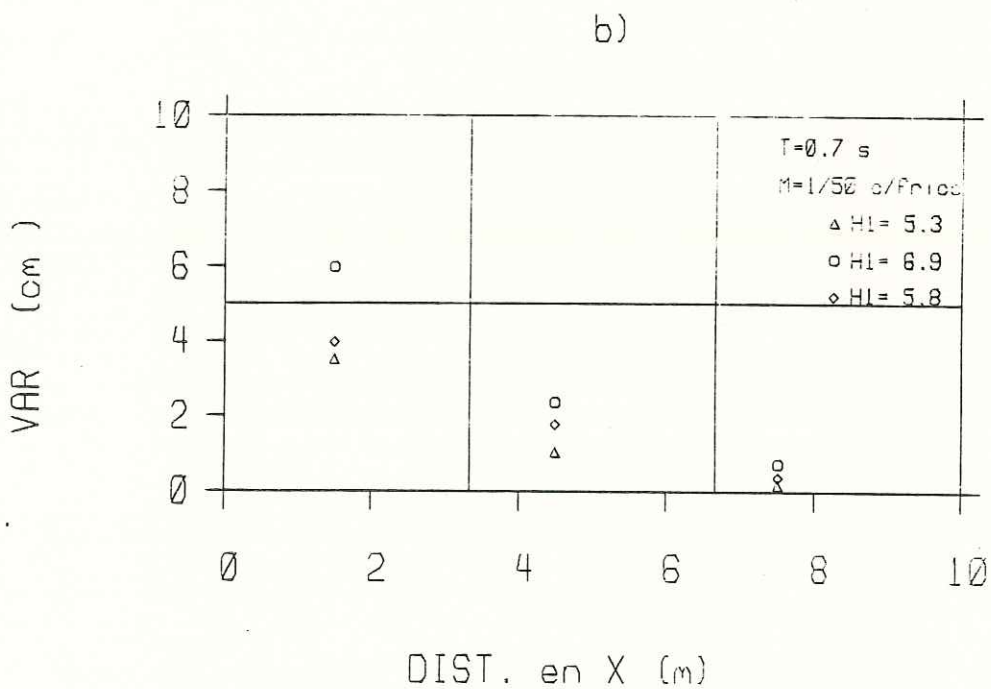
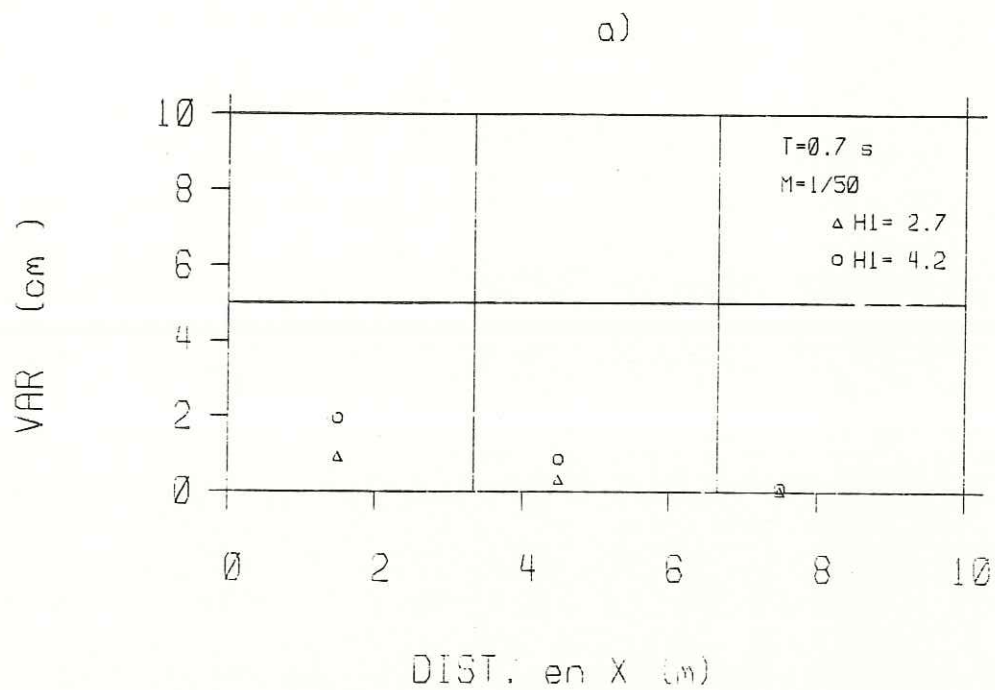


Fig. 16.- Varianza en 3 diferentes puntos del canal: cerca del generador, a la mitad y en la parte final de la trayectoria para la pendiente $M=1/50$ y periodo $T=0.7$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

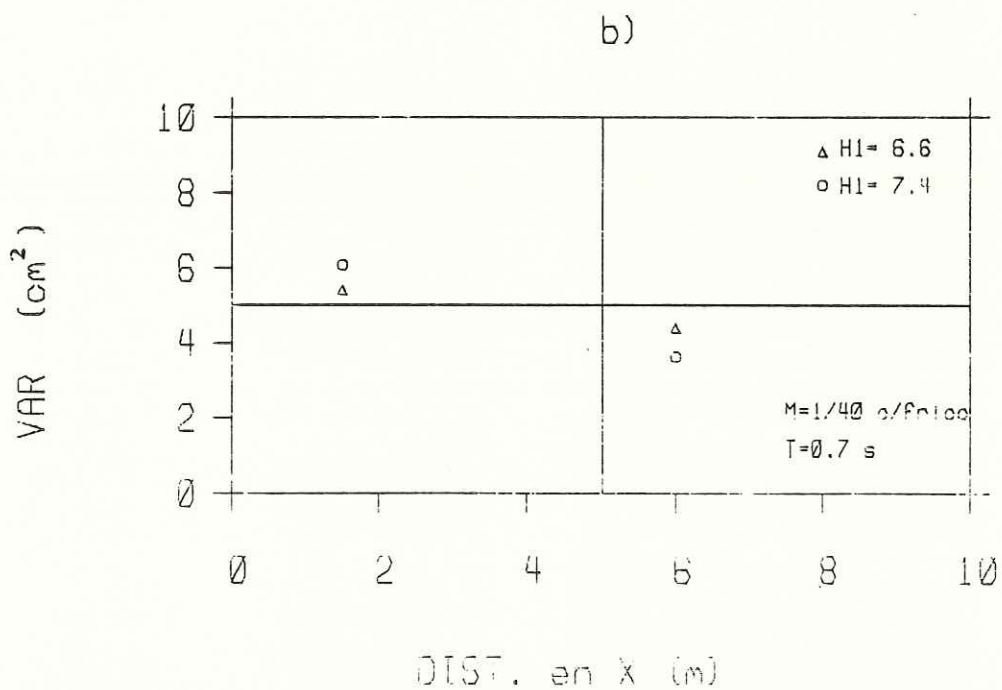
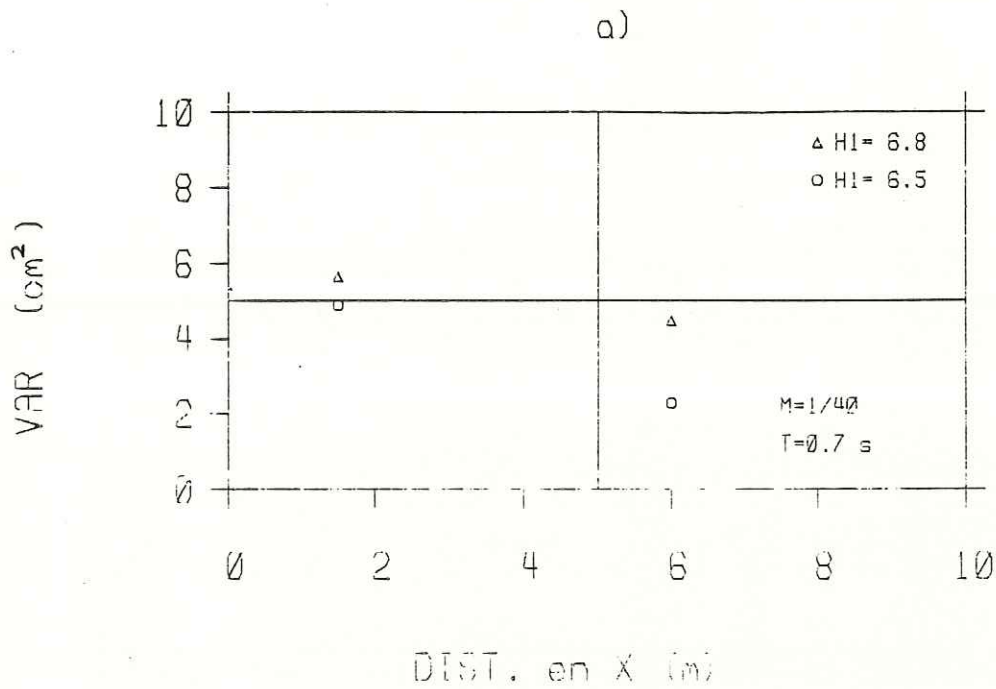


