

# Corrientes longitudinales y resistencia al flujo en la zona de rompientes

Andrés Rodríguez

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

César Mösso

Joan Pau Sierra

Agustín Sánchez Arcilla

Universidad Politécnica de Cataluña, España

Felipe Collado

Instituto de Investigaciones Hidráulicas, Chile

*Se presentan los resultados de las corrientes longitudinales medidas en las campañas DELTA'93, incluyendo datos experimentales y su modelado numérico. Las campañas se realizaron en la costa española (delta del Ebro), mediante correntímetros electromagnéticos distribuidos en la vertical desde 0.1 m sobre el fondo hasta la superficie, para varias pruebas en la zona de rompientes. Estas medidas pueden compararse con modelos numéricos basados en los trabajos de Fredsøe (1984) y Sánchez Arcilla et al. (1992). Los resultados muestran aspectos novedosos en cuanto a supuestos generalmente asumidos para la zona de rompientes. Así, la estructura vertical de las corrientes longitudinales medidas contradice el supuesto de perfiles verticales casi uniformes, mostrando la aceptabilidad de la hipótesis de perfiles logarítmicos, y la distribución en planta de estas corrientes tampoco muestra su máximo valor en el tope de las barras sumergidas, sino que la posición de este valor máximo transversal varía en función del tipo de oleaje en rompiente, desplazándose hacia el seno del perfil transversal en barra. Otros resultados de utilidad práctica son la altura de rugosidad y el coeficiente de fricción, cuyos valores experimentales se comparan con expresiones del estado del arte usualmente adoptadas en ingeniería costera, y que muestran la importancia de considerar las formas de fondo en su estimación.*

**Palabras clave:** zona de rompientes, corrientes longitudinales, capa límite, resistencia al flujo, perfiles verticales.

## Introducción

Las campañas DELTA'93 (descritas en Rodríguez 1997) constituyeron un esfuerzo experimental de gran escala orientado a mejorar el conocimiento de la hidrodinámica de la zona de rompientes, con énfasis en la estructura 3D de sus tres escalas temporales principales: turbulencia, olas y corrientes. En este trabajo se presentan los resultados más relevantes correspondientes a las "corrientes longitudinales" o paralelas a la costa. El lector interesado en completar los análisis hidrodinámicos de estos experimentos puede ver los re-

sultados correspondientes a las corrientes transversales en Rodríguez *et al.* (1994); los resultados asociados con la escala de las olas en Rodríguez *et al.* (1997), y los correspondientes a la turbulencia en Rodríguez *et al.* (1999).

La interacción entre el flujo oscilatorio producido por el oleaje y el flujo medio o corrientes es de naturaleza compleja y no lineal, cuyo estudio ha sido abordado desde hace tiempo. En la actualidad se dispone de una gama de modelos conceptuales y numéricos para su tratamiento (ver e.g. una excelente revisión en Justensen 1988). Sin embargo, el caso de las corrientes

costeras dentro de zona de rompientes, donde la circulación es generada principalmente por la rotura del oleaje, está menos estudiado y la información experimental disponible es escasa (e.g. Thornton *et al.*, 1995; Elfrink *et al.*, 1996; Sánchez-Arcilla *et al.*, 1997).

### Circulación costera

La circulación en la zona costera en general y en la zona de rompientes en particular tiene una estructura tridimensional sumamente compleja; por lo que es usual analizarla en forma simplificada, descomponiendo la estructura en patrones de corriente típicos. Para playas aproximadamente rectilíneas, no encajadas, estos patrones de circulación pueden dividirse en tres tipos principales de corrientes: uno paralelo a la costa, "corrientes longitudinales"; otro en forma de celdas de circulación, "corrientes de retorno" (*rip currents*), y un tercero, perpendicular a la costa, "corrientes de resaca" (*undertow*). Para el cálculo de esta circulación costera se han aplicado desde hace tiempo las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, integradas en la coordenada vertical  $z$  y promediadas a la escala temporal de las corrientes, recibiendo el nombre de ecuaciones de aguas poco profundas, las cuales pueden expresarse de la siguiente forma (ver detalles en Phillips 1977):

$$\partial\eta/\partial t + \partial(dU)/\partial x + \partial(dV)/\partial y = 0 \quad (1)$$

$$\partial U/\partial t + U \partial U/\partial x + V \partial U/\partial y + g \partial\eta/\partial x =$$

$$[F_x + \tau_{sx} - \tau_{bx} + \partial Re_{xx}/\partial x + \partial Re_{xy}/\partial y]/(\rho d) \quad (2)$$

$$\partial V/\partial t + U \partial V/\partial x + V \partial V/\partial y + g \partial\eta/\partial y =$$

$$[F_y + \tau_{sy} - \tau_{by} + \partial Re_{xy}/\partial x + \partial Re_{yy}/\partial y]/(\rho d) \quad (3)$$

donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas horizontales (en general, perpendiculares y paralelas a la costa, respectivamente);  $U$  y  $V$  son las correspondientes componentes horizontales de las corrientes (o flujo medio verticalmente integrado) en las direcciones  $x$  e  $y$ ;  $\eta$  representa las variaciones de la superficie promediando el efecto de las olas respecto de un nivel de referencia (e.g. el nivel medio del mar);  $d$  es la profundidad media, incluyendo las variaciones respecto del nivel medio (*set-up*);  $F_x$  y  $F_y$  representan los términos impulsores debidos al oleaje (gradientes espaciales del tensor de radiación como fue propuesto por Longuet-Higgins 1970a y 1970b);  $\tau$  representa las tensiones horizontales en la superficie debidas al viento y, en el fondo, por la fricción, y  $Re_{ij}$  es el tensor de tensiones

horizontales turbulentas de Reynolds. Estas tensiones horizontales pueden calcularse a través de la hipótesis de Boussinesq como proporcionales a los gradientes horizontales de las corrientes a través de la viscosidad turbulenta  $\nu_{th}$ , utilizando a su vez distintas formulaciones de cierre.

