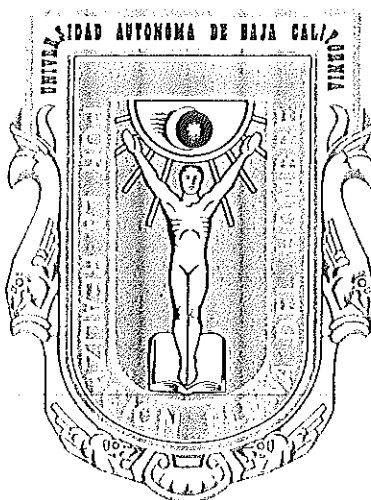
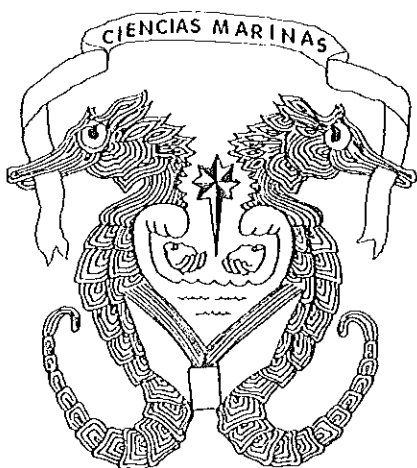


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



"COMPORTAMIENTO DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE GENERADO EN UN CANAL
DE OLAS, AL SER COLOCADO UN FILTRO MECÁNICO SUMERGIDO."



TESIS

Que para obtener el título de

OCEANOLOGO

Presenta:

Rodrigo Villalpando García

Ensenada, Baja California, Febrero de 2006.

RESUMEN

Se realizó una aproximación de laboratorio, para estimar el cambio de energía del oleaje debido al efecto mecánico de una estructura sumergida que interfiere el movimiento del oleaje incidente generado en un canal de olas para una serie de varias frecuencias. En base a relaciones adimensionales, se compararon los resultados obtenidos en Laboratorio y datos de campo en diferentes localidades de la Bahía Todos Santos. Los efectos sobre la energía se analizan mediante la medición directa de las velocidades de las olas expuestas a una serie de estructuras con diferentes alturas y longitudes, buscando una relación (H_E/H_T , H_E es la altura del FMS y H_T es la profundidad de desplazamiento del oleaje) entre la forma y dimensiones de las estructuras y la cantidad de energía que disminuye por efecto de los trenes de olas generados en el laboratorio. Los valores del porcentaje energía que se presentan, nos indican que al aumentar las RPM, la altura de la ola aumenta y la energía es proporcional a este aumento en la altura, así mismo se tuvo que el mayor porcentaje de disminución de la energía (92%) se tuvo a 7.5 RPM y el menor porcentaje de disminución (5%) se presentó a 37.5 RPM. La reducción de la energía utilizando un filtro mecánico en el laboratorio logro ser del 80 % como máximo, para el caso 25 RPM y bloque total. Dimensionalmente esto sería una disminución de 1.56 m de altura de ola hasta 0.31 m, para en el caso analizado en la Bahía de Todos Santos. La extrapolación directa de resultados experimentales al campo debe de considerarse con reservas, debido a la forma de realización de los experimentos y las limitaciones experimentales de generación de oleaje, sin embargo considerando que existe poca información del comportamiento energético del oleaje, el uso de experimentación bajo condiciones controladas se presenta como una alternativa adecuada.

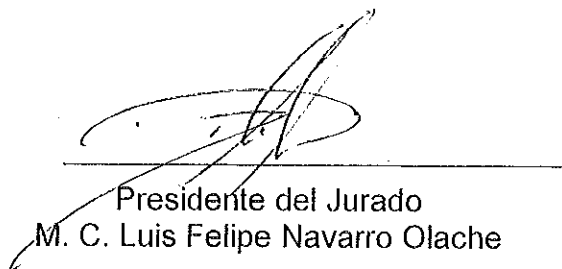
"COMPORTAMIENTO DE LA ENERGIA DEL OLEAJE GENERADO EN UN
CANAL DE OLAS, AL SER COLOCADO UN FILTRO MECANICO
SUMERGIDO"

TESIS

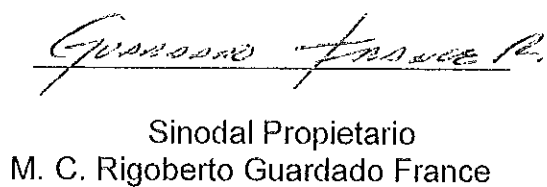
QUE PRESENTA:

Rodrigo Villalpando García

Aprobada por:



Presidente del Jurado
M. C. Luis Felipe Navarro Olache



Sinodal Propietario
M. C. Rigoberto Guardado France



Sinodal Propietario
M. C. Sergio Ignacio Larios Castillo

DEDICATORIA

A mi padre, Gerardo Villalpando González (†), gracias por cuidarme, por tu compañía, cariño y por todos los momentos que pasamos. Se que aunque no te encuentres físicamente a mi lado estas disfrutando este momento conmigo.

A mi madre, Margarita García Romero, por darme la vida, por tu ejemplo de fortaleza, perseverancia y lucha continua. Por todo el apoyo incondicional que me brindaste y sin ti esto no hubiera sido posible. Gracias Mamá.

A mis hermanos Gerardo, Fausto y Fernanda, por estar conmigo en todo momento y apoyarme siempre. Gracias hermanos!!!

A Karina, por estar aquí conmigo y por toda la paciencia que me haz tenido.

A Hiram y Mary Carmen, por todas las que pasamos durante esta etapa de nuestra vida.

Y a todos aquellos que de manera directa o indirecta me inculcaron el interés por las ciencias marinas.

Agradecimientos

Al M. C. Luis Felipe Navarro Olache, por su paciencia, comentarios, sugerencias y revisión de esta tesis.

Al M. C. Rigoberto Guardado France, por sus atinados comentarios y correcciones, para la mejora de esta tesis y por facilitarme las instalaciones del Laboratorio de Física, de la FCM.

Al M. C. Sergio Larios Castillo, por sus comentarios y revisiones, durante el desarrollo de esta tesis.

Al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del estado de Baja California, con número de referencia 2003-05, por el apoyo de una beca.

Al equipo de trabajo del laboratorio de Oceanografía Física del IIO, Diego, Rogelio y Gil por facilitarme el espacio y equipo necesario para realizar este trabajo.

A la F.C.M., a todo el personal directivo, docente y administrativo que labora en ella, por recibirme y acompañarme durante todo este tiempo.

Tabla de Contenidos

	Pág.
Preliminaries	
Carátula.....	i
Resumen.....	ii
Aprobación.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Tabla de Contenidos.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tablas.....	viii
1.- Introducción.....	1
1.1.- Antecedentes Generales.....	6
1.2.- Antecedentes Particulares.....	7
1.3.- Objetivo General.....	8
1.4.- Objetivos Particulares.....	8
2.- Hipótesis.....	8
3.- Metodología.....	9
3.1.- Dimensiones del canal.....	9
3.2.- Paleta generadora de oleaje.....	9
3.3.- Dimensiones del Filtro Mecánico Sumergido.....	10
3.4.- Velocímetro.....	10
3.5.- Parametrización.....	12
3.6.- Registros de oleaje en la BTS.....	14
4.- Resultados.....	14
5.- Discusiones.....	25
6.- Limitaciones.....	27
7.- Conclusiones.....	28
8.- Bibliografía.....	29
9.- Apéndice A.....	32

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema general de una estructura sumergida.....	Pág. 2
Figura 2. Rompeolas tradicionales de protección con corona.....	3
Figura 3. A) Corte de un rompeolas artificial sumergido B) Zona de rompientes natural llamado atolón, este es una estructura de protección de forma circular a oval en torno a una laguna central; no está asociado a alguna masa terrestre visible, por lo general se origina a partir de un volcán sumergido o una línea de falla.....	6
Figura 4. a) Canal de oleaje y b) paleta generadora de oleaje.....	10
Figura 5. a) Filtro mecánico sumergido, b) Velocímetro ADV-SONTEK.....	11
Figura 6. Contornos de velocidad del oleaje interpolados (cm s^{-1}) para el canal con el FMS (derecho) y sin el FMS (izquierdo). Las mediciones se realizaron en 9 posiciones dentro del canal, espaciadas uniformemente.....	11
Figura 7. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasada la estructura, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 10 cm. por encima del fondo del canal.....	18
Figura 8. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasada la estructura, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 10 cm. por encima del fondo del canal.....	19
Figura 9. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasado el FMS, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 20 cm. por encima del fondo del canal.....	21
Figura 10. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasada la estructura, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 20 cm. por encima del fondo del canal.....	22
Figura 11. Regiones de validez para diferentes teorías de oleaje.....	24

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla I. Relación λ/L para determinar la profundidad relativa de desplazamiento de las partículas, de acuerdo a la teoría de Airy.....	14
Tabla II. Valores obtenidos de λ , H_s y T , a diferentes RPM sin el Filtro Mecánico Sumergido.....	15
Tabla III. Profundidad de desplazamiento del oleaje de acuerdo a la relación h/λ ...	15
Tabla IV. Porcentaje de disminución de energía a 20 cm. por encima del fondo, respecto a la energía en la superficie (E_s).....	15
Tabla V. Porcentaje de disminución de energía a 10 cm. por encima del fondo del canal, respecto a la energía en la superficie (E_s).....	16
Tabla VI. Valores máximos y mínimos de la energía de las olas para las figuras 1 y 2 (a 20 cm. por encima del fondo), así como las dimensiones del FMS.....	16
Tabla VII. Valores máximos y mínimos de la energía de las olas para las figuras 3 y 4 (a 10 cm. por encima del fondo), así como las dimensiones del FMS.....	20
Tabla VIII. Valores promedio de la altura ($\overline{H}$), periodo ($\overline{T}$) y longitud de onda ($\overline{\lambda}$) del oleaje medido en diferentes localidades de la BTS.....	27
Tabla IX. Valores obtenidos del cálculo de la Altura de la ola promedio (H_p), la altura de ola máxima (H_{max}), así como la energía de la ola (E_c), a 20 cm. por encima del fondo del canal.....	33
Tabla X. Valores obtenidos del cálculo de la Altura de la ola promedio (H_p), la altura de ola máxima (H_{max}), así como la energía de la ola (E_c), a 10 cm. por encima del fondo del canal	35

Introducción

Las costas son unos de los ambientes mas dinámicos en nuestro planeta, a simple vista las costas parecen lugares tranquilos y placenteros para vivir, sin embargo, estas se ven frecuentemente afectadas por diversos fenómenos climáticos y ambientales que logran no solo poner en riesgo la morfología costera (erosionando playas y bahías), sino también los asentamientos humanos aledaños a la costa. Estos fenómenos naturales son el oleaje de tormenta, inundaciones por las mareas, lluvias intensas, huracanes y deslizamientos (Appendini y Fisher, 1998). La fuerza del oleaje, es familiar para cualquiera que viva cerca de la costa y es conocida por los estragos de que esta es capaz, sobre todo en eventos extremos, de los que existen numerosos testimonios acerca de los serios daños que estos fenómenos han provocado, se pueden mencionar, por ejemplo las olas que llegan al rompeolas Wick, en Escocia, donde un bloque de rocas cementadas con peso mayor a 1350 toneladas fue fracturado y removido por la acción del oleaje, debido al efecto combinado de la presión y la capacidad de incompresibilidad del agua. La olas pueden llegar a romper a lo largo de la costa con una fuerza estimada de unos $30,000 \text{ Kg m}^{-2}$ (Panicker, 1977, citado en Bermúdez-Zavala, 1999) capaz de mover grandes cantidades de material o afectar las estructuras cercanas a la costa. Debido al continuo embate del oleaje se presentan modificaciones de la línea de costa y provoca la erosión de playas, esto trae como consecuencia dificultades en la planeación de asentamientos humanos, así como para la creación de zonas de carga y descarga. Por esta razón y desde hace mucho tiempo se han ideado métodos de protección de la línea costera y sus playas, que logren mitigar los procesos destructivos del oleaje, tanto los eventuales como los continuos de tal forma que se puedan crear zonas de refugio para carga y descarga, así como para el desarrollo de asentamientos cerca de la línea de costa (Rosati, 1990)

