

Capítulo III

Evaluación del Inicio de Arrastre

III. Evaluación del Inicio de Arrastre

Con el objetivo de contribuir a la caracterización de los sedimentos que se encuentran en las costas del estado de Quintana Roo, el presente capítulo expone una metodología para evaluar el inicio de arrastre de dichos sedimentos. Para ello, se describe el trabajo realizado en campo para la selección y recolección de muestras, así como la metodología seguida en el laboratorio.

III.1 Trabajo de Campo

Las muestras utilizadas para el presente estudio fueron seleccionadas, recolectadas y extraídas durante las campañas de campo realizadas por el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, a lo largo de la Península de Yucatán, del año 2007 a 2010.

Se tomaron 145 muestras provenientes de 58 sitios en tres estados diferentes: 84.2 % del estado de Quintana Roo, 10.5% de Yucatán y 5.3% del estado de Campeche. Como se mencionó antes, la dificultad para acceder a algunos sitios produjo las diferencias entre los porcentajes de muestreo, especialmente en el estado de Yucatán, donde, por ejemplo, la Reserva de la Biósfera “Ría Lagartos”, contiene una franja considerable de litoral, cuya extensión es de aproximadamente 80 km en un área de 12580 has, lo que provoca que prácticamente no exista ningún camino de acceso. En el caso del estado de Campeche, existe una gran extensión de costas tipo manglar sin presencia de arenales (Alcérreca, 2011).

Las muestras, en cada sitio, fueron extraídas de tres zonas distintas de la playa con la finalidad de estudiar las características del sedimento que se ve sometido a la asimetría del oleaje. Las zonas muestreadas, esquematizadas en la Figura III-1, fueron:

- ✘ Zona seca o berma (Pb): es la zona que se extiende hacia tierra adentro, a partir de cresta de una berma o en su defecto del límite marcada por la línea de la marea alta, y hasta el límite del cambio fisiográfico o la presencia de la vegetación permanente.
- ✘ Zona de lavado (Pl): es la zona donde el agua avanza y retrocede sobre la cara de la playa, cubriéndola alternativamente, siendo ésta la zona de la playa mojada pero no sumergida en el

agua. Las muestras obtenidas de esta zona son sedimentos producto del mezclado de material, el cual se genera cuando la ola rompe sobre la pendiente de la playa y disipa su energía potencial, transformándose en una serie de oscilaciones semejantes a una onda solitaria.

- ✘ Zona de rompientes (Pr): es la zona en donde las olas que llegan de la región alejada de la costa (playa exterior) se hacen inestables por el fenómeno de someramiento, por lo que empiezan a romper. Las muestras se tomaron aproximadamente a una profundidad de 1.5 m.



Figura III-1 Perfil de playa



Figura III-2 Campaña de recolección de muestras 2007.
Zona de berma (derecha) y zona de lavado (izquierda)

En cada sitio de muestreo, se extrajeron aproximadamente dos kilogramos de material granular, el material fue obtenido de manera superficial, sin realizar pozos de sondeo. Un elemento primordial en las campañas de recolección de las muestras, fue registrar las coordenadas reales de los sitios de muestreo utilizando un equipo GPS (Ruiz, 2009).

III.2 Trabajo de Laboratorio

III.2.1 Propiedades físicas de las muestras

Una vez obtenidas las muestras, se realizaron diversas pruebas en el laboratorio sobre sus propiedades físicas, las cuales servirían a futuro como base para el estudio de otras características de los sedimentos, como es el caso del presente trabajo. A continuación se describe brevemente la metodología utilizada para esta etapa de caracterización.

Análisis granulométrico

Realizar un análisis granulométrico tiene como finalidad obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra, para lo cual se utilizaron tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. En el laboratorio, el análisis se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de la ASTM (American Society for Testing Materials) utilizando mallas de los siguientes números: 5 (4 mm), 8 (2.36 mm), 10 (2.00 mm), 14 (1.40 mm), 18 (1.00 mm), 25 (0.71 mm), 35 (0.50 mm), 45 (0.355 mm), 60 (0.25 mm), 80 (0.18 mm), 120 (0.125 mm), 170 (0.09 mm) y 230 (0.063 mm), donde el valor en milímetros indica el tamaño de la abertura de la malla. Una vez obtenidas las curvas granulométricas correspondientes a cada muestra, se determinaron los diámetros nominales de las partículas para finalmente clasificar las muestras mediante el sistema de clasificación del SUCS (Sistema Universal de Clasificación de Suelos), de la ASTM y de Wentworth.

