

Fig.VI.8. Crecimiento de formas del fondo a partir de irregularidades iniciales puntuales; vista en planta. Nota: la fuente de iluminación se encuentra a la derecha, produciendo sombras hacia la izquierda de cada cresta de las dunas.

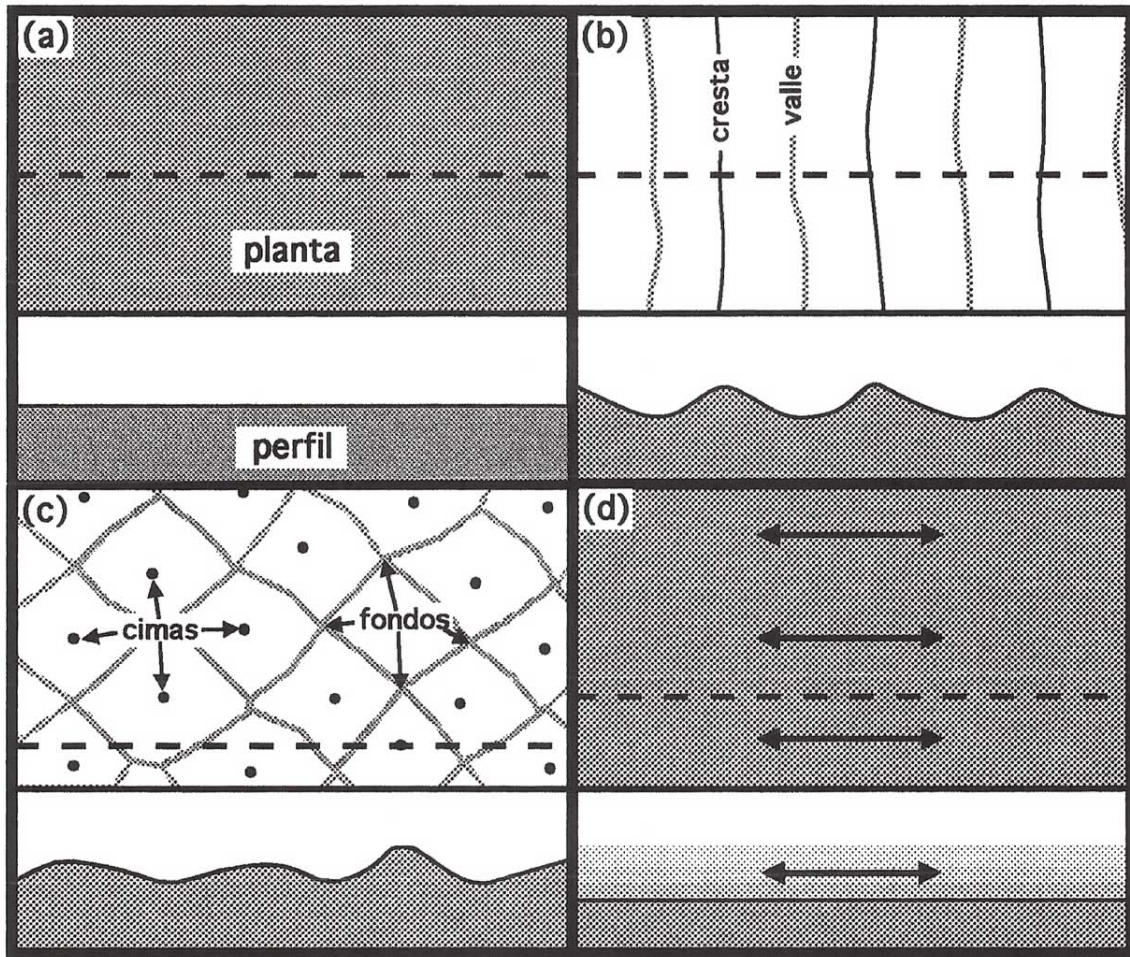


Fig.VI.9. Estado completamente desarrollado del fondo para 4 condiciones crecientes de oleaje:

- (a). por debajo a la iniciación de movimiento del sedimento, fondo plano e inmóvil;
- (b). ligeramente por arriba de la iniciación de movimiento, dunas bidimensionales bastante regulares;
- (c). en condiciones que empiezan a *rasurar* las crestas, patrones tridimensionales e irregulares;
- (d). por arriba del borramiento total de las dunas, fondo nuevamente plano, pero con una capa de sedimento en suspensión en movimiento oscilatorio.

