

Geometria del fondo completamente desarrollado
(oleaje monocromatico)

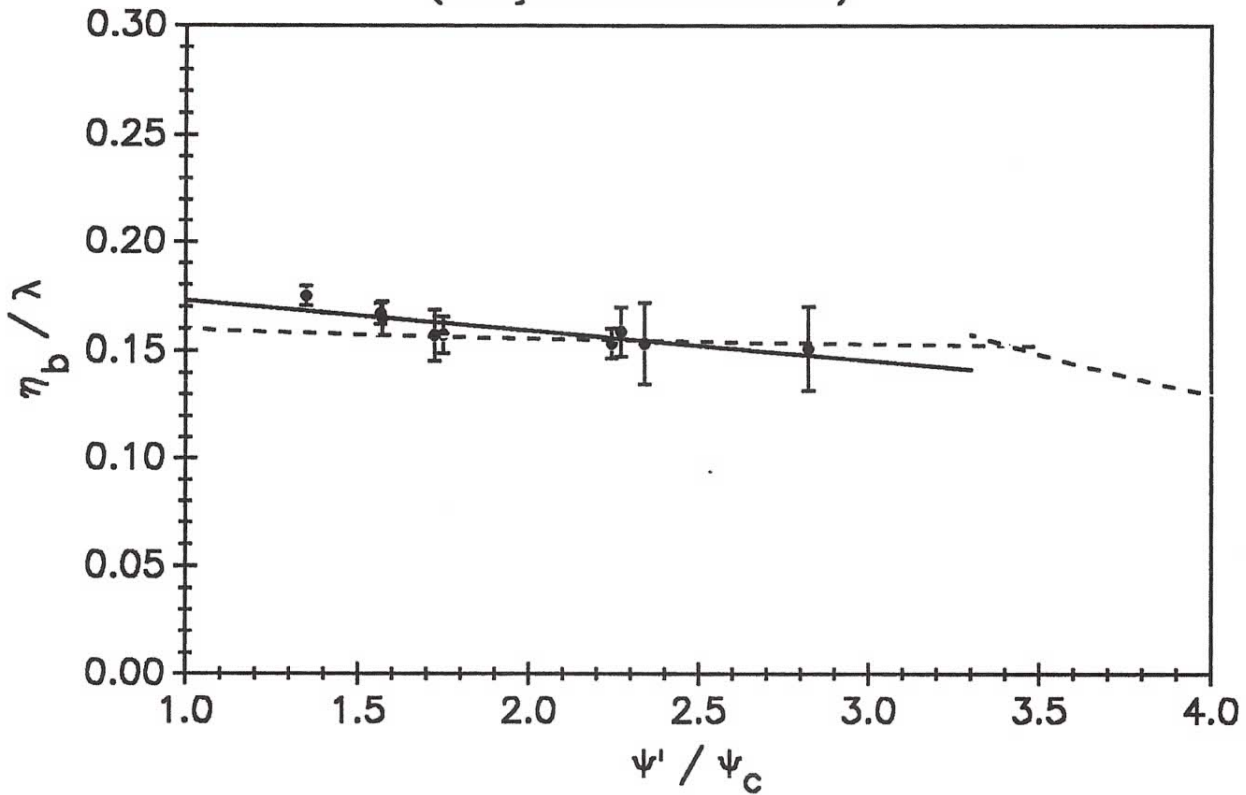


Fig. VI.14. Pendiente de las formas de fondo en estado de completo desarrollo:

$$\text{---} \quad \frac{\eta_b}{\lambda} = 0.16 \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]^{-0.04} \quad 1 < \psi' / \psi_c < 1.8 S_*^{0.61}$$

$$= 0.28 S_*^{0.59} \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]^{-1.0} \quad 1.8 S_*^{0.61} < \psi' / \psi_c$$

$$\text{—} \quad \frac{\eta_b}{\lambda} = 0.1864 - 0.0136 \left[\frac{\psi'}{\psi_c} \right]$$



puntos experimentales (Rosengaus 1987)

(fuente: Rosengaus, 1987).

Finalmente la figura VI.15 muestra resultados experimentales en cuanto a la asimetría de las formas de fondo. Dicha asimetría se debe principalmente a que para oleaje intenso (para el cual la teoría lineal vista hasta ahora no es necesariamente aplicable) el movimiento del fluido en el fondo es asimétrico en el ciclo, presentándose mayores velocidades en la excursión hacia adelante (en el sentido de propagación del oleaje) que en la excursión hacia atrás (en el sentido opuesto a la propagación del oleaje).

