

IMPACTO DE ONDAS SOBRE TALUDES

YAMILE VALENCIA

Ingeniera Civil, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín.

MIGUEL RAMÍREZ

Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín.

MAURICIO TORO

fmtoro@perseus.unalmed.edu.co

Profesor Asociado, Escuela de Geotecnia y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional, Medellín

OSCAR ECHEVERRI

Profesor Asistente, Escuela de Geotecnia y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional, Medellín

Recibido para revisar 28 de Enero de 2002, aceptado 30 de Enero de 2003, versión final 20 de Marzo de 2003.

RESUMEN: Las playas sufren cambios topobatimétricos por la acción del viento, corrientes, hidrodinámica del oleaje e inestabilidad de taludes. En este artículo se estudia un modelo, en donde es posible analizar la solución teórica tipo Airy del movimiento ondulatorio, para tipificar una onda que se produce por medio de un generador de oleaje, diseñado para operar en un canal metálico de determinadas dimensiones. En un extremo del canal fue construido un talud con y sin protecciones, de geometría inicial dada y con diversos materiales (arena gruesa, media, fina y limo-arenoso), el cual fue sometido a la acción de diferentes ondas y a un seguimiento en el tiempo, hasta llegar al perfil de equilibrio. Además, se estudió el proceso erosivo cuya principal característica es la socavación de la parte superior del talud y la depositación en la pata, así como la formación de un punto neutro o de "Cornaglia".

PALABRAS CLAVES: Onda, Playa, Perfil, Punto Neutro.

ABSTRACT: In this paper a model is studied in which, it is possible to analyze the Theoretical solution of Airy of wave movement produced by a generator of waves. This generator is designed for working in a metallic channel of determined dimensions. In one extreme of the channel was built a cupslope with and without protections of initial geometry given and with different materials (thick middle-sized, fine sand and slime-sandy), the cupslope was submitted to the action of different. Waves and to a pursuit in the time, until to arrive at the profile of balance. Besides, was studied the process of erosion whose principal characteristic and the deposit on the low part as soon as the formation of a neutral point or the "Cornaglia".

KEYWORDS: Waves, Beach, Profile, Neuter Point.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los modelos experimentales en el laboratorio, para el análisis de la erosión en playas y taludes, es una necesidad primordial a la hora de proyectar obras de defensa portuaria y

costeras, debido a la poca instrumentación en las playas o a la escasa calidad de las observaciones visuales; hecho que motivó al diseño y construcción de un equipo que generara ondas, las cuales por métodos simplificados, pudiesen ser tipificadas y observar así su impacto sobre un talud conformado con diversos tamaños de grano; además, comprendido el fenómeno erosivo, tratar de proponer mecanismos de protección, que no

sólo atenúen la acción de la onda, sino que también mejoren las características de resistencia del suelo.

Lo ideal es que tanto la onda como el suelo estén escalados. En el presente trabajo, no se analiza dicho aspecto debido a su dificultad; ya que en el suelo, hay presente fuerzas físico-químicas como la cohesión y en el fluido hay una transición de régimen de flujo, según se mueva desde la zona de aguas profundas, hasta la zona de aguas poco profundas o zona "surf", por lo que es difícil obtener una similitud dinámica exacta. Otros efectos, como las ondas de orilla, las corrientes de retorno, las ondas largas, etc., son difícilmente reproducibles en un modelo a escala, pero deben ser tenidos en cuenta en la dinámica litoral de una zona.

2. TEORÍAS DE ONDAS HIDRODINÁMICA DEL OLEAJE

Una onda es una perturbación periódica de una variable física, que evoluciona en el tiempo y en el espacio. En la realidad, se presentan formas complejas que no son más que la superposición de formas simples. Los métodos analíticos, generalmente se desarrollan para cada onda simple, considerando una celeridad y una repetición en el espacio, las cuales son características del denominado movimiento ondulatorio, cuyos parámetros se muestran en la Figura 1.

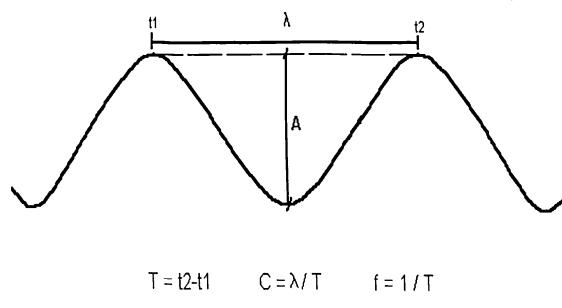


Figura 1. Parámetros del movimiento ondulatorio.