La implementación y diseño de estructuras de protección contra el oleaje, como rompeolas y espigones han surgido de la necesidad de estabilización de la costa, en contra de la erosión. Los rompeolas son estructuras robustas que se construyen paralelas u oblicuas a la línea de costa y su función es la de bloquear o redirigir la energía del oleaje que arriba a ella. Existen una gran diversidad en tipos y formas de rompeolas los mas comunes se construyen desde el litoral, y sobre el nivel medio del mar. La forma, longitud, altura, ancho y orientación de estas estructuras depende primordialmente de la climatología regional del oleaje (Shore Protection Manual, 1984). Para decidir cual es la estructura de protección sumergida más eficiente que disminuya la energía de las olas que inciden en las costas, se tiene que conocer las características de las olas como son el periodo de la ola, la longitud de onda, altura de la ola, etc. Existen otros rompeolas que se construyen alejados de la línea de costa, a este tipo de estructuras se les llama rompeolas sumergidos (figura 1) y su función es el de filtrar el oleaje en lugar de bloquearlo. Estos rompeolas pueden tener una estructura similar a los rompeolas convencionales, pero la cresta o corona queda debajo del nivel del agua o bien al ras del mismo (Dattari, *et al.*; 1978).

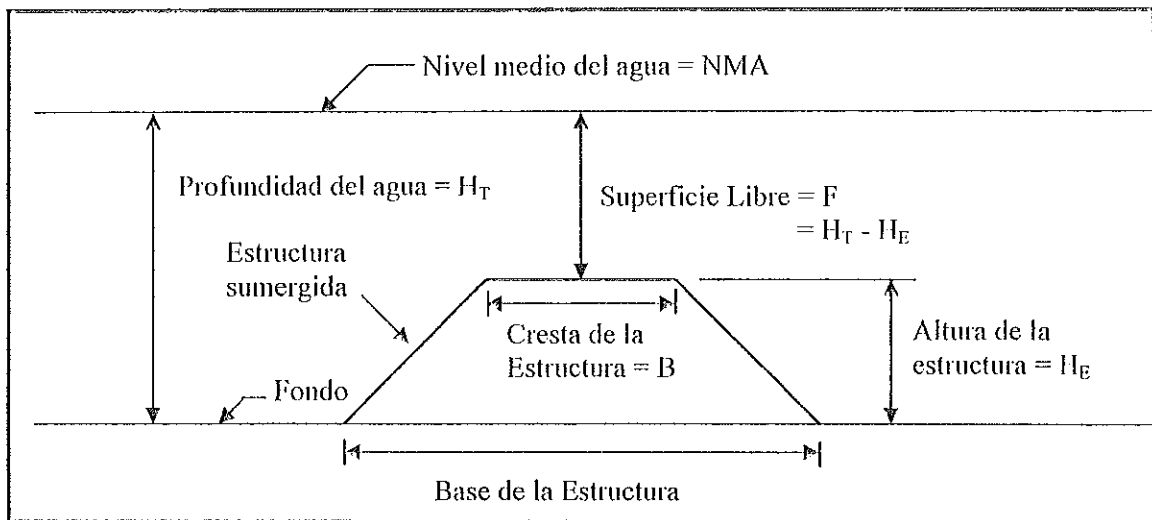


Figura 1. Esquema general de una estructura sumergida.

El bloqueo de la energía conlleva a una disminución del transporte litoral de sólidos provocando zonas de acreción y deposición, dependiendo de la dirección del oleaje incidente y la orientación de las estructuras colocadas en el mar. La energía del oleaje es disipada, reflejada y redireccionalizada (refracción y difracción) al encuentro con los rompeolas (Chasten, *et al.*; 1993) modificando el balance natural de las playas.

De forma simple podemos indicar que: entre mayor sean las olas, mayor tendría que ser la parte sobresaliente o cresta del rompeolas. No obstante, la altura sobresaliente y/o peso de las estructuras que hacen que la corona de un rompeolas se rige con frecuencia por los costos, de manera que la altura en eventos de oleaje extremo queda comprometida y en muchos casos la zona de seguridad es rebasada, ocasionando daños, tanto a la estructura como a la zona protegida por ella (Figura 2). Sin embargo la reposición de estos daños resultan con frecuencia mas económicos que los de hacer una obra de máxima protección contra al oleaje (Guillén-Sánchez, 1998).



Figura 2. Rompeolas tradicionales de protección con corona.

Los rompeolas sumergidos producen una alteración en la altura y por lo tanto en la energía del oleaje incidente debido a la transmisión de momentum durante el choque del oleaje contra la estructura, lo que ocasiona que parte de la energía se refleje se disipe o transmita, causando que la cresta de la ola aumente se vuelva inestable y rompa (Figura 3a), proceso que es función

principalmente de las características del oleaje, pero con otros componentes importantes como la geometría, forma de la estructura y el tipo de suelo. Sin embargo, una forma natural de rompeolas se pueden observar en una gran cantidad de islas volcánicas o en zonas de crecimiento de arrecifes coralinos, en donde el obstáculo contra el oleaje esta sumergida lejos de la costa provocando una zona de rompiente y una zona de calma antes de la playa (Figura 3b).

La forma de conocer si un rompeolas causa que la ola rompa o se transmita, es por medio de la relación de esbeltez de la ola "wave steepness $\delta = \frac{H}{L}$ ", donde H es la altura y L la longitud de la ola en metros es aproximadamente $L = 1.56 (T)^2$, y T el periodo de la ola. Por lo tanto, si δ es mayor a 1/2, se dice que la ola comienza a tocar el fondo de la playa, si la relación es 1/7, la ola se vuelve inestable y si es 1/12 la ola rompe por lo que las olas son reflejadas en la dirección contraria al avance, formando zonas de calma y permitiendo que oleaje de baja energía llegue a la costa (García-Flores, 1998). En este tipo de estructuras tanto naturales como artificiales, se reduce el grado de impacto sobre la zona protegida, no obstruyen la vista y el espacio que crean sirven de refugio a una gran diversidad de especies de peces (Yoshioka, *et al.* 1990; Nakayama, *et al.*; 1993), sin embargo comparándolos con rompeolas tradicionales, la protección contra eventos extremos es menor y en condiciones extremas sus costas son fácilmente inundadas

Para describir al fenómeno de oleaje se han derivado varias teorías, por lo que al adoptar una teoría se debe tener cuidado al escoger el fenómeno de oleaje de interés, que describa de manera razonable la teoría adoptada, debido a que de esto depende el designar una estructura de protección costera. Por lo que se han propuesto, varias teorías y modelos para describir el comportamiento del oleaje. Sin embargo, las teorías de las olas son solamente aproximaciones de la realidad, por lo que describen solo algunas de las

características reales debido a la gran cantidad de suposiciones hechas durante su derivación (Dean y Dalrymple, 1991).

En ambos tipos de rompeolas artificial y natural la energía del oleaje incidente, es el principal proceso físico al que están expuestos. La energía del oleaje incidente se puede presentar de dos formas: 1) Energía cinética que es la energía inherente al movimiento orbital de las partículas de agua, es decir la velocidad de las partículas al paso de una ola y 2) Energía potencial, es la que poseen las partículas cuando estas son desplazadas de su posición media. El total de la energía de un sistema de olas es la suma de su energía cinética y su energía potencial (Brown, *et al*, 1993). En este trabajo se realiza una aproximación de laboratorio, para estimar el cambio de energía del oleaje debido al efecto mecánico de una estructura sumergida que interfiere el movimiento del oleaje incidente generado en un canal de olas para una serie de varias frecuencias. Por lo que se pretende obtener mediante relaciones adimensionales, comparar los resultados obtenidos en Laboratorio y datos de campo obtenidos de mediciones directas de sensores de presión, colocados en la Bahía Todos Santos. Los efectos sobre la energía se analizan mediante la medición directa de las velocidades de las olas expuestas a una serie de estructuras con diferentes alturas y longitudes, buscando una relación (H_E/H_T , H_E es la altura del FMS y H_T es la profundidad de desplazamiento del oleaje) entre la forma y dimensiones de las estructuras y la cantidad de energía que disminuye por efecto de los trenes de olas generados en el laboratorio.

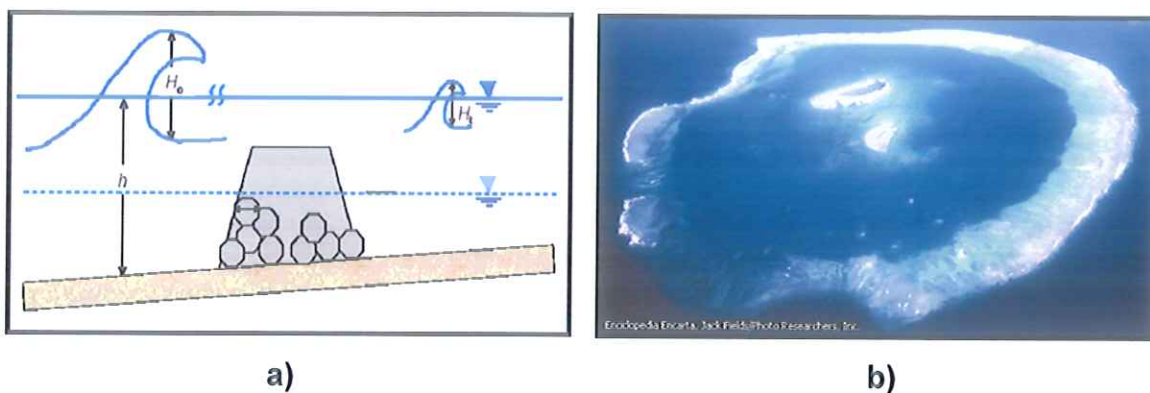


Figura 3. a) Corte de un rompeolas artificial sumergido; **b)** Zona de rompiente natural llamado atolón, este es una estructura de protección de forma circular a oval en torno a una laguna central; no esta asociado a alguna masa terrestre visible, por lo general se origina a partir del colapso de un volcán o una línea de falla.

Antecedentes generales

En distintos países se ha llevado a cabo la construcción de rompeolas sumergidos, a pesar de esto, hasta la fecha se tiene experiencia limitada con respecto al diseño, construcción y funcionamiento de los mismos, principalmente en México (Téllez-García, 2003).

Fischer y Hall (1998), realizaron un estudio sobre el funcionamiento de rompeolas sumergidos, los cuales consisten en un cilindro flotante que se coloca por debajo del agua absorbiendo una fracción considerable de energía de ola incidente. Este tipo de rompeolas presenta beneficios como: 1) conservar el hábitat marino, 2) reduce el costo para su construcción y 3) protege adecuadamente un área costera permitiendo la circulación del agua.

Guardado-France (1997), realiza un estudio de la funcionalidad de las Obras de Protección Costera (OPC) construidas en la Bahía Todos Santos en Ensenada, Baja California, las cuales de acuerdo a la definición de Ross (1988), una OPC es una obra que cumple con su función, su estado físico es excelente y es la estructura adecuada al objetivo de su construcción. En su estudio toma en cuenta el estado Físico en función de los daños que presenta.