Vistas en planta (recuadro superior) y corte en perfil sobre la línea punteada (recuadro inferior).

Si a esto añadimos el hecho de que el oleaje real nunca es estrictamente permanente, y que por lo tanto el oleaje instantáneo se encuentra esculpiendo un fondo, al menos parcialmente, formado por otra condición de oleaje, el lector podrá apreciar la complejidad del proceso y entender el porqué se trata aún de un área de investigación activa.

Sin embargo, considerando tan solo el estado final completamente desarrollado para una cierta condición de oleaje dada, existen ya resultados, mayoritariamente experimentales, que permiten estimar las características de las formas del fondo. Se refiere al lector interesado en el desarrollo de estas formas del fondo a Rosengaus (1987).

VI.4.2 Parámetros adimensionales de importancia.

El parámetro de Shields, ψ , inicialmente usado para parametrizar la iniciación de movimiento en flujo unidireccional es una medida adimensional de τ_b que toma en cuenta el tamaño de partículas y densidad del sedimento.

$$\psi = \frac{\tau_b}{\rho g (s-1) d} \quad (\text{VI-66})$$

donde s es la densidad relativa (al agua) de las partículas sólidas (adimensional), $s-1$ = densidad relativa sumergida de las mismas y d es el diámetro de dichas partículas.

Inicialmente, Shields presenta una curva $\psi \longleftrightarrow R_b^*$ para iniciación de movimiento para flujo unidireccional donde R_b^* es el número de Reynolds del fondo definido como

$$R_b^* = \frac{U_* d}{\nu} \quad (\text{VI-67})$$

Dicho diagrama se reproduce en la fig.VI.10, donde la zona por arriba de la curva mostrada indica condiciones de fondo móvil en movimiento, mientras que la zona por abajo de la curva indica condiciones de sedimento del fondo inmóvil. Al valor de ψ correspondiente a la curva en sí, se le llama valor crítico (para la iniciación de movimiento) y se denomina usualmente con el símbolo ψ_c . En realidad el concepto de sedimento en movimiento es difícil de precisar exactamente, ¿está este en movimiento cuando se observa el primer gránulo que despega del fondo?, o ¿se considera sedimento en movimiento cuando existe movimiento generalizado de los gránulos en la capa superficial del fondo? o ¿alguna condición intermedia? Debido a esta subjetividad del observador, la fig.VI.10 debe interpretarse mejor como una banda alrededor de la curva de Shields, abajo de la cual no existe ningún gránulo en movimiento y arriba de la cual existe movimiento generalizado.