De la física clásica, las ondas se clasifican según el tipo de movimiento de una parte local del medio, con respecto a la dirección de propagación, en ondas transversales y longitudinales; las ondas de mar se clasifican de

acuerdo con la configuración de su superficie y con el movimiento de las partículas del fluido con el movimiento de las partículas del fluido debajo de éstas. Dicha clasificación se presenta en la Figura 2.

Las ondas de gravedad, se pueden clasificar con relación a la magnitud de la longitud de onda (λ) y la distancia desde el fondo hasta el nivel en reposo (h), de acuerdo con la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de las ondas de gravedad.

CLASIFICACIÓN	H/λ
Aguas profundas	$h/\lambda > 1/2$
Zona de transición	$1/25 < h/\lambda < 1/2$
Aguas poco profundas	$h/\lambda < 1/25$

El oleaje son perturbaciones inducidas por el viento en la superficie del mar, durante un periodo de tiempo, que dan como resultado una serie de ondas de forma compleja.

La rotura del oleaje se presenta, cuando la ola se hace inestable y se alcanza una determinada relación entre el peralte, la profundidad y la pendiente del fondo (Tsuguo, 1992). La rotura genera corriente, que produce el transporte sólido de los sedimentos costeros, formación del perfil de equilibrio, forma en planta de las playas y variaciones de la línea de costa; las corrientes, al aproximarse a las playas y encontrar un obstáculo, producen una serie de fenómenos tales como: refracción, difracción y reflexión.

El oleaje es un fenómeno complejo; por tal motivo, resulta útil el análisis de teorías simplificadas, donde la solución de Airy también denominada teoría lineal, es apropiada para la mayor parte de los problemas prácticos, a pesar de la inexactitud en sus resultados. La ecuación de Airy, relaciona entre sí el periodo (T) la longitud de onda (λ) y la profundidad del nivel de agua (h) deducida a partir de una ecuación Laplaciana (Emore - Health, 1968).

$$C = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (1)$$

Donde:

C = Celeridad de la onda,

g = Aceleración de la gravedad

Para aguas poco profundas, $C = \sqrt{gh}$

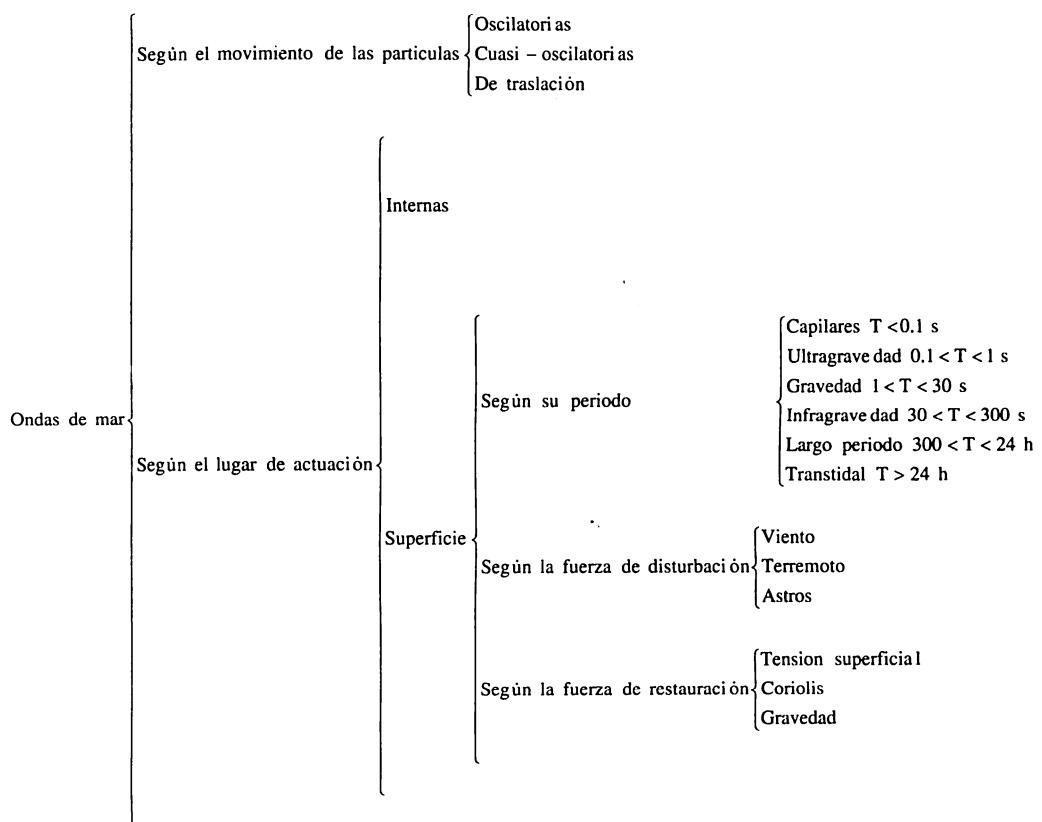


Figura 2. Clasificación de las ondas de mar.

