



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SEPARACIÓN
DEL FLUJO DETRÁS DE DUNAS”

TESIS

Que para obtener el grado académico de
Maestría en Ingeniería
(Hidráulica)

Presenta

Jesús Martín Caballero Ulaje

Directora de tesis

Dra. Joselina Espinoza Ayala



Campus Morelos
México, 2007

*Se hai da trattare delle aque o dei fluidi,
consulta prima l'esperienza, poi la ragione*

(“Si se trata del agua o de algún fluido consulta primero la experiencia, antes
que la razón”)

Leonardo da Vinci (1452-1519)



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SEPARACION DEL FLUJO DETRÁS DE DUNAS

RESUMEN

Se estudia experimentalmente el fenómeno de la separación del flujo detrás de dunas usando técnicas de visualización del flujo para identificar las estructuras coherentes turbulentas y la medición de velocidades puntuales para caracterizar el campo de flujo, con el objetivo de proporcionar algunas características espacio-temporales de estas estructuras dentro de un rango no experimentado de números de Reynolds. Lo anterior con la finalidad de contribuir a disminuir el grado de empirismo e incertidumbre de los fenómenos fluviales y que estos puedan ser representados analíticamente mediante la formulación de leyes.

El trabajo experimental se llevó a cabo en un canal tipo Reebcock con formas de fondo (dunas) fijas bidimensionales con forma semejante a la usada por los investigadores O. Eggenberger (1986) y Müller y Gyr (1986). El procedimiento experimental consistió básicamente en proporcionar varias velocidades del flujo medio en el canal con números de Reynolds de $58,737 \leq Re \leq 116,925$ y video grabar las estructuras coherentes turbulentas para su análisis.

Para caracterizar el campo de flujo sobre las dunas de acuerdo con los perfiles de velocidad media se realizaron mediciones puntuales de la velocidad empleando un tubo de Prandtl conectado a un manómetro diferencial. La coincidencia casi exacta de los perfiles de velocidad de este estudio con los de Müller y Gyr (1986) y otros autores, permitió la validación de la instalación y de los datos obtenidos.

De la visualización directa y del análisis de las imágenes video grabadas resultado de la aplicación de las técnicas de visualización de inyección de tinta e incorporación de partículas trazadoras se logró: a) Identificar las estructuras coherentes turbulentas relacionadas con la separación del flujo detrás de dunas, b) Obtener un patrón de flujo típico para un rango del número de Reynolds, y las siguientes características espacio-temporales de la estructura del flujo: c) Longitud de las ondas de Kelvin-Helmholtz, d) Ángulo de la estela de dispersión de turbulencia, e) Longitud de la separación del flujo, f) Estructura típica de los vórtices discretos, g) Ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos y h) la Frecuencia de formación del Par vorticoso. Se concluye que el campo de flujo completo y, con él, las estructuras dependen del *ondeamiento* de la capa cortante y de la formación de los vórtices discretos.

DEDICATORIAS

A mi querida esposa Miriam Sánchez Peñaloza, por su amor y apoyo incondicional.

A mis queridos hijos Alejandro y Andrea, por ser mi aliento e inspiración en la vida.

A mis padres Manuel y Ma. Elena por darme el regalo de la vida, por sus desvelos y su amor.

A mis hermanos, por su compañía, apoyo y amor filial.

A mis amigos a quienes debo su generosa amistad.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos y cada uno de quienes han contribuido en la realización de este trabajo y a los que de alguna u otra forma me han apoyado en mi formación personal y profesional.

Agradezco especialmente a mi directora de tesis la Dra. Joselina Espinoza Ayala por su guía paciente y generosa durante la realización de este trabajo.

A mis sinodales de examen de grado. Al M.C. Carlos Gutiérrez Ojeda, al M.I. José Alfredo González V., al M.I. Edmundo Pedroza González y al Dr. Víctor Arroyo Correa, quienes con sus observaciones han enriquecido este trabajo.

A mi *Alma Mater* la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a la que debo mi formación académica y profesional.

Con admiración y respeto a mis profesores de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH y de la DEPMI-UNAM.

A mis compañeros profesores, técnicos académicos y trabajadores del Laboratorio de Hidráulica “*Ing. David Hernández Hueramo*” del Departamento de Hidráulica de la UMSNH a quienes agradezco su apoyo para la realización del trabajo experimental y su paciente impulso en la realización de este trabajo.

A los investigadores y personal del Laboratorio de Hidráulica “*Enzo Levi*” del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por su caluroso recibimiento y desinteresada colaboración.

Agradezco al Ing. Everardo Urquiza Marín por su amistad y apoyo.

“Estudio Experimental de la Separación del flujo detrás de dunas”

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	ii
Dedicatorias.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Contenido.....	v
Lista de tablas.....	vii
Lista de figuras.....	viii
Nomenclatura	xi
I INTRODUCCIÓN	1
I.1 Introducción general	4
I.1.1 Formas de fondo	4
I.1.2 Flujo sobre escalones	9
I.1.3 Flujo sobre rizos y dunas	12
I.2 Antecedentes	14
I.2.1 Caracterización del flujo sobre formas de fondo fijas	20
I.2.2 Estructuras coherentes turbulentas sobre formas de fondo	20
a) Identificación de las estructuras	20
b) Inestabilidad en un flujo	28
c) Frecuencia de las estructuras	33
I.2.3 Separación del flujo	37
a) Definición	37
b) Separación de la capa límite	37
c) Separación detrás de dunas	43
II INSTALACIÓN, EQUIPO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	46
II.1 Instalación experimental	46
II.2 Descripción del equipo	49
II.3 Procedimiento experimental y de visualización	50
II.4 Programa experimental	53
III RESULTADOS	55
III.1 Calibración de la instalación experimental	55
III.2 Mediciones	59
III.2.1 Velocidades medias puntuales	59
III.2.2 Perfiles de velocidad media	61
III.3 Visualización de estructuras coherentes	66
III.3.1 Identificación de Estructuras Coherentes Turbulentas	71
III.3.2 Patrones de flujo	73

III.4 Características de las estructuras del flujo en la separación para $58,737 \leq Re \leq 116,925$	76
III.4.1 Longitud de las Ondas de Kelvin y Helmholtz	76
III.4.2 Angulo de la Estela de dispersión de la turbulencia	77
III.4.3 Longitud de la separación del flujo	81
III.4.4 Estructura típica y, ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos	83
III.4.5 Frecuencia de formación del Par vorticoso.....	92
IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
IV.1 Conclusiones	94
IV.2 Recomendaciones	98
Bibliografía	99

Lista de tablas

Frecuencia de las estructuras

Tabla I.2.1 Periodo adimensional, Periodo y Frecuencia de la formación de estructuras coherentes turbulentas detrás de dunas.

Calibración de la instalación experimental

Tabla III.1.1 Calibración de la instalación experimental

Mediciones

Tabla III.2.1 Mediciones puntuales de velocidad en cuatro secciones de la duna.

Tabla III.2.2 Comparación de las características del flujo medio con las de Müller y Gyr (1986) [12].

Tabla III.2.3 Velocidad media y número de Reynolds de los flujos sobre dunas experimentales.

Tabla III.2.4 Velocidades medias utilizadas para adimensionalizar las velocidades puntuales en cada sección del canal experimental.

Visualización de estructuras coherentes

Tabla III.3.1 Características del flujo en la sesión de video grabación.

Características de las estructuras del flujo en la separación

Tabla III.4.1 Ángulos de la estela de dispersión de turbulencia, medidos y calculados.

Tabla III.4.2 Angulo máximo de la estela de dispersión de la turbulencia.

Frecuencia del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos

Tabla III.4.3 Frecuencia (f) del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas, del presente estudio.

Tabla III.4.4 Número de Stouhal o frecuencia adimensional del par vorticoso.

Lista de figuras

Formas de fondo

Figura I.1.1 Esquema de las configuraciones del fondo, Simmons y Richardson (1960).

Figura I.1.2 Rizos sobre arena fina ($d_m = 0.088$ mm), Hill *et al.* (1967).

Figura I.1.3 Geometría de Rizos y Dunas, Haque y Mahmood (1985).

Figura I.1.4 Dunas de arena en un cauce natural. Imagen de Internet.

Flujo sobre escalones

Figura I.1.5 Variación de la geometría del escalón en los experimentos de Makiola y Ruck (1990) [2].

Figura I.1.6 Perfiles de velocidad media normalizada u/u_0 después del borde del escalón para $\alpha = 10^\circ$ y $\alpha = 30^\circ$ y $Re = 47,000$, Makiola y Ruck [2].

Figura I.1.7 Líneas de corriente detrás del borde del escalón para diferentes ángulos y $Re = 47,000$, Makiola y Ruck (1990) [2].

Flujo sobre rizos y dunas

Figura I.1.8 Croquis del ciclo de realimentación, Müller y Gyr (1986) [12].

Mediciones de turbulencia

Figura I.2.1 Regiones del flujo sobre formas de fondo de acuerdo con su comportamiento, Müller y Gyr (1986).

Figura I.2.2 a) Esquema del flujo sobre formas de fondo bidimensionales. En las figuras **b)** y **c)** se muestran los vectores de la velocidad media, Nelson *et al.* (1993) [5].

Figura I.2.3 a) Perfiles de la componente longitudinal de la velocidad, **b)** Perfiles de la componente vertical de la velocidad, Nelson *et al.* (1993) [5].

Figura I.2.4 a) y b) Perfiles de los esfuerzos de Reynolds ($\overline{u'w'}$), Nelson *et al.* (1993) [5].

Figura I.2.5 a) Perfiles de intensidades de turbulencia horizontales, **b)** Perfiles de intensidades de turbulencia verticales, **c)** Perfiles de intensidades de la razón (o cociente) de turbulencia verticales y horizontales, Nelson *et al.* (1993) [5].

Estructuras coherentes turbulentas sobre formas de fondo

Figura I.2.6 Modelo esquemático de la variación del flujo y de la estructura turbulenta a través de la transición de rizos a dunas, Bennett y Best (1996).

Figura I.2.7 Representación esquemática de las diferentes estructuras turbulentas sobre formas de fondo fijas y bidimensionales en un canal de laboratorio.

Figura I.2.8 Mecanismo de *feed-back* o retroalimentación de vórtices coherentes detrás de dunas en canales.

Figura I.2.9 Modelo conceptual de la formación e inestabilidad lateral de un tubo vorticoso detrás de una duna, Müller y Gyr (1986).