Fig. 17.- Varianza en 2 diferentes puntos del canal: cerca del generador, y en la parte final de la trayectoria para la pendiente $M=1/40$ y periodo $T=0.7 \text{ s}$, a) sin fricción, b) con fricción.

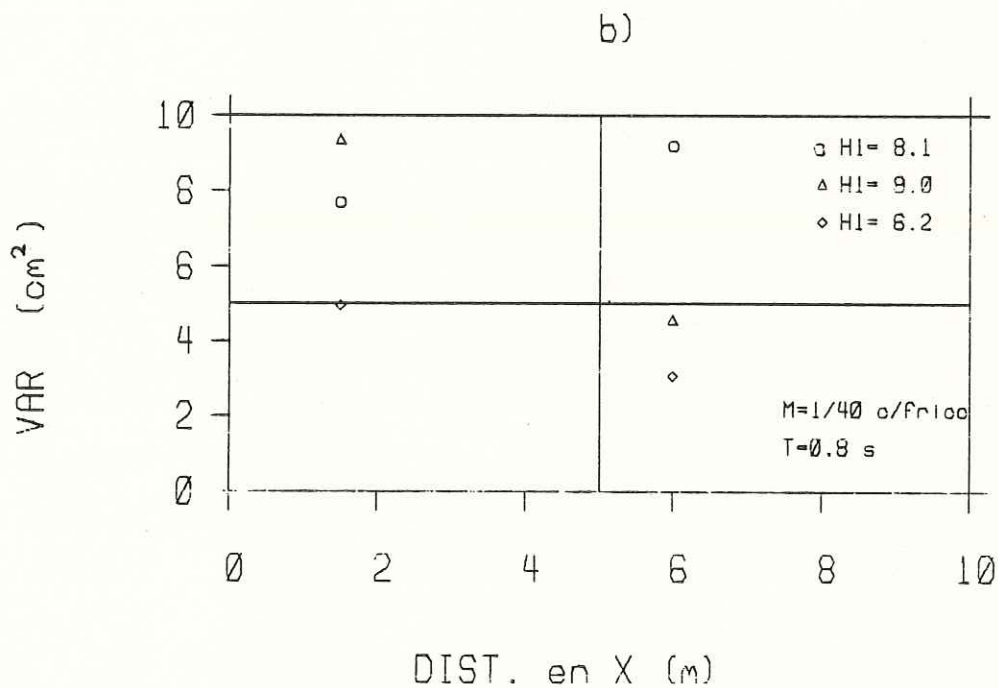
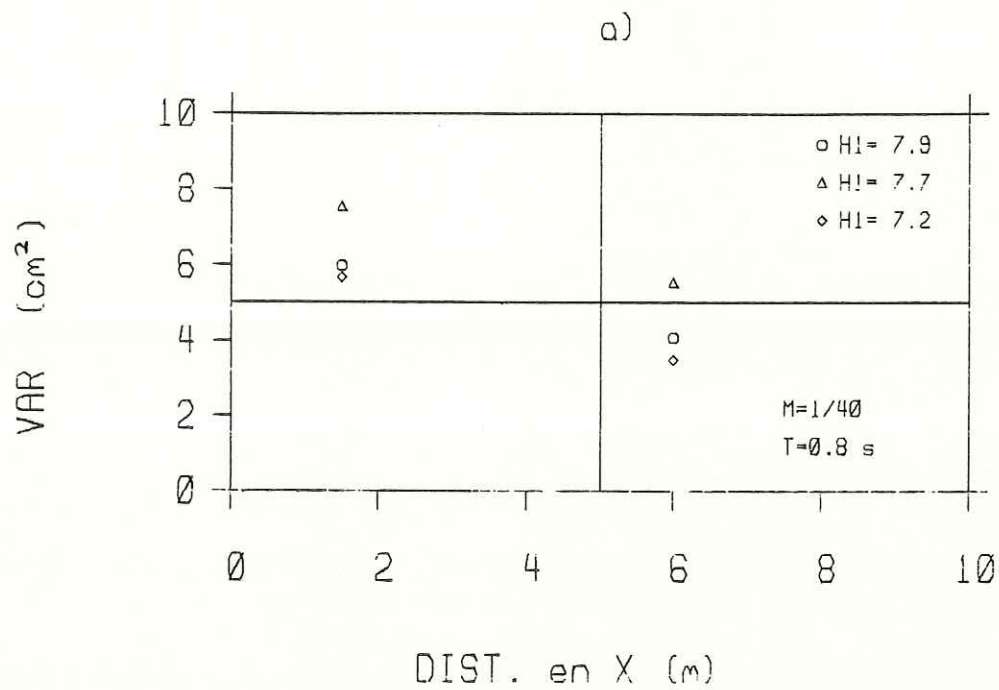


Fig. 18.- Varianza en 2 diferentes puntos del canal: cerca del generador, y en la parte final de la trayectoria para la pendiente $M=1/40$ y periodo $T=0.8$ s, a) sin fricción, b) con fricción.