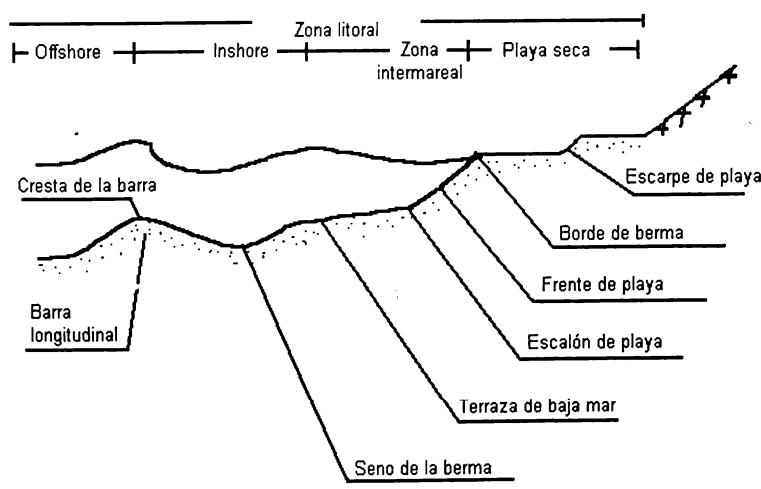


Figura 3. Partes que caracterizan un perfil de playa.

3. MORFOLOGÍA DE PLAYAS, PROTECCIONES COSTERAS Y TALUDES DE TIERRA

En la morfología de playas, es importante analizar las variaciones de las formas costeras anuales o hiperanuales, con el objetivo de detectar procesos de erosión o acumulación. Dicha detección se logra por medio de la batimetría que consiste en la realización de un levantamiento topográfico del fondo, usado especialmente para trabajos de precisión. En la Figura 3, se muestra un perfil de playa característico.

Los cambios más notorios, son los asociados a los desplazamientos de las barras y el avance o retroceso de la barra, debido a la dinámica marina.

Estos cambios morfológicos generan múltiples perfiles, siendo las formas más extremas, las correspondientes al perfil disipativo y reflejante mostrados en las Figuras 4 y 5.

Los cambios más notorios, son los asociados a los desplazamientos de las barras y el avance o retroceso de la barra, debido a la dinámica marina.

Estos cambios morfológicos generan múltiples perfiles, siendo las formas más extremas, las correspondientes al perfil disipativo y reflejante mostrados en las Figuras 4 y 5.

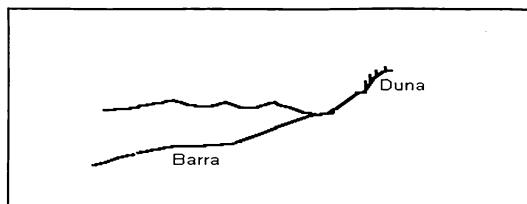


Figura 4. Perfil disipativo.

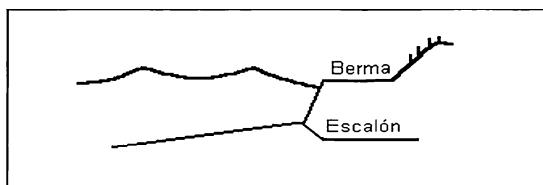


Figura 5. Perfil reflejante.

La acción de procesos de avance y retroceso, forman un punto neutro o de "Cornaglia" a partir del cual, las partículas que se mueven en dirección "offshore", no vuelven al conjunto de la playa.

Para playas, con un sedimento en particular y en condiciones de oleaje estacionario, donde se equilibran las fuerzas constructivas y destructivas, se desarrolla un perfil que no evoluciona en el tiempo, denominado "perfil de equilibrio".

El transporte de sedimentos en el lecho se presenta de varias formas (movimiento en suspensión y por tracción hidráulica), cuando se inicia el movimiento se empiezan a desarrollar algunas formas características en el lecho, tales como rizos u ondas de arena, dunas, antidunas, lecho plano, transición, rápidos y pozos.

La erosión es una de las fuerzas más destructivas que el ingeniero tiene que combatir y comprende el desprendimiento, desalojo y transporte del suelo, que constituye la superficie terrestre ocasionada por la interacción del agua y/o viento con el suelo. Las principales causas de la erosión costera se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Causas de la erosión costera.