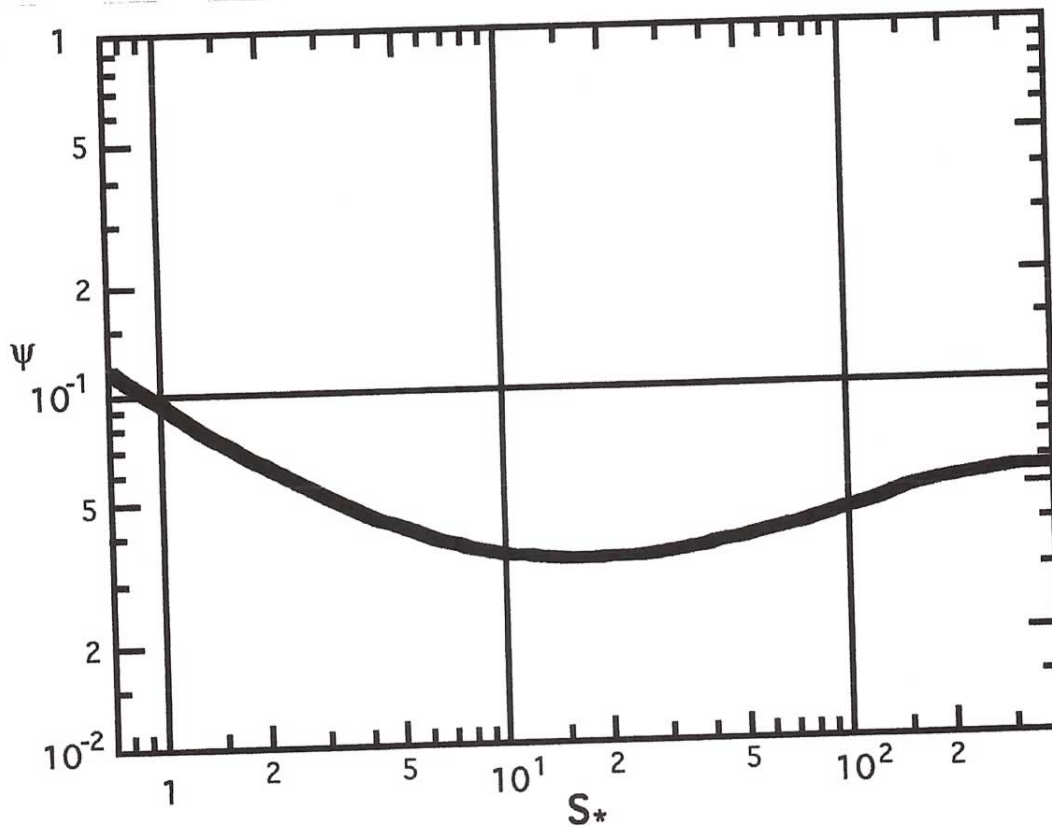


Fig. VI.10. Diagrama de iniciación de movimiento de Shields. La curva indica la condición crítica de iniciación de movimiento del sedimento; la zona inferior a ella representa sedimento inmóvil; la zona superior representa sedimento en movimiento. Este diagrama debe interpretarse como correspondiente a fondo plano, por lo que el eje de ordenadas puede interpretarse como ψ' (fuente: Stefanick, 1979).

Grant y Madsen (1982) mostraron que este diagrama era adecuada para flujo oscilatorio si se considera a τ_b como $\tau_{b,max}$ y para facilitar su uso lo presentaron en forma $\tau_b \longleftrightarrow S_*$, donde S_* es un parámetro adimensional que caracteriza al sedimento unicamente, definido como

$$S_* = \frac{d}{4\nu} \sqrt{(s-1)gd} \quad \text{(VI-68)}$$

Observe, en contraste, que R_b^* contiene características tanto del sedimento como del flujo. La curva de Grant y Madsen equivalente a la de Shields se reproduce en la fig.VI.11, con una interpretación parecida a la del diagrama de Shields original.

Obviamente este τ_b para iniciación de movimiento se refiere a su condición inicial plana. Una vez que se generan las formas de fondo, la rugosidad aumenta y τ_b también aumenta. Por lo tanto, tal y como está definido, el parámetro ψ depende de la condición del fondo, o sea de si existen o no formas de fondo y de existir, también de su geometría. Para propósitos de predicción, es necesario un parámetro basado solo en características del sedimento y del flujo (no del tamaño y geometría de las formas del fondo), lo que se logra con

$$\psi' = \frac{\tau'_{b, \max}}{\rho g (s-1) d} \quad \text{(VI-69)}$$

donde la (') se refiere a las condiciones de fondo plano, o a las cantidades asociadas solo a la resistencia tangencial en la superficie, no la resistencia de forma de los rizados o dunas en el fondo.

Posteriormente se ha comprobado que este ψ' es un parámetro adecuado para caracterizar muchos de los fenómenos de interacción entre el oleaje y el fondo móvil. La forma como lo usaremos aquí será en términos relativos al parámetro de Shields correspondiente al inicio de movimiento de las partículas del fondo

$$\frac{\psi'}{\psi_c}$$

donde ψ_c es el valor crítico para iniciación de movimiento de la curva de Shields (fig. VI.10).

Antes de pasar a la geometría de las formas del fondo es necesario

comentar que los parámetros anteriores tienen al diámetro de las partículas de fondo incluido como un valor único, siendo que en la realidad los sedimentos no son jamás completamente uniformes en tamaño. Así pues se hace necesario manejar a d como un *diámetro representativo* del material de fondo. En casos donde el autor de un cierto estudio no especifique que tipo de diámetro representativo debe ser usado con sus expresiones, se acostumbra considerarlo como el diámetro medio (de la muestra por peso) o el d_{50} que corresponde al valor para el cual 50% de la muestra (en peso) tiene mayor diámetro y 50% de la muestra tiene menor diámetro. Se refiere al lector interesado en manejo y análisis de muestras de sedimentos y suelos a textos de Mecánica de Suelos.

VI.4.3 Geometría de formas de fondo en estado plenamente desarrollado.