Geometría del fondo completamente desarrollado
(oleaje monocromático)

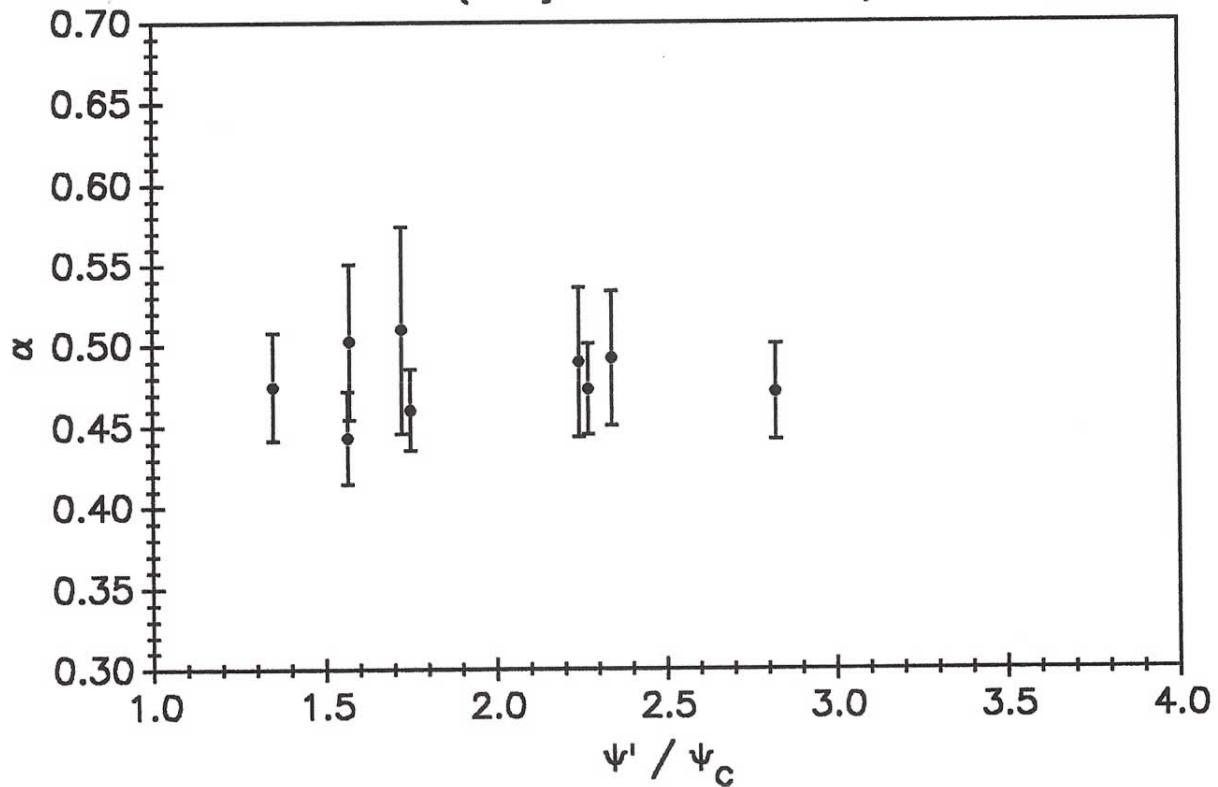


Fig. VI.15. Asimetría de las formas del fondo en estado de completo desarrollo:

● puntos experimentales (Rosengaus 1987)

(fuente: Rosengaus, 1987).

VI.4.4 Velocidad de desarrollo de un fondo móvil.

En la sección anterior se presentaron resultados referentes al estado *totalmente desarrollado* de las formas del fondo, es decir aquel estado en el que el movimiento de las partículas de sedimento se encuentra ya estadísticamente en un estado de equilibrio con el oleaje (supuesto