NATURALES	DEBIDAS AL HOMBRE
1. Elevación del nivel del mar	1. Interrupción del transporte de sedimentos
2. Variabilidad en el aporte de sedimentos a la zona costera	2. Hundimiento del terreno (extracción de recursos del subsuelo)
3. Oleaje de temporal	3. Reducción del aporte de sedimentos, a la zona del litoral
4. Inundación por oleaje	4. Cambio en la protección natural de la costa
5. Deflaxión (transporte de sedimentos debido al viento)	5. Extracción de materiales de la playa

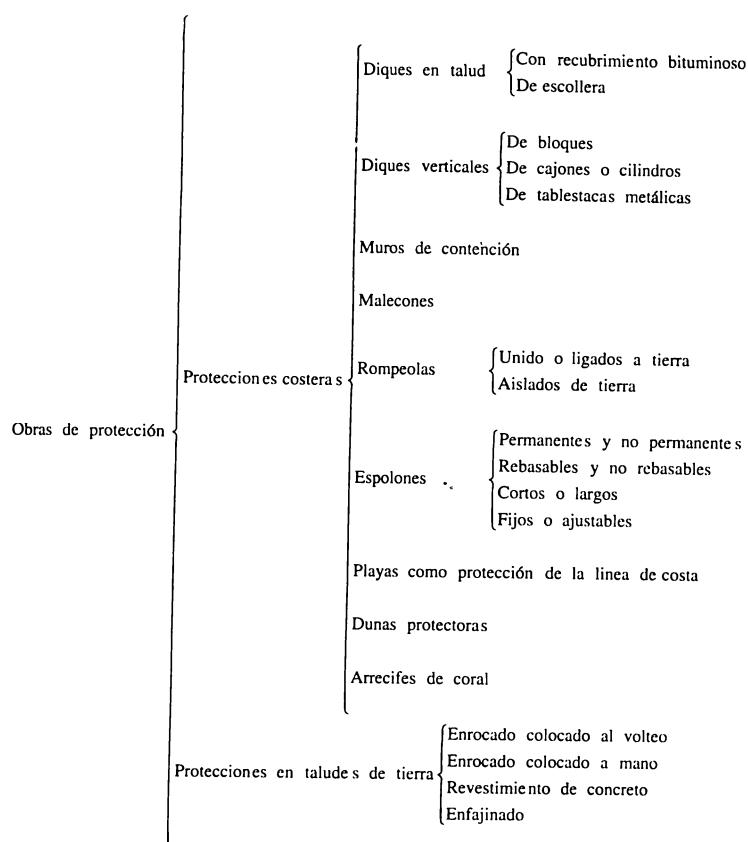


Figura 6. Obras de Protección.

4. TRABAJO EXPERIMENTAL

La parte práctica del trabajo se realizó utilizando tres medidas de experimentación diferentes; se partió de un tanque de ondas donde no se tenía un control directo de variables y cuyo fin era una familiarización con el fenómeno; luego se procedió al uso de un canal metálico (largo 4.9 m, ancho 50 cm y alto 30 cm) en el cual las ondas se generan de una manera más controlada, para finalizar en un lago con el objetivo de corroborar los resultados de las experimentaciones. En este último, no fue posible obtener resultados, debido a que las adecuaciones realizadas al generador de oleaje, (Figura 7) no fueron suficientes para producir una onda que afectara el talud ubicado en la zona de costa.

Con el generador diseñado, se procedió a tipificar la onda variando: el aire inyectado por el

compresor (de tal manera que la paleta fuera activada), la lámina de agua (de 28 cm a 15 cm) y la posición a la que debería estar el generador, para que la longitud de onda tuviese solución única, dentro de la teoría de ondas Airy. La paleta debía encontrarse sumergida la misma distancia vertical, para proporcionarle a las ondas igual energía. Terminada la tipificación, se colocó en el fondo granos de arroz, para observar el efecto de arrastre de las olas; tras ésta experimentación, se encontró que era factible construir taludes, con diferente tamaño de grano (arena gruesa, media, fina y limo - arenoso).

Los taludes se conformaron a partir de una geometría inicial, determinada por el ancho y alto del canal y por el ángulo de reposo de material (Simons, 1977) con el volumen y una densidad característica para todos ellos (1600 Kg/m^3) se determinó el peso que debería ser acomodado, por medio de compactación manual, para garantizar dicha densidad.