Propiedades físicas

A continuación se definen las propiedades físicas determinadas en el laboratorio para las muestras recolectadas en estado seco.

- ✘ Densidad o peso volumétrico (ρ): es la relación de la masa contenida en cierto volumen, por lo que se expresa en unidades de masa sobre volumen. Si la masa no pertenece a un cuerpo confinado, como en el caso de las arenas, se puede medir contenida en un recipiente de masa y volumen conocidos, para después aplicar la siguiente expresión.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\text{masa total} - \text{masa del contenedor}}{\text{volumen del contenedor}} = \frac{m_T - m_c}{V_c} \quad \text{Ec. III-1}$$

- ✘ Densidad relativa (S): es una relación entre la densidad de una sustancia y otra que se toma como referencia, la cual es generalmente el agua con su valor máximo de densidad (1000 kg/m^3 , a $4 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm), es de gran utilidad para el cálculo del volumen ocupado por un material granular en una mezcla. Es un valor adimensional y puede calcularse también como la relación entre masas o pesos de dos sustancias contenidas en igual volumen; en el caso de sólidos, como las arenas, puede determinarse como la relación entre peso del material seco (W_s) sobre la suma de dicho material más el peso de un recipiente con agua (W_{fw}) menos el peso del recipiente con agua y el material (W_{fsw}), como lo determina la ASTM C 128, lo cual relaciona la cantidad de material con la cantidad de agua que desplaza en cierto volumen.

$$S = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{W_s}{W_s + W_{fw} - W_{fsw}} \quad \text{Ec. III-2}$$

- ✘ Peso específico (γ): es la relación entre el peso de una sustancia sobre el volumen en que está contenida, expresada en unidades de fuerza sobre volumen. Puede escribirse también en términos de su densidad o su densidad relativa, en este último caso añadiendo el valor del peso específico del agua (γ_0).

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g = \frac{\rho}{\rho_0} \rho_0 g = S \gamma_0 \quad \text{Ec. III-3}$$

- ✘ Relación de vacíos: es una medida adimensional del volumen de los vacíos con respecto al volumen de las partículas sólidas que forman parte de una muestra. En el caso de material granular, puede ser determinado en función del peso específico del agua, de la densidad relativa del material, del peso del material seco y del volumen que ocupa (V_s).

$$V_r = \frac{V_s S \gamma_0}{W_s} - 1 \quad \text{Ec. III-4}$$

- ✘ Ángulo de reposo: es la pendiente máxima que toma el material granular de manera natural, quedando estable y sin que haya deslizamiento. Esta pendiente es de importancia por el acomodo de las partículas en el fondo marino. Su determinación se realizó mediante la medición directa, dejando caer los granos libremente a cierta altura que permitiera, después de que se hubieran acomodado y estabilizado, de forma tal que se registró el ángulo que formaban respecto a la horizontal con ayuda de un transportador.

Para la aplicación de las expresiones descritas, se obtuvieron los valores de las masas requeridos mediante su medición en básculas electrónicas bajo las condiciones típicas para la realización de estos procedimientos para fines ingenieriles.

De los resultados obtenidos en esta etapa de caracterización, se muestran en la siguiente sección los valores de interés para el presente trabajo.

III.2.2 Selección de muestras representativas

Con el fin de determinar experimentalmente la velocidad de inicio de arrastre de sedimentos de la zona de estudio, de las 145 muestras recolectadas se seleccionaron 10 que fueran representativas en cuanto a ubicación geográfica, granulometría y zona de extracción.

- ✘ Ubicación geográfica: se ubicaron muestras que abarcaran toda la longitud muestreada de las costas del estado con la finalidad de estudiar el comportamiento generalizado de la zona y considerar los diferentes materiales que se encuentran a lo largo de la costa.
- ✘ Granulometría: conocida la distribución del tamaño de los granos de cada muestra, se elaboró un histograma de frecuencias en siete intervalos para el d_{50} y se buscó que las muestras seleccionadas constituyeran un histograma con el mismo comportamiento, con el fin de representar la diversidad de tamaños y la frecuencia con que se presentan a lo largo de la costa.
- ✘ Zona de extracción: se trató representar a los sedimentos procedentes de las diferentes zonas de la playa de las que se obtuvieron las muestras (ver sección III.1).