constante) que lo genera. Obviamente estos resultados son aplicables después de un cierto tiempo de acción del oleaje sobre el fondo, pero ¿cuál es el orden de magnitud de este tiempo necesario para alcanzar el *desarrollo total* de las formas del fondo? Aunque esta pregunta aún no puede ser respondida con certeza, fundamentalmente porque el estado inicial del fondo en casos reales es desconocido, se presentan algunos resultados de Rosengaus (1987) en este sentido. Los experimentos en un canal de oleaje por Rosengaus (1987) desarrollaban el estado final del fondo a partir de un fondo inicialmente plano excepto por pequeñas hondonadas transversales a espaciamiento uniforme a lo largo del canal. El fondo se desarrollaba siguiendo la descripción conceptual presentada en la sección VI.4.1. En base a estos experimentos, Rosengaus (1987) presenta estimaciones de la velocidad de propagación de las manchas de dunas sobre el fondo inicialmente plano, C_b , así como del tiempo necesario para que una duna se desarrolle totalmente desde su aparición hasta su estado totalmente desarrollado, t_f . Con esta información y haciendo alguna hipótesis sobre la separación inicial de perturbaciones en el fondo, se puede estimar el tiempo que tomará a este alcanzar el estado totalmente desarrollado. Por ejemplo bajo las condiciones simplificadas de los experimentos mencionados, el tiempo para total desarrollo del fondo es igual al tiempo necesario para cubrimiento total de dunas, L_{b0}/C_b , más el tiempo necesario para que la última duna aparecida (en el punto de contacto de dos manchas) se desarrolle por completo, t_f , donde L_{b0} representa la distancia inicial entre perturbaciones en el fondo. Este estimado sería conservador en el sentido que más allá de este tiempo las expresiones presentadas en la sección anterior serían de seguro aplicables (aunque lo pudieran ser antes también).

Puesto que los experimentos descritos se realizaron con oleaje no lineal, en el cual el movimiento de fluido en el fondo es asimétrico en el ciclo, los resultados se presentan por separado para la propagación de las manchas en sentido de la propagación del oleaje, C_{b+} , y en sentido opuesto al de propagación del oleaje, C_{b-} , donde el primero es bastante mayor al segundo. Los resultados presentados incluyen experimentos con oleaje monocromático, grupos de olas (o

amplitud modulada) y oleaje espectral. La figura VI.16 muestra la velocidad de propagación de las manchas de dunas normalizada con la amplitud de la velocidad de partículas fluídas en el fondo, C_b/U_b , para diferentes condiciones de oleaje representadas con el parámetro ψ'/ψ_c . Las curvas representan ajustes recomendados para su uso práctico.