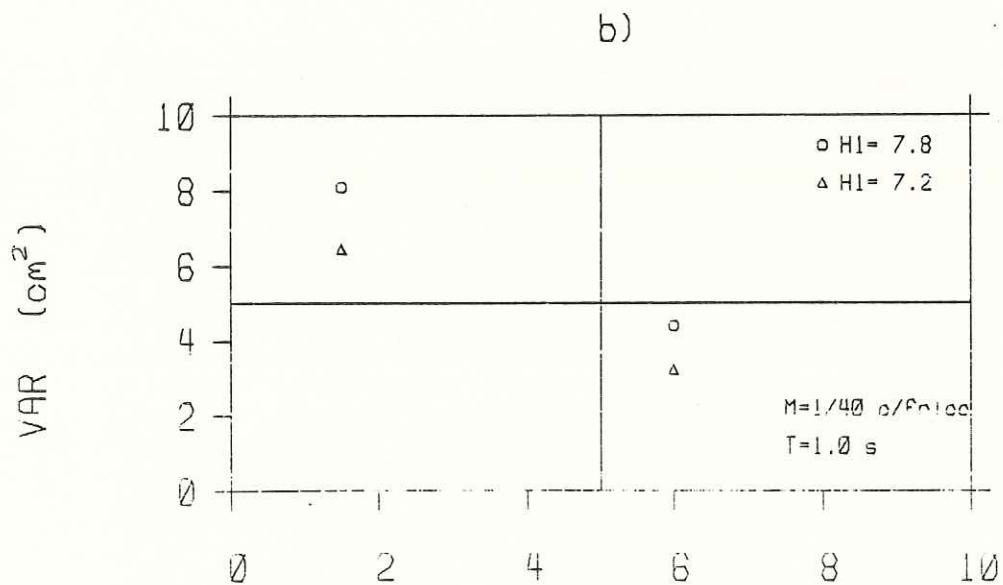
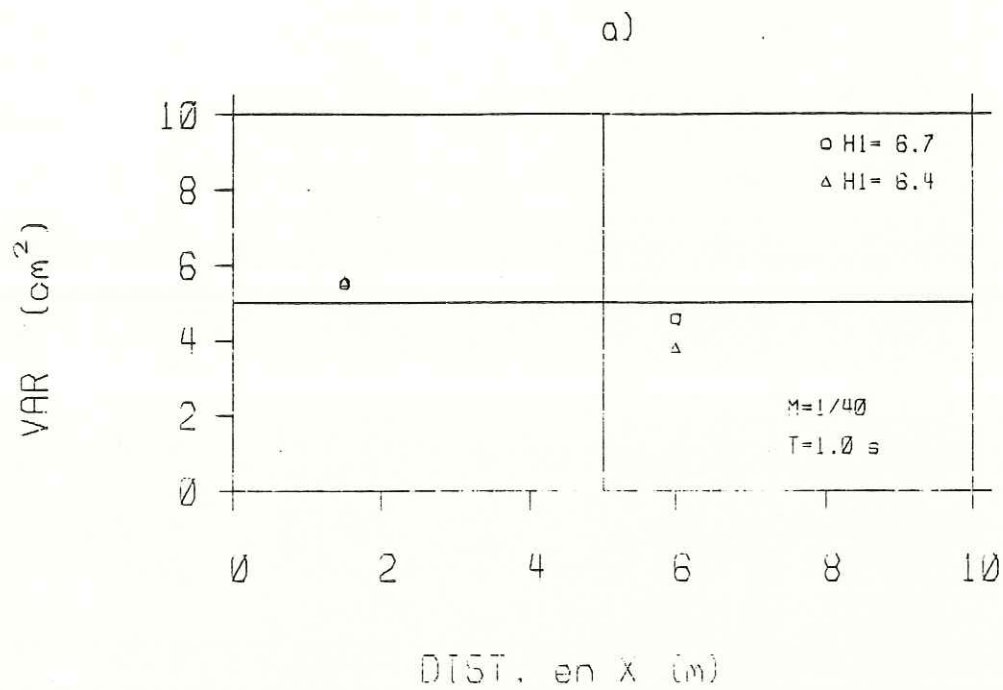


Fig. 19.- Varianza en 2 diferentes puntos del canal: cerca del generador, y en la parte final de la trayectoria para la pendiente $M=1/40$ a) y b) para el periodo $T=1.0$ s sin fricción y con fricción resp. y c) y d) para los periodos $T=0.6$ y 1.2 s sin y con fricción respectivamente.

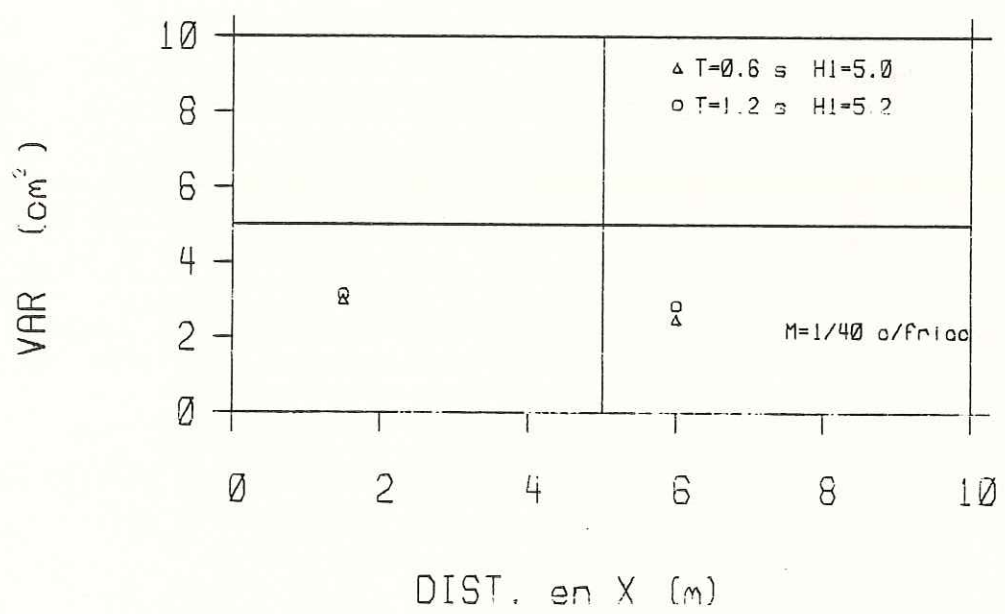
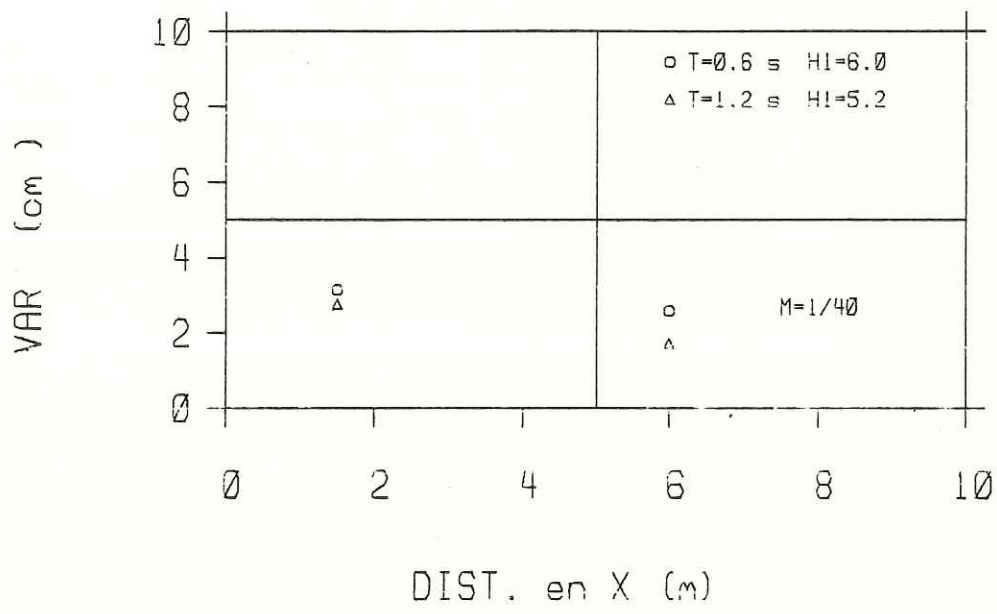


Fig. 19 ... Cont.