En este caso, presentaremos solo las figuras de Rosengaus (1987) para longitud, altura, pendiente y asimetría de formas de fondo con datos experimentales y curvas de ajuste por varios autores, dejando las expresiones específicas para referencia en Rosengaus (1987). Todas las curvas presentadas fueron obtenidas a través de experimentos, ya sea en canales de oleaje o en flujo oscilatorio en un túnel de flujo (sin superficie libre). Nuevamente nos encontramos en un tema donde aún no hay conclusiones universalmente aceptadas, especialmente en cuanto a la aplicabilidad de los resultados experimentales de laboratorio a escalas prototipo, por lo que los resultados presentados deben tomarse con reserva y sujetos a seguras mejoras en el futuro. Los resultados presentados son fundamentalmente para oleaje monocromático, siendo aún tema de investigación y discusión las características de formas de fondo generadas por oleaje irregular o espectral. Información preliminar al respecto puede consultarse en Rosengaus (1987).

La figura VI.11 define a los parámetros utilizados para caracterizar a las formas del fondo, siendo estos: η_b , la altura de la forma del

fondo, considerando el desnivel total entre valle y cresta, λ , la longitud de la forma del fondo o distancia entre crestas consecutivas, η_b/λ , la pendiente media de la forma de fondo y α , la asimetría de la misma. Puesto que naturalmente existe una cierta variabilidad entre las características de las formas del fondo aún bajo las condiciones idealizadas de oleaje unidireccional y uniforme, los resultados presentados se refieren a características estadísticas promedio de las formas del fondo. Desde el punto de vista estadístico, no hace diferencia práctica el que la altura de la forma del fondo se mida del nivel de la cresta hasta el nivel del valle anterior o posterior a esta, así como la longitud de la forma del fondo como aquella entre crestas consecutivas o de valles consecutivos.

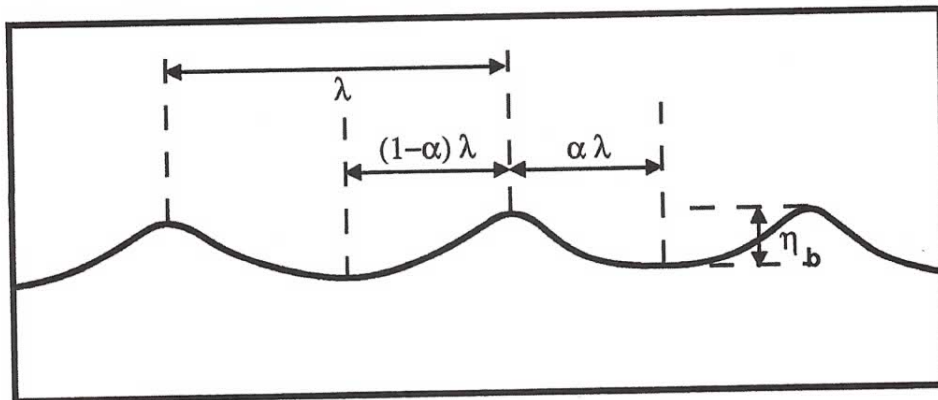


Fig. VI.11. Definición de los parámetros descriptores de la geometría del fondo.

La figura VI-12 presenta resultados experimentales de Rosengaus (1987) de la altura de forma del fondo normalizada con la amplitud de la excursión de las partículas fluídas en el fondo, η_b/A_b , como función del parámetro de Shields normalizado, ψ'/ψ_c . Los puntos representan los resultados experimentales de Rosengaus (1987); cada punto es el promedio de varias realizaciones del experimento para iguales condiciones de oleaje, con las barras de error representando \pm una desviación estándar de la muestra de diferentes realizaciones. La línea sólida es un ajuste de mínimos cuadrados a los puntos mientras

que las líneas punteadas representan un ajuste a resultados experimentales recopilados por Stefanick (1979). El quiebre en la línea punteada, alrededor de $\psi'/\psi_c=3.3$, representa la condición aproximada para la cual la intensidad del oleaje empieza a *barrer* las crestas de las formas del fondo perdiendo estas altura y pendiente. Este es el principio del fenómeno ya mencionado para el cual a grandes intensidades de oleaje el fondo es plano pero con una capa de sedimento en suspensión oscilando bajo el efecto del oleaje. Las expresiones de Stefanick (1979) aparecen en la figura. Observe que el eje de las abscisas inicia en $\psi'/\psi_c=1$, puesto que por definición para valores más bajos no existe movimiento del sedimento y por lo tanto tampoco formas del fondo generadas por el oleaje en cuestión (aunque pueden existir formas del fondo desarrolladas por condiciones de oleaje mayor anteriores).