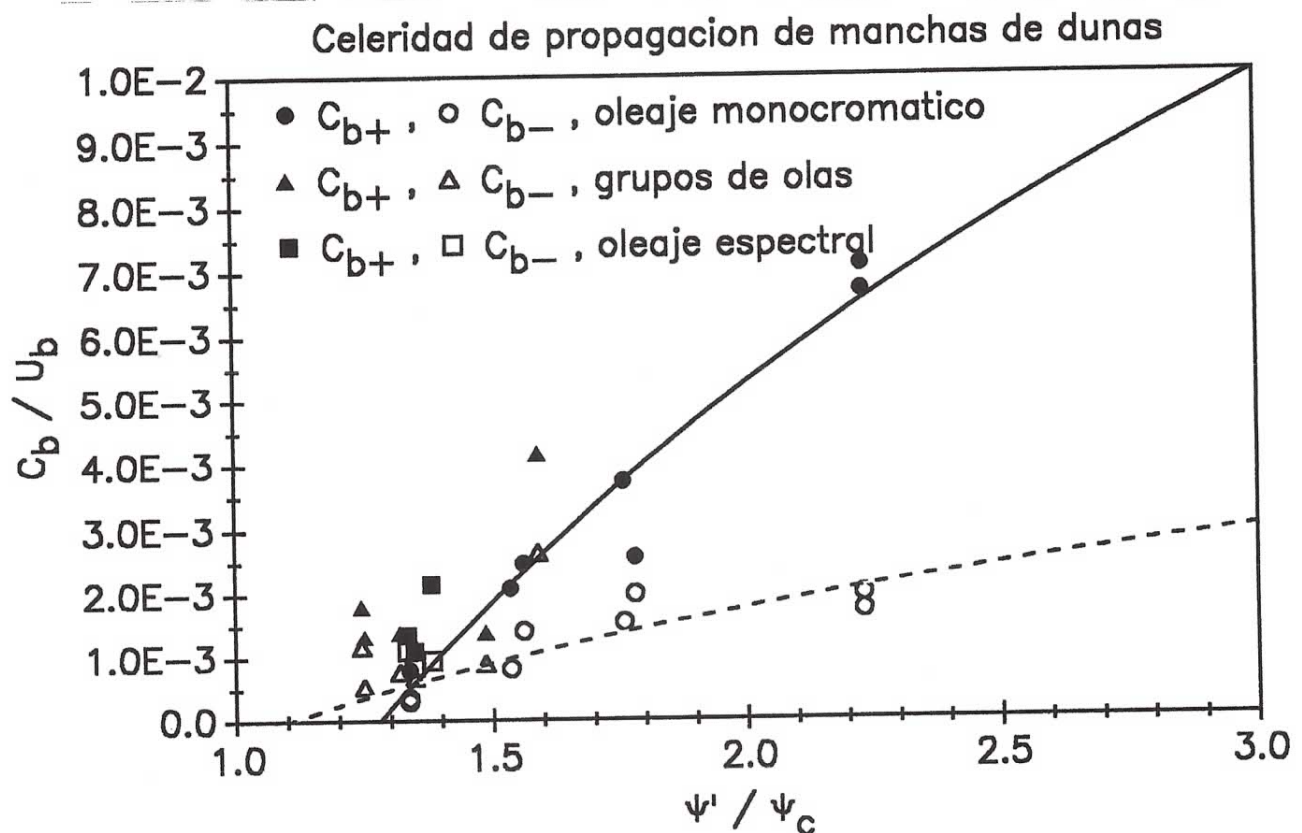


Fig. VI.16. Celeridad de propagación de *manchas de dunas* sobre un fondo plano. Se presentan resultados experimentales de Rosengaus (1987), en cuanto a avance en dirección de la de propagación del oleaje (+) y en contra (-). Las líneas representan ajustes para cada caso. (fuente: Rosengaus, 1987)

La figura VI.17 muestra el tiempo t_f normalizado por el periodo de la

ola, o sea en número de ciclos, necesario para el desarrollo total de una duna incipiente. En este caso no existen diferencias significativas entre t_{f+} y t_{f-} , aunque los puntos experimentales los presentan en forma separada. Nuevamente la curva es un ajuste recomendado para su uso práctico.