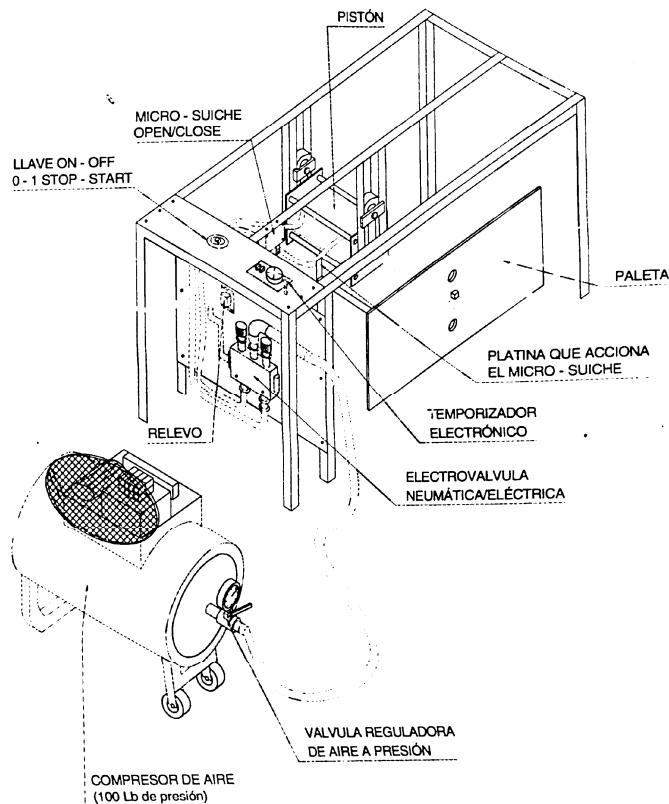


Figura 7. Generador de oleaje.

Posteriormente, los taludes fueron sometidos a la acción de la onda ya estudiada, hasta llegar al perfil de equilibrio y mediante un seguimiento en el tiempo, estudiar el proceso erosivo para cada grano y cada lámina de agua ($h = 25\text{ cm}$, 20 cm , 15 cm). Debido a la presencia de erosión en la parte superior del talud, se colocaron protecciones, que consistieron en barras con cabeza circular, hincadas en el talud y expuestas a la acción del mismo oleaje.

5. RESULTADOS

La Tabla 3, muestra los resultados obtenidos al tipificar la onda, teniendo en cuenta la toma de suficientes tiempos de recorrido, para sacar uno que fuese representativo (\bar{t}), allí también se

presenta la velocidad de recorrido de la onda (V_e), su periodo (T) y longitud (λ).

Tabla 3. Resumen tipificación de la onda

$h(cm)$	$(\bar{t}\text{ s})$	$V_e(m/s)$	$C(m/s)$	(λm)	$T(s)$
28	5"29	1.61	1.66	4.10	2.55
26	5"47	1.55	1.60	4.09	2.63
25	5"64	1.51	1.56	3.29	2.18
24	5"75	1.48	1.53	3.16	2.14
22	6"03	1.41	1.47	2.73	1.94
20	6"29	1.35	1.40	2.69	1.99
18	6"69	1.27	1.33	2.14	1.69
16	7"09	1.20	1.25	1.93	1.61
15	7"30	1.16	1.21	1.81	1.62

La onda obtenida se puede clasificar de acuerdo con la física clásica como onda transversal y de acuerdo con el movimiento de las partículas del fluido, como onda oscilatoria.

Según el lugar de actuación son ondas de superficie, las cuales a su vez, de acuerdo con la fuerza restauradora y con su período que se encuentra en el intervalo $0,1s < T < 30s$, se clasifican como ondas de gravedad en la zona de transición, ya que h/λ está en el intervalo $1/25 < h/\lambda < 1/2$, con una tendencia hacia el límite inferior. Lo anterior se corrobora al ser la

velocidad de recorrido de la onda (C), semejante a la velocidad en aguas poco profundas.

En el resumen de los perfiles de finales (para cada repetición) es típico que la parte alta del talud se erosione y el material sea depositado en la parte baja, de modo que se forma un punto neutro, que para todos los taludes (sin importar la altura de la lámina) se presenta aproximadamente a la mitad de la longitud del talud inicial. Cada ensayo fue repetido, para sacar un perfil típico.