Una vez analizadas las muestras del estado de Quintana Roo bajo estos criterios, se decidió incorporar una muestra del estado de Campeche y otra de Yucatán, con el fin de ampliar el alcance del estudio y permitir una primera aproximación al entendimiento y diferenciación del inicio de arrastre de los sedimentos de los tres estados que conforman la Península de Yucatán.

En la Tabla III-1 Características de las muestras seleccionadas Tabla III-1 se muestran las, para las muestras seleccionadas, características de determinadas en trabajos previos, durante en el trabajo de campo y en la primera etapa de caracterización. En la Figura III-3 se muestra la ubicación geográfica.

Sitio	Zona	Coordenadas		d_{50} mm	ρ kg/m ³	S	γ kgf/m ³	V_r	Ángulo de reposo °
		Longitud	Latitud						
Akumal II	PI	-87.3191	20.3916	0.1438	2319.993	2.259	2259	1.7889	38.2
Puerto Morelos II	Pb	-86.8659	20.8708	0.17223	2752.36	2.68	2680	1.1784	37.4
Isla Mujeres	PI	-86.7512	21.2602	0.21673	2600.364	2.532	2532	1.0293	38.2
Sian Ka'an	PI	-87.4664	20.1197	0.25556	2684.578	2.614	2614	1.2452	41.8
Pto. E (Cancún)	Pr	-86.7854	21.1447	0.30352	2684.578	2.614	2614	1.2430	39.0
Chelem	Pb	-89.7481	21.2551	0.34529	2702.631	2.632	2632	1.0400	38.0
Pto. 10 (Cancún)	PI	-86.7800	21.0369	0.38976	2703.064	2.632	2632	1.0865	39.0
Holbox	Pb	-87.3829	21.5232	0.48604	2625.012	2.556	2556	1.0327	42.7
Bahía Tortugas	PI	-91.0361	19.0962	0.98078	2753.367	2.681	2681	1.0861	42.0
Pto. F (Cancún)	Pr	-86.8060	21.1767	2.0142	2482.259	2.210	2210	1.5114	36.5

Tabla III-1 Características de las muestras seleccionadas

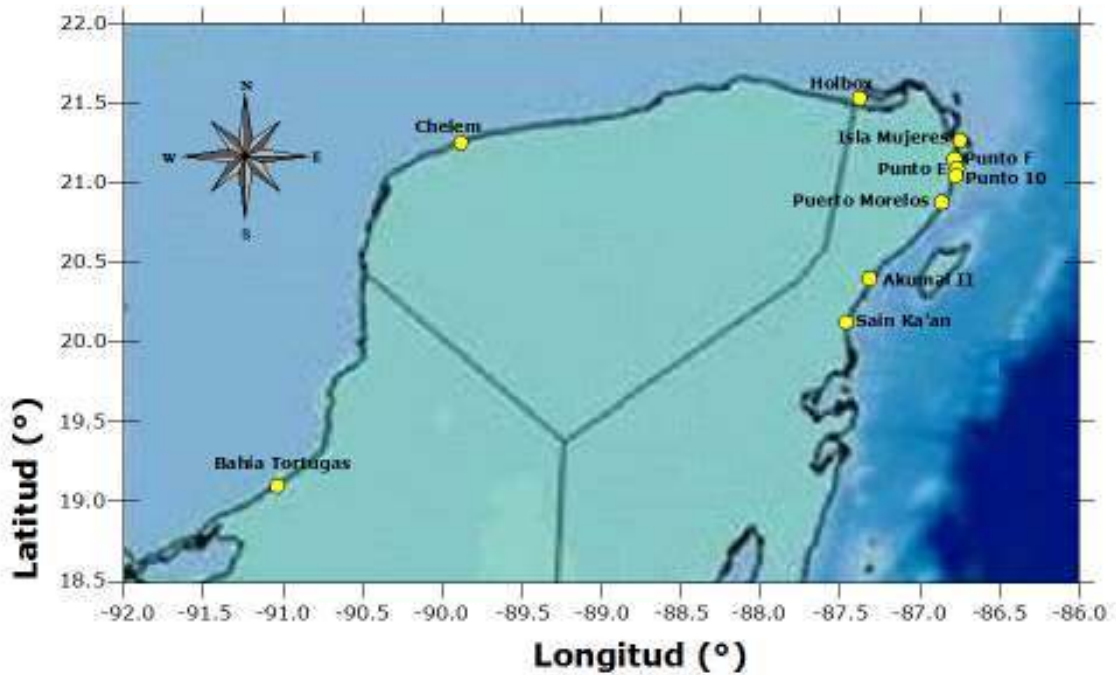


Figura III-3 Ubicación geográfica de las muestras seleccionadas

Figura III-4 Muestras seleccionadas



Figura III-5 Presentación a escala de algunas muestras seleccionadas.