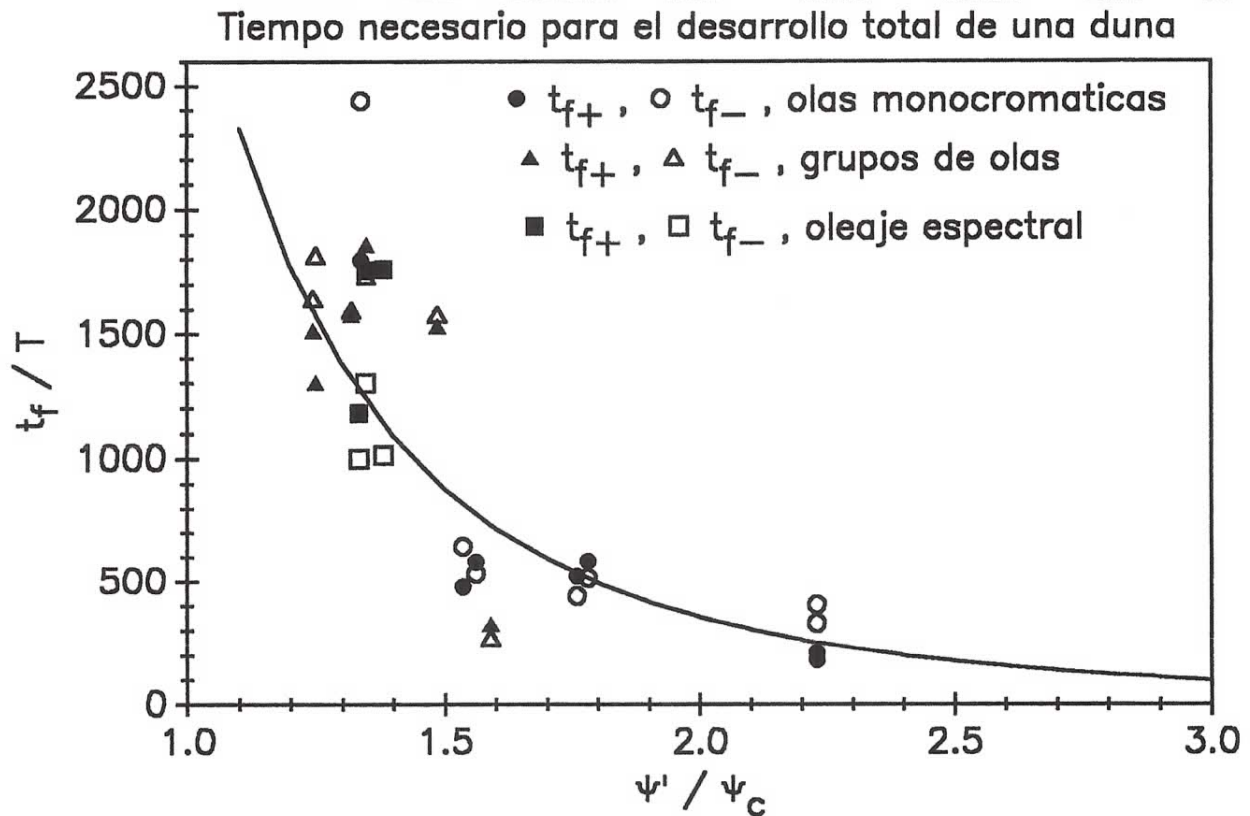


Fig. VI.17. Tiempo necesario para el desarrollo total de una duna incipiente. Se presentan resultados experimentales de Rosengaus (1987). La curva representa un ajuste a los puntos experimentales.
 (fuente: Rosengaus, 1987)

Observe como la velocidad de propagación de las *manchas de dunas* es de 2 a 3 órdenes de magnitud menor a U_b y que el número de ciclos necesario para el completo desarrollo va de las centenas a los miles,

dependiendo de la intensidad del oleaje (y por lo tanto de la intensidad del movimiento de fluido en el fondo).

VI.5 ATENUACION DE OLAJE SOBRE FONDO MOVIL (ARENOSO).

Obviamente, al desarrollarse formas en el fondo arenoso el detalle del flujo en la capa límite ya no coincide con lo visto en la sección VI.1. Sin embargo debido a la falta de soluciones (analíticas o numéricas) satisfactorias para el flujo sobre formas de fondo realistas, es necesario utilizar el mismo tipo de herramienta que para fondo plano, considerándose en este caso a las formas de fondo como elementos de rugosidad para fines del cálculo de atenuación. En este caso la rugosidad equivalente se denomina k_b en lugar de k_s . Es de esperarse que esta rugosidad dependa de la altura y separación de las formas de fondo.

El problema consiste en obtener expresiones de k_b o f_w en términos exclusivamente de características del sedimento y del flujo oscilatorio sobre él, para después utilizar herramientas típicas de fondo plano ya tratadas anteriormente.

La complejidad del fenómeno hace necesario el uso de información experimental, ya que los esfuerzos analítico y numéricos están lejos aún de proporcionar resultados aplicables a condiciones reales. Desgraciadamente no existen muchos estudios de este tipo y algunos de ellos son para geometrías de fondo rígidas que no representan en forma realista la geometría de formas de fondo naturales. Referencias a estos estudios se encuentran en Rosengaus (1987). Los resultados experimentales reportados en la mencionada referencia son los del propio autor y los recopilados por Grant y Madsen (1982) de varios estudios anteriores.

Es importante hacer notar que en este rango de altas rugosidades,

caracterizadas ya por el tamaño de las formas del fondo y no por el tamaño del grano, las expresiones $f_w \leftrightarrow k_b$, como las presentadas en la figura VI.5, presentan grandes diferencias y es sumamente importante usar las herramientas en forma congruente a como fueron obtenidas por sus autores. Esto requiere puntualizarse con una explicación más amplia. Los experimentos para obtener estas expresiones se realizan midiendo en forma independiente por un lado la atenuación de oleaje o pérdida de energía y deduciendo de esta el valor de f_w y por otro lado la geometría de las formas del fondo, de la que se obtiene utilizando alguna expresión la rugosidad del fondo k_b . Así pues al utilizarse estos resultados en la práctica, donde se estima la geometría de las formas del fondo, ver sección VI.4.3, de ellas la rugosidad y de esta el factor de fricción, es muy importante el utilizar como expresión de k_b en función de la geometría de fondo, una que sea congruentes con la utilizada por el autor de la expresión de f_w en función de k_b a ser utilizada, pues de otra manera se pueden obtener factores de fricción inverosímiles.