Figura I.2.10 Esquema que ilustra la causa de las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz.

Figura I.2.11 Esquema que muestra la formación de vórtices y la inestabilidad lateral de un tubo vorticoso, Müller y Gyr [12].

Figura I.2.12 a) Capa de mezclado, **b)** Capa de cortante

Figura I.2.13 Esquema de la capa de cortante para el análisis de estabilidad.

Figura I.2.14 Angulo de difusión, tamaño y distancia en la formación de pares de vórtices en una capa de mezclado [12].

Separación del flujo

Figura I.2.15 a) Patrón de líneas de corriente en la vecindad del punto de separación. **b)** Separación de la capa límite a través de un cilindro. **c)** Separación de la capa límite en un difusor.

Figura I.2.16 Ejemplos de flujos separados para números de Reynolds bajos, **a)** Flujo pasando un cilindro cercano a la pared, **b)** Flujo bidimensional pasando un bloque sobre una pared, $Re = 0.02$ y **c)** Flujo pasando una cavidad en una pared.

Figura I.2.17 a) Esquema típico de la separación de la capa límite turbulenta con el flujo inverso medio viniendo desde lejos de aguas abajo, **b)** Modelo de flujo donde las estructuras coherentes turbulentas suministran parte del flujo inverso medio. Simpson (1989).

Figura I.2.18 Estados de fase secuenciales, usando la técnica de inyección de tinta obtenidos por Espinoza y Martínez-Austria (2000).

Instalación, equipo y procedimiento experimental

Figura II.1.1 Croquis en planta y en corte de la instalación experimental. Canal de Reebock.

Figura II.1.2 a) Instalación experimental en su conjunto, **b)** Dunas sobre “tarrajas” de madera cubiertas con lámina de acrílico.

Figura II.3.1 Geometría de las dunas empleadas en el estudio (1999).

Figura II.3.2 Sección transversal del canal en la que se muestra el equipo empleado en la técnica de visualización de inyección de tinta.

Figura II.3.3 Secuencia de imágenes, generadas con la técnica de visualización de inyección de tinta, que muestran el desarrollo de la estructura del flujo detrás de la duna experimental (intervalo de tiempo 1/30 s).

Figura II.4.1 Corte longitudinal de la duna de pruebas y secciones de medición.

Resultados

Calibración de la instalación experimental

Figura III.1.1 Curva de calibración. Vertedor rectangular de pared delgada.

Figura III.1.2 Calibración del modelo.

Mediciones. Velocidades puntuales

Figura III.2.1 Perfiles de velocidades adimensionalizadas.

Figura III.2.2 Comparación de los perfiles de velocidades del presente estudio con las de Müller y Gyr (1986) y con los de otros autores.

Visualización de estructuras coherentes

Figura III.3.1 Esquema de los diferentes tipos de estructuras identificadas detrás de la duna de pruebas.

Figura III.3.2 Patrón de flujo obtenido para un $Re = 79,144$ utilizando líneas de traza y la técnica de inyección de tinta.

Figura III.3.3 Patrón de flujo obtenido para un $Re = 107,469$, utilizando líneas de traza y la técnica de inyección de tinta.

Características de las estructuras del flujo en la separación

Figura III.4.1 Longitud de las ondas de Kelvin y Helmholtz detrás de duna de pruebas.

Figura III.4.2 Ángulos de la estela de dispersión de turbulencia, medidos y calculados.

Figura III.4.3 Ángulo máximo de la estela de dispersión, curva superior y, ángulo normal de la estela en la curva con línea discontinua y valor inferiores.

Figura III.4.4 Longitud de la separación del flujo adimensionalizada con la altura de la duna (h_s) respecto del número de Reynolds.

Figura III.4.5 Estructura típica de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas.

Figura III.4.6 Series del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna experimental para un número de Reynolds de $58,737$, $\Delta t = 0.30 s$.

Figura III.4.7 Secuencia de imágenes del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna experimental. Inyección de tinta. $Re = 58,737$. $\Delta t = 0.30 s$.

Figura III.4.8 Secuencia de imágenes del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna experimental. Partículas trazadoras. $Re = 58,737$. $\Delta t = 0.30 s$.

Figura III.4.9 Frecuencia adimensional de formación del par vorticoso detrás de la duna de pruebas.

Nomenclatura

Formas de fondo

τ_0	Esfuerzo cortante en la frontera
τ_{0c}	Esfuerzo cortante critico en la frontera
R_e	Número de Reynolds
U	Velocidad media longitudinal
Y	Profundidad del flujo o tirante
ν	Viscosidad cinemática del agua
h	Altura del escalón, Raudkivi (1976)
d	Altura del rizo

Flujo sobre escalones

H_s	Altura del escalón
α	Angulo de inclinación de la pared del escalón

Mediciones de turbulencia

δ	Espesor de la capa límite interna
b	Espesor de la estela de turbulencia
LDV	Velocímetro Láser Doppler
$\overline{\rho u' u'}$	Intensidades de turbulencia horizontales
$\overline{\rho w' w'}$	Intensidades de turbulencia verticales

Estructuras coherentes turbulentas

a) Identificación de las estructuras

S	Separación
ST	Separación transitoria
SI	Separación incipiente
STI	Separación transitoria intermitente
γ_{pu}	Fracción de tiempo que permanece el flujo “pegado” a la pared del cuerpo
U_e	Velocidad media externa de la capa límite
η	Frecuencia del “Bursting”
X_r	Distancia media del escalón al punto de cierre de la zona de recirculación
U_0	Velocidad del flujo externo hacia aguas arriba del escalón
u'_{rms}	Intensidad de turbulencia longitudinal

Estructuras coherentes turbulentas

b) Inestabilidad en un flujo

d	Espesor del plano vorticoso
-----	-----------------------------

λ	Longitud de las ondas Kelvin-Helmholtz
η	Deformación de la onda
α	Ángulo de difusión de la capa de mezclado o ángulo de la estela de dispersión de la turbulencia
r_n	Radio del vórtice de la n-ésima generación
X_n	Distancia del origen al vórtice n .

Estructuras coherentes turbulentas

c) Intermitencia de las estructuras

T	Periodo de formación de los “Boils”
\bar{U}	Velocidad media en el río
f	Frecuencia o inverso del periodo T
T_b	Periodo de aparición de los “Boils” sobre dunas, Jackson (1976)
S_t	Relación o número de Strouhal
f_s	Frecuencia adimensional de las ondas de Kelvin-Helmholtz

Programa experimental

x	Distancia horizontal a partir de la cresta de la duna
H	Altura de la duna

Calibración de la instalación experimental

q	Gasto unitario
h_o	Tirante sobre la cresta de la duna
h_m	tirante medio, a la mitad de la duna
h_t	Tirante total o al fondo de la duna.

Medición de velocidades

h	Profundidad del flujo o tirante
U_m	Velocidad media del flujo

Características de las estructuras del flujo en la separación

X_r	Longitud de la separación del flujo detrás de dunas
ν	Viscosidad cinemática; $\nu = 1.007 \times 10^{-6}$
α	Ángulo de la estela de dispersión de la turbulencia.
α_{\max}	Ángulo máximo de la estela de dispersión.
λ_0	Longitud de onda de la inestabilidad inicial. Ondas de Kelvin-Helmholtz
r_o	Radio del primer vórtice discreto
Re	Número de Reynolds
F	Número de Froude
S	Número de Strouhal

-
- f frecuencia del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos.
d Ancho promedio de la estela de dispersión.
D Ancho de la estela de dispersión.
T Periodo del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos.
T_{adim} Periodo adimensional del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SEPARACION DEL FLUJO DETRÁS DE DUNAS

RESUMEN

Se estudia experimentalmente el fenómeno de la separación del flujo detrás de dunas usando técnicas de visualización del flujo para identificar las estructuras coherentes turbulentas y la medición de velocidades puntuales para caracterizar el campo de flujo, con el objetivo de proporcionar algunas características espacio-temporales de estas estructuras dentro de un rango no experimentado de números de Reynolds. Lo anterior con la finalidad de contribuir a disminuir el grado de empirismo e incertidumbre de los fenómenos fluviales y que estos puedan ser representados analíticamente mediante la formulación de leyes.

El trabajo experimental se llevó a cabo en un canal tipo Reebcock con formas de fondo (dunas) fijas bidimensionales con forma semejante a la usada por los investigadores O. Eggenberger (1986) y Müller y Gyr (1986). El procedimiento experimental consistió básicamente en proporcionar varias velocidades del flujo medio en el canal con números de Reynolds de $58,737 \leq Re \leq 116,925$ y video grabar las estructuras coherentes turbulentas para su análisis.

Para caracterizar el campo de flujo sobre las dunas de acuerdo con los perfiles de velocidad media se realizaron mediciones puntuales de la velocidad empleando un tubo de Prandtl conectado a un manómetro diferencial. La coincidencia casi exacta de los perfiles de velocidad de este estudio con los de Müller y Gyr (1986) y otros autores, permitió la validación de la instalación y de los datos obtenidos.

De la visualización directa y del análisis de las imágenes video grabadas resultado de la aplicación de las técnicas de visualización de inyección de tinta e incorporación de partículas trazadoras se logró: a) Identificar las estructuras coherentes turbulentas relacionadas con la separación del flujo detrás de dunas, b) Obtener un patrón de flujo típico para un rango del número de Reynolds, y las siguientes características espacio-temporales de la estructura del flujo: c) Longitud de las ondas de Kelvin-Helmholtz, d) Ángulo de la estela de dispersión de turbulencia, e) Longitud de la separación del flujo, f) Estructura típica de los vórtices discretos, g) Ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos y h) la Frecuencia de formación del Par vorticoso. Se concluye que el campo de flujo completo y, con él, las estructuras dependen del *ondeamiento* de la capa cortante y de la formación de los vórtices discretos.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SEPARACION DEL FLUJO DETRÁS DE DUNAS

I. INTRODUCCION

En la naturaleza, el transporte de sedimentos por la corriente de agua es un proceso continuo que genera cambios morfológicos en los cauces de los ríos y la formación de depósitos sedimentarios tales como islas, barras y formas de fondo.

