



VELOCIDAD DE CAÍDA DE ARENAS COSTERAS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO

CONTENIDO	I
LISTA DE SÍMBOLOS	III
LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABLAS	VII
INTRODUCCIÓN	XI
1.- IMPORTANCIA	XI
2.- ESTADO DEL ARTE.....	XI
2.1.- Ecuaciones de velocidad de caída	XII
2.1.1.- Cheng (1997)	XIII
2.1.2.- Ahrens (2000)	XV
2.1.3.- Jiménez – Madsen (2003)	XVII
2.1.4.- Camenen (2007)	XIX
3.- OBJETIVO.....	XXIII
4.- METODOLOGÍA.....	XXIV
5.- ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	XXIV
SECCIÓN I.- MARCO TEÓRICO	1
I.1.- PLAYA	1
I.1.1.- Perfil de una playa.....	3
I.2.- DINÁMICA MARINA	4
I.2.1.- Oleaje.....	4
I.2.2.- Corrientes marinas	7
I.2.2.1.- Fuerza de Coriolis.....	8
I.2.2.2.- Temperatura, densidad y salinidad de las aguas oceánicas	9
I.2.3.- Viento	9
I.3.- MECANISMOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	11
I.4.- VELOCIDAD DE CAÍDA	12
I.4.1.- Ley de Stokes	12
I.4.2.- Ecuaciones empíricas de velocidad de caída	14
SECCIÓN II.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS ARENAS	18
II.1.- METODOLOGÍA.....	18
II.2.- RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	19
II.3.- CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LAS ARENAS EN LABORATORIO	22
II.3.1.- Análisis granulométrico.....	22
II.3.2.- Propiedades físicas básicas de la muestra	23
II.3.3.- Ángulo de reposo natural del material	25
II.3.4.- Propiedades del mezclado agua – sedimento	25
II.3.5.- Umbrales de movimiento de la partícula en el fondo marino	27
II.3.6.- Tamaño y forma de los granos.....	29
II.3.7.- Medición de la velocidad de caída.....	29



SECCIÓN III.- MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CAÍDA.....	30
III.1.- SELECCIÓN DE LAS MUESTRAS	30
III.2.- TRABAJO EXPERIMENTAL.....	31
III.2.1.- Descripción del método de trabajo.....	31
III.2.2.- Particularidades del método de trabajo.....	33
III.3.- VELOCIDAD DE CAÍDA EXPERIMENTAL (W_f)	34
III.3.1.- Resultados del análisis fotográfico	34
III.3.2.- Resultados de las pruebas de velocidad de caída	39
SECCIÓN IV.- ANÁLISIS DE RESULTADOS	42
IV.1.- ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL d_{50} DE LAS PARTÍCULAS	42
IV.2.- ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA VELOCIDAD DE CAÍDA	44
IV.2.1.- Comparación con ecuaciones empíricas de velocidad de caída.....	44
IV.2.2.- Criterios de comparación	47
IV.2.2.1.- <i>Primer criterio de comparación</i>	47
IV.2.2.2.- <i>Segundo criterio de comparación</i>	50
IV.2.3.- Clasificación a partir de la velocidad de caída.....	55
IV.3.- DISCUSIÓN	56
SECCIÓN V.- CONCLUSIONES	61
SECCIÓN VI.- ANEXOS.....	63
VI.I.- PARÁMETROS ESTADÍSTICOS.....	63
VI.II.- ERRORES ABSOLUTOS Y RELATIVOS DE VELOCIDAD DE CAÍDA.....	66
REFERENCIAS.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	75
MESOGRAFÍA	75