En opinión del autor, para valores pequeños de ψ'/ψ_c (digamos $1 \leq \psi'/\psi_c \leq 4$) se pueden obtener resultados aceptables con alguna de los siguientes tres criterios:

$$1) \quad \frac{k_b}{A_b} = 20 \left(\frac{\eta_b}{A_b} \right) \left(\frac{\eta_b}{\lambda} \right) \quad (\text{VI-70})$$

con la geometría de formas de fondo calculada de

$$\frac{\eta_b}{A_b} = 0.22 \left[\psi'/\psi_c \right]^{-0.16} \quad (\text{VI-71})$$

$$\frac{\eta_b}{\lambda} = 0.16 \left[\psi'/\psi_c \right]^{-0.04} \quad (\text{VI-72})$$

y f_w de la expresión de Grant-Madsen (1978) en la figura VI.5, estando limitado al rango

$$\psi'/\psi_c < 1.8 S_*^{0.61} \quad (\text{VI-73})$$

$$2) \quad \frac{k_b}{d} = 275 \quad \text{para arenas finas a muy finas} \quad (\text{VI-74})$$

con f_w del criterio Grant-Madsen (1978) en la figura VI.5.

$$3) \quad \frac{k_b}{A_b} = 23 \left(\frac{\eta_b}{A_b} \right) \left(\frac{\eta_b}{\lambda} \right) \quad (\text{VI-75})$$

con la geometría de formas de fondo calculada de

$$\frac{\eta_b}{A_b} = .31 - 0.06 \left(\psi'/\psi_c \right) \quad (\text{VI-76})$$

$$\frac{\eta_b}{\lambda} = 0.186 - .0136 \left(\psi'/\psi_c \right) \quad (\text{VI-77})$$

con f_w del criterio de Jonsson en la figura VI.5.

La figura VI.18 muestra los 3 criterios anteriores comparados con datos experimentales de Rosengaus (1987).