El transporte de sedimentos tiene su origen en el desprendimiento de partículas del fondo las cuales se desplazan arrastrándose por el fondo del cauce y por masas de sedimento suspendido hacia el flujo medio por vórtices que se levantan desde el fondo plano. Estos vórtices o estructuras turbulentas, con el tiempo, modificarán el fondo del cauce generando configuraciones o formas de fondo tales como rizados y dunas. Estas formas de fondo se oponen al movimiento del flujo generando vórtices de mayor tamaño los que se denominan comúnmente macro-estructuras turbulentas. Estas macro-estructuras tienen una importante función en la interacción entre el flujo medio, el transporte de sedimentos y las formas de fondo. Dichas macro-estructuras evolucionan en una macro escala de espacio y tiempo originada por la acción bidireccional del flujo y el movimiento local de las partículas del fondo. Dentro de este movimiento local ocurren procesos en una micro escala de espacio y tiempo del orden del tamaño de las partículas de arena más finas y de las rápidas fluctuaciones de su desplazamiento. La acción conjunta de macro y micro estructuras darán lugar, con el tiempo, a la configuración de los ríos, lagos y mares.

Sobre la superficie del lecho arenoso de un río se pueden observar algunas *configuraciones* o *formas de fondo* las que se pueden identificar y clasificar en los tipos conocidos. Müller y Gyr (1989) [12] sugieren que debido a las interrelaciones que existen entre los procesos de la separación del flujo detrás de formas de fondo es conveniente describir éstos en términos de un *ciclo de realimentación* de la siguiente manera: las formas de fondo afectan al flujo como una condición de frontera; a su vez éstas solo pueden transformarse por medio del transporte de sedimento y, solo a través del flujo las formas del fondo pueden afectar la distribución del sedimento transportado.

La cuestión esencial en éste caso no es la identificación de las *componentes* del ciclo de realimentación (formas, flujo y transporte) sino la comprensión y descripción detallada de las *interrelaciones* o *conexiones* entre componentes. Siendo el flujo y el transporte de sedimento sobre formas de fondo un ejemplo de tal sistema de realimentación, Müller y Gyr (1987) [12].

Aún cuando la teoría de la Capa límite proporciona un conocimiento sólido, aunque cualitativo, del comportamiento de los flujos viscosos se debe a la *separación*

del flujo que esta teoría se hace insuficiente para realizar un cálculo completo del campo de flujo. Cuando ocurre la *separación* el patrón de flujo completo depende principalmente de las características del flujo en particular. La estructura de los flujos separados es muy diferente respecto de los flujos no separados. La separación del flujo genera la disipación de una gran cantidad de energía de turbulencia debido a que la corriente principal suministra continuamente energía de turbulencia al movimiento de recirculación y a que el alto gradiente de velocidad en la superficie de separación genera una alta turbulencia, la cual es arrastrada por el flujo hacia aguas abajo.

Algunos investigadores han identificado y clasificado diferentes eventos turbulentos los que se han denominado genéricamente como Estructuras Coherentes Turbulentas. Se dice que una estructura es Coherente cuando aparecen eventos turbulentos de características similares de manera cuasi periódica, López *et al.* (1996) [26]. Como se puede suponer, la ocurrencia de éstos eventos coherentes tiene una estrecha relación con la dinámica de la turbulencia. Actualmente se acepta de manera generalizada que la mayor parte de la producción de la turbulencia se origina en los eventos intermitentes y cuasi periódicos, tanto en el espacio como en el tiempo, denominados *Burts* (eyecciones) y *Sweeps* (eventos de barrido), López *et al.* (1996) [26].

Existe evidencia, experimental y de estudios de campo, que muestra que la *macroturbulencia* generada detrás de formas de fondo es muy importante para comprender la dinámica del transporte de sedimento y los procesos de evolución de las formas de fondo, Martínez *et al.* (1998) [23], Bennett y Best (1995) [6].

Empleando diferentes técnicas de visualización se han identificado al menos cinco tipos de estructuras coherentes turbulentas en flujos sobre formas de fondo fijas y bidimensionales, Martínez *et al.* (1998) las cuales se describen adelante en este trabajo. Una propiedad de éstas estructuras es la de tener movimientos dinámicos con un ciclo de vida, por lo que no son totalmente determinísticos en términos de las variables usadas para describirlos, sin embargo se reconoce en ellas un movimiento periódico y cuasi organizado, Nezu y Nakagawa (1993) [25].

Los efectos de la *separación del flujo* en la cresta de la duna son el motor de importantes cambios en el flujo a través de la turbulencia generada por las estructuras coherentes vorticosas las que, a su vez, provocan la resuspensión del sedimento del fondo. Razón por la que en el presente trabajo se estudian los diferentes aspectos de la *separación del flujo detrás de dunas*, haciendo una revisión de la literatura, experimentalmente en laboratorio se llevó a cabo un estudio que consistió en visualizar el fenómeno y hacer un análisis de las principales características de la estructura del flujo a partir de los datos e imágenes obtenidas en un modelo físico de dunas fijas bidimensionales en un canal tipo Reebeck.

El conocimiento de las interacciones entre el flujo y las formas de fondo es muy importante en relación con los procesos de transporte de sedimento, de fondo y en suspensión, que se presentan en un río.

Actualmente, el conocimiento de los fenómenos fluviales es empírico en su mayor parte, resultado de estudios de campo y de observaciones en laboratorios, El grado de empirismo e incertidumbre en el conocimiento preciso de los fenómenos fluviales, se refleja en el hecho de que existen varios métodos para resolver un mismo problema, aportando cada uno de ellos resultados muy diferentes. De ahí que la hidráulica fluvial, en opinión de Maza y García (1984) [22], realmente avanzará cuando estos fenómenos sean comprendidos en toda su extensión y puedan ser representados analíticamente mediante la formulación de leyes.

En años recientes la investigación se ha enfocado en tratar de comprender la física de los procesos que ocurren en la región de separación de flujo detrás de formas de fondo por lo que el estudio de las estructuras coherentes turbulentas ha tomado auge. El objetivo del presente estudio es el de aportar conocimiento, tanto cualitativo como cuantitativo, de la separación del flujo detrás de dunas, empleando para ello un modelo experimental. Esperando que el resultado de este trabajo contribuya al conocimiento de los fenómenos fluviales a través del estudio de las estructuras coherentes turbulentas detrás de dunas.

Resumen de objetivos:

1. Caracterizar el campo de flujo sobre las dunas de acuerdo con los perfiles de velocidad media.
2. Con el uso de técnicas de visualización de flujo identificar las estructuras coherentes turbulentas relacionadas con la separación del flujo detrás de dunas.
3. Investigar las características espacio-temporales de las estructuras del flujo detrás de dunas, como son: a) Longitud de las ondas de Kelvin - Helmholtz, b) Ángulo de la estela de dispersión de turbulencia, c) Longitud de la separación del flujo, d) Frecuencia del desprendimiento de vórtices discretos.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA SEPARACION DEL FLUJO DETRÁS DE DUNAS

I. INTRODUCCION

En la naturaleza, el transporte de sedimentos por la corriente de agua es un proceso continuo que genera cambios morfológicos en los cauces de los ríos y la formación de depósitos sedimentarios tales como islas, barras y formas de fondo.

El transporte de sedimentos tiene su origen en el desprendimiento de partículas del fondo las cuales se desplazan arrastrándose por el fondo del cauce y por masas de sedimento suspendido hacia el flujo medio por vórtices que se levantan desde el fondo plano. Estos vórtices o estructuras turbulentas, con el tiempo, modificarán el fondo del cauce generando configuraciones o formas de fondo tales como rizos y dunas. Estas formas de fondo se oponen al movimiento del flujo generando vórtices de mayor tamaño los que se denominan comúnmente macro-estructuras turbulentas. Estas macro-estructuras tienen una importante función en la interacción entre el flujo medio, el transporte de sedimentos y las formas de fondo. Dichas macro-estructuras evolucionan en una macro escala de espacio y tiempo originada por la acción bidireccional del flujo y el movimiento local de las partículas del fondo. Dentro de este movimiento local ocurren procesos en una micro escala de espacio y tiempo del orden del tamaño de las partículas de arena mas finas y de las rápidas fluctuaciones de su desplazamiento. La acción conjunta de macro y micro estructuras darán lugar, con el tiempo, a la configuración de los ríos, lagos y mares.

Sobre la superficie del lecho arenoso de un río se pueden observar algunas *configuraciones* o *formas de fondo* las que se pueden identificar y clasificar en los tipos conocidos. Müller y Gyr (1989) [12] sugieren que debido a las interrelaciones que existen entre los procesos de la separación del flujo detrás de formas de fondo es conveniente describir éstos en términos de un *ciclo de realimentación* de la siguiente manera: las formas de fondo afectan al flujo como una condición de frontera; a su vez éstas solo pueden transformarse por medio del transporte de sedimento y, solo a través del flujo las formas del fondo pueden afectar la distribución del sedimento transportado.

La cuestión esencial en éste caso no es la identificación de las *componentes* del ciclo de realimentación (formas, flujo y transporte) sino la comprensión y descripción detallada de las *interrelaciones* o *conexiones* entre componentes. Siendo el flujo y el transporte de sedimento sobre formas de fondo un ejemplo de tal sistema de realimentación, Müller y Gyr (1987) [12].

Aún cuando la teoría de la Capa límite proporciona un conocimiento sólido, aunque cualitativo, del comportamiento de los flujos viscosos se debe a la *separación* del flujo que esta teoría se hace insuficiente para realizar un cálculo completo del campo de flujo. Cuando ocurre la *separación* el patrón de flujo completo depende principalmente de las características del flujo en particular. La estructura de los flujos separados es muy diferente respecto de los flujos no separados. La separación del flujo genera la disipación de una gran cantidad de energía de turbulencia debido a que la corriente principal suministra continuamente energía de turbulencia al movimiento de recirculación y a que el alto gradiente de velocidad en la superficie de separación genera una alta turbulencia, la cual es arrastrada por el flujo hacia aguas abajo.

Algunos investigadores han identificado y clasificado diferentes eventos turbulentos los que se han denominado genéricamente como Estructuras Coherentes Turbulentas. Se dice que una estructura es Coherente cuando aparecen eventos turbulentos de características similares de manera cuasi periódica, López *et al.* (1996) [26]. Como se puede suponer, la ocurrencia de éstos eventos coherentes tiene una estrecha relación con la dinámica de la turbulencia. Actualmente se acepta de manera generalizada que la mayor parte de la producción de la turbulencia se origina en los eventos intermitentes y cuasi periódicos, tanto en el espacio como en el tiempo, denominados *Burts* (eyecciones) y *Sweeps* (eventos de barrido), López *et al.* (1996) [26].