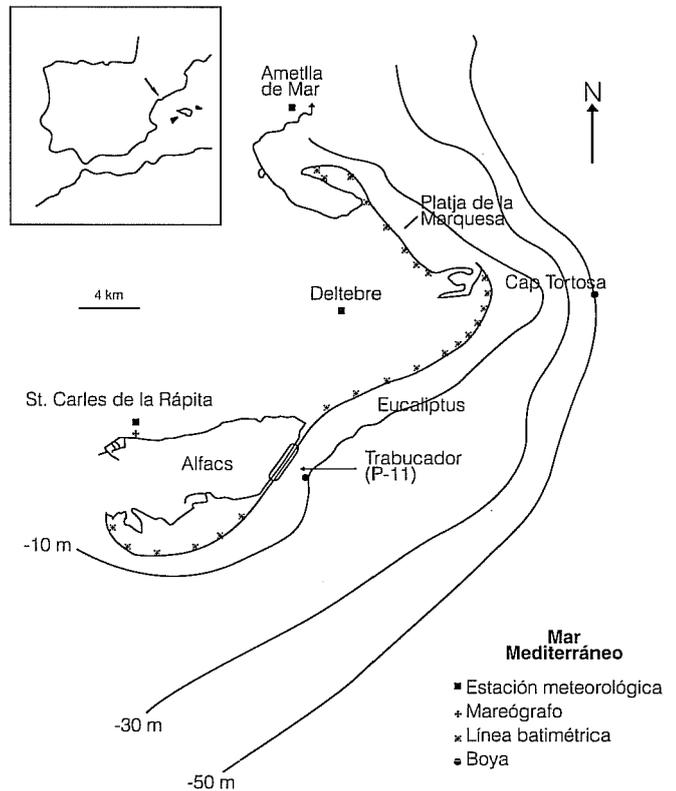
Para la zona de rompientes, este tipo de formulaciones de 2DH suelen no ser suficientes dada la tridimensionalidad del flujo, por lo cual se necesitan aproximaciones más generales, como las formulaciones cuasi tridimensionales (Q3D) presentadas por Sánchez Arcilla *et al.* (1992) y Collado (1995).

### Experimentos realizados

Los experimentos denominados DELTA'93 se realizaron en una playa casi rectilínea de arena, con un perfil transversal barrado denominada Barra del Trabucador, en el delta del río Ebro, en el Mediterráneo español en diciembre de 1993 (ilustración 1).

Los experimentos incluyeron la medición simultánea durante cerca de una semana de parámetros meteorológicos (viento, temperatura, presión atmosférica), olea-

Ilustración 1. Área del delta del Ebro y sitio de medición: P11 en la barra del Trabucador.



**Cuadro 1. Condiciones hidrodinámicas de los experimentos seleccionados ( $x$ , coordenada perpendicular a la costa;  $d$ , profundidad media;  $T$ , periodo del pico espectral del oleaje irregular;  $\Theta$ , ángulo entre las olas y la corriente longitudinal medido con los CEM;  $H_{1/3}$ , altura de ola media del tercio superior de la serie temporal ordenada de manera decreciente).**

Prueba	$x(m)$	$d(m)$	$T(s)$	$\Theta(^{\circ})$	$H_{1/3}(m)$
5	39.9	1.29	7.11	104.6	0.71
6	25.2	0.80	8.00	102.6	0.55
7	17.1	0.69	8.00	101.0	0.46
8	45.5	1.34	7.11	109.5	0.61
9	31.8	0.70	7.11	-	0.58
10	26.0	0.69	7.11	103.9	0.47
11	21.5	0.60	8.00	101.6	0.41
12	12.0	0.38	8.00	101.3	0.27
Costa	0.0	0.00	-	-	0.00

je, velocidades del flujo, batimetrías y transporte de sedimentos en suspensión (no presentados en este trabajo, ver Jiménez *et al.*, 1996). Los casos medidos en DELTA'93 se dividieron en 12 pruebas, de las cuales se han seleccionado las de mayor energía de oleaje. Cada prueba consistió en un conjunto de series temporales de veinte minutos de duración. Las series de datos de oleaje dentro de la zona de rompientes se midieron con un sensor de contacto *Etrometa* de 2.5 cm de resolución a 4 Hz, que permite obtener niveles medios, alturas y periodo del oleaje; las velocidades se midieron con seis correntímetros electromagnéticos (CEM) 2D *Delft P-s*, con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, una resolución de  $\pm 2.5$  cm/s (1% del fondo de escala) distribuidos en una helicoide vertical en las cotas a 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6 y 0.8 m del fondo. Las principales condiciones hidrodinámicas de las ocho pruebas seleccionadas se resumen en el cuadro 1 y el perfil transversal  $d(x)$  se observa en la parte inferior de la ilustración 2.