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{a}_c	Aceleración de Coriolis
g	Aceleración de la gravedad
C_D	Coefficiente de arrastre
C_c	Coefficiente de curvatura
cp	Coefficiente de permeabilidad
C_u	Coefficiente de uniformidad
CV	Coefficiente de variación
CL	Coefficiente que toma en cuenta el flujo laminar (Ahrens)
CT	Coefficiente que toma en cuenta el flujo turbulento (Ahrens)
P_b	Criterio de suspensión de Bagnold
k	Curtosis
ρ_{sus}	Densidad de suspensión
ρ_f	Densidad de un fluido cualquiera
ρ_e	Densidad de una partícula cualquiera
ρ_s	Densidad de una partícula de arena
ρ	Densidad del agua
Δ	Densidad relativa de la muestra dentro del agua
S_s	Densidad relativa de la partícula
σ	Desviación estándar
ϕ'	Diámetro interno de la probeta
d_{50}	Diámetro nominal correspondiente al 50 percentil de la curva granulométrica
d_n	Diámetro nominal correspondiente al n-ésimo percentil de la curva granulométrica
d_N	Diámetro nominal que utiliza la expresión de Jiménez – Madsen
E	Empuje de Arquímedes
EA	Error absoluto
ER	Error relativo
τ_{cr}	Esfuerzo cortante crítico
CSF	Factor de forma de la partícula de Corey
F_R	Factor de reducción
FR^*	Factor de reducción correspondiente a la expresión de velocidad de velocidad de caída que presentó el menor error relativo
F_r	Fuerza de fricción o de arrastre
A	Índice de flotación de Arquímedes
P	Índice de redondez
L	Longitud de onda
ρ_{cas}	Masa de concentración
Re	Número de Reynolds
v_*	Parámetro adimensional (Swamee y Ohja)



ω_*	Velocidad adimensional de la partícula (Swamee y Ohja)
z	Parámetro adimensional (Zanke)
d_*	Parámetro adimensional de la partícula o factor de Yalin
A_p	Parámetro de escala
ψ_{cr}	Parámetro de Shields crítico
S_*	Parámetro fluido – sedimento
T	Período de onda
kp	Permeabilidad específica
P	Peso de una partícula o cuerpo
γ_s	Peso específico de las partículas
γ_0	Peso específico del agua destilada a 4°C
P_{or}	Porosidad
r	Radio de la partícula
V_r	Relación de vacíos
a	Sesgo
ϕ	Unidad Phi
$\bar{\omega}$	Velocidad angular de un sistema de referencia rotatorio
W_*	Velocidad de caída adimensional (Jiménez –Madsen)
W_{fc}	Velocidad de caída corregida por efecto de ϕ'
v_c	Velocidad de caída de la Ley de Stokes
W_f	Velocidad de caída de una partícula de arena
W_{fr}	Velocidad de caída reducida
v	Velocidad de una partícula en el seno de un fluido
u_{*cr}	Velocidad del esfuerzo cortante crítico
$\bar{v}_{p/o}$	Velocidad lineal de una partícula respecto a un sistema rotatorio
W_{mf}	Velocidad mínima del flujo
ν	Viscosidad cinemática
μ	Viscosidad dinámica
C	Volumen de concentración
$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{wf}$	Gradiente de presión

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Número de Reynolds como función del parámetro adimensional de la partícula d_* y el factor de Corey CSF acordes a la ecuación propuesta por Dietrich, Camenen (2007)	XX
Figura 2 Número de Reynolds como función de d_* y de la redondez, acorde a la expresión empírica propuesta por Dietrich para partículas elípticas, Camenen (2007).....	XXI
Figura 3 Calibración de los coeficientes A, B y m como funciones del CSF y P utilizando los resultados de Dietrich (1982), representados con círculos para un $P = 6$, diamantes para un $P = 3.5$ y cuadrados para un $P = 2$. La ecuación (30) está representada por las tres líneas que se muestran, para la línea azul corresponde un $P = 6.0$, para la línea de roja un $P = 3.5$ y para la línea verde un $P = 2.0$	XXII
Figura I.1 Gravas y arenas en un mismo banco de material	2
Figura I.2 Playa en un río	2
Figura I.3 Zonas del perfil de una playa	4
Figura I.4 Trayectorias orbitales de las partículas de agua en una onda (Macdonel <i>et al.</i> , 1999).....	6
Figura I.5 La Quebrada, Acapulco México. Ejemplo de playa con un perfil que posee una pendiente muy pronunciada	7
Figura I.6 Distintas playas a lo largo de la línea de costa del Golfo de México	7
Figura I.7 Desviación de Coriolis	8
Figura I.8 Dirección de los vientos a lo largo del planeta, tomado del SENAMHI.....	10
Figura I.9 Diagrama de cuerpo libre de una partícula esférica moviéndose en el seno de un fluido.....	13
Figura II.1 Zonas del perfil de una playa	19
Figura II.2 Sitios muestreados en el estado de Quintana Roo, México. Imagen modificada (fuente: portal del INEGI)	21
Figura II.3 Sitios muestreados en el estado de Yucatán, México. Imagen modificada (fuente: portal del INEGI)	22
Figura II.4 Isla del Carmen, sitio muestreado en el estado de Campeche, México. Imagen satelital.....	22