Existe evidencia, experimental y de estudios de campo, que muestra que la *macroturbulencia* generada detrás de formas de fondo es muy importante para comprender la dinámica del transporte de sedimento y los procesos de evolución de las formas de fondo, Martínez *et al.* (1998) [23], Bennett y Best (1995) [6].

Empleando diferentes técnicas de visualización se han identificado al menos cinco tipos de estructuras coherentes turbulentas en flujos sobre formas de fondo fijas y bidimensionales, Martínez *et al.* (1998) las cuales se describen adelante en este trabajo. Una propiedad de éstas estructuras es la de tener movimientos dinámicos con un ciclo de vida, por lo que no son totalmente determinísticos en términos de las variables usadas para describirlos, sin embargo se reconoce en ellas un movimiento periódico y cuasi organizado, Nezu y Nakagawa (1993) [25].

Los efectos de la *separación del flujo* en la cresta de la duna son el motor de importantes cambios en el flujo a través de la turbulencia generada por las estructuras coherentes vorticosas las que, a su vez, provocan la resuspensión del sedimento del fondo. Razón por la que en el presente trabajo se estudian los diferentes aspectos de la *separación del flujo detrás de dunas*, haciendo una revisión de la literatura, experimentalmente en laboratorio se llevó a cabo un estudio que consistió en visualizar el fenómeno y hacer un análisis de las principales características de la estructura del flujo a partir de los datos e imágenes obtenidas en un modelo físico de dunas fijas bidimensionales en un canal tipo Reebeck.

El conocimiento de las interacciones entre el flujo y las formas de fondo es muy importante en relación con los procesos de transporte de sedimento, de fondo y en suspensión, que se presentan en un río.

Actualmente, el conocimiento de los fenómenos fluviales es empírico en su mayor parte, resultado de estudios de campo y de observaciones en laboratorios, El grado de empirismo e incertidumbre en el conocimiento preciso de los fenómenos fluviales, se refleja en el hecho de que existen varios métodos para resolver un mismo problema, aportando cada uno de ellos resultados muy diferentes. De ahí que la hidráulica fluvial, en opinión de Maza y García (1984) [22], realmente avanzará cuando estos fenómenos sean comprendidos en toda su extensión y puedan ser representados analíticamente mediante la formulación de leyes.

En años recientes la investigación se ha enfocado en tratar de comprender la física de los procesos que ocurren en la región de separación de flujo detrás de formas de fondo por lo que el estudio de las estructuras coherentes turbulentas ha tomado auge. El objetivo del presente estudio es el de aportar conocimiento, tanto cualitativo como cuantitativo, de la separación del flujo detrás de dunas, empleando para ello un modelo experimental. Esperando que el resultado de este trabajo contribuya al conocimiento de los fenómenos fluviales a través del estudio de las estructuras coherentes turbulentas detrás de dunas.

Resumen de objetivos:

1. Caracterizar el campo de flujo sobre las dunas de acuerdo con los perfiles de velocidad media.
2. Con el uso de técnicas de visualización de flujo identificar las estructuras coherentes turbulentas relacionadas con la separación del flujo detrás de dunas.
3. Investigar las características espacio-temporales de las estructuras del flujo detrás de dunas, como son: a) Longitud de las ondas de Kelvin - Helmholtz, b) Ángulo de la estela de dispersión de turbulencia, c) Longitud de la separación del flujo, d) Frecuencia del desprendimiento de vórtices discretos.

I.1 Introducción general

I.1.1 Formas de fondo.

Al observar la superficie del lecho arenoso de un río se puede constatar que este puede ser plano u ondulado. El fondo plano existe cuando no hay arrastre de partículas y, aún cuando lo haya, no se llegan a producir ondulaciones. Cuando un cauce es arenoso y se presenta transporte de sedimentos se generan ondulaciones en el fondo. En el caso de lechos ondulados estos forman *configuraciones o formas de fondo* las que se pueden identificar y clasificar dentro de los tipos que se anotan adelante. Estas *formas de fondo* no están fijas sino que se modifican por efecto de las complejas interacciones que se generan entre el flujo, el transporte de sedimento y las partículas que las conforman. Estas interacciones aún no conocen completamente. Resulta de interés conocer las características de las formas de fondo y de su evolución debido a que éstas afectan la rugosidad del cauce y, por lo tanto, generan cambios en la resistencia al flujo.

Por otro lado, es importante señalar que las dificultades para llevar a cabo mediciones y observaciones en flujos de agua son mucho mayores que en flujos de aire, debido a la compleja interrelación que hay entre las componentes del ciclo de realimentación, que se menciona en la introducción general, y al hecho de que la razón de densidad entre el fluido y el material transportado es muy cercana a la unidad. En el caso de arena en agua es muy difícil separar el efecto del movimiento del agua circundante del efecto del movimiento de los granos en ella.

Hipótesis sobre el origen y desarrollo de las formas de fondo

Las formas de fondo, tales como rizos y dunas, emergen y se desarrollan como consecuencia de la interacción entre el flujo, las formas de fondo y el transporte de sedimento. En la literatura generalmente se proponen dos hipótesis sobre el origen y desarrollo de las formas de fondo u ondas sedimentarias. La primera de ellas propone que el origen de las formas de fondo se encuentra en las perturbaciones locales, las que crecen y se desarrollan debido a un reacomodo progresivo de las partículas de sedimento que las conforman, Raudkivi (1966); Coleman y Melville (1966).

La segunda hipótesis supone la existencia de un proceso extendido en el cual las formas de fondo se originan en forma simultánea en todo el lecho debido a un proceso de inestabilidad del sistema flujo-transporte de sedimento (Engelund y Fredsøe, 1982). Niño y Barahona (1998) encontraron evidencia experimental que apoya esta hipótesis y propusieron que aunque el origen de las formas de fondo es un proceso extendido, dicha inestabilidad puede ser originada por efectos locales los cuales pueden ser perturbaciones del lecho inducidos por estructuras coherentes del flujo turbulento sobre él.

Secuencia de desarrollo de las formas de fondo

Aún cuando no hay una clasificación universalmente aceptada para describir las formas de fondo, la secuencia de desarrollo más usada es: *fondo plano sin arrastre*, *rizos*, *dunas*, *fondo plano con arrastre*, *ondas estacionarias* y *antidunas*. En este punto es conveniente señalar que existe una alta dificultad para definir con precisión las condiciones que pueden llevar de un tipo de formas de fondo a otro, Raudkivi (1976) [11]. A partir de un fondo plano y para un gasto creciente la evolución de las formas del fondo para flujos subcríticos $F < 1$ sería: Rizos, Dunas y Ondas estacionarias. Para flujos supercríticos $F > 1$ la evolución sería: Fondo plano con arrastre y Antidunas. De acuerdo con la literatura se podría afirmar que los Rizos y las Dunas son las formas de fondo mas comunes en la naturaleza y en canales de laboratorio con pendientes suaves. Los rizos, aunque muy similares a las dunas son formas mas pequeñas las cuales se considera están afectadas por características de la región mas cercana al fondo. Si bien *rizos* y *dunas* muestran algunas sutiles diferencias, su apariencia geométrica tiene notables similitudes. Ambas se caracterizan por una superficie en pendiente suave hacia aguas arriba, ligeramente convexa en la dirección del flujo, y hacia aguas abajo una superficie rugosa inclinada con un ángulo de reposo, Haque y Mahmood (1985) [9] (ver Fig. I.1.1).

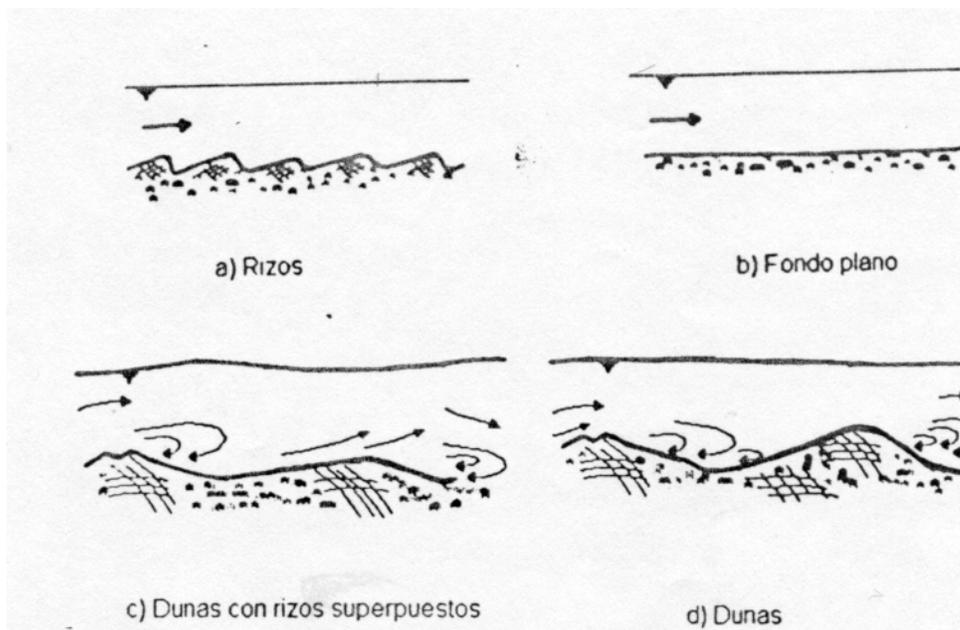


Fig. I.1.1 Esquema de las configuraciones del fondo, Simmons y Richardson (1960).

Puesto que los *rizos* son formas de fondo que inician su *desarrollo* con un exceso de esfuerzo cortante relativamente pequeño ($\tau_0 - \tau_{0c}$) y, solo ligeramente más allá del inicio del movimiento de una partícula, éstos se relacionan con niveles bajos de turbulencia (ver

Fig. I.1.2). Donde τ_0 es el valor del esfuerzo cortante en la frontera y τ_{0c} es el valor crítico o umbral del esfuerzo cortante en la frontera.

Simons *et al.* (1964) encontraron que "después del inicio del movimiento, el fondo plano cambió a *rizos* para diámetros de partículas de arena menores a 0.5 mm y a *dunas* para diámetros menores de 0.93 mm". El valor límite del número de Reynolds, $R_e = \frac{UY}{\nu}$ donde: U es la velocidad media del flujo, Y es la profundidad de la corriente y ν la viscosidad cinemática del agua, para arena de 0.93 mm es del orden de 22 y éste parece ser el límite superior para la formación de rizados. El límite inferior parece darse cuando la velocidad del flujo es tan baja que éste no crea una *estela* detrás de un obstáculo, es decir en flujos laminares con bajos números de Reynolds.