Pto. F (Cancún)



Bahía Tortugas



Chelem



Puerto Morelos



En la Figura III-5 se muestran ordenadas, de mayor a menor diámetro representativo, cuatro de las muestras seleccionadas sobre una retícula de 1 mm².

III.2.3 Metodología experimental para la evaluación del inicio de arrastre

Modelo

Las pruebas se realizaron dentro del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM en el canal de oleaje, el cual tiene una longitud de 37 m, 1.2 m de alto y 0.80 m de ancho, y cuenta con una pala mecánica (tipo pistón) generadora de oleaje regular e irregular que puede ser definido a través de la altura de la ola y del periodo o utilizando un espectro de oleaje.



Figura III-6 Canal de oleaje (izquierda) y pala generadora (derecha)

Para la colocación de las muestras dentro del canal, se fabricó una caja de policarbonato que tuviera una capacidad adecuada para la cantidad de material con el que se contaba de cada muestra. Se construyó con doble fondo, en el cual se colocaron cubos de concreto de 3 cm de lado, esto con el fin de evitar su flotación. Las placas de policarbonato utilizadas cuentan con espesor de 8 mm y el área exterior de la caja es de 30x30 cm con una altura de 7.5 cm, de la cual 1 cm corresponde a la altura libre para la colocación del material.



Figura III-7 Caja de policarbonato

Debido a la configuración determinada para la caja, fue necesario colocar un acomodo del fondo de manera que el oleaje no sufriera alteraciones importantes por el cambio de profundidad y de material al encontrarse con la muestra. Para ello se construyó una rampa de placas de policarbonato de 8 mm de espesor con una pendiente de 1:7, del ancho del canal y una altura de 9 cm, la cual fue llenada con arena para evitar su flotación; de esta manera fue posible acomodar tres filas de cubos de concreto de 3 cm de lado como continuación de la rampa. El inicio de la rampa se colocó a 15.7 m de la pala

generadora de oleaje. En el centro del ancho del canal, a 60 cm del final de la rampa, se colocó la caja sobre una fila de cubos de concreto de 3 cm de lado. Al inicio de la rampa, debido al espesor de las placas, se presentó un pequeño escalón, por lo que se colocó grava de origen calcáreo para continuar la pendiente hasta el fondo del canal. Finalmente, para nivelar la superficie, se colocó una cama de cubos de concreto de 1.5 cm de lado, con lo cual se logró posicionar la parte más alta de la caja, y por lo tanto de la muestra, al mismo nivel la zona que la rodearía. La elección de material para este acomodo responde a la similitud de rugosidad que tienen con las muestras, para que, como se mencionó, el flujo no se encuentre con un cambio brusco y pueda verse alterado. De esta manera, quedó instalado el modelo.



Figura III-8 Colocación del modelo



Figura III-9 Modelo en planta (arriba) y en perfil (abajo)

Equipos

Se utilizaron tres equipos de medición diferentes, los cuales se describen brevemente a continuación.

Sensores de nivel

Son sensores de resistividad que sirven para medir el nivel de la superficie del agua. Por medio de dos barras, miden la intensidad de corriente que circula por ellas, la cual depende del nivel de agua que haya a cada instante. Cuentan con un procesador que, por medio de una previa calibración, transforma la intensidad registrada a un valor de longitud correspondiente a la elevación de la superficie del agua respecto al nivel medio indicado (durante la calibración) y, con ayuda de programa de computadora, arroja el número de olas registradas, su altura y su periodo.



Figura III-10 Sensor de nivel

Vectrinos

Utilizan el efecto Doppler para medir la velocidad del flujo. El efecto Doppler es el cambio en el tono que se escucha cuando la fuente del sonido o el receptor están en movimiento, en ambos casos, el cambio de tono indica qué tan rápido se está moviendo. El Vectrino transmite pares de pulsos de sonido, escucha sus ecos y, finalmente, mide el cambio en la frecuencia de regreso del sonido. Dichos pulsos son transmitidos por el transductor central, con un alcance de 5 cm por debajo de él, y el cambio Doppler introducido por los reflejos de las partículas suspendidas es capturado por cuatro receptores (Figura III-11). El sonido no se refleja en el agua, pero sí en las partículas suspendidas en ella, las cuales se mueven a una velocidad igual a la del agua. Por lo tanto, la velocidad registrada será la velocidad del agua.