**Análisis de resultados**

Para analizar la fricción con el fondo en caso de olas y corrientes combinadas existen diversas aproximaciones, siendo el modelo de capa límite oscilatoria de Fredsøe (1984) una de las mejores de acuerdo con Soulsby *et al.* (1993), por considerar la interacción no lineal entre olas y corrientes. Este modelo resuelve la ecuación de cantidad de movimiento en la escala del flujo oscilatorio. La integración en el tiempo de este tipo de modelos conduce a un perfil doble logarítmico

para las corrientes cuando son afectadas por las olas y a un logaritmo clásico para el caso de corrientes puras. Aplicando un modelo de esta clase a la componente longitudinal de la corriente, dentro de la capa límite inferior o capa límite CWBL (que se obtiene promediando la capa límite oscilatoria), el perfil de velocidades puede expresarse como:

$$v(z) = (u_* / \kappa) \log (30z / K_N), \quad z < z_b \quad (4)$$

donde  $\kappa$  es la constante de von Karman (0.41);  $u_*$ , la velocidad de corte dentro de la CWBL;  $K_N$ , la altura de rugosidad equivalente de Nikuradse, y  $z_b$ , el tope de la CWBL, cuyo espesor se representa por  $\delta_{wc}$ .

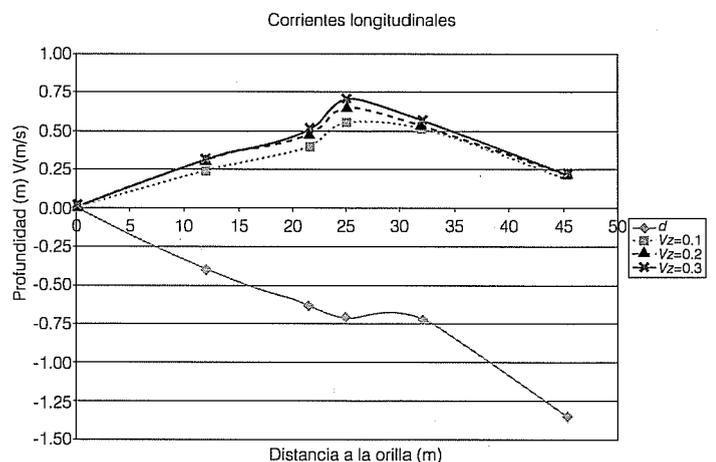
En la capa superior, el perfil de velocidades se expresa mediante:

$$v(z) = (u_{*wc} / \kappa) \log (30z / K_w), \quad z > z_b \quad (5)$$

donde  $u_{*wc}$  es la velocidad de corte y  $K_w$ , la altura de rugosidad. Ambas se incrementan por efecto de la interacción del flujo oscilatorio (olas) con el flujo medio (corrientes) dentro de la capa límite de espesor  $\delta_{wc}$ .

Se menciona que durante los experimentos DELTA'93 se han obtenido valores de velocidades fuera de la capa límite del fondo CWBL debido a que su espesor ( $\delta_{wc}$ ) está aproximadamente entre 5 y 10% de la profundidad  $d$  (Rodríguez *et al.*, 1991). Esta distancia resulta menor o igual a 10 cm, que es la distancia al fondo del correntímetro CEM inferior. Por esta razón se emplea la ecuación 5 para ajustar la distribución vertical de la componente longitudinal de la corriente, y así estimar  $u_{*wc}$  y  $K_w$ .

**Ilustración 2. (Superior) Distribución perpendicular a la costa de las corrientes longitudinales  $v_{(xz)}$  a 0.1, 0.2 y 0.3 m del fondo. (Inferior) Perfil transversal. Notar la posición de  $v$  máxima en el seno de la barra.**



**Cuadro 2.** Corriente longitudinal  $v(z)$  en m/s, medida en las subseries de mayor oleaje (cinco minutos).

Prueba	$z = 10$ cm	$z = 20$ cm	$z = 30$ cm	$Z = 40$ cm	$z = 60$ cm	$z = 80$ cm
5	0.52	0.56	0.58	0.63	*	*
6	0.76	0.775	0.84	0.90	*	*
7	0.65	0.665	0.71	0.78	*	*
8	0.185	0.21	0.22	0.24	0.235	0.255
9	0.51	0.53	0.57	*	*	*
10	0.545	0.645	0.70	*	*	*
11	0.40	0.465	0.49	0.51	*	*

\* Valores decrecientes por estar el CEM sobre el nivel de senos de algunas olas.

En hidrodinámica costera, la definición de "corrientes" no es trivial, debido a la existencia de múltiples escalas temporales que van desde olas, varios tipos de ondas largas, mareas, etcétera. En el presente trabajo, los valores experimentales de las corrientes se han obtenido promediando las velocidades en dos intervalos de tiempo distintos: uno de veinte minutos, que implica a la media de toda la serie (representadas por  $V$ ), y otro (representadas por  $v$ ) promediando en un subintervalo de cinco minutos, correspondiente aproximadamente a cuarenta olas. Este subintervalo se seleccionó como el periodo de ocurrencia de oleaje irregular de mayor energía (o altura) dentro de la serie total de veinte minutos.

En siete de las ocho pruebas analizadas se han ajustado los perfiles logarítmicos respectivos para obtener las velocidades de corte  $u_{*wc}$ , alturas de rugosidad  $K_w$  y coeficientes de fricción respectivos. La prueba 12, cerca de la zona de mojado intermitente (o zona de *swash*), no ha sido incluida, pues no se dispuso de suficientes puntos en la vertical, al haber adoptado un mínimo de tres puntos por perfil (a fin de disponer

como mínimo de un grado de libertad en los ajustes por regresión lineal). En las pruebas analizadas se han eliminado los puntos superiores al nivel de senos de las olas en los cuales los CEM hayan quedado temporalmente fuera del agua. Los valores de la corriente longitudinal  $v(x,z)$  se muestran en la ilustración 2 y en el cuadro 2.