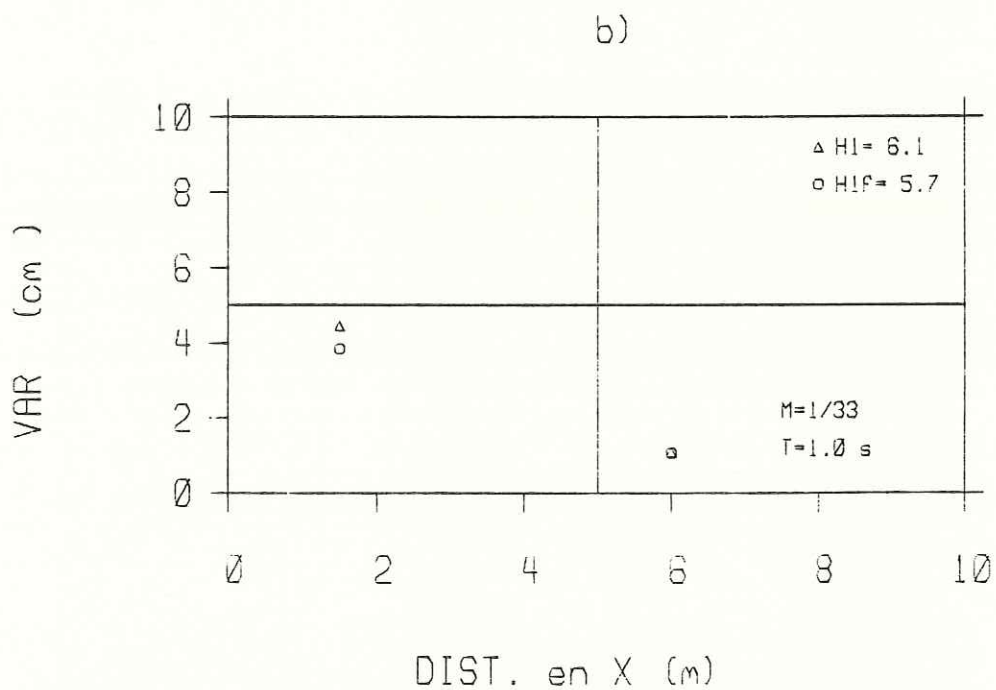
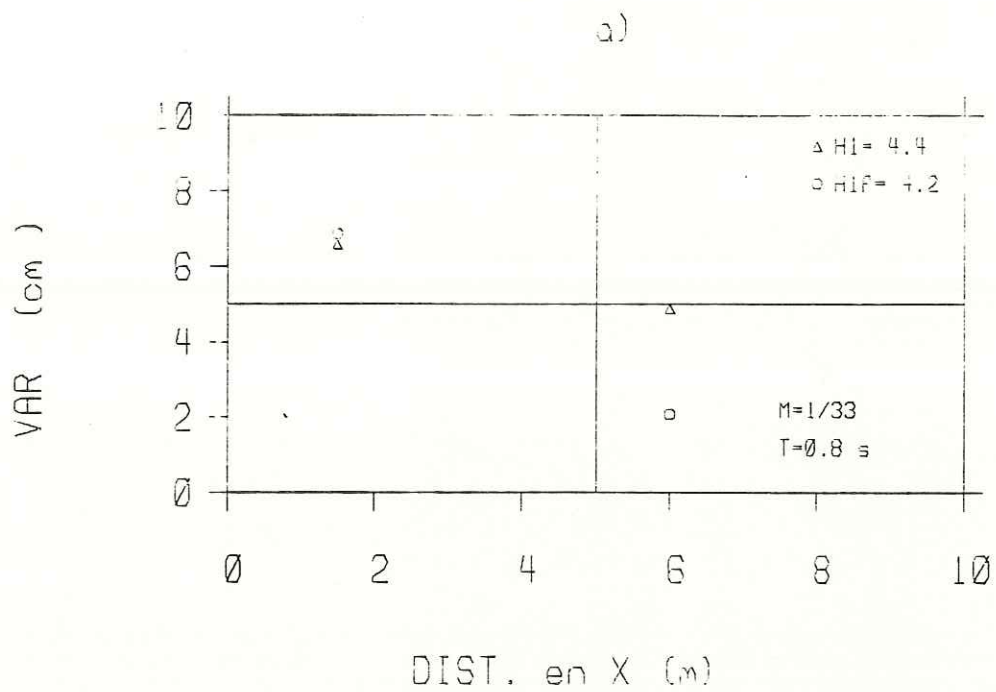


Fig. 20.- Varianza en 2 diferentes puntos del canal: cerca del generador, y en la parte final de la trayectoria para la pendiente $M=1/40$ a) periodo $T=0.8 \text{ s}$ con y sin fricción, b) periodo $T=1.0 \text{ s}$ con y sin fricción, c) periodo $T=1.22 \text{ s}$ con y sin fricción.

c)

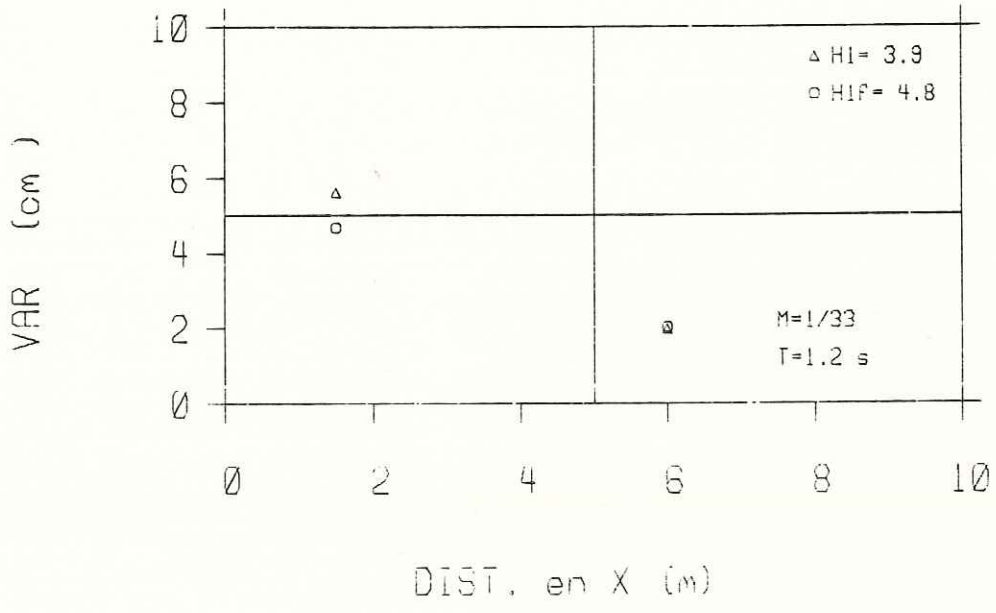


Fig. 20 ... Cont.

Las graficas de varianza de los experimentos con pendiente $M_2=1/40$ (figuras 17, 18 y 19) sin fricción varían poco de un experimento a otro, no así los experimentos con fricción.

En el experimento con pendiente $M_3=1/33$, (fig. 20), el comportamiento entre las varianzas de las olas con y sin fricción es muy semejante aunque se observa una disminución considerable del último punto con respecto al más cercano a la zona de generación, cosa que se presenta más suave en el resto de los experimentos con pendiente media y baja, a excepción de las olas $H1=7.7$ y $H1=7.9$ en el experimento con pendiente $M_2=1/40$ (fig 18a).

Las olas con período $T=0.8$ seg (figura 20a) comienzan su trayectoria con sus varianzas casi iguales y en el extremo opuesto para el experimento con fricción disminuyó notablemente con respecto al mismo experimento con fricción.