Inicio de separación del flujo

Algunos granos individuales se comportan como obstáculos aislados de los cuales se desprenden *vorticillos* (Eddies) cuando: $\frac{UY}{\nu} \geq 3.5$, por lo tanto parece razonable suponer que el inicio de la separación del flujo ocurrirá en un escalón con valores similares de $\frac{Uh}{\nu}$, donde h es la altura del escalón, Raudkivi (1976) [11].

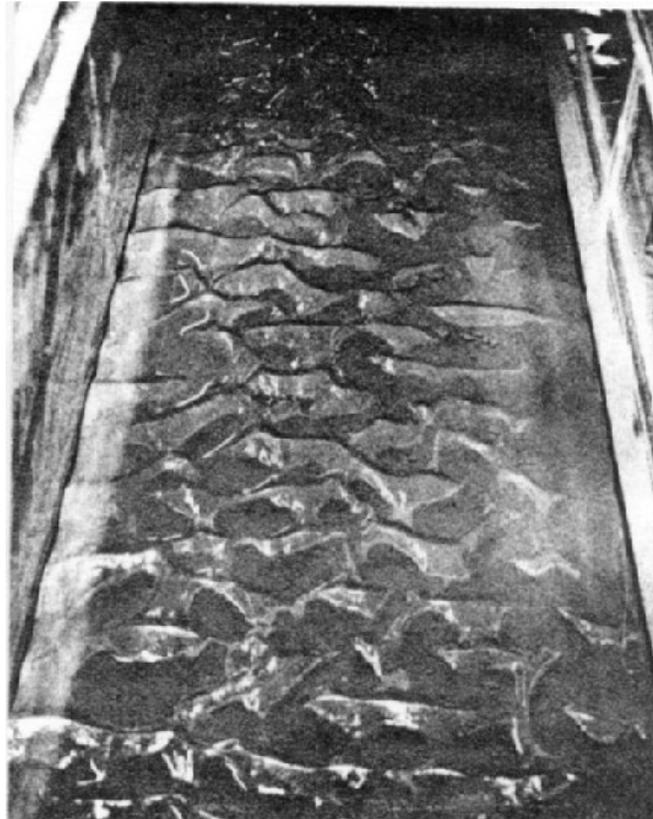


Fig. I.1.2 Rizos sobre arena fina ($d_m = 0.088$ mm). Hill *et al.* (1967).

Cuando se forma una discontinuidad en la superficie del fondo, ya sea por socavación y subsecuente depósito, por acumulación de unos granos más ligeros sobre unos más pesados, o cualquiera otra condición, se forma una *estela* en la región de aguas abajo de la discontinuidad. El flujo *se separa* en la cresta y se une nuevamente a 5 o 6 veces la altura de la forma hacia aguas abajo. Puesto que los gradientes de velocidad en la superficie de separación son muy pronunciados se genera en esta interfase una intensa producción de turbulencia (ver Fig.I.1.3).

Aguas abajo de la cresta de una duna y bajo la capa de cortante se forma un vórtice fijo en la región que se denomina como *zona de recirculación*. A partir del punto de cierre de la zona de recirculación se inicia hacia aguas abajo una nueva capa límite donde la superficie rugosa de la forma de fondo gobierna la producción de turbulencia, Müller y Gyr (1986).

Condición de estabilidad de las formas de fondo

El transporte de sedimento proveniente del fondo se mantiene en movimiento dentro del flujo por el efecto combinado de la agitación turbulenta y el esfuerzo cortante medio temporal. Puede advertirse que el mecanismo descrito implica que el desarrollo de la forma de fondo se propaga hacia aguas abajo de un punto, o puntos, de disturbio inicial. Esto no es un proceso de amplificación de un disturbio de fondo para una longitud de onda dada, sino un crecimiento gradual de la forma de fondo hasta que ésta alcanza la condición de estabilidad.

La magnitud del esfuerzo cortante sobre el fondo plano parece ser un factor, entre otros, que determina la altura del rizo para un tamaño de grano dado y la cantidad de turbulencia producida en la interfase, Raudkivi (1963) [8]. Pero ya que la altura del rizo determina el patrón del flujo hacia aguas abajo ésta determina también la longitud del mismo.

La formación de rizos se restringe a valores pequeños del Re y profundidades del flujo relativamente grandes, Y_0/d , por lo que la altura del rizo es prácticamente independiente de la profundidad del flujo (ver Fig. I.1.3). Donde Y_0 es la profundidad del flujo y d es la altura del rizo.

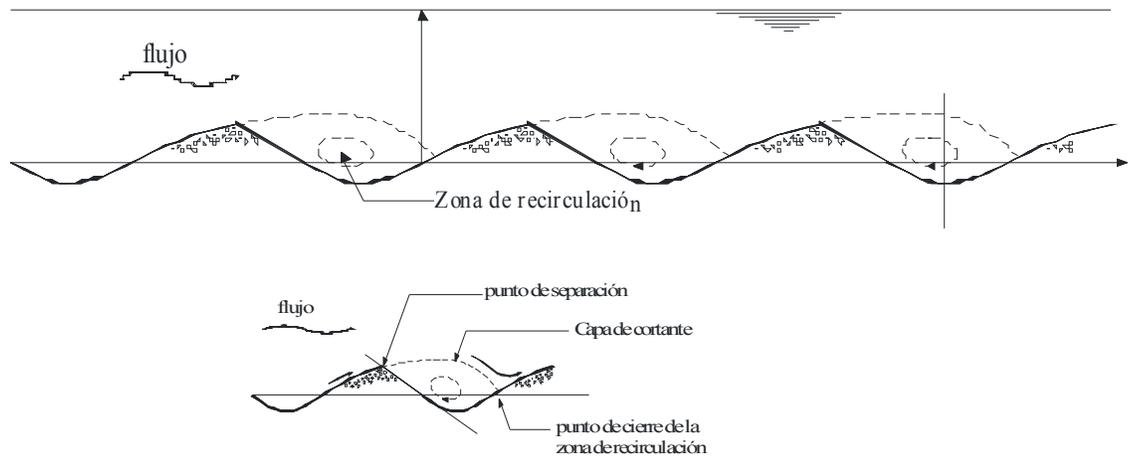


Fig. I.1.3 Geometría de rizados y dunas, Haque y Mahmood (1985).

Las *dunas* en general son formas mucho más grandes que los rizados las cuales alcanzan una longitud de aproximadamente 7 veces la profundidad de la corriente. Estas se generan a velocidades y esfuerzos cortantes más altos y su tamaño se relaciona con la profundidad del flujo. Yalin (1972) argumenta que en condiciones adecuadas para la formación de dunas una discontinuidad en la frontera del flujo lleva a un desprendimiento de vórtices de gran escala y a una interacción con la superficie libre del agua, aquí Yalin observó la formación de una, de las ahora denominadas, estructuras coherentes turbulentas como lo es el Kolk o Boil.

Para valores pequeños de $\frac{Y_0}{d} \leq 700$ las longitudes de las dunas son aproximadamente mil veces mas grandes que las de rizados y, ambos, tanto rizados como dunas se pueden presentar para valores muy pequeños del número de Reynolds.

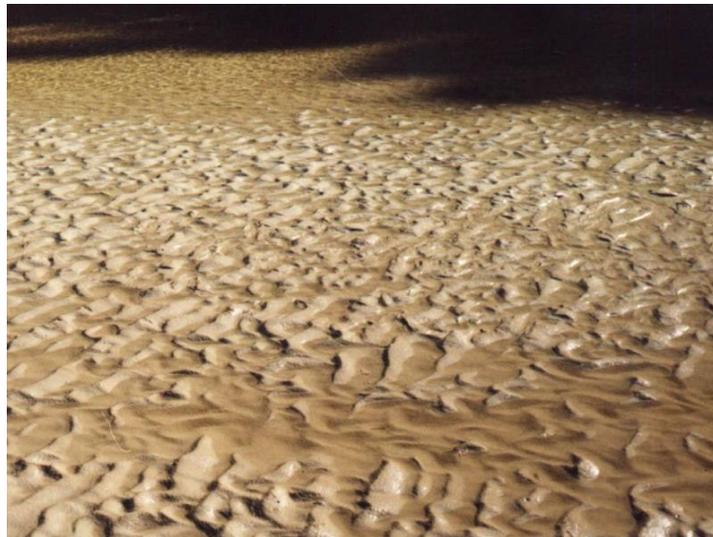


Figura I.1.4 Dunas de arena en un cauce natural. Imagen de Internet

I.1.2 Flujo sobre escalones

El flujo sobre un escalón es un ejemplo clásico de los *flujos con separación* ya que existe una gran similitud entre las condiciones del flujo aguas abajo de un escalón negativo (caída) y la cara de aguas abajo de un rizo, Raudkivi (1963) [8]. Esta similitud puede extenderse a otras *formas de fondo* en cauces naturales. Por otro lado para acercarse al estudio del complejo fenómeno de separación del flujo detrás de formas de fondo tridimensionales es más fácil hacerlo utilizando la geometría simple de un escalón en el que la bidimensionalidad del flujo es más accesible.

En un escalón los perfiles del flujo medio varían rápidamente causando que la energía del flujo medio se disperse en el lugar, lo que presta facilidades para el estudio de la estructura del flujo medio, Nakagawa y Nezu (1987) [1].

Algunas de las principales conclusiones obtenidas por Nakagawa y Nezu (1987) en su investigación experimental sobre estructuras turbulentas en flujos de agua sobre un escalón a 90° en un canal, son:

1. La velocidad media del flujo se desvía de la ley logarítmica de distribución inmediatamente aguas abajo del escalón y se ajusta bien a la distribución Gaussiana de la capa de mezclado cuando se aproxima al punto de cierre de la zona de recirculación. Después de este punto se forma una nueva capa límite donde se puede aplicar la *ley de la pared*. Aunque el retorno de la velocidad media a la ley logarítmica de distribución es bastante lento hacia aguas abajo del punto de cierre de la zona de separación del flujo.