Con los valores de  $v(z)$  y  $V(z)$  se ajustaron por mínimos cuadrados los perfiles de velocidad logarítmicos (ecuación 5), obteniendo así los valores respectivos de  $u_{*wc}$  a partir de la pendiente de la recta de ajuste y  $K_w$  de la ordenada al origen. Estos valores "experimentales" se han utilizado para estimar los coeficientes de fricción  $f_c$ ,  $f_{wc}$  y compararlos con formulaciones empíricas o teóricas. En la ilustración 3 se ejemplifica uno de los ajustes para la prueba ocho. Los valores obtenidos a partir de  $V(z)$  se presentan en el cuadro 3.

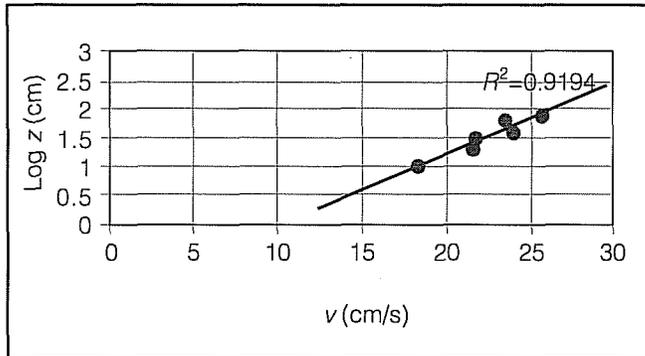
Se debe señalar que si bien los coeficientes de correlación obtenidos son bastante altos (entre 0.89 y 0.999) se debe tener cautela en la interpretación de los resultados debido a que los grados de libertad son reducidos (como se puede observar en el cuadro 3), y

**Cuadro 3.** Alturas de rugosidad equivalente  $K_w$  y velocidades de fricción  $u_{*wc}$  para las pruebas de 5 a 11, obtenidas mediante ajustes logarítmicos de  $V(z)$ .

Prueba	$\text{Log } z'_0$	$z'_0$ (cm)	$K_w = 30z'_0$ (cm)	$\kappa/u_{*wc}$	$u_{*wc}$ (cm/s)	Coef. corr.	Grad. lib.
5	-1.8368	0.015	0.44	0.055	7.4	0.96	2
6	-1.6798	0.021	0.63	0.037	11.1	0.91	2
7	-1.4459	0.036	1.07	0.039	10.3	0.89	2
8	-1.2626	0.055	1.64	0.123	3.3	0.96	4
9	-2.8718	0.001	0.04	0.076	5.3	0.985	1
10	-0.6726	0.212	6.40	0.031	13.4	0.999	1
11	-1.1867	0.065	1.95	0.054	7.5	0.99	2

Valores experimentales según  $\log(z) = \kappa/u_{*wc} V(z) + \log(z'_0)$ .

**Ilustración 3. Ajuste semilogarítmico de la corriente longitudinal  $v(z)$  para la prueba 8 (fuera de la CWBL).**



a la alta sensibilidad en la determinación de  $z'_0$  ( $z'_0 = K_w/30$ ). A partir de los valores de  $u_{*wc}$  obtenidos se ha calculado, para cada prueba, la componente longitudinal del esfuerzo cortante en el fondo  $\tau_b$ , como:

$$\tau_b/\rho = u_{*wc}^2 \quad (6)$$

siendo  $\rho$  la densidad del agua. Los coeficientes o factores de fricción para el caso de corrientes en presencia de olas se denominan  $f_{wc}$  y  $f_c$ , y se definen en las ecuaciones 7a y 7b, respectivamente, donde  $f_{wc}$  se estima por lo común a partir de expresiones como la de la ecuación 8 (ver detalles en Nielsen, 1992).

$$\tau_b/\rho = \frac{1}{2} f_{wc} u_{orb} V(z_b) \quad (7a)$$

$$\tau_b/\rho = \frac{1}{2} f_c (U^2(z_b) + V^2(z_b))^{0.5} V(z_b) \quad (7b)$$

$$f_{wc} = \exp[-6.3 + 5.5(A_0/K_N)^{-0.2}] \quad (8)$$

donde  $A_0$  es la amplitud del movimiento oscilatorio (estimada como  $u_{orb}T/2\pi$ );  $u_{orb}$  es un estimador de la velocidad orbital cerca del fondo;  $U$  y  $V$  representan las corrientes cerca del fondo. Como estimador de  $u_{orb}$ , se ha adoptado el valor "significante" (obtenido a partir de la altura de ola media del tercio superior de la serie medida), y para las corrientes se han escogido tanto las componentes medias en cinco minutos  $u, v$  como los valores medios en veinte minutos  $U, V$  del correntímetro electromagnético inferior localizado a 10 cm del fondo.

Combinando 6, 7a y 7b se puede obtener:

$$f_{wc} = 2 u_{*wc}^2 / (u_{orb} V(z_b)) \quad (9)$$

$$f_c = 2 u_{*wc}^2 / ((U^2(z_b) + V^2(z_b))^{1/2} V(z_b)) \quad (10)$$

donde los valores de  $u_{*wc}$  son los que se tienen como pendientes en los ajustes logarítmicos de los perfiles de los dos tipos de corrientes longitudinales ( $V$  y  $v$ ) para las siete pruebas analizadas.