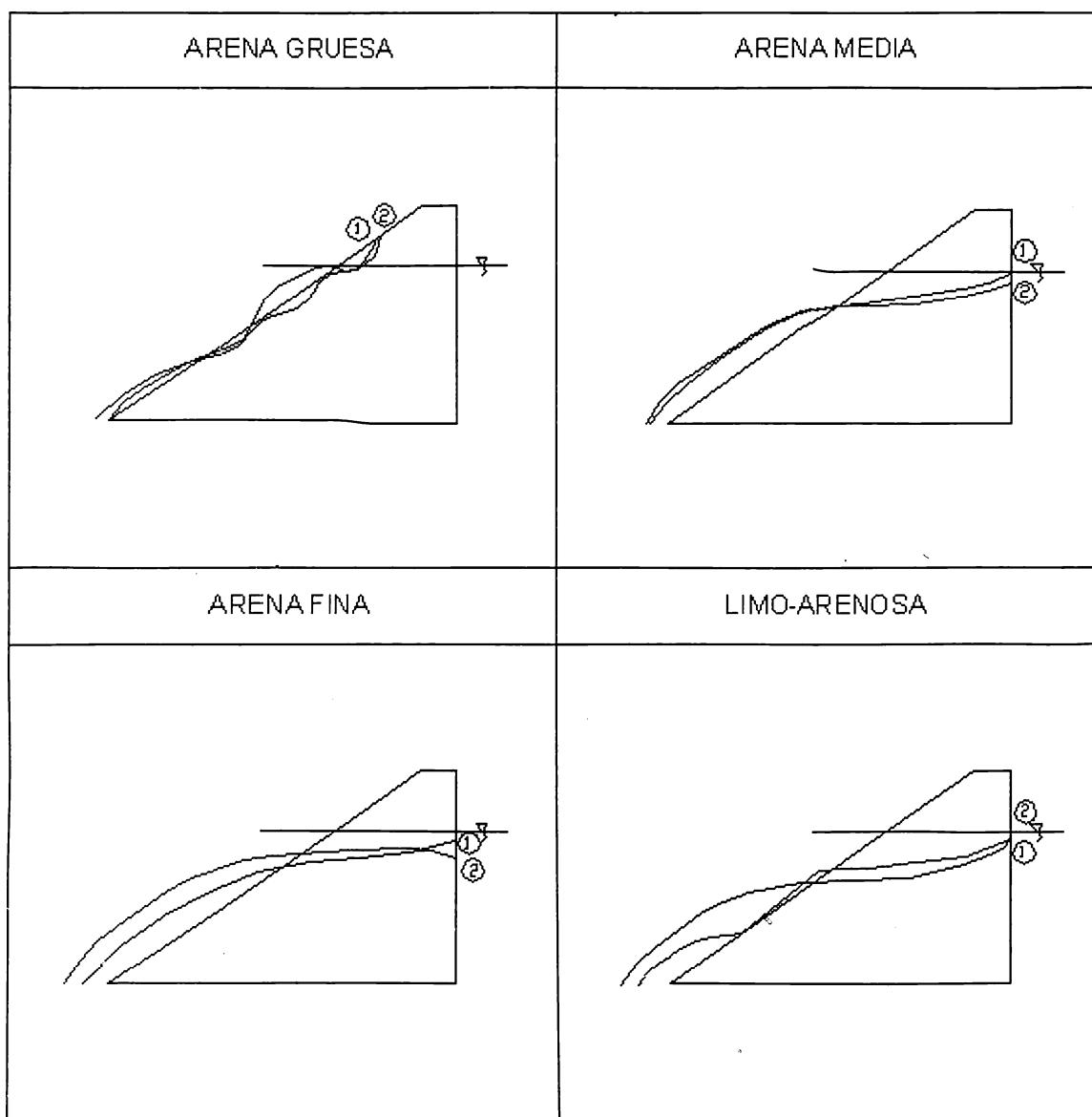


Figura 8. Resumen perfiles finales para taludes con protección y $h = 20 cm$.