Ferrer-Vega (2003), realizó un estudio oceanográfico y el diseño de un rompeolas separado de la costa para proteger cantiles marinos en la zona norte del hotel las rosas ubicado en ensenada, B. C., encontrando que el oleaje que más afecta a esta zona es el de invierno y que el diseño de la estructura se desplantará a los 4 m de profundidad a 230 m de distancia de la costa y tendría una longitud de 460 m, para oleaje de condiciones normales con alturas de olas rompientes de 2.88 a 3 m

Antecedentes Particulares

Rivas-Cáceres, (1992), diseña un modelo a escala en una canal de olas de la Facultad de Ciencias Marinas, para realizar la conversión de energía del oleaje a energía eléctrica y determina sus probables usos y aplicaciones, encontrando que el modelo tiene una eficiencia del 15%.

Medina-Enríquez (1993), realizó un anteproyecto de un modelo hidráulico de fondo fijo del puerto del Sauzal de Rodríguez, llevado a cabo en la cuba de ondas de la Escuela de Ingeniería de la UABC, con la finalidad de que se utilizara en estudios sobre efectos de rompeolas en zonas costeras. Para realizar el modelo utilizó datos reales de la naturaleza del oleaje, nivel de agua, características físicas de las estructuras, trasladando este modelo a escala, así como la batimetría y el estudio de refracción para esta zona. Encontrando, en base a datos cualitativos y de acuerdo a las características dadas para la construcción del modelo propuesto, que los resultados fueron adecuados y propone que en una cuba mejor diseñada se pueden obtener buenos datos cuantitativos.

Téllez-García (2003) realizó un diseño preeliminar de un rompeolas sumergido (a base de rocas) separado de la costa y determina su impacto frente a los cantiles marinos de Punta Morro, Ensenada, B. C., encontrando

que la profundidad de colocación del rompeolas seria de 5 m, con una altura diseño de 4.5 m, el tirante de agua de 0.5 m y con una longitud de 100 m, colocado a 95° respecto al norte, concluyendo que la colocación de dicha estructura reduciría la altura de oleaje de tormenta en un 38% y 57.3% para condiciones normales de oleaje que incide en esta zona.

Objetivo General

Determinar el comportamiento energético del oleaje al colocar un filtro mecánico, y establecer la razón (H_E/H_T) de eficiencia disipativa de la energía que pasa a través de este.

Objetivos Particulares

- Llevar a cabo mediciones de la energía del oleaje antes y después de rebasado el filtro mecánico sumergido al variar su altura.
- Determinar cual es la mejor forma de disminuir la energía al variar la altura y el ancho del filtro mecánico sumergido.
- Generar información básica que pueda ser utilizada en estudios posteriores, para el establecimiento de una estructura de este tipo que sirva de protección a una zona costera.

Hipótesis

Se espera obtener una buena eficiencia del FMS que va a ser determinada por la relación H_E/H_T y por la cantidad de disminución de energía que se transmite después de que es rebasado. De la misma manera, se espera que la energía del oleaje disminuya después de rebasado el filtro mecánico sumergido (FMS), respecto a la energía que incide antes de rebasado, por lo que la altura y el periodo del oleaje disminuirán y por consiguiente se generará un zona de calma.

Metodología

Dimensiones del canal

Los experimentos se realizaron en el canal de oleaje de la Facultad de Ciencias Marinas (Figura 4a), cuyas dimensiones son de 13.8 m de largo por 0.55 m de altura se realizaron una serie de experimentos para determinar la cantidad de energía disipada por un filtro mecánico sumergido (FMS) y consistieron en la variación de la forma y dimensiones del FMS por las que pasan una serie de olas monocromáticas de diferentes características. Los experimentos consistieron en llenar con agua de la llave a temperatura ambiente el canal hasta un nivel de 30 m.

Paleta generadora de oleaje

Una vez lleno el canal se acciona un brazo de palanca eléctrico para propagar olas desde uno de los extremos del canal, mediante una paleta conectada a un motor de rotación que sirvió como el generador de las olas (Figura 4b). En el extremo opuesto se colocó una pendiente para que la ola rompiera y se disipara para evitar la propagación de energía en sentido contrario a la generación de las olas. El oleaje generado por el motor de rotación fue en las siguientes frecuencias 7.5, 15, 25 y 37.5 revoluciones por minuto (RPM) de acuerdo a las condiciones físicas del motor, lo que equivale a unas longitudes de onda de 164, 106.9, 71.2 y 58.4 cm., respectivamente.



a)

b)

Figura 4. a) Canal de oleaje y b) paleta generadora de oleaje

Dimensiones del Filtro Mecánico Sumergido (FMS)

El FMS fue colocado aproximadamente en la mitad del canal de olas (debido a que en este sitio es donde se presenta una menor variación en la forma y altura de las oleaje generado) y consistió de una serie de estructuras rectangulares con una dimensión de 10 cm. de ancho, 10 cm. de alto y 25 cm. de largo, las cuales fueron hechas con una red de malla de metal de aproximadamente 1 cm. de luz de malla, en la cual se colocaron rocas de tamaño variaba entre 5 y 10 cm. (Figura 5a). La altura y ancho de la estructura se varió colocando una o más estructuras a manera de obtener el efecto de la estructura sobre las olas generadas por el motor.

Velocímetro

Para contabilizar estos cambios en la energía se utilizó un velocímetro acústico ADV-SONTEK (Figura 5b), el cual consiste de un arreglo de tres sensores doppler situados a 5 cm. del punto de medición, que en este caso corresponden a las velocidades orbitales de las partículas en dirección de propagación vertical, transversal y horizontal, es decir, las velocidades de los componentes u , v y w respectivamente, en nuestro caso solo tomamos las mediciones obtenidas en el paso de las olas en la vertical (u) y la horizontal (w).

Las mediciones de velocidad se llevaron a cabo en tres fases: a) mediciones “blanco” es decir sin el FMS; b) mediciones antes del FMS y c) mediciones después del FMS. El velocímetro se colocó a una profundidad de 10 y 20 cm. sobre el fondo en el centro del canal de acuerdo a la plantilla de velocidades (Figura 6) que muestra que ahí es la posición de velocidades mas estable. Los datos de velocidad se tomaron durante aproximadamente 60 segundos a una razón de muestreo de 0.0625 seg, con una frecuencia de 16 Hz.

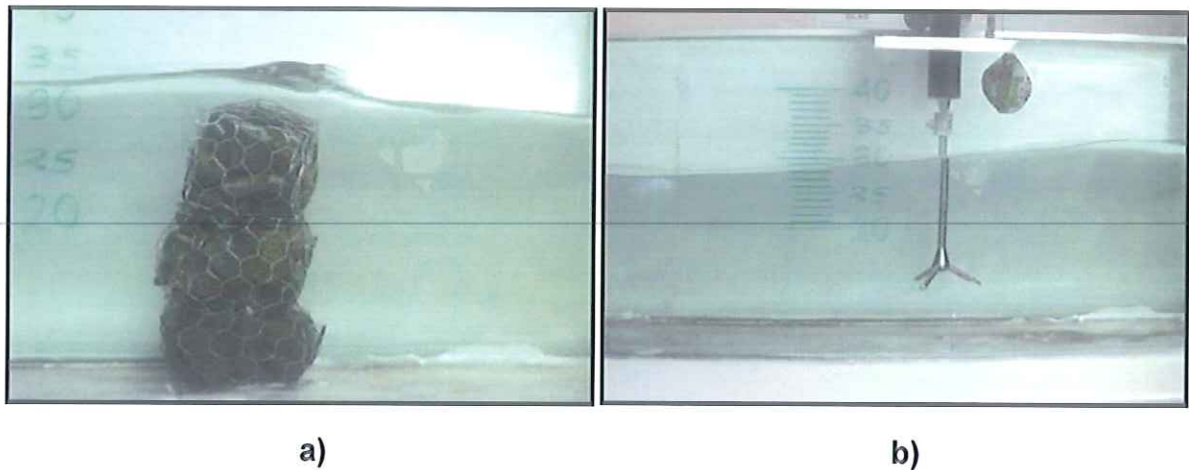


Figura 5. a) Filtro mecánico sumergido, b) Velocímetro ADV-SONTEK.

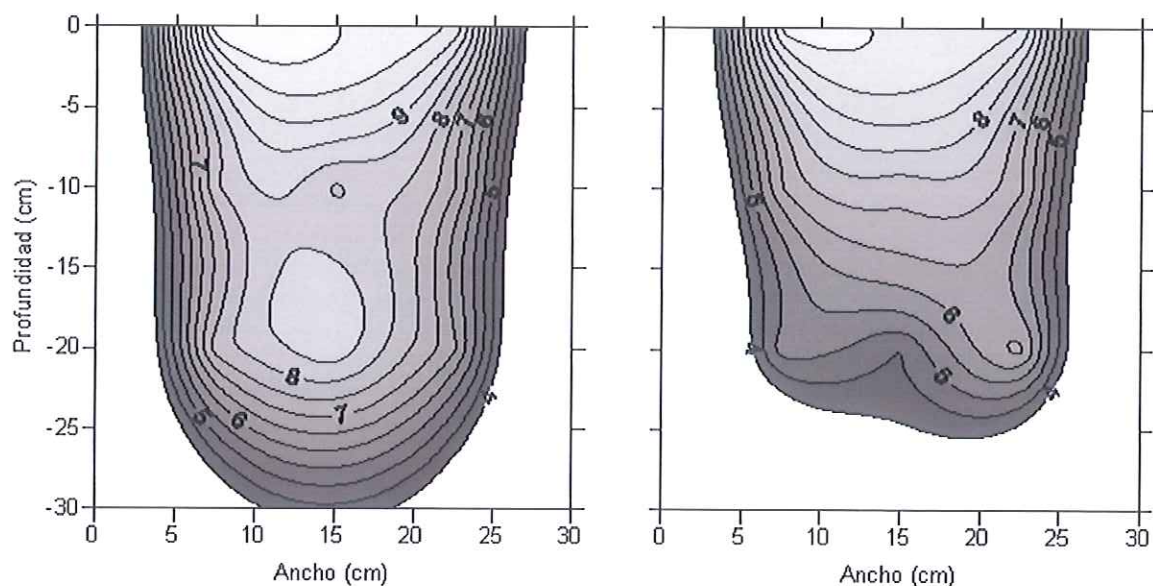


Figura 6. Contornos de velocidad del oleaje interpolados ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) para el canal con el FMS (derecho) y sin el FMS (izquierdo). Las mediciones se realizaron en 9 posiciones dentro del canal, espaciadas uniformemente.

Parametrización

Los parámetros de la ola que se midieron directamente en los experimentos y también mediante fotografía y video de los experimentos, estos parámetros fueron : 1) Altura de la ola (H), periodo de la ola (T) y la longitud de onda (λ). La relación entre la profundidad de colocación del FMS (H_E) y la profundidad de desplazamiento de las olas (H_T) es la que nos va determinar cual es la altura de ola que se va considerar para la colocación y dimensiones del FMS, que disminuya de manera más eficiente la energía, además de la profundidad de colocación del obstáculo, de tal manera que este no pueda ser observado en la superficie.

En el estudio de la energía de las olas y las velocidades para varios valores de profundidad y de tiempo durante el paso de una ola, las velocidades tienen que ser encontradas. Por lo que, la componente vertical u y la componente horizontal w , de la velocidad local de un fluido de acuerdo a la teoría lineal de Airy, están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\cosh[2\pi(z+h)/\lambda]}{\cosh(2\pi h/\lambda)} \cos \theta \quad (1)$$

$$w = \frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\sinh[2\pi(z+h)/\lambda]}{\cosh(2\pi h/\lambda)} \sin \theta \quad (2)$$

Donde:

H = Altura de la ola.

g = Aceleración debido a la gravedad.