Geometria del fondo completamente desarrollado
(oleaje monocromático)

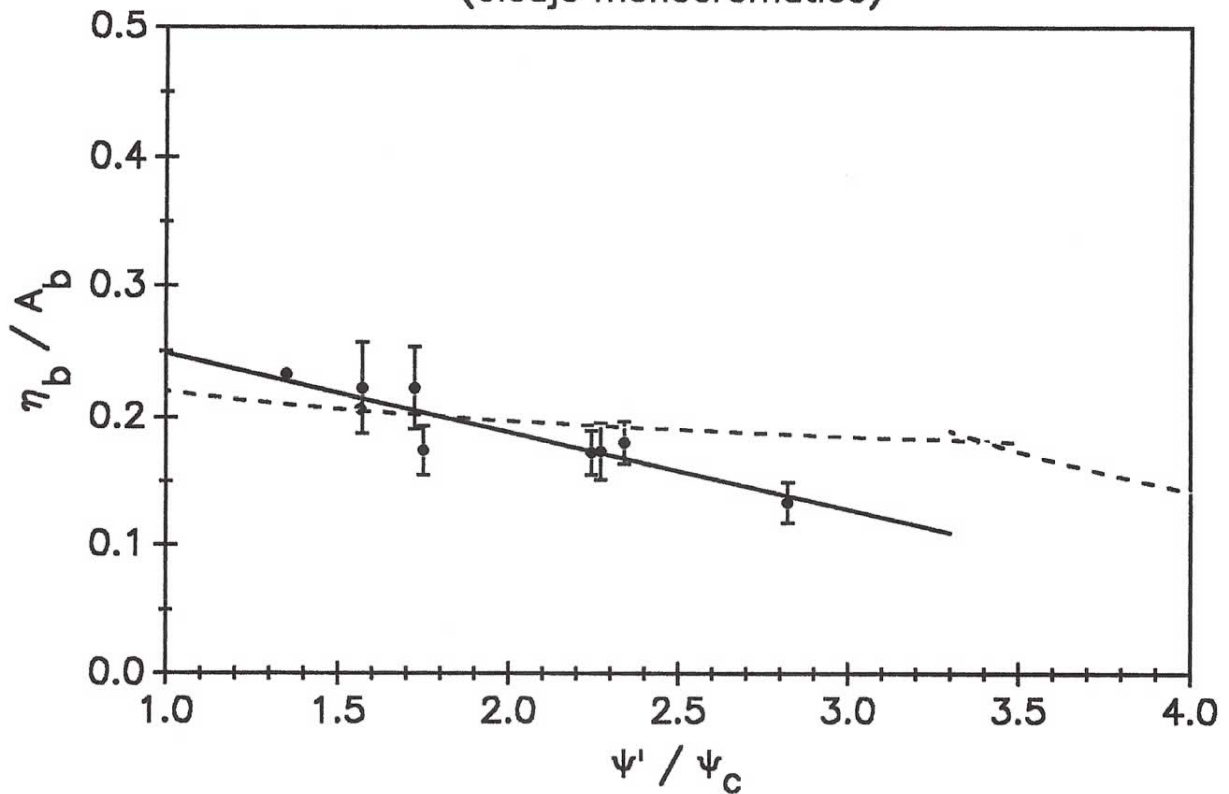


Fig. VI.12. Altura de las formas del fondo para condiciones de completo desarrollo:

$$\begin{aligned}
 \text{---} \quad \frac{\eta_b}{A_b} &= 0.22 \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]^{-0.16} & 1 < \psi' / \psi_c < 1.8 S_*^{0.61} \\
 &= 0.48 S_*^{0.82} \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]^{-1.5} & 1.8 S_*^{0.61} < \psi' / \psi_c
 \end{aligned}$$

$$\text{—} \quad \frac{\eta_b}{A_b} = 0.3094 - 0.0607 \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]$$



puntos experimentales (Rosengaus 1987)

(fuente: Rosengaus, 1987).

La figura VI.13 muestra en forma similar a la figura VI.12 los resultados en este caso para la longitud de la forma del fondo normalizada con la amplitud de la excursión de partículas fluídas en el fondo, λ/A_b .