Figura III.1 Arena del sitio Puerto Morelos 2, Quintana Roo, México (zona backshore)..... 35

Figura III.2 Arena del sitio Punto 5, Quintana Roo, México (zona offshore) 36

Figura III.3 Arena del sitio Punto F, Quintana Roo, México (zona offshore, rompientes)..... 37

Figura III.4 Arena del sitio Punta Allen, Quintana Roo, México (zona offshore) 38

Figura IV.1 Frecuencia de mejor ajuste vs ecuaciones empíricas de velocidad de caída para el estado de Quintana Roo, México 53

Figura IV.2 Frecuencia de mejor ajuste vs ecuaciones empíricas de velocidad de caída para el estado de Yucatán, México 54

Figura IV.3 Frecuencia de mejor ajuste vs ecuaciones empíricas de velocidad de caída para Cancún, Quintana Roo México 54

Figura IV.4 Factor de reducción vs factor de forma de Corey (CSF) para el estado de Quintana Roo, México 58

Figura IV.5 Factor de reducción vs factor de forma de Corey (CSF) para el estado de Yucatán, México 58

Figura IV.6 Factor de reducción vs factor de forma de Corey (CSF) para el estado de Campeche, México..... 59

Figura IV.7 Factor de reducción vs factor de forma de Corey (CSF) para Cancún, Quintana Roo, México 59

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Coeficientes de arrastre de partículas sedimentarias para valores extremos del número de Reynolds, Cheng (1997).....	XIV
Tabla 2 Valores observados y calculados de la viscosidad cinemática, Ahrens (2000)	XVII
Tabla 3 Coeficientes A, B y m involucradas en la ecuación (26), Camenen (2007)	XX
Tabla I.1 Diámetros de las partículas correspondientes al d_{50} de los 6 sitios del Estado de Yucatán. Como se ve claramente en la tabla, las partículas pertenecientes a la zona de lavado (sección de playa foreshore) poseen un d_{50} mayor que las partículas de las otras zonas.....	12
Tabla I.2 Ecuaciones empíricas de velocidad de caída	15
Tabla II.1 Coordenadas geográficas de los sitios de los cuales se extrajeron las muestras (~ No se realizaron pruebas de velocidad de caída;* Muestras provenientes de Cancún)	20
Tabla II.2 Tamices de acuerdo a la ASTM	23
Tabla II.3 Configuración del fondo marino a partir del número de Reynolds, Ruíz (2007)	28
Tabla II.4 Clasificación del flujo a partir del índice de flotación de Arquímedes, Ruíz (2007).....	28
Tabla II.5 Modo de transporte del material o sedimento a partir del número de Rouse, Ruíz (2007).....	28
Tabla III.1 Intervalos de diámetros.....	32
Tabla III.2 Diámetro de partícula y su correspondiente zoom de cámara.....	32
Tabla III.3 d_{50} teórico y experimental del sitio Puerto Morelos 2 zona backshore	35
Tabla III.4 d_{50} teórico y experimental del sitio Punto 5 zona offshore.....	36
Tabla III.5 d_{50} teórico y experimental del sitio Punto F zona offshore (rompientes).....	37
Tabla III.6 d_{50} teórico y experimental del sitio Punta Allen zona offshore.....	38
Tabla III.7 Velocidad de caída de las arenas del sitio Puerto Morelos Estación UNAM, zona foreshore, Quintana Roo	39



Tabla III.8 Velocidad de caída de las arenas del sitio Punto 9, zona foreshore, Quintana Roo.....	39
Tabla III.9 Velocidad de caída de las arenas del sitio Tulum A, zona foreshore, Quintana Roo.....	40
Tabla III.10 Velocidad de caída de las arenas del sitio Holbox, zona offshore, Quintana Roo.....	40
Tabla III.11 Velocidad de caída de las arenas del sitio UAY, zona offshore, Yucatán.....	40
Tabla III.12 Velocidad de caída de las arenas del sitio Isla del Carmen, zona backshore, Campeche	41
Tabla IV.1 Errores absolutos y relativos de las arenas de la península de Yucatán	42
Tabla IV.2 Valores máximos y mínimos de error absoluto y relativo para 28 muestras de las 143	43
Tabla IV.3 Análisis de la media como parámetro de comparación.....	44
Tabla IV.4 Análisis de la moda como parámetro de comparación.....	45
Tabla IV.5 Resultados de velocidad de caída teórica para el sitio Akumal 1, zona backshore	46
Tabla IV.6 Factores de reducción para el sitio Holbox, zona backshore	49
Tabla IV.7 Factores de reducción para el sitio Holbox, zona foreshore	49
Tabla IV.8 Factores de reducción para el sitio Holbox, zona offshore	49
Tabla IV.9 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Quintana Roo, zona backshore.....	50
Tabla IV.10 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Quintana Roo, zona foreshore	50
Tabla IV.11 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Quintana Roo, zona offshore.....	51
Tabla IV.12 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Yucatán, zona backshore.....	51
Tabla IV.13 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Yucatán, zona foreshore	51
Tabla IV.14 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Yucatán, zona offshore	51