T = Periodo de la ola.

λ = Longitud de la ola.

z = Profundidad de desplazamiento de la partícula (profundidad de colocación del velocímetro).

h = Profundidad total del agua en el canal de oleaje.

Para obtener la altura de la ola se utilizó la ecuación (1), debido a que se asumió que las olas viajaban paralelas en dirección de la pendiente de la ola, por lo tanto, el término $\cos \theta$ es igual a uno y al obtener en base a la Teoría de Airy, que en todos los experimentos el oleaje generado de acuerdo relación h/λ , se estaban desplazando en aguas intermedias (Ver tabla I), la altura de las olas que incidían sobre el FMS antes y después de rebasado, se obtuvo a partir de cada una de las velocidades orbitales medidas por el velocímetro colocado a 10 y 20 cm. sobre el fondo, entonces, despejando H de (1) se obtuvo que:

$$H = u * \frac{2\lambda [\cosh(2\pi h / \lambda)]}{\cosh[2\pi(z + h) / \lambda]} \cos \theta \quad (3)$$

Las alturas de las olas desplazándose sobre el obstáculo, se calcularon por medio de un programa realizado en MATLAB 6.5, las cuales se obtuvieron a partir de promedio de la altura (H_p) para cada experimento al variar la altura y el ancho de la estructura (ver Anexo, tablas VIII y IX) y en base a estas se calculó la energía total (E), la cual por unidad de área de cresta de la ola esta dada por:

$$E = 1/8(\rho g H^2) \quad (4)$$

Donde:

ρ = Densidad del agua.

g = Aceleración debido a la gravedad.

H = Altura de la ola.

E = Energía total.

Para efecto de este estudio se tomó la densidad del agua pura (1 gr cm^{-3}), la gravedad como 981 cm s^{-2} y la altura de la ola en cm., por lo que la energía se obtuvo en ergs cm^{-2} .

Tabla I. Relación h/λ para determinar la profundidad relativa de desplazamiento de las partículas, de acuerdo a la teoría de Airy.

Aguas someras	Aguas Intermedias	Aguas Profundas
$\frac{h}{\lambda} < \frac{1}{25}$	$\frac{1}{25} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$	$\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$

Registros de oleaje en la BTS

Se utilizaran datos de campo con la finalidad de comparar los datos obtenidos en laboratorio, a partir de registros de oleaje medidos por sensores de presión en la Bahía de Todos Santos (BTS), Baja California, ubicados en Punta Morro (P. M.), Ciprés, Boca del Estero (BOCA) y Punta Banda (P. B.), el estudio fue llevado a cabo por Martínez en el 2004, las variables que se tomaron en cuenta de este estudio son los valores promedio de la altura, periodo y longitud de onda del oleaje en esas localidades.

Resultados

En la tabla II se muestran los valores medidos directamente en la superficie del canal de la longitud de la ola (λ), la altura de ola (H_s), el periodo (T) y la energía asociada a esa altura (E_s), a diferentes RPM sin el filtro mecánico sumergido (FMS). En la tabla III se presentan la relación h/λ , que en base a la Teoría de Airy es la profundidad relativa de desplazamiento de las partículas, en donde h es igual a 30 cm. (profundidad del agua en el canal) y λ es la longitud de onda asociada a las revoluciones por minuto (RPM).

Tabla II. Valores obtenidos de λ , H_s y T , a diferentes RPM sin el Filtro Mecánico Sumergido.

<i>RPM</i>	λ (cm)	H_s (cm)	T (s)	E_s (ergs cm ⁻²)
7.5	164	1.5	3.03	275.91
15	106.9	2	1.98	490.5
25	71.2	3	1.328	1103.62
37.5	58.4	5	1.096	3065.63

Tabla III. Profundidad de desplazamiento del oleaje de acuerdo a la relación h/λ .

<i>RPM</i>	$\frac{h}{\lambda}$	Profundidad relativa
7.5	0.1829	Aguas Intermedias
15	0.2806	Aguas Intermedias
25	0.4213	Aguas Intermedias
37.5	0.5136	Aguas Intermedias

*Este valor se tomo que las partículas viajaban en aguas intermedias, debido que se encuentra dentro del limite.

En las tablas IV y V se presentan los valores de la energía calculadas por medio de la ecuación 4, la energía en la superficie (E_s) se obtuvo a partir de la altura de la ola en la superficie del canal (H_s), la energía sin FMS (E), la energía promedio antes de rebasado el FMS ($\bar{E}_A$) y después de rebasado el FMS ($\bar{E}_D$), se calcularon por medio de la ecuación 4, a partir de las alturas promedio obtenidas en base a los valores de velocidad (ecuación 3). El porcentaje de disminución de energía sin FMS ($\%E$), antes y después del FMS ($\%\bar{E}_A$ y $\%\bar{E}_D$), se calculó tomando como el 100% el valor de E_s .

Tabla IV. Porcentaje de disminución de energía a 20 cm. por encima del fondo del canal, respecto a la energía en la superficie (E_s).

<i>RPM</i>	E_s (ergs cm ⁻²)	E (sin FMS) (ergs cm ⁻²)	$\bar{E}_A$ (ergs cm ⁻²)	$\bar{E}_D$ (ergs cm ⁻²)	$\%E$	$\%\bar{E}_A$	$\%\bar{E}_D$
7.5	275.91	22.94	21.28	26.66	92	92	90
15	490.5	56.74	106.65	95.34	88	78	81
25	1103.62	216.45	961.81	657.53	80	13	40
37.5	3065.63	506.67	2900.50	2585.35	84	5	16

Tabla V. Porcentaje de disminución de energía a 10 cm. por encima del fondo del canal, respecto a la energía en la superficie (E_s).

<i>RPM</i>	E_s (ergs cm ⁻²)	$E^s(\text{FMS})$ (ergs cm ⁻²)	$\bar{E}_A$ (ergs cm ⁻²)	$\bar{E}_D$ (ergs cm ⁻²)	% E	% $\bar{E}_A$	% $\bar{E}_D$
7.5	275.91	10.14	14.33	14.03	96	95	95
15	490.5	64.46	49.22	37.29	87	90	92
25	1103.62	139.82	236.75	150.87	87	78	86
37.5	3065.63	389.04	667.34	465.90	87	78	85

En las tablas IX y X (anexo1), se presentan los valores obtenidos del cálculo de la Altura de la ola promedio (H_p), la altura de ola máxima ($H_{\max}$), así como la energía de la ola (E_c), que se obtuvo a partir de la ecuación de energía (ec. 3) en base a los valores de H_p , para los diferentes experimentos realizados; antes (azul) y después (rojo) de rebasada la estructura en el canal de oleaje, así como la altura (H_E) y el ancho del FMS (Λ_E). En las figuras 7-10 se presentan los valores antes y después de rebasado el FMS contra la relación de la altura del obstáculo ($H_E = 10, 20$ y 30 cm.) y la profundidad total de la columna de agua ($H_T = 30$ cm.) a diferentes anchos (A_{10}, A_{20} y A_{30}), llevando a cabo las mediciones a 10 y 20 cm. sobre el fondo. Los máximos y mínimos así como las dimensiones del FMS para cada uno de los experimentos a diferentes revoluciones por minuto (7.5, 15, 25 y 37.5 RPM) se presentan en las tablas VI y VII.

Tabla VI. Valores máximos y mínimos de la energía de las olas para las figuras 1 y 2 (a 20 cm. por encima del fondo), así como las dimensiones del FMS.

<i>RPM</i>	Máximo (ergs cm ⁻²)	Mínimo (ergs cm ⁻²)	Máximo		Mínimo	
			alto	ancho	alto	ancho
7.5	43.56	15.39	20x10 ^D		30x20 ^D	
15	135.70	55.62	30x10 ^A		30x30 ^D	
25	1735.7	370.29	30x30 ^A		30x30 ^D	
37.5	4562.77	1822.86	30x30 ^A		10x30 ^A	

D = Después de rebasado el FMS; A = Antes de rebasado el FMS

En la figura 7a, el valor máximo obtenido de la energía se presentó después de rebasado el FMS, con un valor de $43.56 \text{ ergs cm}^{-2}$ con una dimensión $10 \times 20 \text{ cm.}$ y el mínimo fue de $15.39 \text{ ergs cm}^{-2}$, después de rebasado el FMS con una dimensión de $30 \times 20 \text{ cm.}$, en la figura 7b, la energía después de rebasado el FMS, para los diferentes anchos y alturas presentaron una disminución de la energía principalmente después de los 20 cm. de altura, el mínimo y el máximo, para estos experimentos fueron de 55.62 y $137.5 \text{ ergs cm}^{-2}$, con una dimensión del FMS de 30×30 y $10 \times 30 \text{ cm.}$, respectivamente. En la figura 8a, se observa de manera general, que después de rebasado el FMS a los 20 cm. de altura, la energía disminuye para todos los experimentos, teniendo que el mínimo de energía fue de $370.29 \text{ ergs cm}^{-2}$ y el máximo de $1737.7 \text{ ergs cm}^{-2}$, ambas con una dimensión del FMS de $30 \times 30 \text{ cm.}$ En la figura 8b, los valores de energía son mayores después de rebasado el FMS en todos los experimentos, comenzando a disminuir a los 20 cm. de altura, teniendo que el valor máximo para estos experimentos fue de $4562.77 \text{ ergs cm}^{-2}$ con una dimensión del FMS de $30 \times 30 \text{ cm.}$ y el mínimo de $1822.86 \text{ ergs cm}^{-2}$ con una dimensión del FMS de $30 \times 10 \text{ cm.}$ De manera general, los mínimos se presentaron después de rebasado el FMS como de puede observar en la Tabla VI, excepto para el experimento a 37.5 RPM y los máximos se presentaron en su mayoría antes de rebasado el FMS, excepto a 7.5 RPM .