Por una parte, los valores "experimentales" obtenidos del primer coeficiente de fricción,  $f_{wc}$ , se han comparado con las predicciones de fórmulas empíricas presentadas más adelante. Mientras que para el coeficiente de fricción,  $f_c$ , se han comparado sus valores "experimentales" con las predicciones "teórico-numéricas" del modelo de capa límite para olas y corrientes convenientemente caracterizado por medio de parámetros (ver Sánchez Arcilla *et al.*, 1992). Este modelo supone que si el espesor  $\delta_{wc}$ , de la CWBL, es pequeño frente a la profundidad  $d$ , se puede aplicar:

$$f_c = 2 \kappa / (\ln(30 d/K_w) - 1) \quad (11)$$

donde la rugosidad equivalente  $K_w$  se obtiene mediante la expresión 12, resolviendo el modelo de capa límite mencionado:

$$K_w/K_N = (30 \delta_{wc}/K_N) (1 - u_{*wc}/u_{*c}) \quad (12)$$

Se ha observado que ambos coeficientes de fricción  $f_{wc}$  y  $f_c$  son altamente sensibles a los valores de rugosidad  $K_N$  que se utilice en su evaluación.

En la naturaleza, con oleaje irregular y siguiendo a diversos autores (e.g. Nielsen, 1992; Raudkivi, 1988), puede estimarse la altura de rugosidad  $K_N$  mediante tres tipos diferentes de aproximación:

- Sólo debida a los granos de sedimento:  $K_{N1}$ .
- Debida a formas de fondo fijas (dunitas o rizos):  $K_{N2}$ .
- Debida a formas de fondo móviles (a lo que se suma el efecto del transporte de fondo de sedimentos):  $K_{N3}$ .

Las expresiones propuestas por Raudkivi y Nielsen, correspondientes a las ecuaciones 13 y 14, pertenecen al segundo grupo, mientras que el tercer grupo puede representarse por expresiones como las basadas en los trabajos de Wilson (1989) y Nielsen (1992), correspondiente a la ecuación 15:

$$K_{N1} = 2.5 D_{50} \quad (13)$$

$$K_{N2} = 16 \gamma^2 / \lambda + 0.16 u_{orbm}^{2.25} \quad (14)$$

$$K_{N3} = 8 \gamma^2 / \lambda + 5 \theta'_{2.5} D_{50} \quad (15)$$

Con:

$$\gamma/A_0 = 21 \psi^{-1.25} \quad (16)$$

$$\lambda/A_0 = \exp [(693 - 0.37Ln^8 \psi)/(1000 + 0.75Ln^7 \psi)] \quad (17)$$

$$\theta'_{2.5} = 0.5 f_{2.5}/\psi \quad (18)$$

donde  $D_{50}$  es el diámetro medio de los sedimentos;  $A_0$ , la amplitud del movimiento orbital;  $\gamma$  y  $\lambda$  corresponden, respectivamente, a la altura y separación entre dunitas, y  $\theta'_{2.5}$  es el parámetro de Shields de las partículas;  $f_{2.5}$  se obtiene utilizando  $K_{N1}$  en la ecuación 8 y  $\psi$  es el número de movilidad ( $u_{orb}^2/(\Delta g D)$ ), siendo  $\Delta$  la densidad relativa de las partículas sumergidas.

Se ha verificado que las predicciones de  $f_{wc}$  mediante la ecuación 8 dependen en gran medida del valor que se asuma para  $K_N$ . Los valores calculados con base en una rugosidad de las partículas ( $K_{N1}$  en función de  $D_{50}$ , medido como 0.2 mm) subestiman en un

orden de magnitud los valores experimentales obtenidos en la mayoría de las pruebas para las dos escalas temporales seleccionadas de cinco y veinte minutos.

Los resultados de las comparaciones de los coeficientes de fricción experimentales  $f_{wc}$  y  $f_c$ , y los "teóricos"  $f_{wcT}$  y  $f_{cT}$  se resumen en el cuadro 4.

Puede observarse que las predicciones de  $f_{wc}$  y  $f_c$  mejoran sustancialmente si se estima  $K_N$  mediante las expresiones 14 a 18, que consideran la fricción adicional por formas de fondo y el transporte de sedimentos.

Los valores experimentales de  $u_{*wc}$  y  $K_w$  obtenidos anteriormente han sido comparados con los predichos por el modelo de capa límite caracterizado por medio de parámetros. Como parámetros de entrada se utilizaron valores medidos de  $T$ ,  $d$ ,  $\Theta_{wc}$  (ángulo entre olas y corrientes longitudinales),  $u_{orb1/3}$  para cada prueba y las rugosidades  $K_{Ni}$  obtenidas mediante las ecuacio-