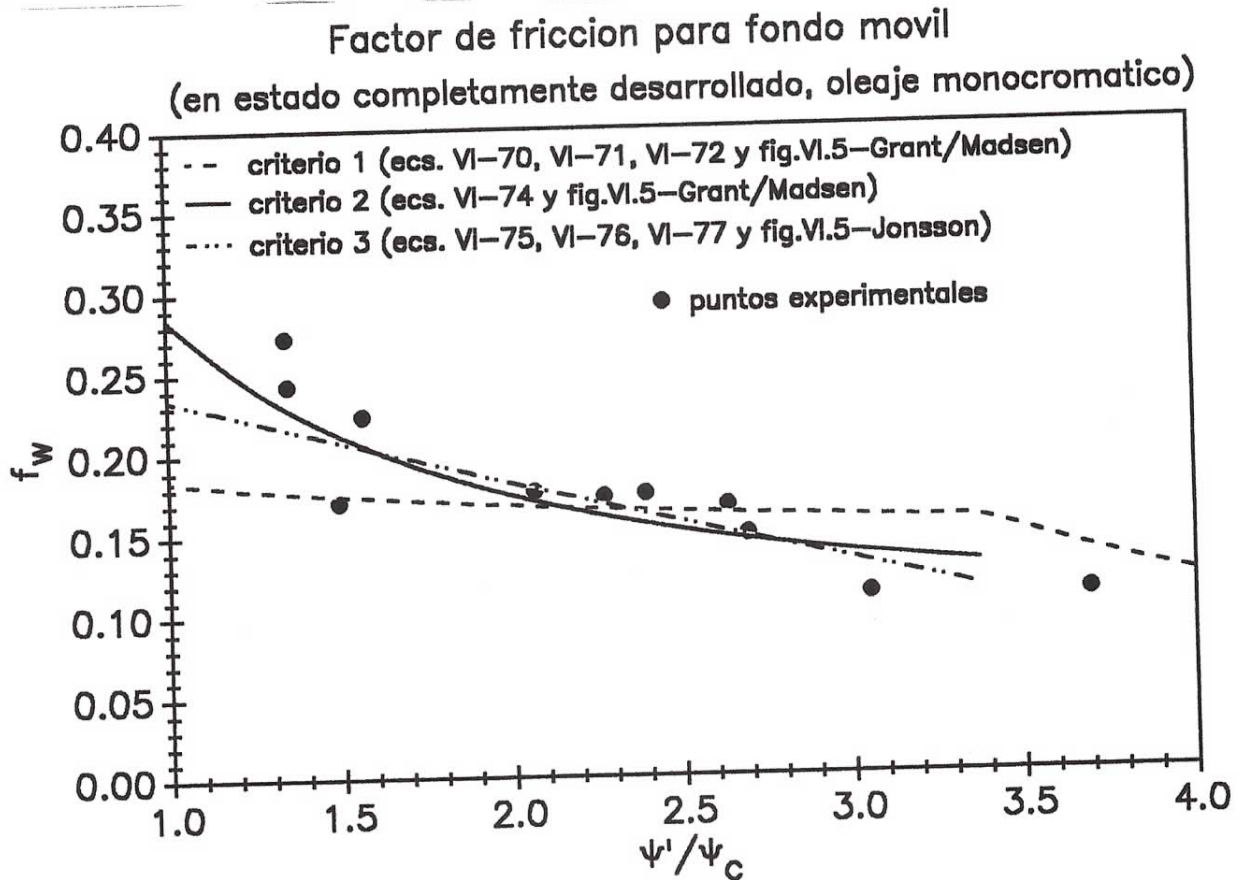


Fig. VI.18. Factor de fricción para fondo móvil (arenoso). Se muestra una comparación entre datos experimentales (Rosengaus, 1987) y 3 criterios adecuados para el rango de formas de fondo dominantes.
(fuente: Rosengaus, 1987)

En este rango, $\psi'/\psi_c \leq 3$ ó 4 , las formas de fondo dominan a otros efectos en cuanto fricción del fondo. Para ψ'/ψ_c mayores (dependiendo de S_*) las formas de fondo son muy tridimensionales e irregulares borrándose hasta llegar nuevamente a un fondo plano pero en este caso con un gran movimiento oscilatorio de sedimentos que producen fuertes pérdidas de energía.

Grant y Madsen (1982) presentan resultados de la rugosidad equivalente del fondo en rangos mucho más amplios del parámetro ψ'/ψ_c , mismos que se ilustran en forma gráfica, para el caso particular de sedimento con

grano esférico de tamaño $d = 0.2$ mm, en la figura VI.19. La expresión matemáticas correspondiente a esta figura es:

$$\frac{k_b}{A_b} = 28 \frac{\eta_b}{A_b} \frac{\eta_b}{\lambda} + 160(s+C_m) \frac{d}{A_b} \psi_c \left([\psi' / \psi_c]^{1/2} - 0.7 \right)^2 \quad (\text{VI-78})$$

donde s representa la densidad relativa del material del fondo con respecto a la del agua (2.65 para cuarzo) y C_m es el coeficiente de masa adicionada a un grano del sedimento, que depende de su forma (consultar textos de mecánica de fluídos), con un valor de 0.5 para esferas perfectas. Esta expresión está fundamentada en experimentos anteriores realizados por Bagnold (1946) y Carstens (1967). El primer término se refiere a la parte correspondiente a las formas del fondo, mientras que el segundo es la parte correspondiente a la rugosidad equivalente debido a la energía utilizada en mantener al sedimento en suspensión en su movimiento oscilatorio. Desgraciadamente, el segundo término se obtuvo en base a un número muy limitado de experimentos, por lo que existe gran incertidumbre con respecto al comportamiento en el rango de fondo liso con una capa oscilatoria de sedimento en suspensión. Este es un tema donde se requiere mayor experimentación para obtener conclusiones más confiables.