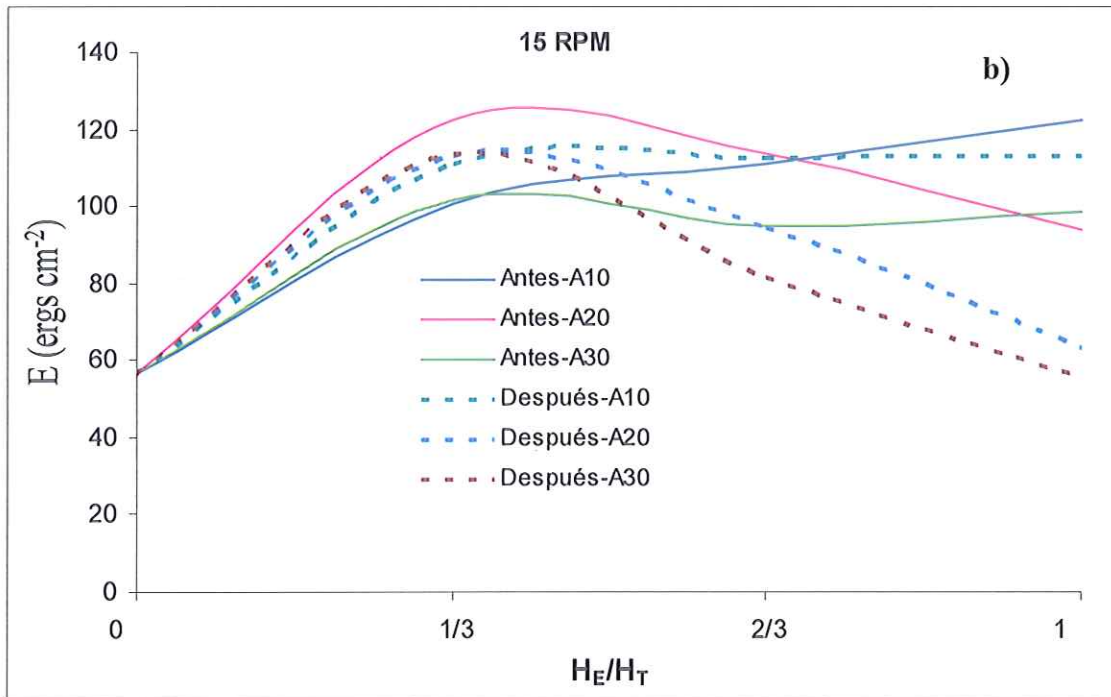
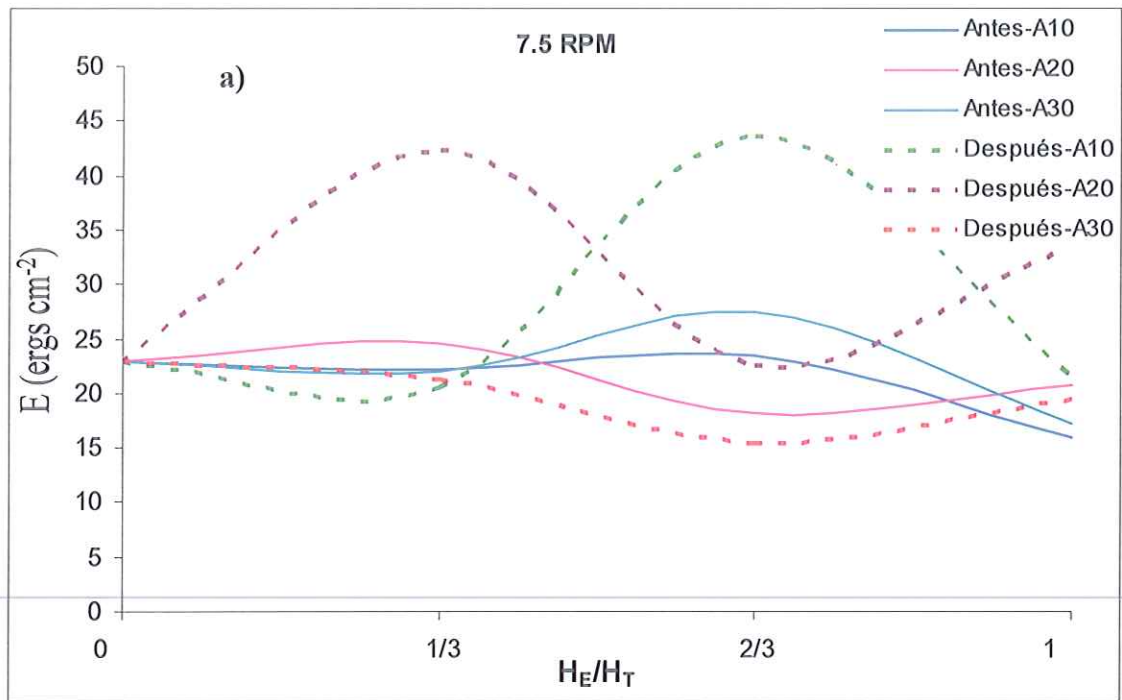


Figura 7. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasado el FMS, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 20 cm. por encima del fondo.

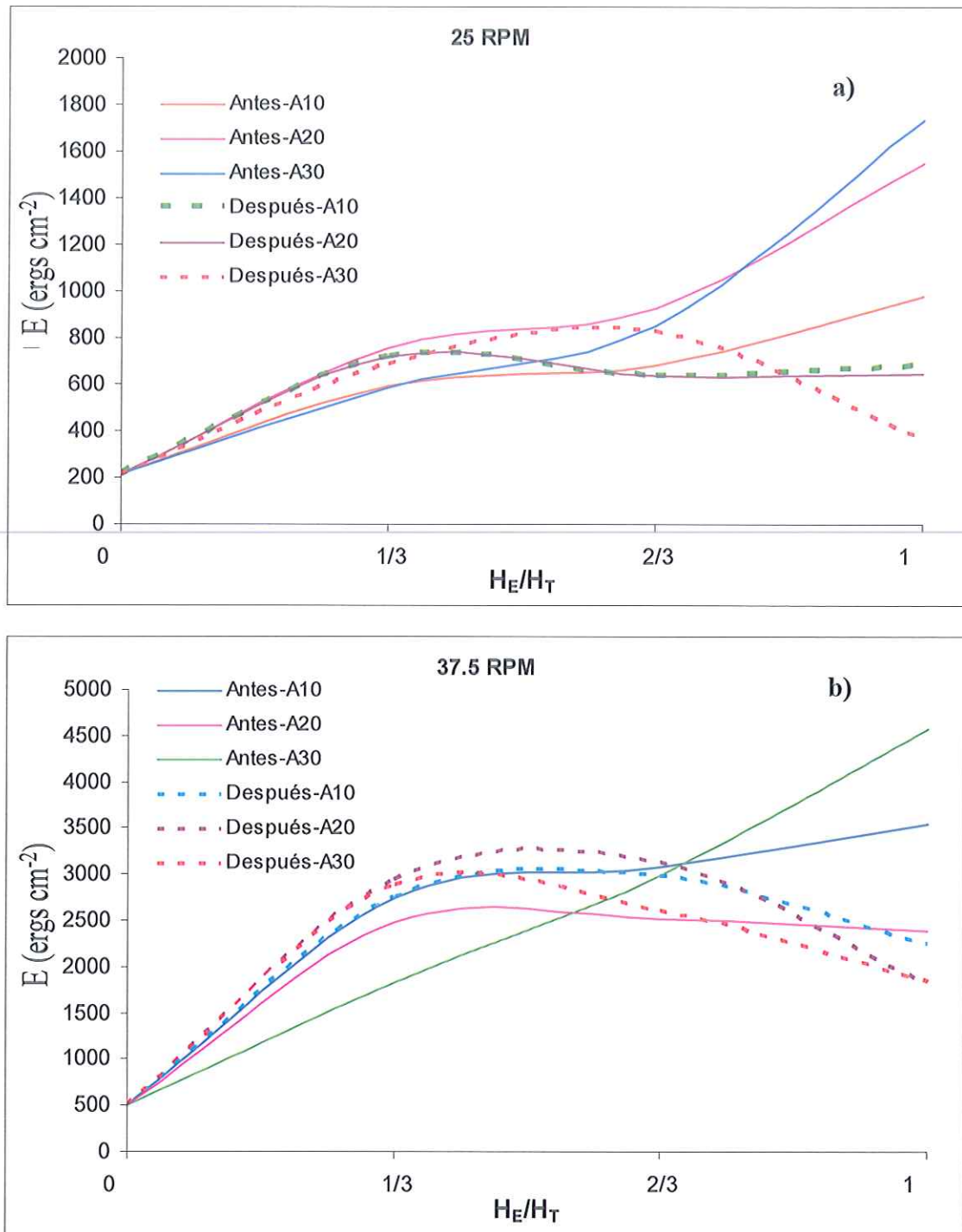


Figura 8. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasado el FMS, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 20 cm. por encima del fondo.

La figura 9a muestra que el valor máximo de energía ($22.77 \text{ ergs cm}^{-2}$, ver Tabla VII), se presentó después de rebasado el FMS con una dimensión de $20 \times 20 \text{ cm.}$, el mínimo ($10.27 \text{ ergs cm}^{-2}$) se presentó con una dimensión del FMS de $30 \times 30 \text{ cm.}$, después de rebasado el FMS. En la figura 9b, los valores de energía en general disminuyeron después de rebasado el FMS, teniendo el máximo antes de rebasado el FMS con una dimensión de $30 \times 30 \text{ cm.}$ y el mínimo después de rebasado el FMS con una dimensión de $20 \times 30 \text{ cm.}$, en la figura 10a los valores de la energía disminuyeron a los 20 cm. antes de rebasado el FMS, el máximo fue de $364.63 \text{ ergs cm}^{-2}$, con una dimensión de $20 \times 30 \text{ cm.}$ y el mínimo de $75.86 \text{ ergs cm}^{-2}$ después de rebasado el FMS con dimensión de $30 \times 30 \text{ cm.}$, los valores de energía para los experimentos antes de rebasado el FMS con una dimensión de 30×30 , no fueron registrados por el velocímetro. En la figura 10b la energía disminuyó a los 20 cm. de altura para todos los experimentos, teniendo que el mínimo fue de $158.05 \text{ ergs cm}^{-2}$ y el máximo de $1021.22 \text{ ergs cm}^{-2}$, ambos valores se presentaron en dimensiones del FMS de $20 \times 30 \text{ cm.}$

Tabla VII. Valores máximos y mínimos de la energía de las olas para las figuras 3 y 4 (a 10 cm. por encima del fondo), así como las dimensiones del FMS.

RPM	Máximo (ergs cm^{-2})	Mínimo (ergs cm^{-2})	Máximo		Mínimo	
			alto	ancho	alto	ancho
7.5	22.77	10.27	20x10	^D	30x20	^D
15	69.48	25.07	30x10	^A	30x30	^D
25	364.53	75.86	30x30	^A	30x30	^D
37.5	1021.22	158.05	30x30	^A	10x30	^A

D = Después de rebasado el FMS; A = Antes de rebasado el FMS

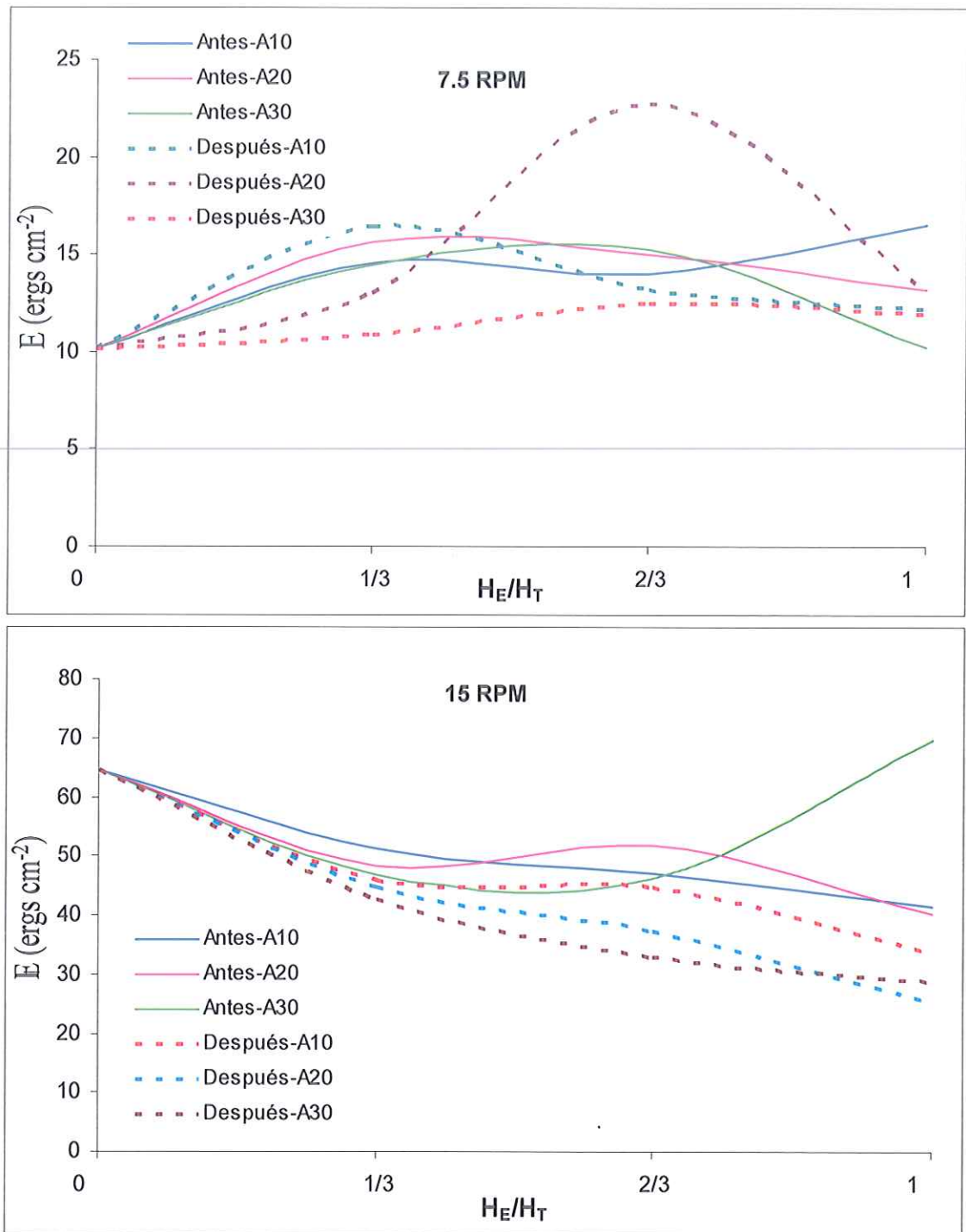


Figura 9. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasado el FMS, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 10 cm. por encima del fondo.