**Cuadro 4. Valores "experimentales" y "teóricos" de los coeficientes de fricción  $f_{wc}$  y  $f_c$ .**

Prueba	5	6	7	8	9	10	11
Valores experimentales							
$f_{wc} = 2 u_{*wc}^2 / u_{orb} v$	0.02440	0.02840	0.03320	0.04470	0.0112	0.09000	0.03930
$f_{wcT} = 2 u_{*wc}^2 / u_{orb} v$	0.03444	0.01177	0.02179	0.02033	0.01136	0.06377	0.05771
$f_c = 2 u_{*wc}^2 \sqrt{(u^2 + v^2)} v$	0.03827	0.02828	0.03632	0.05912	0.01909	0.11045	0.06583
$f_{cT} = 2 u_{*wc}^2 \sqrt{(u^2 + v^2)} v$	0.06663	0.01095	0.02556	0.06015	0.01796	0.08099	0.10648
Valores teóricos							
$f_{wcT} \Rightarrow$ ecs. 8 y 13 $K_N = K_{N1}$	0.00653	0.00660	0.00653	0.00708	0.00626	0.00681	0.00656
$f_{wcT} \Rightarrow$ ecs. 8 y 14 $K_N = K_{N2}$	0.06637	0.06303	0.05456	0.05127	0.07598	0.05721	0.05398
$f_{wcT} \Rightarrow$ ecs. 8 y 15 $K_N = K_{N3}$	0.00882	0.00892	0.00882	0.01309	0.00873	0.00929	0.00888
$f_{cT} \Rightarrow$ ecs. 11 y 12 $K_N = K_{N1}$	0.00492	0.00426	0.00470	0.00591	0.00524	0.00477	0.00548
$f_{cT} \Rightarrow$ ecs. 11 y 12 $K_N = K_{N2}$	0.02189	0.01967	0.02104	0.01963	0.03171	0.02059	0.02501
$f_{cT} \Rightarrow$ ecs. 11 y 12 $K_N = K_{N3}$	0.00609	0.00534	0.00591	0.00752	0.00678	0.00600	0.00690

Coefficientes de fricción  $f_{wc}$  y  $f_c$  a través de la zona de rompientes

$K_N$  = altura de rugosidad total  $K_{N1}$  = rugosidad de las partículas

$K_{N2}$  = rugosidad con formas de fondo fijas  $K_{N3}$  = rugosidad con formas de fondo y transporte de sedimentos

**Cuadro 5. Cálculo mediante modelo de capa límite de los valores teóricos de  $K_w$ ,  $\delta_{wc}/d$ ,  $u_*$  y  $u_{*wc}$  considerando la rugosidad de las partículas.**

Valores teóricos	5	6	7	8	9	10	11
$K_w$ (cm)	0.4	0.1	0.15	0.75	0.25	0.15	0.25
$\delta_{wc}/d$ (%)	1.6	3.1	3.5	1.0	3.6	3.0	3.5
$u_*$ (cm/s)	1.9	3.8	2.8	0.8	2.7	2.6	2.0
$u_{*wc}$ (cm/s)	2.5	4.2	3.2	1.3	3.4	3.0	2.5

Simulación de  $V(z)$  mediante el modelo de capa límite ( $w+c$ ) parametrizado,  $K_N = K_{N1}$  (ecuación 13), considerando solamente el efecto de los sedimentos.

**Cuadro 6. Cálculo mediante modelo de capa límite de los valores teóricos de  $K_w$ ,  $\delta_{wc}/d$ ,  $u_*$  y  $u_{*wc}$ , considerando formas de fondo fijas.**

Valores teóricos	5	6	7	8	9	10	11
$K_w$ (cm)	27.8	14.5	13.7	23.1	29.1	13.1	16.6
$\delta_{wc}/d$ (%)	5.2	9.0	10.1	3.0	12.8	8.5	10.3
$u_*$ (cm/s)	3.6	7.9	5.9	1.3	6.6	5.2	4.1
$u_{*wc}$ (cm/s)	5.3	8.9	6.9	2.4	8.4	6.3	5.3

Simulación de  $V(z)$  mediante el modelo de capa límite ( $w+c$ ) caracterizado por medio de parámetros.  
 $K_N = K_{N2}$  (ecuación 14), considerando formas de fondo fijas.

**Cuadro 7. Cálculo mediante modelo de capa límite de los valores teóricos de  $K_w$ ,  $\delta_{wc}/d$ ,  $u_*$  y  $u_{*wc}$ , considerando formas de fondo móviles.**

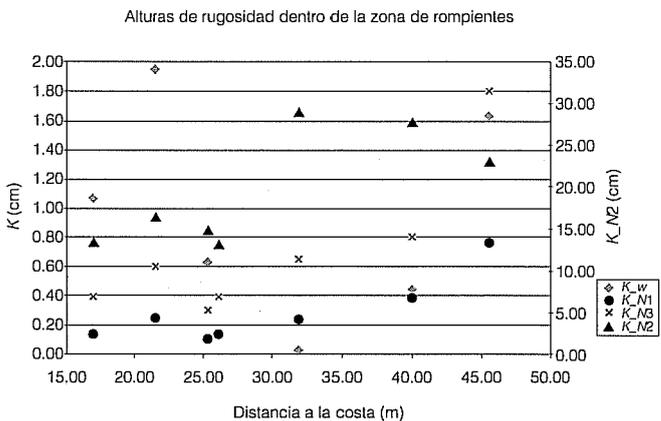
Valores teóricos	5	6	7	8	9	10	11
$K_w$ (cm)	0.8	0.3	0.4	1.8	0.65	0.4	0.6
$\delta_{wc}/d$ (%)	2	3.5	4	1	4	3.5	4
$u_*$ (cm/s)	2.1	4.2	3.2	0.9	3.1	2.9	2.2
$u_{*wc}$ (cm/s)	2.8	4.7	3.7	1.5	3.9	3.4	2.8

Simulación de  $V(z)$  mediante el modelo de capa límite ( $w+c$ ) caracterizado por medio de parámetros.  
 $K_N = K_{N3}$  (ecuación 15), considerando formas de fondo y transporte de sedimentos.