Tabla IV.15 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Campeche, zona backshore	51
Tabla IV.16 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Campeche, zona foreshore.....	51
Tabla IV.17 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para el estado de Campeche, zona offshore.....	51
Tabla IV.18 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para la isla barrera de Cancún, Quintana Roo, zona backshore	52
Tabla IV.19 Frecuencias de mejor ajuste de las ecuaciones para la isla barrera de Cancún, Quintana Roo, zona foreshore	52
Tabla IV.20 Clasificación de las ecuaciones de mejor comportamiento para la península de Yucatán	55
Tabla IV.21 Clasificación de las ecuaciones para Cancún, Quintana Roo	55
Tabla IV.22 Rangos del d_{50} de las partículas de la península de Yucatán	56
Tabla IV.23 Velocidad de caída para el sitio Punto F, zona offshore	57
Tabla IV.24 Rangos de los factores de reducción asociados al CSF	60
Tabla VI.1 Escala Udden – Wentworth, Tripaldi (2000).....	65
Tabla VI.2 Errores absolutos y relativos para el sitio Boca Sur, zona foreshore.....	66
Tabla VI.3 Errores absolutos y relativos para el sitio Puerto Morelos Estación UNAM, zona offshore.....	66
Tabla VI.4 Errores absolutos y relativos para el sitio Puerto Morelos 3, zona foreshore.....	66
Tabla VI.5 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto 2, zona backshore	67
Tabla VI.6 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto 3, zona offshore	67
Tabla VI.7 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto 4A, zona foreshore	67
Tabla VI.8 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto 6, zona backshore	67
Tabla VI.9 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto 7, zona offshore	68
Tabla VI.10 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto 9, zona foreshore	68
Tabla VI.11 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto 10, zona offshore	68



Tabla VI.12 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto B, zona foreshore	68
Tabla VI.13 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto D, zona backshore	69
Tabla VI.14 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto E, zona offshore	69
Tabla VI.15 Errores absolutos y relativos para el sitio Punto G, zona backshore	69
Tabla VI.16 Errores absolutos y relativos para el sitio Isla Mujeres, zona offshore	69
Tabla VI.17 Errores absolutos y relativos para el sitio Tulum B, zona foreshore.....	70
Tabla VI.18 Errores absolutos y relativos para el sitio Bahía Príncipe, zona backshore	70
Tabla VI.19 Errores absolutos y relativos para el sitio Akumal 1, zona offshore.....	70
Tabla VI.20 Errores absolutos y relativos para el sitio Playa del Carmen 2, zona foreshore	70
Tabla VI.21 Errores absolutos y relativos para el sitio Punta Allen, zona backshore	71
Tabla VI.22 Errores absolutos y relativos para el sitio Holbox, zona offshore	71
Tabla VI.23 Errores absolutos y relativos para el sitio Telchac, zona backshore	71
Tabla VI.24 Errores absolutos y relativos para el sitio UAY, zona foreshore.....	71
Tabla VI.25 Errores absolutos y relativos para el sitio ECCA, zona offshore	72
Tabla VI.26 Errores absolutos y relativos para el sitio Progreso, zona offshore.....	72
Tabla VI.27 Errores absolutos y relativos para el sitio Carissa Palma, zona backshore	72
Tabla VI.28 Errores absolutos y relativos para el sitio Hilton, zona foreshore.....	72
Tabla VI.29 Errores absolutos y relativos para el sitio Royal Solaris, zona foreshore.....	73
Tabla VI.30 Errores absolutos y relativos para el sitio Isla del Carmen, zona backshore	73
Tabla VI.31 Errores absolutos y relativos para el sitio Punta Xen, zona foreshore	73