5.4 PREDICCIONES DE ALTURA DE OLA POR EL METODO DE GROSSKOPF

En las tablas II, III y IV se presentan los

Tabla II.- Resultados de prediccion de altura de ola (MPRED) por el metodo de Grosskopf a partir de simulacion haciendo variar la altura inicial (M1) donde: PHI es la funcion de disipacion encontrada por medio de tablas: KS y Cf son los coeficientes de disminucion de profundidad y friccion, M2 es la altura medida en el punto de prediccion y DESV es la desviacion en porcentaje entre la altura estimada y la medida.
 Pendiente 1/50, a) sin friccion, b) con friccion.

a)

T	KS	PHI	Cf	M1	M2	MPRED	DESV %
0.4	0.948	0.27E-03	0.29E-02	3.5	0.6	3.3	434.6
0.4	0.948	0.27E-03	0.28E-02	3.6	0.6	3.4	449.8
0.4	0.948	0.27E-03	0.29E-02	3.1	0.8	3.0	272.9
0.6	0.923	0.75E-02	0.30E-02	3.9	1.0	3.5	237.6
0.6	0.923	0.75E-02	0.31E-02	3.5	0.8	3.2	315.3
0.7	0.914	0.21E-01	0.31E-02	2.7	0.4	2.4	562.0
0.7	0.914	0.21E-01	0.31E-02	4.2	0.7	3.6	450.9
0.7	0.914	0.21E-01	0.31E-02	3.9	1.0	3.4	257.2

b)

T	KS	PHI	Cf	M1	M2	MPRED	DESV %
0.4	0.921	0.27E-03	0.55E-02	4.7	1.9	4.3	124.2
0.4	0.921	0.27E-03	0.55E-02	4.4	2.3	4.0	76.2
0.4	0.921	0.27E-03	0.45E-02	4.3	1.6	3.9	148.4
0.6	0.913	0.90E-02	0.50E-02	5.5	1.9	4.8	149.4
0.6	0.920	0.90E-02	0.50E-02	5.3	1.5	4.7	207.2
0.7	0.922	0.21E-01	0.50E-02	5.3	1.2	4.6	283.5
0.7	0.913	0.21E-01	0.47E-02	6.9	1.7	5.9	236.6
0.7	0.913	0.21E-01	0.50E-02	5.8	1.6	5.0	221.0

Tabla III.- Resultados de prediccion de altura de ola (HPRED) por el metodo de Crosskopf a partir de simulacion haciendo variar la altura inicial (H1) donde: PHI es la funcion de disipacion encontrada por medio de tablas: KS y Cf son los coeficientes de disminucion de profundidad y friccion, H2 es la altura medida en el punto de prediccion y DESV es la desviacion en porcentaje entre la altura estimada y la medida.
 Pendiente 1/40, a) sin friccion, b) con friccion.

a)									
T	KS	PHI	Cf	H1	H2	HPRED	DESV %		
0.6	0.959	0.89E-03	0.25E-02	6.0	5.1	5.7	13.5		
0.7	0.959	0.45E-02	0.27E-02	6.5	4.8	6.2	29.7		
0.7	0.934	0.45E-02	0.27E-02	6.9	6.8	6.4	-4.8		
0.8	0.938	0.17E-01	0.29E-02	7.2	5.9	6.5	10.0		
0.8	0.914	0.17E-01	0.28E-02	7.7	7.0	6.9	-1.7		
0.8	0.915	0.17E-01	0.28E-02	7.9	6.0	7.0	17.7		
1.0	0.930	0.48E-01	0.31E-02	6.4	5.8	5.7	-2.4		
1.0	0.917	0.48E-01	0.31E-02	6.7	6.2	5.9	-6.0		
1.2	1.132	0.12E 00	0.71E-03	5.2	4.1	5.8	39.5		
b)									
T	KS	PHI	Cf	H1	H2	HPRED	DESV %		
0.6	0.964	0.92E-03	0.45E-02	5.0	4.4	4.8	8.8		
0.7	0.942	0.44E-02	0.45E-02	7.4	6.0	6.9	15.7		
0.7	0.913	0.44E-02	0.45E-02	6.6	5.6	6.0	6.5		
0.8	0.915	0.16E-01	0.45E-02	6.2	5.1	5.5	7.4		
0.8	0.916	0.16E-01	0.40E-02	9.0	6.1	7.9	29.2		
0.8	0.916	0.16E-01	0.45E-02	8.1	6.0	7.1	18.7		
1.0	0.930	0.48E-01	0.50E-02	7.2	4.3	6.1	40.9		
1.0	0.934	0.48E-01	0.50E-02	7.8	6.2	6.7	8.0		
1.2	0.926	0.12E 00	0.55E-02	5.2	3.2	4.3	36.9		

Tabla IV.- Resultados de prediccion de altura de ola (HPRED) por el metodo de Grosskopf a partir de simulacion haciendo variar la altura inicial (H1) donde: PHI es la funcion de disipacion encontrada por medio de tablas: KS y Cf son los coeficientes de disminucion de profundidad y friccion, H2 es la altura medida en el punto de prediccion y DESV es la desviacion en porcentaje entre la altura estimada y la medida.
 Pendiente 1/33, a) sin friccion, b) con friccion.

a)

T	KS	PHI	Cf	H1	H2	HPRED	DESV %
0.8	0.923	0.31E-01	0.31E-02	4.4	3.6	3.9	8.6
1.0	0.995	0.72E-01	0.30E-02	6.1	4.1	5.8	41.3
1.2	1.005	0.19E 00	0.94E-03	3.9	2.6	3.9	48.3

b)

T	KS	PHI	Cf	H1	H2	HPRED	DESV %
0.8	0.920	0.17E-01	0.55E-02	4.2	2.6	3.8	43.1
1.0	0.923	0.54E-01	0.55E-02	5.7	3.0	5.0	65.3
1.2	1.009	0.15E 00	0.62E-02	4.8	2.2	4.4	97.1

resultados del programa que simula la disminución de la altura de la ola por el método de Grosskopf a partir de la altura inicial (H_1), el coeficiente de fricción (C_f), el coeficiente de disminución de profundidad (K_s), período (T), las longitudes de onda al inicio y al final (L_1 y L_2). Se muestra la altura predicha (H_{PRED}) correspondiente a L_2 , la altura real (H_2) y la desviación ($DESV\%$). $DESV\%$ es la diferencia en porcentaje entre la predicción y la estimación de la altura medida en el mismo punto, el signo positivo significa que el modelo sobreestimó esa altura.

En la pendiente más baja $M_1=1/50$ (tabla II) la estimación presenta una desviación grande (hasta de un 450%). Las estimaciones en la pendiente media $M_2=1/40$ (tabla III) son buenas ($\pm 15\%$ en promedio) a excepción de los períodos más grandes en que la diferencia pasa del 30%. En el caso de pendiente alta $M_3=1/33$ (tabla IV) la estimación presenta desviaciones que van del 40% al 97% a excepción del período $T=.8s$ sin fricción en que la desviación es del 8%.

5.5 COMPARACIONES

En las tablas V, VI y VII se presentan los resultados del programa de computación que compara la variación de la energía del oleaje por el método de conservación de potencia, en donde podemos hacer las comparaciones entre los experimentos con y sin fricción, y entre los diferentes tipos de ola.

En estas tablas LS1 y LS2 son las longitudes de ola calculadas por el programa en los dos puntos cerca y lejos del generador, H1 y H2 son las alturas de ola medidas en los lugares donde se calculan LS1 y LS2, HPS y HPE son las alturas de ola en la playa calculadas a partir del método de conservación de potencia con las longitudes e onda obtenidas a partir del método de Stokes de 3er orden (LS2) y los espectros de número de onda (L2) respectivamente. %DES, %DEE y %DER son, respectivamente, el porcentaje de variación de energía a partir de los métodos de conservación de potencia con Stokes, con las longitudes obtenidas a partir de los números de onda de los espectros y los medidos directamente.