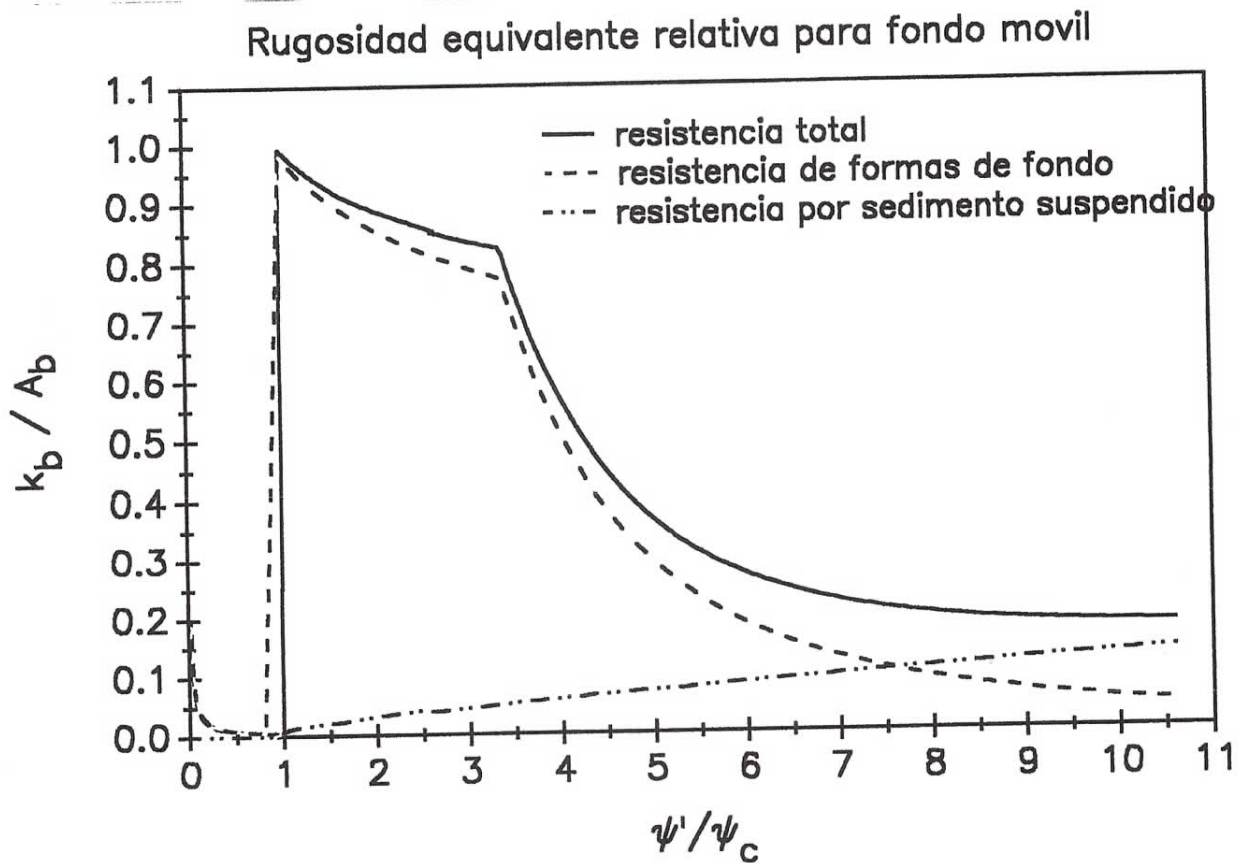


Fig. VI.19. Rugosidad equivalente para fondo móvil. Se presenta el cálculo de acuerdo al criterio de Grant-Madsen (1982) para fondo de arena fina ($d=0.2\text{mm}$), para condiciones de oleaje que van de fondo inmóvil a fondo liso con sedimento suspendido en movimiento oscilatorio, pasando por formas de fondo de pendiente máxima y su borramiento. (fuente: Rosengaus, 1987)

Como puede observarse en la figura VI.19, la rugosidad equivalente (normalizada con respecto a A_b) es relativamente pequeña en el rango correspondiente a fondo inmóvil (supuesto plano), $0 \leq \psi' / \psi_c \leq 1$. Al comenzar el movimiento del sedimento del fondo para condiciones de oleaje más intensas, el fondo se *esculpe* rápidamente con dunas, aumentando dramáticamente la rugosidad equivalente, en el rango $1 \leq \psi' / \psi_c \leq 1.2$. Para las mismas condiciones empieza a crecer la rugosidad equivalente que se asocia con la energía utilizada en mantener al

sedimento suspendido en movimiento. Esta crece suavemente al incrementarse las condiciones de oleaje. La rugosidad equivalente total es la suma de ambas. En el rango $1 \leq \psi'/\psi_c \leq 3.5$ las formas del fondo tienen crestas relativamente agudas y dominan marcadamente las pérdidas de energía por fricción (y por lo tanto aportan la mayor contribución a k_b). Sin embargo a partir de $\psi'/\psi_c \cong 3.5$, las crestas de las dunas empiezan a ser redondeadas por el flujo oscilatorio, perdiendo rápidamente rugosidad debida a formas del fondo, al mismo tiempo que la rugosidad por sedimento suspendido aumenta monotonamente. A partir de $\psi'/\psi_c \cong 7.6$ la rugosidad por sedimento suspendido es mayor que la debida a formas del fondo, puesto que estas han sido prácticamente borradas de él. Es interesante hacer notar, que de acuerdo a este criterio, el oleaje muy intenso, capaz de borrar las formas del fondo, puede en efecto *sentir* un fondo menos rugoso que oleaje de menor intensidad, concepto que puede tener importantes repercusiones en estudios de oleaje de diseño de obras marítimas al viajar sobre la plataforma continental. Obsérvese que esto deja en claro que, no solamente el oleaje afecta a la condición del fondo, sino que el fondo afecta al oleaje, y esto, en ocasiones es de una forma que no coincide con una percepción intuitiva simple.

Para un estudio más estricto que este breve *recetario* se refiere al lector interesado a Rosengaus (1987).