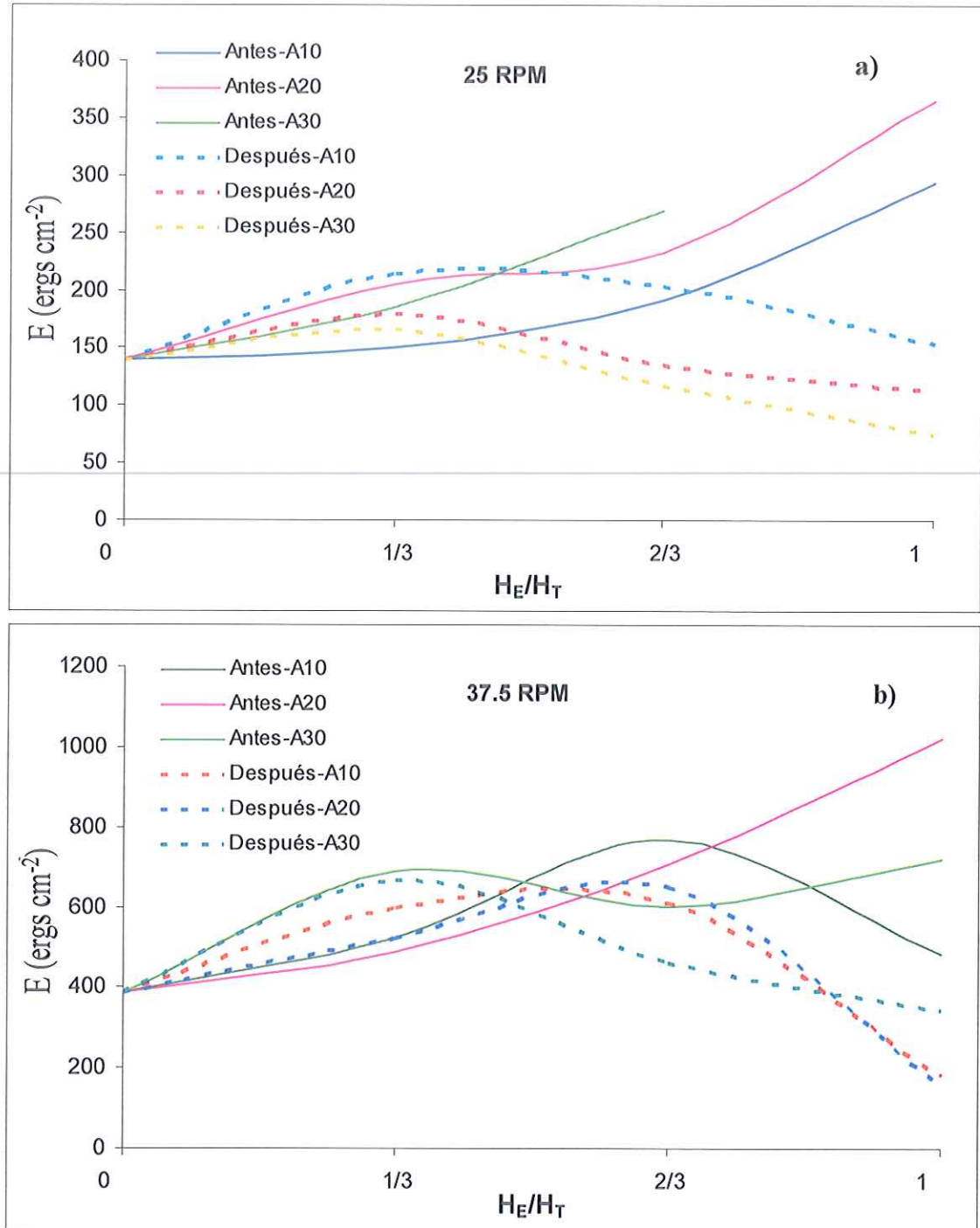


Figura 10. Energía calculada (E) para los experimentos realizados antes y después de rebasado el FMS, con diferentes anchos (A10, A20 y A30) contra la relación H_E/H_T , a 10 cm. por encima del fondo.

En la figura 11, se muestran las regiones de validez para caracterizar al oleaje de acuerdo a las diferentes teorías del oleaje propuestas por diferentes autores (modificado de Le Méhauté, 1976; tomado del Shore Protection Manual, 1984). Para obtener esta grafica se utilizaron valores de oleaje de la altura de la ola (H), la profundidad de desplazamiento las olas (h) y los periodos (T). Las teorías que aquí se indican son las teorías de Stokes de 2°, 3° y 4° orden. Dean (1974), después de analizar las tres teorías analíticas, concluyó que presentaban pequeñas diferencias significativas entre ellas. Dean y Le Méhauté (1970), recomendaron adicionar la teoría Cnoidal para oleaje propagándose sobre aguas someras de baja esbeltez y las teorías de Stokes de orden superior para oleaje propagándose sobre aguas profundas. Dean (1974), demostró que se presentaban pequeñas diferencias entre la teoría de función corriente y la teoría de Airy, para oleaje de baja esbeltez propagándose sobre aguas intermedias y profundas.

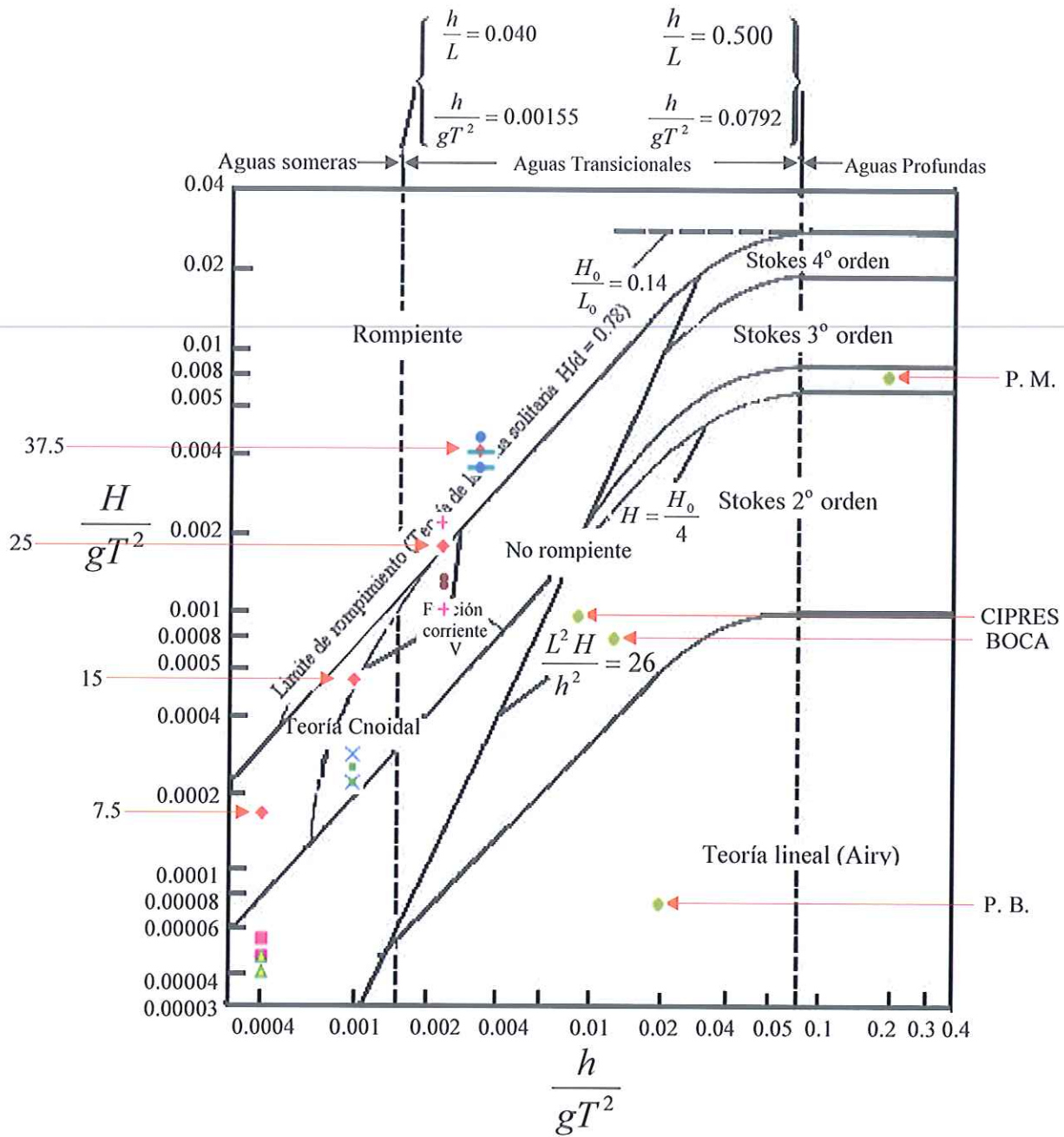


Figura 11. Regiones de validez para diferentes teorías de oleaje.

Discusiones

Los valores del porcentaje energía que se presentan en la Tabla IV (a 20 cm. sobre el fondo del canal), nos indican que al aumentar las RPM, la altura de la ola aumenta y la energía es proporcional a este aumento en la altura, así mismo se tuvo que el mayor porcentaje de disminución de la energía (92%) se tuvo a 7.5 RPM y el menor porcentaje de disminución (5%) se presentó a 37.5 RPM, se observó también que al colocar el FMS la energía de las olas aumentaba, tanto antes como después de rebasado el FMS (Tabla IV, Figura 7a y 9a)., en el canal de oleaje se observó de manera directa este aumento de la altura antes rebasado el FMS. Por conservación de energía esto sería imposible por lo que denotamos que para estas olas nuestro instrumento midió en una zona cercana o sobre un levantamiento producido por el FMS. Lo que nos sugiere que un futuro experimento deberá de realizarse con mediciones a lo largo del canal, y no solo a una sola distancia de la estructura.