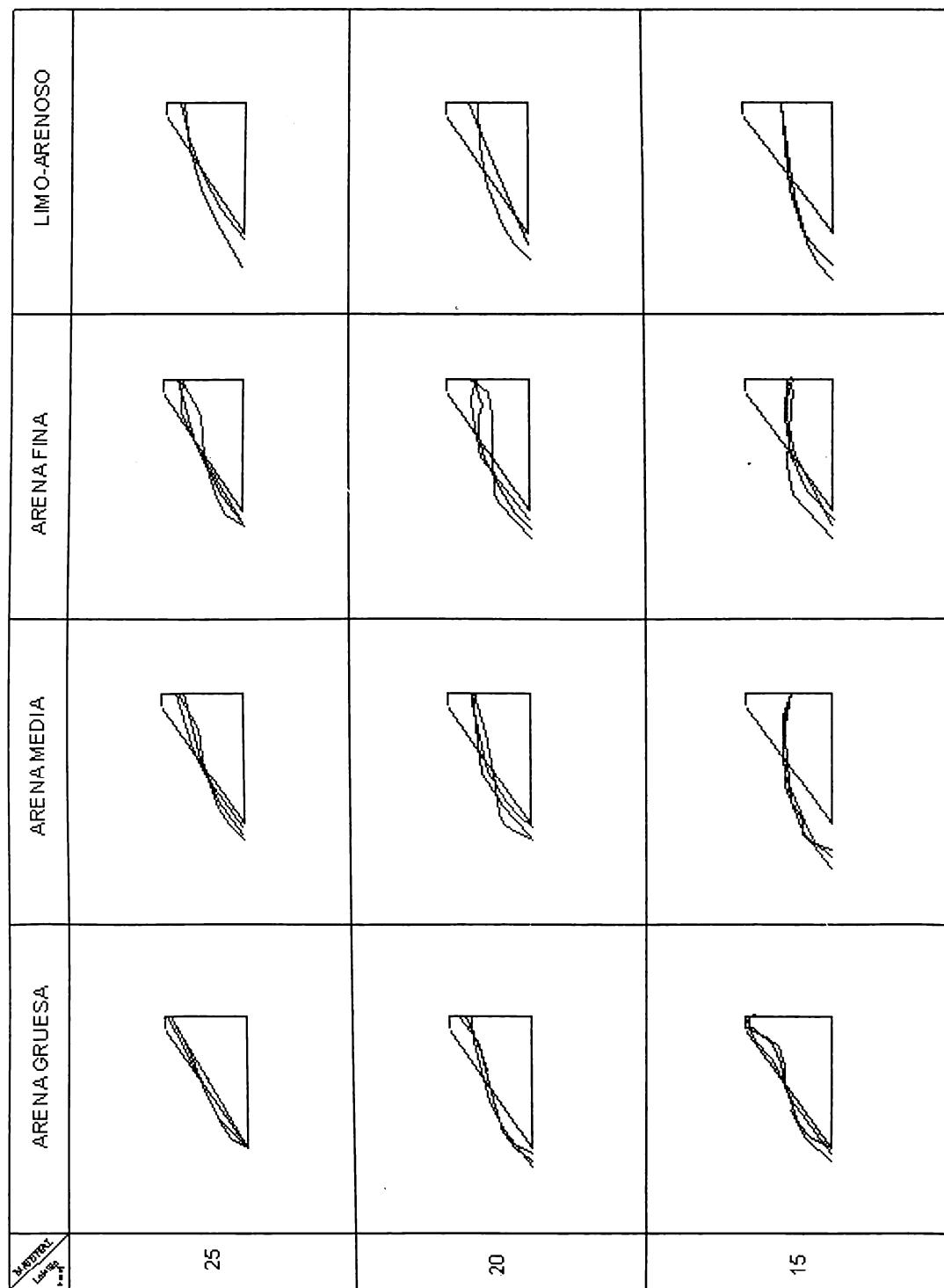


Figura 9. Resumen perfiles finales para taludes sin protección.

En esta figura (ver Figura 8 y 9), también se puede observar que los perfiles finales, tienden a equilibrarse por debajo del nivel de la lámina de agua, además cuando ésta lámina disminuye y el tamaño del grano también, el proceso erosivo se

da por carcavamiento del perfil formando pendientes negativas, al igual ocurre cuando se colocan protecciones.

Las protecciones fueron eficientes para la arena gruesa ya que ella, al ser de granos tan

angulosos, ejerce mayor fricción sobre las protecciones, contrario a lo que sucedió con los otros materiales en donde las protecciones no fueron eficientes, porque el talud final es prácticamente el mismo que el obtenido, cuando no se colocaron protecciones; además, el tiempo requerido para llegar al perfil de equilibrio no aumentó. Estas falencias se deben a que las protecciones no atravesaban la superficie de falla y no ejercían suficiente fricción con el material.

6. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

- Por actuar el oleaje en un medio restringido, se presenta el fenómeno de reflexión en el que parte de la onda es reflejada por el talud y parte por la pared del acrílico.
- En general a mayor cohesión mayor densidad de compactación y menor tamaño de grano, el tiempo de estabilización del talud sometido al oleaje es mayor. En el caso del limo - arenoso fue necesario efectuar una sobresaturación, para hacerlo más vulnerable al oleaje y disminuir el tiempo del ensayo.
- A medida que se alcanzan los perfiles de equilibrio tiende a disminuir la salpicadura y el oleaje a disiparse más sobre el talud.
- A medida que la lámina de agua y el tamaño del grano disminuyen las pendientes de los perfiles finales se hacen más suaves, indicando así que los granos gruesos disipan más energía por unidad de volumen.
- Los perfiles finales en cada experimentación indican la manera como se pueden construir y proteger los taludes de embalses. Entonces se sugiere construir un talud con berma a partir del punto neutro en una magnitud proporcional a la amplitud de la ola incidente de diseño (esa amplitud será determinada por el factor de escala del modelo) con el objetivo de que la ola que impacta el talud disipe más energía y disminuya la erosión en la parte superior.
- Si se tienen restricciones de espacio que no permitan la construcción de la berma, se recomienda proteger el talud por encima del punto neutro con protecciones de geometría semejante a la utilizada en la experimentación

en el canal, pero que atraviesen la superficie del círculo de falla que presenta el material de acuerdo a sus propiedades (σ , ϕ); adicionalmente si se hace un anclaje activo (tensionado) es de esperarse un mejor comportamiento del elemento protector o implementar con otras protecciones que muestren ser eficientes para este tipo de erosión.