Figura III-11 Vectrino (izquierda) y su funcionamiento (derecha)

FlowMap PIV (*Positional Image Velocimetry*)

Utiliza una técnica de medición que permite obtener mapas de velocidades instantáneas, partiendo de que la velocidad es igual a una distancia dividida entre el tiempo en que se recorrió. El PIV mide la distancia que viajaron partículas sólidas suspendidas en el flujo en un intervalo de tiempo conocido, las cuales, en el caso del estudio presentado, se trata de los granos de arena. Para lograr percibir el movimiento, un láser lanza una pantalla en pulsos, lo que genera un efecto estroboscópico, congelando el movimiento de las partículas; el tiempo entre los pulsos es el requerido en el cálculo de la velocidad. Para detectar la posición de las partículas, una cámara se coloca perpendicular a la pantalla láser, la cual se sincroniza con el procesador FlowManager a una computadora, donde las partículas aparecerán como puntos iluminados en un fondo oscuro. Las fotografías se toman en dos cuadros por cada una, de manera que el primer pulso de la pantalla de láser corresponda al cuadro número 1 y el segundo pulso al cuadro número 2.

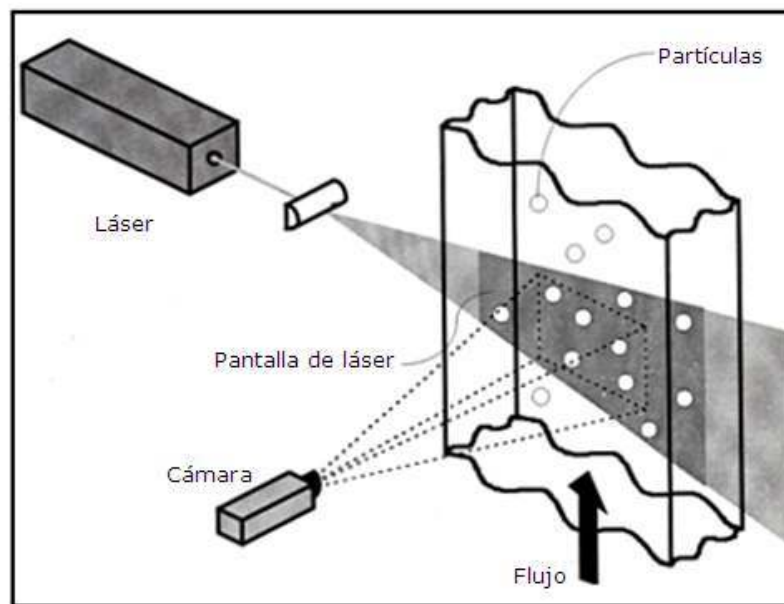


Figura III-12 Funcionamiento del PIV

Una vez tomadas las imágenes, con ayuda del procesador, se dividen en regiones rectangulares llamadas áreas de interrogación y, para cada una de ellas, la imagen del primer y segundo pulso de la pantalla láser son correlacionadas para generar un vector de desplazamiento promedio para la partícula, haciendo esto para todas las áreas de interrogación, se obtiene un mapa de vectores desplazamiento promedio de las partículas. Finalmente, dividido entre el tiempo que pasó entre las dos imágenes se genera el mapa de vectores velocidad.

Ubicación de los equipos

Una vez colocado el modelo, se definió la ubicación de los equipos de medición con el fin de obtener datos útiles para el análisis, la ubicación longitudinal se referenció partiendo de la posición de la pala generadora de oleaje.

Sensores de nivel

Se colocaron 3 sensores:

El primero (sensor 1) a 5 m de la pala, con el fin de registrar la altura y el periodo de las olas antes de sufrir alguna perturbación causada por la presencia del modelo.

El segundo (sensor 2) se colocó a 16.5 m de la pala, distancia correspondiente a la ubicación del final de la rampa, para así poder registrar una posible perturbación después de haber pasado por ella.

El tercero (sensor 3) se colocó a 20 m de la pala, encontrándose después del modelo y de los demás equipos de medición.

Vectrinos

Se utilizaron 2 vectrinos ubicados a 17.05 (Vectrino 2) y 17.35 (Vectrino 1) metros de la pala con la finalidad de registrar la velocidad del flujo al inicio y a final de la muestra, de esta manera se tendrán los valores más cercanos sin que se obstruya el flujo, y principalmente la visibilidad en el área de la muestra. El transductor central se fijó a 10 cm del fondo de la cama de cubos, teniendo de esa manera el registro de la velocidad a 5 cm del mismo.