En estas tablas se puede observar que mientras las

Tabla V.- Comparacion del cambio en la energia del oleaje al propagarse. L1 y L2 son las longitudes de onda inicial y final obtenidas de los espectros de numero de onda: LS1 y LS2 longitudes de onda inicial y final calculadas con la teoria de Stokes de 3er orden: H1 y H2 aturas de ola inicial y final medidas en las fotografias: HPS y HPE alturas predichas con la teoria de conservacion de potencia usando Ls y L respectivamente: %DES, %DEE, %DBER porcentaje de variacion de energia del oleaje usando HPS, HPE y H2 respectivamente, en comparacion con H1. Pendiente 1/50, a) Sin friccion, b) con friccion.

a)

T	D2	L1	L2	LS1	LS2	H1	H2	HPS	HPE	%DES	%DEE	%DBER
0.4	10.0	40.0	27.5	32.2	27.0	3.5	0.6	3.5	3.9	-1.81	-24.22	96.86
0.4	10.0	40.0	27.5	32.2	27.0	3.6	0.6	3.6	4.0	-1.81	-24.22	97.03
0.4	10.0	40.0	27.6	32.2	27.1	3.1	0.8	3.2	3.5	-1.81	-24.22	93.55
0.6	10.0	46.7	52.7	41.4	47.3	3.9	1.0	4.1	4.1	-11.51	-12.80	92.89
0.6	10.0	56.1	52.6	41.3	47.2	3.5	0.8	3.7	4.1	-11.61	-35.96	95.28
0.7	10.0	56.1	68.6	48.3	58.5	2.7	0.4	2.9	2.9	-17.37	-16.25	98.22
0.7	10.0	56.1	68.7	48.3	58.6	4.2	0.7	4.5	4.5	-17.29	-16.25	97.53
0.7	10.0	56.1	68.8	48.3	58.7	3.9	1.0	4.3	4.3	-17.16	-16.25	94.09

b)

T	D2	L1	L2	LS1	LS2	H1	H2	HPS	HPE	%DES	%DBE	%DBER
0.4	8.0	48.0	28.6	42.7	27.5	4.7	1.9	4.8	4.9	-4.10	-12.52	83.20
0.4	8.0	43.3	29.0	41.0	28.0	4.4	2.3	4.5	4.5	-3.83	-5.68	72.78
0.4	8.0	49.3	28.2	42.7	27.1	4.3	1.6	4.4	4.6	-4.19	-15.64	86.31
0.6	8.0	73.0	53.2	53.0	45.2	5.5	1.9	6.0	6.5	-17.78	-37.74	87.56
0.6	8.0	63.0	53.0	43.7	44.7	5.3	1.5	5.8	6.4	-18.36	-44.20	91.66
0.7	8.0	72.5	68.8	65.0	54.6	5.3	1.2	6.0	5.6	-26.13	-11.62	94.87
0.7	8.0	72.0	69.0	54.0	55.1	6.9	1.7	7.7	8.0	-25.24	-33.33	93.62
0.7	8.0	69.5	69.0	54.5	54.9	5.8	1.6	6.6	6.6	-25.57	-27.55	92.89

Tabla VI. Comparacion del cambio en la energia del oleaje al propagarse. L1 y L2 son las longitudes de onda inicial y final obtenidas de los espectros de numero de onda: LS1 y LS2 longitudes de onda inicial y final calculadas con la teoria de Stokes de 3er orden: M1 y M2 aturas de ola inicial y final medidas en las fotografias: HPS y HPE alturas predichas con la teoria de conservacion de potencia usando Ls y L respectivamente: %DES, %DEE, %DER porcentaje de variacion de energia del oleaje usando HPS, HPE y H2 respectivamente, en comparacion con M1. Pendiente 1/40, a) Sin friccion, b) con friccion.

a)

T	D2	L1	L2	LS1	LS2	M1	M2	HPS	HPE	%DES	%DEE	%DER
0.6	18.0	59.1	57.8	58.3	56.6	6.0	5.1	6.1	6.0	-2.06	-1.44	28.88
0.7	18.0	67.5	75.3	58.3	71.7	6.5	4.8	6.6	7.0	-5.02	-15.84	46.27
0.7	18.0	66.0	77.8	66.0	74.6	6.9	6.8	7.1	6.9	-4.36	-0.00	5.40
0.8	18.0	86.7	98.6	66.5	91.4	7.2	5.9	7.4	8.2	-7.89	-30.32	30.94
0.8	18.0	80.0	99.8	87.8	93.0	7.7	7.0	8.0	7.4	-7.34	8.88	18.06
0.8	18.0	127.0	98.6	128.0	91.4	7.9	6.0	8.2	7.9	-7.87	0.78	42.85
1.0	18.0	127.0	132.6	125.0	118.9	6.4	5.8	6.8	6.5	-11.51	-1.60	17.74
1.0	18.0	127.0	133.0	123.0	119.6	6.7	6.2	7.1	6.8	-11.20	-3.25	14.05
1.2	18.0	129.0	176.0	128.0	152.6	5.2	4.1	5.6	5.2	-15.33	-0.78	36.12

b)

T	D2	L1	L2	LS1	LS2	M1	M2	HPS	HPE	%DES	%DEE	%DER
0.6	19.0	73.0	56.9	66.5	56.0	5.0	4.4	5.0	5.2	-1.70	-9.77	21.94
0.7	19.0	67.5	76.8	65.0	73.9	7.4	6.0	7.6	7.6	-3.87	-3.85	35.83
0.7	21.0	79.5	76.3	74.5	74.4	6.6	5.6	6.7	6.8	-2.51	-6.71	28.44
0.8	19.0	97.4	97.7	90.0	91.3	6.2	5.1	6.4	6.5	-6.99	-8.22	32.29
0.8	21.0	91.3	98.7	88.7	94.6	9.0	6.1	9.2	9.1	-4.42	-2.98	54.06
0.8	21.0	107.1	98.6	97.0	94.4	8.1	6.0	8.3	8.5	-4.45	-10.37	45.58
1.0	19.0	147.0	131.3	132.0	118.6	7.2	4.3	7.5	7.6	-10.64	-11.36	63.36
1.0	21.0	137.0	132.9	136.0	124.5	7.8	6.2	8.1	7.9	-6.77	-0.74	38.06
1.2	19.0	133.0	175.3	128.0	154.2	5.2	3.2	5.5	5.3	-13.70	-3.91	63.07

Tabla VII Comparacion del cambio en la energia del oleaje al propagarse. L1 y L2 son las longitudes de onda inicial y final obtenidas de los espectros de numero de onda: LS1 y LS2 longitudes de onda inicial y final calculadas con la teoria de Stokes de 3er orden: H1 y H2 aturas de ola inicial y final medidas en las fotografias: HPS y HPE alturas predichas con la teoria de conservacion de potencia usando Ls y L respectivamente: %DES, %DEE, %DER porcentaje de variacion de energia del oleaje usando HPS, HPE y H2 respectivamente, en comparacion con H1. Pendiente 1/33, a) Sin friccion, b) con friccion.

a)

T	D2	L1	L2	LS1	LS2	H1	H2	HPS	HPE	%DES	%DEE	%DER
0.8	15.0	98.7	93.7	98.0	84.4	4.4	3.6	4.6	4.4	-11.01	-0.67	30.68
1.0	15.0	142.0	125.4	122.0	109.9	6.1	4.1	6.5	6.6	-14.06	-16.39	54.68
1.2	15.0	162.0	165.1	150.0	140.1	3.9	2.6	4.3	4.1	-17.80	-8.00	55.44

b)

T	D2	L1	L2	LS1	LS2	H1	H2	HPS	HPE	%DES	%DEE	%DER
0.8	15.0	112.0	93.0	94.7	83.4	4.2	2.6	4.4	4.6	-11.56	-18.32	60.30
1.0	15.0	121.0	124.5	113.0	108.2	5.7	3.0	6.1	5.9	-15.09	-7.08	72.20
1.2	15.0	182.0	164.8	152.0	139.6	4.8	2.2	5.2	5.3	-18.11	-19.74	78.31

mediciones de laboratorio (H_1 y H_2) muestran disminución en la energía del oleaje ($\%DER$), los resultados de las estimaciones por los métodos de conservación de potencia utilizando Stokes de 3er orden y las longitudes de onda de los espectros de número de onda ($\%DES$ y $\%DEE$), muestran un aumento de la energía a medida que la ola avanza.