2. La longitud de la separación del flujo, entendida ésta como la distancia entre el borde del escalón y el punto donde cae la capa de cortante, disminuye al incrementarse el número de Reynolds por lo que tal vez se alcance una longitud de separación constante. Y consecuentemente a medida que crece el número de Reynolds, la zona de recirculación y su velocidad inversa a la dirección del flujo medio se hacen más pequeñas.

3. La intensidad de la turbulencia crece más de 1.5 veces, aproximadamente, el valor inicial a lo largo de la línea $\frac{y}{H_s} = 1$ donde y es una distancia vertical y H_s es la altura del escalón.

Por otro lado, los esfuerzos cortantes de Reynolds se incrementan rápidamente a lo largo de la línea de corriente divisoria entre la zona de recirculación y el flujo medio alcanzando aproximadamente 5 veces el valor inicial del esfuerzo cortante antes de llegar al punto de cierre de la zona de recirculación.

4. La energía de turbulencia se genera a lo largo de la capa cortante, mientras la mayor parte de esta energía se disipa en la región de recirculación.

Makiola y Ruck (1990) [2] llevaron a cabo una investigación experimental en el campo del flujo turbulento sobre un escalón negativo con geometría inclinada en la

dirección del flujo, con un rango de variación de 10° a 90° respecto de un plano horizontal que pasa por la cresta del escalón (Fig. I.1.5).

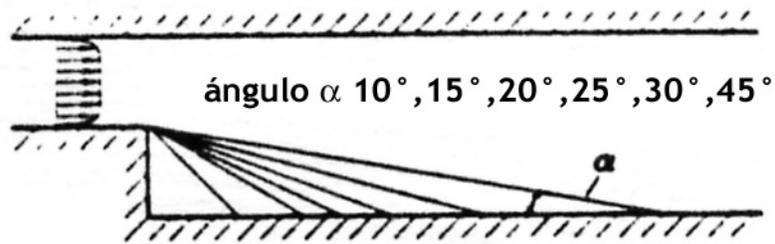


Fig. I.1.5 Variación de la geometría del escalón en los experimentos de Makiola y Ruck(1990) [2].

En este experimento el flujo se midió como una función del número de Reynolds y del ángulo de inclinación de la pared. Así para un número de Reynolds constante y un incremento del ángulo de inclinación α (de 15° a 45°) se observó que la longitud de la separación del flujo fue aumentando, la velocidad máxima del flujo se fue incrementando al igual que las velocidades longitudinales en las secciones transversales entre el borde superior del escalón y hasta el punto de cierre de la zona de recirculación, (ver Fig. I.1.6) [2].

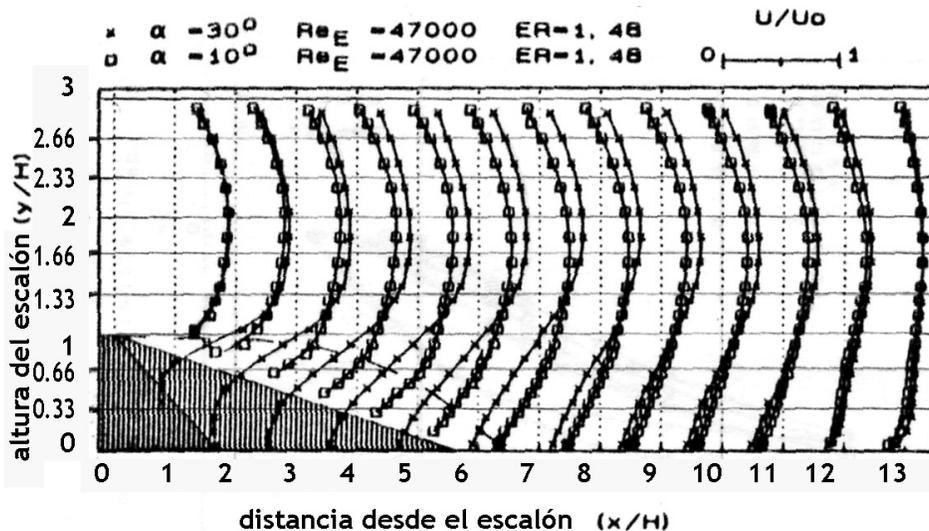


Fig. I.1.6 Perfiles de velocidad media normalizada u/u_0 después del borde del escalón para $\alpha = 10^\circ$ y $\alpha = 30^\circ$ para $Re = 47,000$, Makiola y Ruck [2].

Cuando los ángulos (α) del escalón fueron menores que 30° se redujo la *masa fluida* recirculante en la *burbuja de separación*, acompañada de una reducción en el gradiente de velocidad en la capa cortante en desarrollo (ver Fig. I.1.7). Por otro lado en geometrías planas del escalón ($\alpha > 15^\circ$) al aumentarse el ángulo de inclinación la intensidad de la turbulencia en la región de recirculación creció rápidamente y alcanzó un máximo para ángulos de entre 20° y 30° , excediendo incluso los valores obtenidos sobre un escalón a 90° . Para ángulos $\alpha \leq 15^\circ$ y $Re > 33\,000$ y bajo ciertas condiciones del flujo no se alcanzó la separación del mismo, Makiola y Ruck (1990) [2].

El estudio del flujo sobre escalones es un acercamiento natural al estudio de los flujos sobre formas de fondo de cauces naturales y canales aluviales.

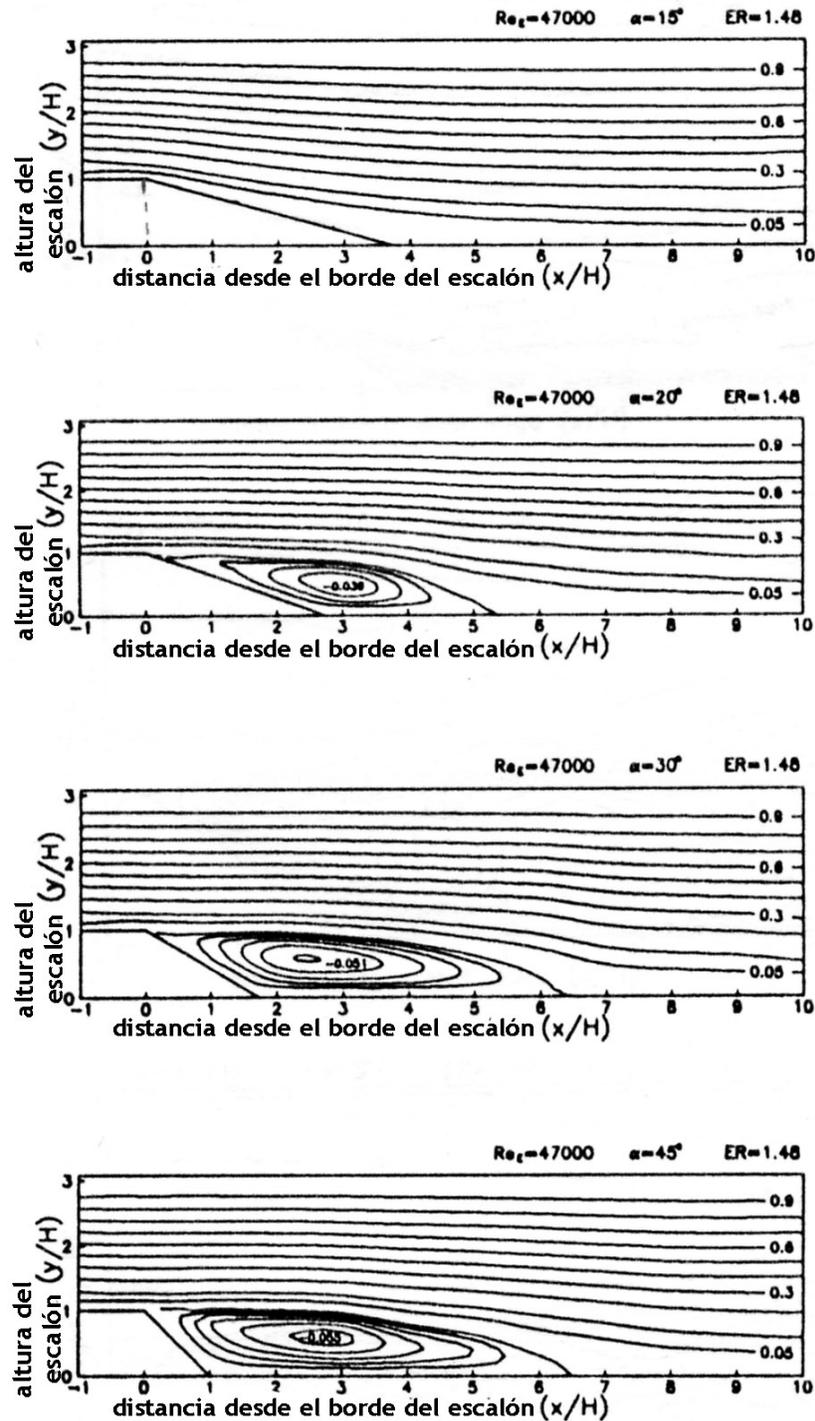


Fig. I.1.7 Líneas de corriente detrás del borde del escalón para diferentes ángulos y $Re = 47,000$. Makiola y Ruck (1990) [2].

I.1.3 Flujo sobre rizos y dunas

El flujo sobre rizos y dunas es bastante más complejo que el flujo sobre escalones debido a que en el primero deben tomarse en cuenta aspectos que no se consideran en el flujo sobre escalones, tales como: el escurrimiento del flujo sobre un fondo móvil que está cambiando constantemente, el efecto de la rugosidad del fondo, una mayor resistencia al flujo por el efecto de las formas de fondo, el sedimento en suspensión, el arrastre de fondo, etcétera.

Tradicionalmente el flujo sobre una duna se describe, en el tiempo medio, como una *separación* en la cresta y un *punto de unión* de la capa de cortante sobre la pendiente de la siguiente duna. A partir de éste punto de unión se desarrolla una nueva capa límite hacia aguas arriba sobre la pendiente suave de la duna. Bajo la capa de cortante y frente a la cresta de la duna se forma un vórtice similar a un rollo elongado en la zona de recirculación.

Los procesos dinámicos del flujo detrás de dunas proporcionan la “realimentación” entre el flujo, el transporte de sedimento y las formas de fondo, mismos procesos que se han señalado como generadores del desarrollo y persistencia de las dunas. Müller y Gyr (1986) [12] clasificaron éstos procesos dinámicos del flujo en términos de estructuras coherentes, en las cuales se concentra la vorticidad de la capa límite hacia aguas arriba. Por otro lado en un flujo de agua y sedimento los procesos de *formación, persistencia y disipación* de las formas de fondo ofrecen un grado de libertad a un río para adaptarse a su factor de fricción, Alan y Kennedy (1965).