- Para evitar el arrastre y el proceso erosivo del material de playa se recomienda el diseño y construcción de un dique exento al menos en la terraza de bajamar que retenga los sedimentos y no permita el avance erosivo.
- Si se va a proteger un talud con material grueso-granular se sugiere que su tamaño sea aquel que resista los esfuerzos que genera el oleaje en el talud.
- No se pudo experimentar en el lago, debido a las restricciones del equipo y a la heterogeneidad del material ubicado en la zona de costa.
- Uno de los parámetros más importantes de la ola es la altura significativa (H_s) ya que con ésta se puede determinar la Energía (E) y el esfuerzo cortante (τ). H_s es la variable más utilizada para la clasificación de los perfiles disipativos o de reflexión y poder predecir la evolución de las playas. Por ello se recomienda el uso de transductores de presión, de tal manera que se pueda tener un registro de alturas y poder así, mediante un análisis estadístico, determinar dicho valor.
- Se sugiere producir oleaje en ángulo de tal manera que se pueda estudiar el fenómeno de refracción o colocar el talud en forma de obstáculo, para analizar el fenómeno de difracción.

REFERENCIAS

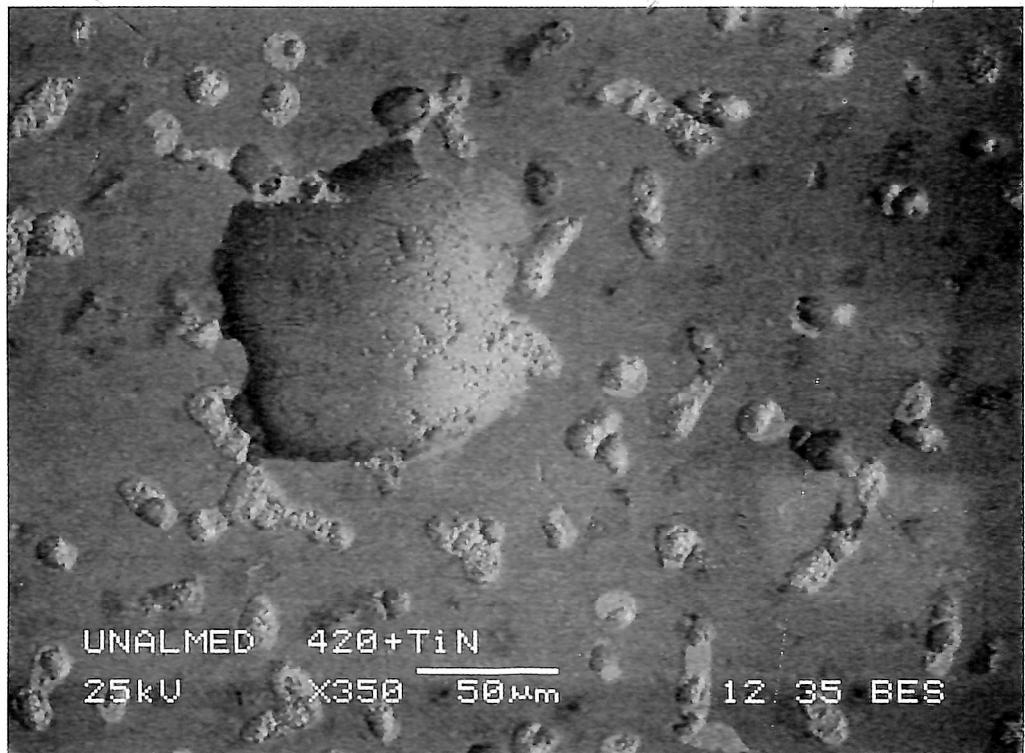
- Chaparría, V. *Obras marítimas*. Universidad Politécnica de Valencia. España, 1994.
 Coastal Engineering Group. *Coastal Engineering : Introduction*. University of Technology Delft. Netherlands, 1982.
 Elmore, W y Heald, M. *Physic of waves*. Mc Graw Hill. Dover, EE.UU, 1985.

González, M. y Medina, R. *Curso internacional de morfodinámica de playas.* Universidad del Valle. Cali, 1996.

Ingeniería Civil. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Nº 66. Madrid, España, 1988.,

Ministerio de Obras Públicas y Transporte. *Efecto de las olas.* Ministerio de Obras Públicas y Transporte. España, 1992.

- Posada, L. *Transporte de sedimentos.* Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1994.
- Simons, D. y Sentürk, F. *Sediment transport technology.* Water Resources. Fort Collins, Colorado, 1997.
- Tsuguo, S. *Geomorphology of rock coasts,* John Wiley and Sons Ltda. England, 1992.
- Van Rijn, L. *Handbook sediment transport by currents and waves.* Deft Hydraulics, 1989.



Acero inoxidable recubierto con una capa de TiN aplicado por PVD, evidencia de corrosión por picadura.