En el caso de las mediciones realizadas a 10 cm. sobre el fondo (Tabla V), mostraron un porcentaje de disminución similar y con muy poca variación, sin embargo, se mantuvo el mismo patrón al igual que las mediciones realizadas a 20 cm. sobre el fondo, en donde el mayor porcentaje de disminución de la energía se presentó a 7.5 RPM (95%), para el caso $\% \bar{E}_A$ y $\% \bar{E}_D$ y el menor porcentaje de disminución (78%) se presentó a 25 y 37.5 RPM, para $\% \bar{E}_A$ y $\% \bar{E}_D$. Estos valores aumentaron, con respecto a las mediciones realizadas a 20 cm. sobre el fondo, debido a que se midió a una profundidad en donde las partículas tienen un menor desplazamiento, tanto en la componente vertical (u) como en la horizontal (w) y por lo tanto se observa una mayor disminución en el porcentaje de energía.

De acuerdo al porcentaje de disminución de la energía para después de rebasado el FMS, cuyos valores fueron los mas altos, tanto para las mediciones realizadas a 10 y 20 cm. sobre el fondo del canal, la opción mas recomendable

para disminuir la energía de las olas es el FMS cuya altura y ancho es de 30 cm. Sin embargo, por las características anteriores del FMS con un bloque total y debido a la necesidad de reducir las dimensiones y por lo tanto el costo en la colocación de este tipo de estructuras otra opción con características diferentes y de menores dimensiones es la de un bloque con una altura y un ancho 20 cm. teniendo una eficiencia del ~40%, por lo tanto, tomando en cuenta la altura del oleaje de 1.56 m que arriba al ciprés (tabla VIII), la altura de esta ola con las dimensiones del canal de anteriormente mencionadas disminuirá hasta 0.624 m.

En la figura 11, se graficaron los diferentes valores de H , h y T de las olas generadas en el laboratorio en base a diferentes RPM (7.5, 15, 25 y 37.5) sin el FMS (S/FMS), así como las alturas donde se presentaban máximas disminuciones de energía (Máx. D) y máximos aumentos de energía (Máx. A) antes y después de rebasado el FMS. En esta gráfica se presenta información de las características del oleaje, por lo que se vierten de datos de oleaje reales obtenidos por sensores de presión en la Bahía de Todos Santos, como se mencionó anteriormente. Lo anterior nos permite realizar una comparación de datos de medición de oleaje de campo y los generados en un canal de oleaje, a partir de una relación adimensional. Así mismo, se observa que hacia valores mayores en el eje vertical y hacia la izquierda en el eje horizontal los valores del oleaje se vuelven más inestables tendiendo al límite de rompimiento de las olas. El movimiento de nuestros datos fue en sentido del límite de rompimiento conforme se aumentaban las revoluciones por minuto (Figura 11).

Usando las adimensionalizaciones adecuadas es posible realizar una interpretación de los cambios de energía causados por el FMS usando los datos de campo publicados por Martínez (2004). Para la zona del Ciprés donde se presentó la mayor altura del oleaje (Tabla VIII), comparando los datos obtenidos de laboratorio de 25 RPM (Tabla VI), en donde se presento la máxima disminución de la energía del oleaje con ~80% de disminución del

oleaje después de rebasado el FMS. De acuerdo a esta la disminución de la energía para una profundidad de 10 metros y una altura del oleaje de 1.56 m, el FMS tendería a disminuir un 80% la energía del oleaje, con una estructura sumergida de 10 m de altura y la altura de la ola disminuiría a 0.31 m.

Tabla VIII. Valores promedio de la altura ($\bar{H}$), periodo ($\bar{T}$) y longitud de onda ($\bar{\lambda}$) del oleaje medido en diferentes localidades de la BTS.

Localidad	$\bar{H}$ (m)	$\bar{T}$ (s)	$\bar{\lambda}$ (m)
Punta Morro (P. M.)	0.71	3.1	20
Ciprés	1.56	12.4	145.322
Boca	0.86	10.5	118.068
Punta Banda (P. B.)	0.62	7.6	68.836

Limitaciones

Aunque se obtuvieron resultados de disminución de la energía mediante e filtro, debemos denotar que existen limitaciones en el método, debido principalmente a las condiciones del canal y a la forma de generación de oleaje, encontramos problemas de oscilaciones a lo largo de la ola causada por los bordes del canal, debido a que este es estrecho, la generación de oleaje se realizó de forma monocromática, por lo que se tiene una sola ola generada por experimento.

Otra limitación a este experimento son los errores que se tienen al muestrear una señal continua y sinusoidal, como las que se reproducen al generar oleaje. Por lo que se debe de calcular el error máximo relativo de una señal continua de oleaje de acuerdo a Sánchez-Fernández (2004). Este error debido a la frecuencia del muestreo del oleaje se puede reducir tomando frecuencias de muestreo mínima entre 18 y 20 Hz, que en nuestro caso fue de 16 Hz, así mismo se recomienda generar un mínimo de 120 olas para reducir el error en los cálculos estadísticos.

Los rompeolas sumergidos resultan además benéficos en muchos sentidos ya que además de las funciones de protección estos generan zonas de calma entre el oleaje incidente y la zona costera que puede utilizarse para recreación o abrigo y son menos agresivos para el transporte de sólidos. Estas estructuras han mostrado además que incrementan la producción pesquera por generar microhabitats en los cuales se desarrolla diversas pesquerías.

Conclusiones

- La reducción de la energía utilizando un filtro mecánico en el laboratorio logro ser del 80 % como máximo, para el caso 25 RPM y bloque total. Dimensionalmente esto sería una disminución de 1.56 m de altura de ola hasta 0.31 m, para en el caso analizado en la Bahía de Todos Santos.
- Sin embargo, de acuerdo a la reducción en dimensiones y costo de este tipo de estructuras un bloque de 20 cm. tendría una eficiencia del 40%, disminuyendo la altura de la ola en la localidad del ciprés de 1.56 m hasta 0.624 m.
- La extrapolación directa de resultados experimentales al campo debe de considerarse con reservas, debido a la forma de realización de los experimentos y las limitaciones experimentales de generación de oleaje, sin embargo considerando que existe poca información del comportamiento energético del oleaje, el uso de experimentación bajo condiciones controladas se presenta como una alternativa adecuada.
- Se muestra que un filtro mecánico es una alternativa factible para disminuir la energía del oleaje y la creación de zonas de calma.

Bibliografía

Appendini, C. y D. Fischer, (1998). Hazard management planning for severe storm erosion. *Shore&Beach*. Vol. 66. num. 4. 5-8 pp.

Bermúdez Zavala R. F., (1999). *Diseño de un rompeolas separado de la costa como alternativa de protección en la zona de el Sauzal de Rodríguez, B. C.* Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. 72 pp.

Brown J. *et. al.*, (1993). *Waves, tides and shallow water processes*. The Open University. United States of America. 187 pp.

Cerca Martínez L. M., (1995). *Evaluación del potencial de extracción de energía eléctrica a partir del oleaje, como posible fuente alterna en Rosarito, BC.* Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. 51 pp.

Chasten M. J., Rosati y J. McCormick, (1993). Engineering design guidance for detached breakwaters as shoreline stabilization structures. Us Army Corps of Engineers. Technical Report. CERC-93-19. 141 pp.

Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, (1984). *Shore Protection Manual*. Fourth Edition. U.S. Government Printing Center.

Dattatri, J., H. Raman, J. Shankar (1978). Performance characteristics of submerged breakwaters. *Coastal Engineering*. Vol. II. 2153-2171 pp.

Dean, R.G., and B. Le Méhauté, (1970). "Experimental Validity of Water Wave Theories," *Proceedings of the Meeting on National Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers.

- Dean, R.G., (1974). "Evaluation and Development of Water Wave Theories for Engineering Application," SR-1, Vol. II, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- Dean, R. G. y R. A. Dalrymple, (1991). Water Waves Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice Hall. United States of America.
- Fischer, M. P. Y Hall, K. R., (1998). *The function of submerged active breakwaters*. International Conference on Coastal Engineering, June 1998, sponsored by ASCE, Copenhagen Denmark.
- Ferrer-Vega, A., (2003). Rompeolas separado de la costa. Alternativa de protección para cantiles ubicados en el Costado Norte del Hotel las Rosas. Ensenada, B. C. Facultad de Ciencias Marinas. UABC. 53 pp.
- García-Flores, M. (1998). Rompeolas sumergidos, estudio experimental. Series del Instituto de Ingeniería. N. 511. Instituto de Ingeniería, UNAM. 175 pp.
- Guardado-France, R., (1997). *Funcionalidad de las obras de Protección Costera construidas en la Bahía Todos Santos, B. C., México*. Tesis de Maestría en Oceanografía Costera. 145 pp.
- Guillén-Sánchez, J. V., (1998). *Estudio de las Características Oceanográficas frente al rompeolas del puerto de Ensenada, B. C., para el diseño de un deflector de oleaje*. Tesis de Licenciatura. Ingeniería Civil. Universidad Autónoma de Baja California. 76 pp.

- Martínez Díaz de León, A. (2004). *Spatial Variability of Wave Data from Todos Santos Bay, Baja California, México*. Journal of Coastal Research. Vol 4. Num. 20. 1231-1236 pp.
- Medina-Enríquez P., (1993). *Anteproyecto de un modelo Hidráulico del Puerto del Sauzal*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. 83 pp.
- Nakayama, A., N. Hirokosi, y H. Kobayashi (1993). The planning and design of multipurpose artificial barrier reefs. Coastlines of Japan II. 183-197 pp.
- Rivas-Caceres, H., (1992). *Conversión de la energía del oleaje; diseño, usos y aplicaciones*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. 62 pp.
- Rosati, J. D., (1990). Functional design of breakwaters for shore protection: Empirical methods. Technique Report . CERC-90-15, U.S. Army Engineers Waterways Experiments Station, Vicksburg, MS.
- Sánchez-Fernández, L. P., (2004). Error en las mediciones de oleaje en laboratorios de Investigación. Ingeniería hidráulica en México. Vol. XIX. Num. 2. 101-106 pp.
- Téllez García, G., (2003). *Diseño preliminar de un rompeolas sumergido separado de la costa y su impacto potencial frente a los Cantiles Marinos de Punta Morro Ensenada, B. C., México*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas. Universidad Autónoma de Baja California. 72 pp.
- Yoshioka, K., Kwakami, T., S., Tanaka y M. Koari (1993). Design manual of artificial reefs. Coastlines of Japan II. 93-107 pp.

Referencias en Internet

http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1100/PartII/Part-II-Chap_1-ppi-60.pdf

Apéndice A

Teoría de Airy

La teoría más elemental del oleaje es la teoría de pequeña amplitud o la teoría lineal. Esta teoría fue desarrollada por Airy en 1845 y proporciona una razonable aproximación de las características de las olas para un amplio rango de parámetros de las olas. La teoría de Airy tiene algunas limitaciones en su aplicabilidad, debido a que en el desarrollo de esta se hicieron las siguientes asunciones:

- 1) El fluido es homogéneo e incompresible, y por lo tanto, la densidad es constante.
- 2) La tensión superficial puede ser ignorada.
- 3) El efecto de Coriolis, debido a la rotación de la tierra, puede ser ignorado.
- 4) La presión en la superficie libre es uniforme y constante.
- 5) El fluido es ideal o no viscoso.
- 6) Una onda en particular puede considerarse que no interactúa con cualquier otro movimiento del agua. El fluido es irrotacional, por lo que las partículas del agua no rotan (solo las fuerzas normales son importantes y el stress cortante es despreciable).
- 7) La ola tiene una amplitud pequeña y la forma de la ola es invariante en tiempo y espacio.
- 8) Las olas son planas o de cresta larga (en dos dimensiones). Sin embargo, la teoría de Airy puede ser utilizada como una buena aproximación de las características de las olas

Tabla IX. Valores obtenidos del cálculo de la Altura de la ola promedio (H_p), la altura de ola máxima (H_{max}), así como la energía de la ola (E_c), a 20 cm. por encima del fondo del canal.