Estos procesos dinámicos fueron definidos por Müller y Gyr (1986) en términos de un *ciclo de realimentación* como el que se muestra en el croquis de la figura I.1.8. Estos autores opinan que los procesos dinámicos del flujo similares a los obtenidos sobre formas de fondo bidimensionales juegan un papel importante en el ciclo de realimentación de formas de fondo tridimensionales.

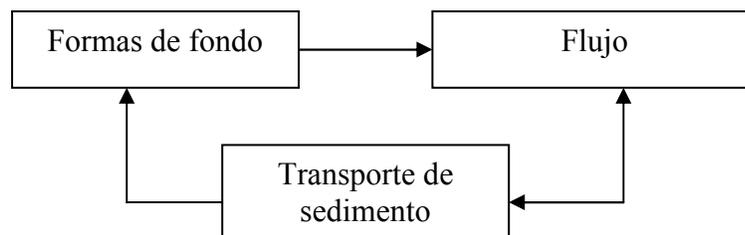


Fig. I.1.8 Croquis del ciclo de realimentación. Müller y Gyr (1986) [12].

Se anota adelante una descripción del ciclo de realimentación, el cual no tiene un origen definido, como sigue: Las formas de fondo afectan al flujo como una condición de frontera; a su vez las formas de fondo solo pueden modificarse por medio del transporte de sedimento y, solo a través del flujo las formas de fondo pueden afectar la distribución del sedimento transportado, Müller y Gyr (1979) [12].

En el ciclo anterior debe subrayarse la importancia de la interrelación que existe entre los componentes del mismo (flujo, transporte y formas de fondo) donde la comprensión profunda de estas interrelaciones o conexiones entre componentes son una cuestión esencial. De estas interrelaciones puede destacarse aquella entre el transporte de sedimento y el flujo de agua, en la cual se requiere mayor trabajo experimental para conocer con mayor precisión como y en que medida el transporte de sedimento afecta al flujo en forma directa.

Por otro lado, comprender el aspecto físico de las interrelaciones mencionadas proporciona, o puede proporcionar, la base para desarrollar mejores métodos para calcular la *rugosidad efectiva* en canales aluviales y así permitir la formulación de relaciones más exactas entre el fondo y la descarga. Además permitirá la posibilidad de hacer predicciones más precisas del transporte de sedimento sobre lechos con formas de fondo y, en general, mejores predicciones de cada una de las componentes del ciclo de realimentación, lo que es de fundamental importancia para las diversas áreas de las ciencias ambientales y la ingeniería, Nelson y Smith (1989) [14].

Diferencias en la dinámica del flujo sobre Rizos y Dunas

Tanto rizos como dunas poseen una capa de cortante libre en la zona de separación, sin embargo la capa de cortante sobre rizos es prácticamente paralela al fondo, mientras la capa de cortante en dunas es topográficamente forzada hacia arriba por la pendiente ascendente de la duna.

Dado que la estructura de la turbulencia detrás de formas de fondo depende de la formación, la magnitud y el alcance hacia aguas abajo de la capa de cortante resultado de la separación del flujo, parece razonable atribuir a la velocidad diferencial en la capa de cortante, y por lo tanto a la magnitud de las inestabilidades de Kelvin y Helmholtz, las diferencias conocidas en la dinámica del flujo entre rizos y dunas.

Adicionalmente, las dunas se pueden diferenciar de los rizos por poseer éstas vórtices de mayor magnitud y frecuencia. Por lo tanto una vez que un rizo alcanza una cierta altura dentro del flujo, esto quizá por la amalgamación o coalescencia de dos rizos, Leeder (1980), se incrementa la velocidad diferencial a través de la capa de cortante provocando que los eventos coherentes turbulentos se hicieran más grandes y más frecuentes incrementando con ello el transporte de sedimento hacia aguas abajo. Nótese de lo anterior que la velocidad media, el esfuerzo cortante de fondo y la tasa de transporte de sedimento se incrementan durante la transición de rizos a dunas. Ahora bien una profundidad mayor del flujo sobre lechos con rizos genera un mayor mezclado y una mayor disipación de la turbulencia de baja magnitud y frecuencia originada en la capa de cortante. Por lo tanto las dunas pueden diferenciarse de los rizos por poseer una intensidad de turbulencia más alta que puede trasladarse a través de la profundidad entera del flujo antes de mezclarse completamente. Esto también se relaciona en general con el desarrollo de la capa de cortante, cuyo espesor vertical y longitud son aproximadamente igual a la altura de la duna y a su longitud, respectivamente, Bennett y Best (1995) [6].

I.2 Antecedentes

I.2.1 Caracterización del flujo sobre formas de fondo fijas.

La comprensión de la dinámica del flujo sobre *fronteras no uniformes* es de importancia fundamental para una extensa serie de problemas en ciencias e ingeniería, Nelson *et al.*, (1993) [5]. Este problema se puede abordar desde un punto de vista experimental o teórico sobre lechos de cauces, en ríos o canales, con fondos erosionables por el esfuerzo cortante del flujo.

Cuando un *flujo turbulento* es capaz de producir un movimiento significativo de las partículas de sedimento, el fondo del cauce será inestable a perturbaciones y evolucionará en una serie de formas de fondo (p.e. rizos y/o dunas). En el caso específico, y más generalizado, del flujo turbulento sobre lechos no uniformes; el flujo completamente desarrollado y las características del fondo son el resultado de complejas interacciones entre el flujo, la geometría del fondo y el transporte de sedimento sobre el lecho.

El flujo sobre formas de fondo se puede subdividir en las siguientes regiones de acuerdo con su comportamiento:

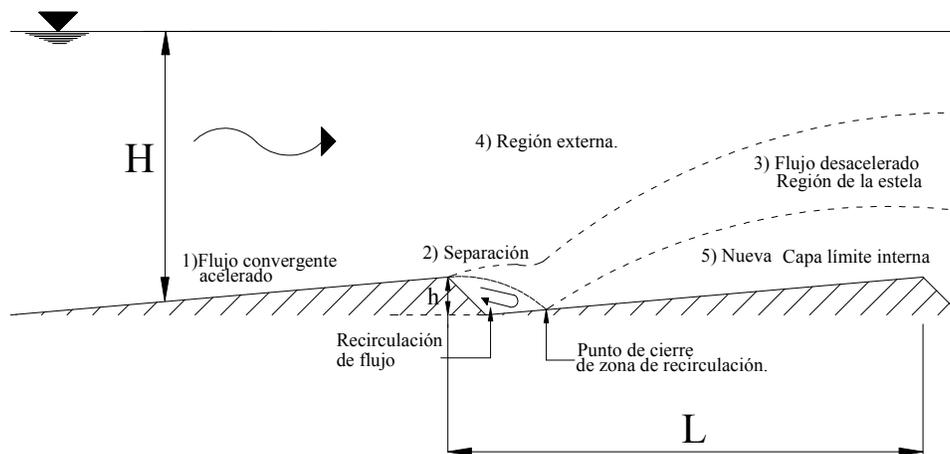


Fig. I.2.1 Regiones del flujo sobre formas de fondo de acuerdo con su comportamiento, Müller Y Gyr (1986).

1. Flujo convergente acelerado sobre la pendiente ascendente de la duna.
2. Zona de separación y recirculación del flujo detrás de la duna.
3. Región del flujo desacelerado o región de estela, sobre la zona de separación del flujo.
4. Región externa del flujo, sobre la región de estela y hasta la superficie del agua.
5. Nueva capa límite, la cual se origina a partir del punto de cierre de la zona de recirculación.

Ver: Raudkivi (1966), Engelund y Fredsoe (1982), Müller y Gyr (1982, 1986).

Como se observa en la figura I.2.1 la región de la estela se difunde en forma diagonal ascendente desde la zona de separación la cual crece en tamaño y decrece en energía turbulenta.

La nueva capa límite interactúa con la estela y ambas emergen en la cresta de la siguiente duna conformando una nueva capa límite casi uniforme, Mc Lean (1994).

D.J. Tritton (1988) en la introducción de su libro *Physical Fluid Dynamics* hace notar que debido a la forma en que se han observado los patrones de flujo derivados de las leyes de la mecánica, conservación de masa y del movimiento de Newton, es frecuente que estos patrones no tengan un significado aparente y que se requiere de una gran estructura teórica y conceptual basada, por una parte en las leyes básicas y por otra en la experimentación para aclarar el modo en que se derivan los patrones de flujo observados de las leyes de la mecánica.

En la investigación científica y, particularmente en la mecánica de fluidos y la hidráulica, ha sido común emplear la experimentación como herramienta para conocer y obtener valores característicos de algún fenómeno que no se ha comprendido lo suficiente. En este sentido y desde hace 30 años con el desarrollo de las técnicas de anemometría de película caliente, que permite medir las velocidades puntuales instantáneas, y complementada con la técnica de visualización de burbujas de hidrógeno se pueden obtener perfiles de velocidad instantáneos. De esta manera se han logrado avances importantes en el conocimiento de la estructura de los flujos turbulentos. Se ha llevado a cabo bastante trabajo experimental para obtener valores y correlaciones, por ejemplo: de los esfuerzos cortantes en el fondo, de las intensidades de turbulencia y del transporte de sedimentos.

Se abordan primero las mediciones de turbulencia sobre formas de fondo fijas para facilitar su análisis al eliminar las variaciones del fondo móvil en el tiempo. Por otro lado es importante mencionar que sin el conocimiento preciso de la geometría de las formas del fondo, las que a su vez dependen de las características del flujo cercano al fondo, no se podrá pronosticar ni el flujo local ni el flujo medio, Nelson *et al.* (1993) [5], encontrándonos de esta manera, metafóricamente hablando, en un *nudo gordiano*.

El primer paso en una investigación de flujos sobre formas de fondo es el análisis de la *dinámica del flujo* sobre formas de fondo bien desarrolladas. Sin embargo, debido a la variabilidad espacial de la estructura del flujo local, se requieren mediciones muy detalladas con una alta resolución en el espacio y en el tiempo de cantidades medias y turbulentas para describir un campo de flujo de esta naturaleza con suficiente exactitud que permita obtener conclusiones de balances de *momentum* tanto locales como de promedios espaciales y temporales.