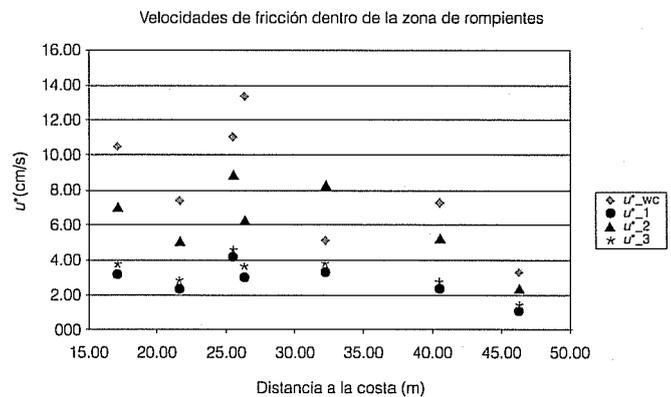
nes 13 a 18, acopladas al modelo de capa límite obtenido. Estos resultados se presentan en los cuadros 5 a 7 y en las ilustraciones 4 y 5, para las siete pruebas seleccionadas, variando el tipo de rugosidad (de las partículas, con formas de fondo y con transporte de sedimentos).

Distribución transversal de  $K_w$  y  $u_{*wc}$  en la zona de rompientes (ilustraciones 4 y 5): Los valores "experimentales" de la altura de rugosidad muestran una alta dispersión a lo largo de la zona de rompientes, con un

**Ilustración 4. Valores "experimentales" ( $K_w$ ) y "teóricos" ( $K_{N1,2,3}$ ) de la altura de rugosidad, (ver cuadros 5, 6 y 7).**



**Ilustración 5. Valores "experimentales" ( $u_{*wc}$ ) y "teóricos" ( $u_{*1,2,3}$ ) de la velocidad de fricción.**



rango de entre 0.04 y 6.40 cm y una tendencia a valores creciente en la zona de rompientes exterior. Esta tendencia es reproducida por las ecuaciones 13 y 15, siendo la segunda la de mejor ajuste (considera la influencia del transporte de sedimentos). La ecuación 14 (que considera formas de fondo fijas) sobreestima excesivamente la rugosidad, y la ecuación 13 la subestima, al considerar solamente la rugosidad de las partículas. Sin embargo, para la velocidad de corte se ha encontrado una menor dispersión y que el mejor estimador es el que considera rugosidades calculadas

con la ecuación 14, el cual se aproxima por debajo a los valores "experimentales" (con excepción de la prueba nueve).

## Conclusiones

Los resultados muestran aspectos interesantes respecto a supuestos usualmente asumidos para la zona de rompientes. Así, la estructura vertical de las corrientes longitudinales medidas en los experimentos realizados (DELTA'93) contradice el supuesto de perfiles verticales cuasi uniformes (e.g. Svendsen y Lorenz, 1989) y muestra que puede aceptarse la hipótesis de perfiles logarítmicos, como previamente presentó Rodríguez *et al.* (1994), además de que esto se verifica posteriormente en los experimentos DUCK'94 (Thornton *et al.*, 1995). La distribución en planta de estas corrientes tampoco muestra su máximo en el tope de las barras sumergidas, sino que la posición del máximo varía en función del tipo de oleaje en rotura, desplazándose hacia el seno del perfil transversal, como puede verse en la ilustración 2.

La comparación de la altura de rugosidad  $K_w$  y la velocidad de corte  $u_{*wc}$  "experimentales" y "teóricas" puede realizarse mediante las ilustraciones 4 y 5, respectivamente. De ellas se infiere que para la velocidad de fricción, la mejor predicción es la que se obtiene con la ecuación 14, la cual considera formas de fondo fijas, mientras que para las alturas de rugosidad, la mejor predicción es la que se tiene al considerar el efecto de las formas de fondo y el transporte de sedimentos (ecuación 15). Para los coeficientes de fricción  $f_{wc}$  y  $f_c$ , se observa que su predicción también mejora sustancialmente si se estima la altura de rugosidad  $K_N$  mediante las expresiones que consideran la fricción adicional por formas de fondo fijas (ecuación 14). Es necesario señalar, sin embargo, que estas fórmulas empíricas de  $K_N$  y  $f_{wc}$  deben utilizarse con cuidado, ya que son ajustes de validez restringida a las condiciones para las cuales se obtuvieron y diferentes para casos de campo o laboratorio (e.g. ajustadas con  $u_{orb1/3}$  en lugar de  $u_{orb-rms}$ , para los casos de campo). Lamentablemente, no se conocen más datos de campo con suficiente nivel de detalle que permitan una mayor generalización de las conclusiones obtenidas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a las instituciones que patrocinaron los experimentos: UPC, PCM, DGICYT-MEC de España y el Programa MAST de la UE y a todo el personal involucrado del Grupo LIM-CIIRC.