6 DISCUSIONES

6.1 ESPECTRO DE NUMERO DE ONDA

Los espectros analizados demuestran un corrimiento de la región de máxima densidad espectral hacia números de onda mayores con la consecuente disminución en la longitud de onda, y un ensanchamiento en la banda de mayor energía solo en algunos de los experimentos. Estos cambios demuestran, (vg. fig. 5 y 6), una distribución de la energía entre otras bandas de número de onda, es decir, hacia otras longitudes de onda como es común cuando existe mucha fricción. Se encontró que la energía perdida al final de la trayectoria es mayor que en los casos en que el espectro se mantiene angosto, resultando en una mayor disminución en la altura de ola como consecuencia.

Lo anterior concuerda con los estudios realizados por Hasselman y Collins (1968), en los cuales estiman los espectros de datos tomados en tres estaciones situadas a 17 km una de otra a lo largo de una línea perpendicular a la costa y se puede observar una disminución de la energía del oleaje a lo largo de su trayectoria.

6.2 VARIACION DE LA ALTURA DEL OLEAJE

Putnam y Johnson (1949) desarrollaron una teoría de pérdida de energía de las olas por fricción, con la cual obtienen la curva teórica de olas de $T=12$ y $T=6$ seg. Aunque en nuestro trabajo no se tomó un período tan grande, debido a que las condiciones del canal no lo permiten, algunos resultados obtenidos a partir de los experimentos concuerdan con sus resultados en el caso del período más bajo ($T=6$ seg) con fricción; esto se puede observar de la figura 7 a la 13 para todas las pendientes de playa.

Stiassnie y Peregrine (1980) presentan un estudio matemático de transformación de olas por disminución de la profundidad y muestran para un rango de períodos entre 1.0 y 1.6 seg y una pendiente de playa de $M=1/33$, gráficas de oleaje que se aproxima a la costa en donde observan primero una disminución de la altura y un aumento justo antes de la rompiente. Los resultados de las figuras 7b, 9b, 10a, 11a, 12b y 13a, indican comportamiento muy semejante a los resultados de Stiassnie y Peregrine (1980), presentando una disminución constante en la altura de la ola, hasta un punto en el cual la altura comienza a

aumentar, justo antes de la rompiente.

De los resultados anteriores se puede observar que en los casos en que no hay fricción predomina el mecanismo de disminución de la profundidad y que la variación de energía por este mecanismo puede ser tan importante como el de fricción. En el caso del canal de olas se puede esperar esto, pues lo poco ancho del canal y la vibración de la playa influyen grandemente en la disipación.

6.3 VARIANZA

Dado que la varianza es proporcional a la energía, en las figuras 14 a la 20 se puede observar la disminución de esta a lo largo de la trayectoria de las olas. De estas gráficas se puede observar que para períodos grandes, es más grande la disminución de la varianza con la fricción que con los cambios en la pendiente del fondo. Para períodos menores (.6 a .8 s), el cambio de la pendiente del fondo es tan importante en la disminución de la varianza (energía del oleaje), como el cambio en la fricción.

6.4 PREDICCIONES DE ALTURA DE OLA

Grosskopf (1980), a partir de la teoría de Breteschneider y Reid (1954), muestran una serie de resultados de olas que viajan en aguas poco profundas de pendiente constante y períodos entre 5 y 12 s. De estos resultados, presentan una selección, en la que se observa una desviación del 11%, entre los valores de las alturas reales y las que predice el método. Muestran que en lugares cercanos a estructuras hechas por el hombre o en donde las características del fondo son muy irregulares, el método resulta inadecuado encontrándose una desviación promedio de 60%. Si se comparan los resultados obtenidos por Grosskopf con los nuestros (mediante el programa que simula altura), se puede observar que para la de pendiente 1/40, hay desviaciones pequeñas (7% aprox.); esta desviación es mayor con la pendiente 1/33.

Hay desviaciones en la aproximación a partir del método de Grosskopf (1980) con respecto a la variación real de la altura para ciertos tipos de ola y éstos son los de períodos más grandes (1.0 y 1.2 seg).

En los experimentos se observa una desviación entre

los valores que predice el programa y los reales mayor de un 60%.

6.5 COMPARACIONES

De acuerdo al análisis de transformación de energía por el método de conservación de potencia tablas V, VI y VII se pueden hacer algunas observaciones importantes: La diferencia por ciento entre las alturas reales y las predichas por Stokes (3er orden) a partir de los espectros, generalmente aumenta con el período y disminuye con la pendiente de la playa (fig. 21), esto es, para ondas de mayor período se observa mayor diferencia debido a que estas están más tiempo 'sintiendo' el fondo.

Con la pendiente más baja (M_1), se disipa más energía (fig. 21) que con la media y alta (M_2 y M_3). Esto se puede deber a que la ola viaja más tiempo 'sintiendo' fondo.

Entre las pendientes media y alta (Fig. 21) no existe diferencia significativa para los períodos estudiados. En los experimentos con pendiente alta (M_3) la diferencia se puede atribuir a la inestabilidad de la