No. Exp _(RPM)	H_p (cm)	H_{max} (cm)	E_c (ergs cm ⁻²)	H_E (cm)	A_E (cm)
Exp-3 _(7.5)	0.424	1.129	22.071	10	10
Exp-6 _(7.5)	0.409	1.329	20.515	10	10
Exp-4 _(7.5)	0.438	1.431	23.533	20	10
Exp-7 _(7.5)	0.596	1.691	43.563	20	10
Exp-5 _(7.5)	0.360	1.240	15.874	30	10
Exp-8 _(7.5)	0.419	1.111	21.519	30	10
Exp-9 _(7.5)	0.448	1.277	24.619	10	20
Exp-12 _(7.5)	0.587	1.327	42.272	10	20
Exp-10 _(7.5)	0.384	1.081	18.086	20	20
Exp-13 _(7.5)	0.428	1.286	22.461	20	20
Exp-11 _(7.5)	0.411	1.249	20.671	30	20
Exp-14 _(7.5)	0.523	1.407	33.532	30	20
Exp-15 _(7.5)	0.423	1.190	21.954	10	30
Exp-18 _(7.5)	0.416	1.240	21.197	10	30
Exp-16 _(7.5)	0.473	1.327	27.452	20	30
Exp-19 _(7.5)	0.354	0.815	15.392	20	30
Exp-17 _(7.5)	0.375	1.327	17.261	30	30
Exp-20 _(7.5)	0.399	1.106	19.494	30	30
Exp-3 ₍₁₅₎	0.906	2.491	100.607	10	10
Exp-6 ₍₁₅₎	0.952	2.575	111.042	10	10
Exp-4 ₍₁₅₎	0.952	2.480	111.157	20	10
Exp-7 ₍₁₅₎	0.959	2.516	112.669	20	10
Exp-5 ₍₁₅₎	1.052	2.612	135.702	30	10
Exp-8 ₍₁₅₎	0.889	2.368	96.885	30	10
Exp-9 ₍₁₅₎	1.000	2.317	122.518	10	20
Exp-12 ₍₁₅₎	0.961	2.418	113.161	10	20
Exp-10 ₍₁₅₎	0.963	2.135	113.800	20	20
Exp-13 ₍₁₅₎	0.876	1.986	94.115	20	20
Exp-11 ₍₁₅₎	0.875	2.233	93.835	30	20
Exp-14 ₍₁₅₎	0.717	2.264	63.077	30	20
Exp-15 ₍₁₅₎	0.910	2.101	101.563	10	30
Exp-18 ₍₁₅₎	0.963	2.255	113.659	10	30
Exp-16 ₍₁₅₎	0.881	2.432	95.077	20	30
Exp-19 ₍₁₅₎	0.816	2.292	81.589	20	30
Exp-17 ₍₁₅₎	0.897	2.387	98.743	30	30
Exp-20 ₍₁₅₎	0.674	2.194	55.626	30	30

Tabla IX. (Continuación)

No. Exp _(RPM)	H _p (cm)	H _{max} (cm)	E _c (ergs cm ⁻²)	H _E (cm)	A _E (cm)
Exp-3 ₍₂₅₎	2.199	5.884	593.11	10	10
Exp-6 ₍₂₅₎	2.416	6.355	715.53	10	10
Exp-4 ₍₂₅₎	2.359	5.939	682.15	20	10
Exp-7 ₍₂₅₎	2.284	5.758	639.70	20	10
Exp-5 ₍₂₅₎	2.823	6.635	977.49	30	10
Exp-8 ₍₂₅₎	2.357	6.744	681.15	30	10
Exp-9 ₍₂₅₎	2.482	5.764	755.33	10	20
Exp-12 ₍₂₅₎	2.417	6.936	716.15	10	20
Exp-10 ₍₂₅₎	2.743	5.035	922.84	20	20
Exp-13 ₍₂₅₎	2.277	6.323	636.03	20	20
Exp-11 ₍₂₅₎	3.550	7.276	1545.76	30	20
Exp-14 ₍₂₅₎	2.287	6.810	641.23	30	20
Exp-15 ₍₂₅₎	2.191	4.630	588.75	10	30
Exp-18 ₍₂₅₎	2.364	6.635	685.49	10	30
Exp-16 ₍₂₅₎	2.641	5.835	855.20	20	30
Exp-19 ₍₂₅₎	2.605	9.917	832.17	20	30
Exp-17 ₍₂₅₎	3.762	7.512	1735.70	30	30
Exp-20 ₍₂₅₎	1.738	4.564	370.30	30	30
Exp-3 _(37.5)	4.725	9.305	2738.26	10	10
Exp-6 _(37.5)	4.751	11.384	2767.54	10	10
Exp-4 _(37.5)	5.007	12.591	3073.62	20	10
Exp-7 _(37.5)	4.930	12.599	2980.87	20	10
Exp-5 _(37.5)	5.372	11.794	3539.16	30	10
Exp-8 _(37.5)	4.289	12.222	2255.96	30	10
Exp-9 _(37.5)	4.494	9.481	2476.93	10	20
Exp-12 _(37.5)	4.899	11.442	2942.80	10	20
Exp-10 _(37.5)	4.538	9.388	2524.73	20	20
Exp-13 _(37.5)	5.054	11.065	3131.66	20	20
Exp-11 _(37.5)	4.414	11.761	2388.71	30	20
Exp-14 _(37.5)	3.866	10.621	1833.00	30	20
Exp-15 _(37.5)	3.856	9.112	1822.86	10	30
Exp-18 _(37.5)	4.861	10.671	2897.33	10	30
Exp-16 _(37.5)	4.928	13.538	2977.50	20	30
Exp-19 _(37.5)	4.607	17.436	2603.09	20	30
Exp-17 _(37.5)	6.100	14.561	4562.77	30	30
Exp-20 _(37.5)	3.890	12.817	1855.89	30	30

Tabla X. Valores obtenidos del cálculo de la Altura de la ola promedio (H_p), la altura de ola máxima (H_{max}), así como la energía de la ola (E_c), a 10 cm. por encima del fondo del canal.

No. Exp _(RPM)	H_p (cm)	H_{max} (cm)	E_c (ergs cm ⁻²)	H_E (cm)	A_E (cm)
Exp-21 _(7.5)	0.345	0.942	14.5748	10	10
Exp-24 _(7.5)	0.366	0.910	16.4652	10	10
Exp-22 _(7.5)	0.338	0.867	14.0192	20	10
Exp-25 _(7.5)	0.329	0.956	13.2618	20	10
Exp-23 _(7.5)	0.367	0.930	16.5117	30	10
Exp-26 _(7.5)	0.315	0.683	12.1978	30	10
Exp-27 _(7.5)	0.357	0.770	15.6112	10	20
Exp-30 _(7.5)	0.326	0.850	13.0342	10	20
Exp-28 _(7.5)	0.350	0.778	15.0007	20	20
Exp-31 _(7.5)	0.431	0.836	22.7772	20	20
Exp-29 _(7.5)	0.328	0.899	13.1819	30	20
Exp-32 _(7.5)	0.328	0.750	13.1708	30	20
Exp-33 _(7.5)	0.344	0.850	14.5100	10	30
Exp-36 _(7.5)	0.298	0.722	10.9033	10	30
Exp-34 _(7.5)	0.353	0.795	15.3038	20	30
Exp-37 _(7.5)	0.320	0.838	12.5181	20	30
Exp-35 _(7.5)	0.289	0.666	10.2733	30	30
Exp-38 _(7.5)	0.312	0.765	11.9549	30	30
Exp-21 ₍₁₅₎	0.647	1.495	51.304	10	10
Exp-24 ₍₁₅₎	0.611	1.698	45.839	10	10
Exp-22 ₍₁₅₎	0.620	1.367	47.076	20	10
Exp-25 ₍₁₅₎	0.605	1.425	44.823	20	10
Exp-23 ₍₁₅₎	0.581	1.410	41.385	30	10
Exp-26 ₍₁₅₎	0.524	1.238	33.725	30	10
Exp-27 ₍₁₅₎	0.627	1.492	48.212	10	20
Exp-30 ₍₁₅₎	0.604	1.479	44.662	10	20
Exp-28 ₍₁₅₎	0.651	1.486	51.936	20	20
Exp-31 ₍₁₅₎	0.551	1.480	37.214	20	20
Exp-29 ₍₁₅₎	0.574	1.456	40.369	30	20
Exp-32 ₍₁₅₎	0.452	1.151	25.073	30	20
Exp-33 ₍₁₅₎	0.619	1.479	46.921	10	30
Exp-36 ₍₁₅₎	0.590	1.536	42.691	10	30
Exp-34 ₍₁₅₎	0.614	1.300	46.287	20	30
Exp-37 ₍₁₅₎	0.517	1.128	32.761	20	30
Exp-35 ₍₁₅₎	0.753	1.544	69.484	30	30
Exp-38 ₍₁₅₎	0.485	1.095	28.796	30	30

Tabla X. (Continuación)

No. Exp _(RPM)	H _p (cm)	H _{max} (cm)	E _c (ergs cm ⁻²)	H _E (cm)	A _E (cm)
Exp-21 ₍₂₅₎	1.109	2.471	150.946	10	10
Exp-24 ₍₂₅₎	1.321	3.085	214.076	10	10
Exp-22 ₍₂₅₎	1.250	2.621	191.706	20	10
Exp-25 ₍₂₅₎	1.288	3.180	203.370	20	10
Exp-23 ₍₂₅₎	1.549	2.938	294.050	30	10
Exp-26 ₍₂₅₎	1.121	3.211	154.017	30	10
Exp-27 ₍₂₅₎	1.294	2.804	205.276	10	20
Exp-30 ₍₂₅₎	1.210	2.783	179.401	10	20
Exp-28 ₍₂₅₎	1.379	3.204	233.296	20	20
Exp-31 ₍₂₅₎	1.053	2.311	135.944	20	20
Exp-29 ₍₂₅₎	1.724	3.266	364.539	30	20
Exp-32 ₍₂₅₎	0.960	2.177	112.904	30	20
Exp-33 ₍₂₅₎	1.229	2.644	185.198	10	30
Exp-36 ₍₂₅₎	1.162	2.992	165.684	10	30
Exp-34 ₍₂₅₎	1.481	3.023	268.998	20	30
Exp-37 ₍₂₅₎	0.978	2.200	117.221	20	30
Exp-35 ₍₂₅₎	0.000	0.000	0.000	30	30
Exp-38 ₍₂₅₎	0.783	2.125	75.169	30	30
Exp-21 _(37.5)	2.065	4.159	522.688	10	10
Exp-24 _(37.5)	2.204	4.464	595.669	10	10
Exp-22 _(37.5)	2.505	5.916	769.414	20	10
Exp-25 _(37.5)	2.232	4.981	611.096	20	10
Exp-23 _(37.5)	1.992	3.803	486.364	30	10
Exp-26 _(37.5)	1.211	4.039	179.780	30	10
Exp-27 _(37.5)	1.997	4.461	489.162	10	20
Exp-30 _(37.5)	2.063	4.836	521.926	10	20
Exp-28 _(37.5)	2.402	11.415	707.447	20	20
Exp-31 _(37.5)	2.299	5.232	648.247	20	20
Exp-29 _(37.5)	2.886	5.223	1021.223	30	20
Exp-32 _(37.5)	1.135	3.378	158.051	30	20
Exp-33 _(37.5)	2.368	5.516	687.619	10	30
Exp-36 _(37.5)	2.334	5.443	667.978	10	30
Exp-34 _(37.5)	2.218	4.792	603.421	20	30
Exp-37 _(37.5)	1.946	4.297	464.597	20	30
Exp-35 _(37.5)	2.421	4.625	718.709	30	30
Exp-38 _(37.5)	1.679	7.219	345.773	30	30