Recibido: 01/02/2000  
Aprobado: 06/10/2000

## Referencias

- Collado, F., *Modelado Q3D de la circulación cercana a la costa*, tesis doctoral, DEHMA, ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1995.
- Elfrink, B., I. Brøker, R. Deigaard, E. Hansen y P. Justensen, *Modelling of 3D Sediment Transport in the Surf Zone*, ICCE, ASCE, Orlando, Estados Unidos, 1996, pp. 3805-3817.
- Fredsøe, J., "Turbulent Boundary Layers in Wave Current Motion", *JHD*, ASCE, vol. 110, núm. HY8, 1984, pp. 1103-1120.
- Jiménez, J., F. Rivero, A. Sánchez-Arcilla, V. Gracia y A. Rodríguez, *Suspended Sediment Mixing in the Surf Zone*, Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, Orlando, Estados Unidos, 1996, pp. 4098-4110.
- Justensen, P., *Turbulent Wave Boundary Layers*, PhD tesis, IHEE, Univ. Téc., Lingby, Dinamarca, 1988.
- Longuet-Higgins, M., "Long-Shore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves I", *JGR*, AGU, vol. 75, 1970a, pp. 6778-6789.
- Longuet-Higgins, M., "Long-Shore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves II", *JGR*, AGU, vol. 75, 1970b, pp. 6790-6801.
- Nielsen, P., "Coastal Boundary Layers and Sediment Transport", *ASOE*, vol. 4, World Scientific, Singapur, 1992.
- Phillips, O., *The Dynamics of Upper Ocean*, Cambridge University Press, Reino Unido, 1977.
- Raudkivi, A., "The Roughness Height under Waves", *JHR*, IAHR, vol. 22, 1988, pp. 569-584.
- Rodríguez, A., F. Collado y A. Sánchez Arcilla, *Estudio y simulación del flujo en capas límites en presencia de olas y corrientes*, Public. CIMNE, IT47, Barcelona, 1991, 50 pp.
- Rodríguez, A., A. Sánchez Arcilla, F. Collado, V. Gracia, M. Coussirat y J. Prieto, "Waves and Currents in the Ebro Delta Surf Zone: Measurements and Modelling", *IC Coastal Engineering*, ASCE, Kobe, Japón, 1994, pp. 2542-2556.
- Rodríguez, A., A. Sánchez Arcilla, C. Mösso y B. Mercader, "Comparación entre mediciones y teorías para el flujo oscilatorio en la zona de rompientes", *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. XII, núm. 2, 1997, pp. 17-27.
- Rodríguez, A., *Un estudio experimental de la hidrodinámica en zona de rompientes*, tesis doctoral, DEHMA, ETSECCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1997.
- Rodríguez, A., C. Mösso, J.P. Sierra, A. Sánchez Arcilla y J.M. Redondo, *Macroturbulence Measurements Under Breaking Waves*, XXVIII Congreso Mundial de Hidráulica, IAHR, Graz, Austria, 1999, pp. 1-7.
- Sánchez Arcilla, A., F. Collado y A. Rodríguez, "Vertically Varying Velocity Field in Q3D Nearshore Circulation", *I.C.*

- Coastal Engineering*, ASCE, Venecia, 1992, pp. 2811-2824.
- Sánchez Arcilla, A., A. Rodríguez, J. Santás, V. Gracia, R. K'osyan, S. Kuznetsov y C. Mösso, "DELTA'96: Surf-Zone and Nearshore Measurements at the Ebro Delta", *I.C. Coastal Dynamics*, ASCE, Plymouth, Reino Unido, 1997, pp. 556-565.
- Soulsby, R., A. Davies, J. Fredsøe, D. Huntley, I. Jonsson, D. Myrhaug, R. Simons, A. Temperville y T. Zitman, *Bed shear-Stress Due to Combined Waves and Currents*, MAST2, G8M Coastal Morphodynamics, Overall Workshop, Grenoble, Francia, 1993, pp. 2.1-4.
- Svendsen, I. y S. Lorenz, "Velocities in Combined Undertow and Longshore Currents", *Coastal Engineering*, vol. 13, núm. 1, 1989, pp. 55-79.
- Thornton, E, C. Soares y T. Stanton, "Vertical Profiles of Longshore Currents and Bed Shear Stress", *I.C. Coastal Dynamics*, ASCE, Gdansk, Polonia, 1995, pp. 449-459.
- Wilson, K., "Mobile Bed Friction at High Shear Stress", *JHE*, ASCE, vol. 115, núm. 6, 1989, pp. 825-830.

### Abstract

Rodríguez, A., C. Mösso, J.P. Sierra, A. Sánchez Arcilla y F. Collado, "Long Shore Currents and Flow Resistance in the Surf Zone", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVI, num. 4, pages 35-43, October-December, 2001.

*Experimental and numerical results of long shore currents measured during DELTA'93 field experiments are presented. Velocities were measured in the Ebro River delta, with six electromagnetic current meters distributed from 0.1 m above the bottom up to the water surface. The results are compared to numerical models based on Fredsøe, J. (1984) and Sánchez Arcilla, A. et al. (1992) works, and present new aspects respect to what has been generally accepted for the surf zone. The vertical distribution of long shore currents is opposite to the assumed quasi-uniform vertical profiles, thus ratifying the logarithmic profiles hypothesis. The maximum of the horizontal profile was located near the trough of the barred crossshore profile and varies according to the wave forms. Also, experimental values of friction coefficients and roughness heights have been obtained and compared to state-of-the-art formulations.*

**Key words:** surf zone, long-shore currents, boundary layer, flow resistance, vertical profiles.

### Dirección institucional de los autores:

Andrés Rodríguez

Universidad Nacional de Córdoba, Argentina  
Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales  
Departamento de Hidráulica  
Teléfono (351) 433 41448  
Correo electrónico: arodrig@gtwing.efn.uncor.edu

César Mösso  
Joan Pau Sierra  
Agustín Sánchez Arcilla

Universidad Politécnica de Cataluña, España

Felipe Collado  
Instituto de Investigaciones Hidráulicas, Chile