Geometria del fondo completamente desarrollado
(oleaje monocromatico)

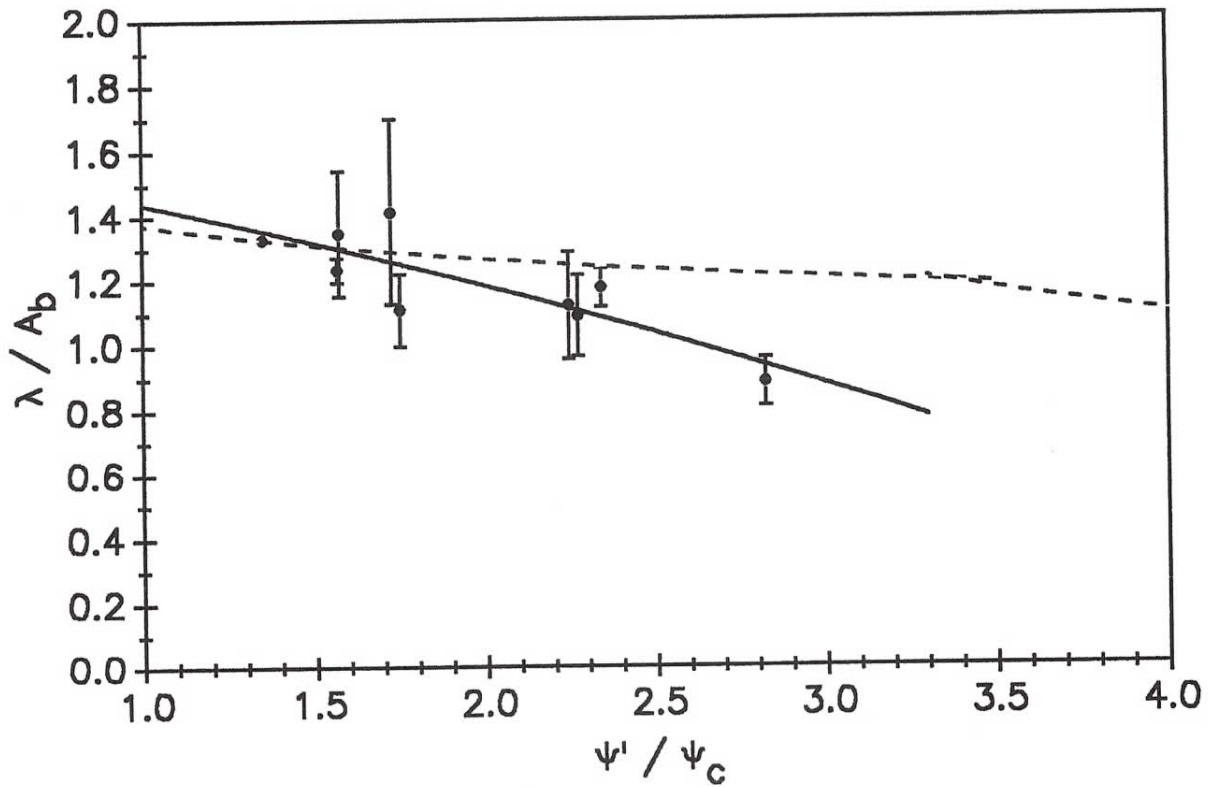


Fig. VI.13. Longitud de las formas del fondo para condiciones de completo desarrollo:

$$\text{---} \quad \frac{\lambda}{A_b} = 1.375 \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]^{-0.12} \quad 1 < \psi' / \psi_c < 1.8 S_*^{0.61}$$

$$= 1.714 S_*^{0.23} \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]^{-0.5} \quad 1.8 S_*^{0.61} < \psi' / \psi_c$$

$$\text{—} \quad \frac{\lambda}{A_b} = \frac{0.3094 - 0.0607 (\psi' / \psi_c)}{0.1864 - 0.0136 (\psi' / \psi_c)}$$



puntos experimentales (Rosengaus 1987)

(fuente: Rosengaus, 1987).

La figura VI.14 muestra en forma similar a las figuras VI.12 y VI.13 los resultados sobre la pendiente promedio de las formas de fondo, η_b/λ . Esta figura representa las mediciones independientes de la pendiente del fondo y no coincide exactamente con lo que se obtendría de dividir valores obtenidos de la figura VI.12 entre valores obtenidos de la figura VI.13, por el tratamiento estadístico que involucran. Como puede observarse la pendiente de las formas del fondo es bastante insensible a la intensidad del oleaje manteniéndose cerca del valor 0.16 para todas las condiciones en las que formas del fondo existen.