PIV

El cañón que emite el láser se ubicó a 18 m de la pala, de manera que la pantalla tuviera el alcance necesario para cubrir la zona de la muestra pero que estuviera lo más lejos posible de ella para no perturbar el flujo. La cámara se colocó al nivel de la muestra y al centro de la misma.



Figura III-13 Ubicación de equipos de medición. De izquierda a derecha: cañón del PIV, vectrino 1, vectrino 2, sensor de nivel 2.

Pruebas de inicio de arrastre

Previo al inicio de las pruebas de inicio de arrastre, se realizó una primera serie de pruebas con arena de Puerto Morelos, con el fin de determinar una altura de ola conveniente para registrar el inicio de arrastre, la cual sería constante en todas las pruebas, dado que se sabe de experimentaciones previas que el periodo de la ola es un factor más determinante que la altura de la ola para el inicio de arrastre. De lo cual resultó que una altura de 15 cm era adecuada, para lo que se requería una profundidad de 40 cm para evitar el rompimiento de las olas.

Una vez determinada la altura de ola de 15 cm, se buscó el periodo de ola que pusiera en movimiento a los granos, para lo que se inició la prueba con 0.9 s, apreciando un leve movimiento y dado que el diámetro de los granos de Puerto Morelos es de los menores respecto a las demás muestras seleccionadas, se decidió iniciar las pruebas con periodo igual a 1 s hasta llegar a 2 s, evaluando cada 0.2 s. Todos los ensayos se realizaron bajo condiciones de oleaje regular.

En cuanto a los parámetros de registro del PIV, debido a que el instante que se buscaba captar se mantiene un fracción de segundos y a la capacidad del equipo de cómputo, se determinó tomar 30 fotografías, separadas 0.125 s entre ellas, con 2 cuadros cada una y un tiempo entre pulsos de 0.150 ms, con lo que se tiene un tiempo total de grabación de 3.75 s.

Las pruebas realizadas a cada una de las muestras seleccionadas se basaron en la siguiente metodología:

- 1) Colocar la muestra dentro de la caja de policarbonato, cuidando que la superficie quede al ras con el borde de la caja y plana.
- 2) Establecer 40 cm de profundidad de agua en el canal y calibrar los sensores de nivel.
- 3) Iniciar la generación del oleaje bajo la condición determinada y la medición con los Vectrinos y los sensores de nivel.

Para la primera condición (altura de 15 cm, periodo de 1 s y cama plana) se enciende la pala y de manera prácticamente simultánea, el inicio de registro de los Vectrinos y de los sensores de nivel, el cual se determinó fuera de 1 min para ambos equipos.

- 4) Iniciar la grabación con el PIV.

Debido a que el movimiento de la pala comienza sobre el agua cuando está en reposo, las ondulaciones en la superficie del agua comienzan a establecerse hasta que después de algunos

segundos la altura de la ola se constituye regular. A partir del instante en que dicha ola llega a la muestra se inicia la grabación con el PIV. Debido a esto se presenta un desfase entre los registros de los Vectrinos y sensores de nivel con el del PIV, por lo que se toma el tiempo de dicho desfase para poder empatarlos posteriormente.

5) Permitir la formación de rizos.

Al finalizar el tiempo de grabación del PIV, continúa la generación de oleaje con el fin de permitir la formación de los rizos, cuando se hayan formado, se detiene la pala y se permite que el agua quede en reposo. Después, se repite el paso 3, ahora con formaciones de rizos en el fondo.

6) Aplanado de la cama.

Finalizada la grabación del PIV, se detiene la pala mecánica y se aplanan la cama de arena para la siguiente prueba.



Figura III-14 Aplanado de la cama de arena

7) Repetir los pasos 3, 4, 5 y 6 para las demás condiciones de oleaje.

Altura de 15 cm y periodos de 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 y 2 s.



Figura III-15 Pruebas de inicio de arrastre

Las pruebas realizadas bajo todas las condiciones de oleaje, en cama plana y rizos, para todas las muestras, suman un total de 120 ensayos, 3600 fotografías y 7200 cuadros tomados por la cámara del PIV, 240 registros de los Vectrinos y 360 registros de los sensores de nivel, cuyo análisis se presenta en el capítulo siguiente.