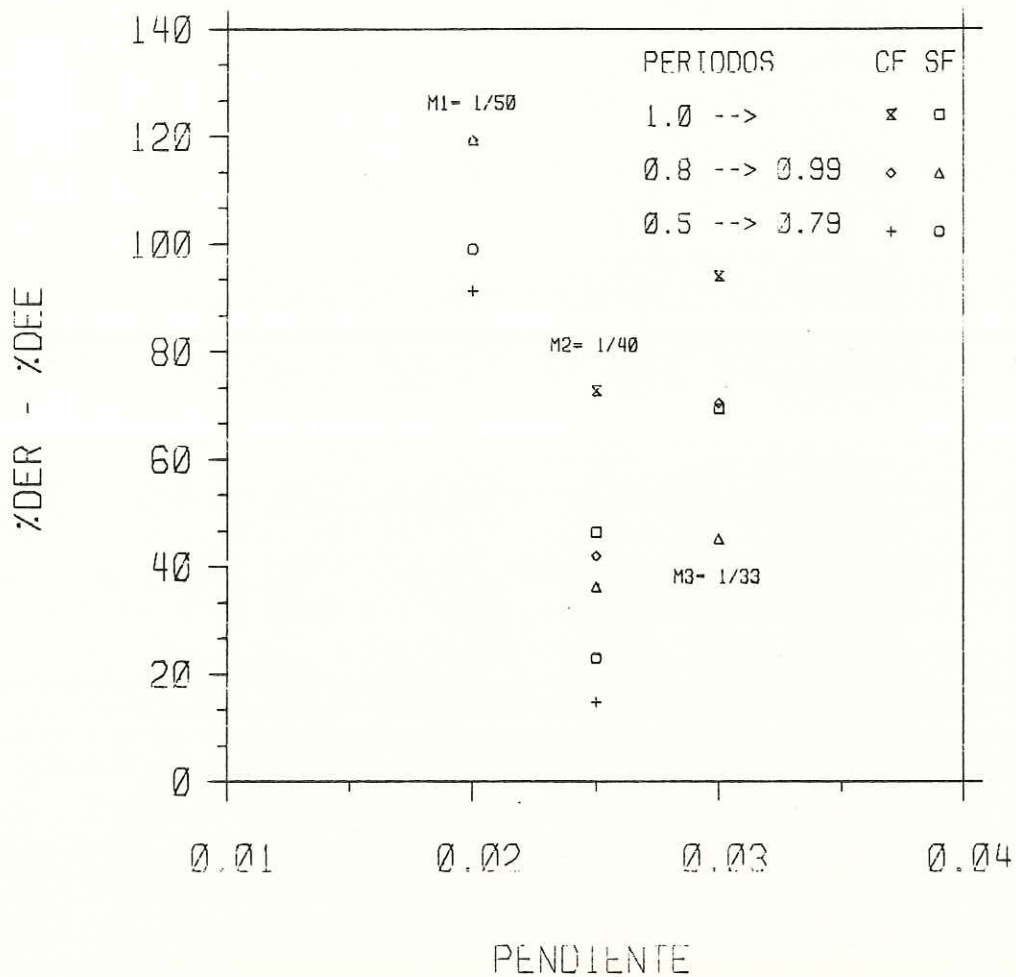


Fig. 21.- Diferencia de por ciento de disipación de energía entre los datos obtenidos en el canal (%DER) y el método de conservación de potencia a partir de los espectros (%DEE) para las tres diferentes pendientes y los rangos de periodo de ola mayor que 1.0s, entre 0.8 y 0.99s, y entre 0.5 y 0.79s con y sin fricción.

playa ya que, olas grandes como lo fueron los períodos que en ella se estudiaron hacían vibrar la madera que servía de playa actuando en este caso como amortiguador de las olas. Es difícil tratar de experimentar con un rango más amplio de frecuencias debido a las condiciones tan restringidas del canal (en el caso de períodos bajos) y al método de fotografía cuando se trata de olas muy largas, pues empieza a ser importante la deformación en las fotografías.

Hay mayor disipación en las pendientes M_2 y M_3 con fricción que sin ella (figs. 17, 18 y 19), sin embargo para M_1 se observa que el experimento con fricción no disipa más que sin fricción (figs. 14, 15 y 16). La disipación sobre la pendiente M_1 es tan grande que el introducir la red no influye de manera significativa.

7 CONCLUSIONES

De los análisis espectrales, se encuentra que la energía de la ola es repartida en otras longitudes de onda menores que la que llevaban originalmente.

A partir de los análisis de alturas de ola y de varianza, se encuentra que en algunos casos el efecto de disminución de la profundidad puede ser tan importante como el de fricción en la disminución de la Energía de la ola. Sin embargo en los períodos grandes es más importante siempre la fricción y la variación de la profundidad afecta en mucho menor grado.

La aplicación del método de Grosskopf(1980) a nuestro canal concuerda mejor con los resultados para la pendiente 1/40.

Se encuentra que la disminución de la altura del oleaje aumenta con el período y disminuye al aumentar la pendiente de la playa.

Se encuentra que, mientras que los datos obtenidos en los experimentos del canal demuestran disipación de

energía a lo largo de su trayectoria, los métodos de conservación de potencia (Stokes 3er orden) muestran una tendencia inversa.

En todos los casos, la disipación por fricción (roce con el fondo al propagarse la ola) es predominante sobre el efecto de disminución de la profundidad tanto para los experimentos con red como sin ella.

Se concluye que el método de medición y procesado es confiable puesto que en general concuerdan con los diferentes autores, aunque es necesario poner cuidado en la construcción de la playa, la generación de las olas, la toma de más fotografías por cada experimento y la aplicación de la teoría adecuada.

8 BIBLIOGRAFIA

- Barnett T.P., Holland C.H. Jr. y Yager P., (1969) Westinghouse Ocean Res. Lab. N62306-68-C-0285.
- Breteshneider, C. L. y R. O. Reid, (1954) Modification of wave high due to bottom friction, percolation, and refraction TM-45, Beach Erosion Board Corps of Engineers, Washington, D.C.
- Cokelet, E.D., (1967) Steep gravity waves in water of arbitrary uniform depth. Philadelphia Trans. Royal Soc. A280 183-230.
- Grosskopf, W.G., (1980) Calculation of wave atenuation due to friction and shoaling: an evaluation. U. S. Army Corps of Engineers, Costal Engineering Research Center. Tech. Paper No. 80-8, pp 1-15.
- Hasselmann, K. y J. I. Collins, (1968) Spectral dissipation of finite-depth gravity waves due to turbulent bottom friction. J. Marine Res., 26, 1-12.
- Hasselman, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell, H. Walden, (1973) Mesurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dutsches Hydrog. Inst., Hamburg .
- Hsiao, S. V. y O. H. Shemdin, (1980) Interaction of ocean waves with a soft bottom, J. Phys. Oceanogr, 10 (4) 605-610.
- Jonsson, I. G., (1965) Friction factor diagrams for oscillatory boundary layers, Basic. Res. Prog. 10, Tech. Univ. of Denmark, Copenhagen.
- Kamphius, J. W., (1975) Friction factor under oscillatory waves. Journal of the water waves and Harbors Divition, Vol. 101 No. WW2 pp 135-144.

- Keulegan, G. H., and G. W. Patterson, (1940) Mathematical theory of irrotational translation waves. J. Res. NBS, Vol. (24) 47-101.
- Koh, R.C. y B. Le Méhauté, (1966) Wave shoaling. J. Geophys. Res., (75) 2005-2012.
- Le Méhauté, B. y L. Webb (1964) Periodic gravity wave over a gentle slope at a third order of approximation, Proc. 9th Conf. Coastal Eng., Lisbon, 23-40.
- Le Méhauté, B., D. Divoky y A. Lin, (1968) Shallow water waves: a comparison of theories and experiments. Proceedings of 11th. conf. on Coastal Engineering, London Eng., pp 86-107.
- Longuet-Higgins, M. S. y J. D. Fenton, (1974) On the mass, momentum, energy and circulation of a solitary wave. II Proc. Roy. Soc. A 340, pp 471-493.
- Mash, F.D., (1964) Cnoidal waves in shallow water, Proc. 9th Conf. Coastal Eng., 9th, Lisbon, 1-21.
- Putnam, J. A. y J. W. Johnson, (1949) The dissipation of wave energy by bottom friction, Trans. Amer. Geophys. Union, (30) 1: 67-74.
- Shemdin, O. H., S. V. Hsiao, H. E. Carlson, K. Hasselmann y K. Schulze, (1980) Mechanisms of wave transformation in finite-depth water. J. Geophys. Res., 85 (9) 5012-5018.
- Shore Protection Manual, (1977) 3rd ed. Vol. II, U. S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, U.S.Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- Skjelbreia, L. y J. Hendrickson, (1960) Fifth order gravity wave theory, Proc. 7th. Conf. Coastal Eng., The Hague, 184-196.
- Stiassnie, M. y D. H. Peregrine, (1980) Shoaling of finite-amplitude surface waves of slowly-varying depth. J. Fluid Mech., 97(4), 783-805.