Campo de flujo sobre una forma de fondo

Ante un cambio en el flujo las formas de fondo inicialmente simétricas tenderán a hacerse asimétricas cuando éstas empiecen a crecer y emigren. Sobre la cresta de la forma

de fondo hay una separación del flujo que produce una *estructura de flujo* parecida a una *estela* hacia aguas abajo (área sombreada con líneas diagonales, "b" en la Fig. I.2.2 a). Sin embargo a diferencia de una estela clásica, este flujo también está influenciado por débiles aceleraciones inducidas por la topografía suavemente ascendente de la duna de aguas abajo. Bajo la región de estela crece una *capa límite interna* hacia aguas abajo del punto donde se une la línea de corriente con la siguiente forma (región ligeramente sombreada "δ" en la Fig. I.2.2) como resultado de la condición de no-deslizamiento en la frontera del lecho.

Los efectos del flujo con potencial y la turbulencia de las estelas de otras formas de fondo de aguas arriba, determinan la estructura del flujo sobre la duna en estudio, en la región sin sombrear, Fig. I.2.2 a) [5].

En la figura I.2.2.a) se muestra una descripción esquemática del flujo sobre una forma de fondo típica, para ayudar en la interpretación de los campos de flujo medidos por Nelson et al. (1993) [5]. En las Figs. I.2.2 b) y I.2.2 c) se presentan las velocidades medias en forma de vector.

En la Figura I.2.3 a) se muestran los perfiles de la componente longitudinal de la velocidad, y en la Fig. I.2.3 b) los perfiles de la componente vertical de la velocidad.

Los autores Nelson *et al.* (1993) [5] concluyeron de su trabajo experimental que la distribución vertical de la velocidad en la capa límite interna tiene una naturaleza casi logarítmica, así como también su crecimiento y desarrollo a lo largo de la forma de fondo.

Cualitativamente, estas figuras nos dan una idea clara de los *procesos* que actúan sobre formas de fondo típicas, incluyendo la *estela*, la *capa límite* y la respuesta propia del *flujo potencial*, Nelson *et al.* (1993) [5]. En la región de la estela se produce además la interacción de las estructuras coherentes con el flujo de recirculación, generándose una capa de mezclado que se extiende hacia aguas abajo hasta el punto de cierre de la zona de recirculación, Niño y Aracena (1988) [24]. De lo anterior se puede concluir que los procesos de la estela son de primordial importancia para el desarrollo de la estructura turbulenta sobre una serie de formas de fondo y que juegan también un papel clave en el desarrollo de la estructura del flujo medio.

Esfuerzos de Reynolds

El flujo turbulento se caracteriza en cada punto por el *tensor de esfuerzos* formado por un conjunto de nueve esfuerzos cortantes producto de la agitación turbulenta sobre el área paralela a la pared y sobre los planos normales a la misma. Estos esfuerzos cortantes se conocen como *esfuerzos de Reynolds* o *esfuerzos aparentes*, los que permiten medir las variaciones de energía dentro del flujo.

Las distribuciones de los esfuerzos de Reynolds en las figuras I.2.4 a) y b) muestran la misma estructura general que las distribuciones de velocidad. De la siguiente manera: Los esfuerzos de Reynolds crecen hacia fuera del lecho en la región de la estela próxima al fondo, alcanzando un máximo cerca de la región central de la estela y, luego, decreciendo hasta cero en la superficie libre del agua.

En la figura I.2.5 a) se muestran las intensidades de turbulencia horizontales o componente normal horizontal del tensor de esfuerzos de Reynolds $\rho \overline{u'u'}$. En la I.2.5 b) se muestran las intensidades de turbulencia verticales o componente normal vertical del tensor de esfuerzos de Reynolds $\rho \overline{w'w'}$. En la figura I.2.5 c) se muestra la razón o cociente de las intensidades de turbulencia verticales y horizontales. Las mediciones bidimensionales de la estela presentadas por Townsend (1976) muestran que esta *razón* tiene un valor casi constante de 0.7 en la región entre 0.2 y 0.8 veces la altura de la estela desde la línea central de la misma, éste valor (de la *razón*) es muy similar al obtenido por Nelson *et al.* (1993) en sus mediciones.

Estructura de la turbulencia

Si bien algunos flujos sobre formas de fondo se consideran a menudo como flujos semejantes a la capa límite, el patrón espacial de producción de turbulencia demuestra que esa no es una suposición adecuada, porque con mucho la mayor parte de la producción de turbulencia ocurre en la capa de cortante libre hacia aguas abajo de la cresta de una forma de fondo.

Algunas mediciones hechas por Nelson, para investigar el papel de la aceleración inducida por la topografía que modifica el campo de turbulencia sobre formas de fondo, fueron comparadas a mediciones similares hechas por otros investigadores en flujos aguas abajo de escalones negativos. El resultado de estas comparaciones mostró que la disminución longitudinal del valor máximo de los esfuerzos de Reynolds y de las intensidades de turbulencia hacia aguas abajo del punto de separación es mucho más pronunciada en mediciones sobre formas de fondo que en mediciones similares sobre escalones negativos, donde no se tienen aceleraciones topográficas aguas abajo del obstáculo.

Finalmente Nelson *et al.* (1993) concluyeron que existe una interacción significativa entre la capa límite interna, sobre la pendiente "suave" de la forma de fondo y, la "sobrepuesta" región de estela. Esta interacción produce coeficientes de correlación anómalamente bajos en la capa límite interna, fenómeno que tiene significativas implicaciones para el transporte de sedimento sobre formas de fondo. Este efecto es probablemente el responsable de la inestabilidad básica de la forma de fondo [5]. La distribución espacial de la turbulencia también aporta los posibles mecanismos del transporte de partículas en suspensión provenientes de la carga de fondo, el transporte y la suspensión del sedimento en dunas, Bennett y Best (1995) [6]. Autores como Raudkivi (1966), Müller y Gyr (1982, 1986), Bennett y Best (1995) observaron que la intensidad de la turbulencia y esfuerzos de Reynolds alcanzaron valores máximos a lo largo de la zona de separación del flujo.

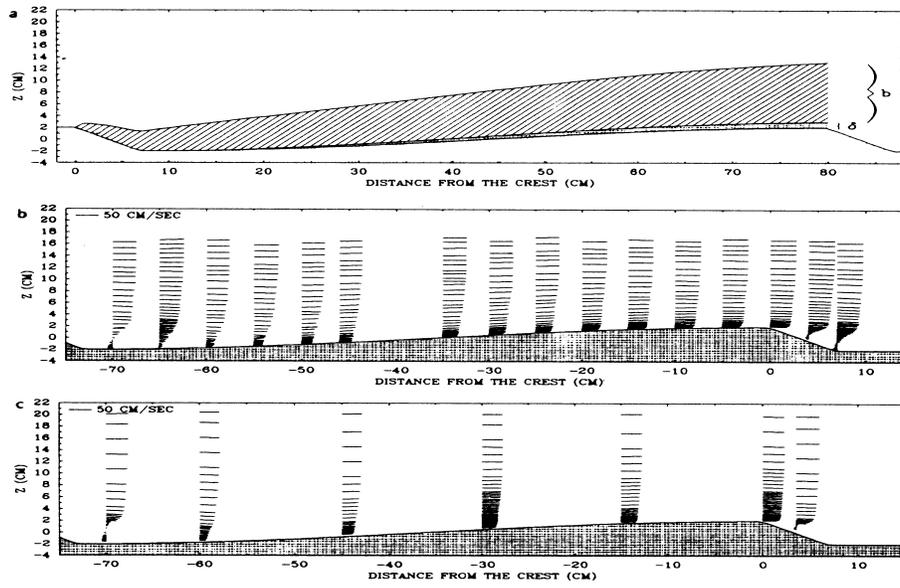


Fig. I.2.2 a) Esquema del flujo sobre formas de fondo bidimensionales, donde δ es la altura de la capa límite interna y b es la altura de la estela. En las figuras b) y c) se muestran los vectores de la velocidad media. En éste y en subsecuentes gráficos, las escalas se muestran en la esquina superior izquierda, Nelson *et al.* (1993) [5].

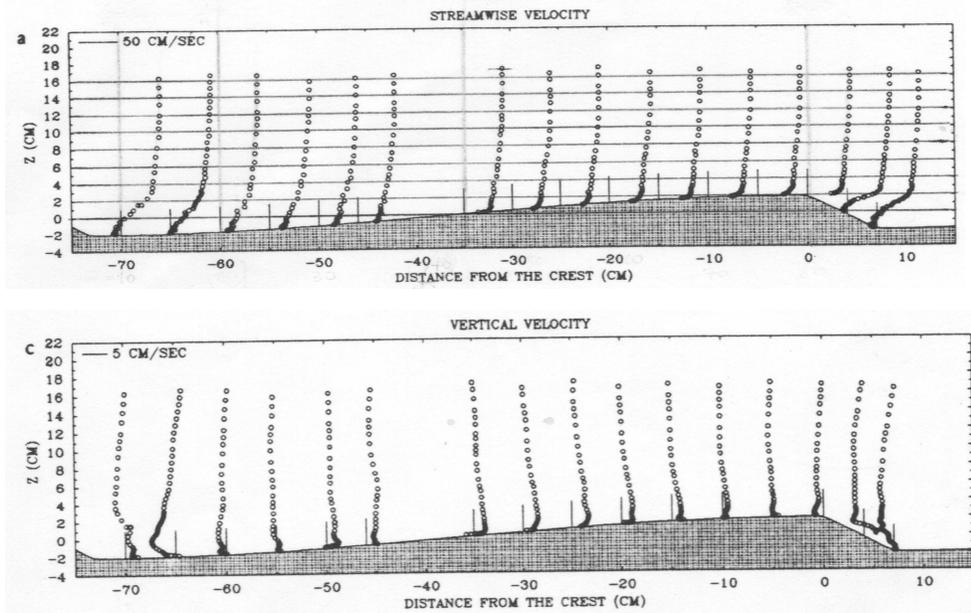


Fig. I.2.3 a) Perfiles de la componente longitudinal de la velocidad y b) Perfiles de la componente vertical de la velocidad. En éstos gráficos y en los subsecuentes, las líneas verticales indican el origen y la localización sobre la duna donde fue trazado el perfil vertical, Nelson *et al.* (1993) [5].

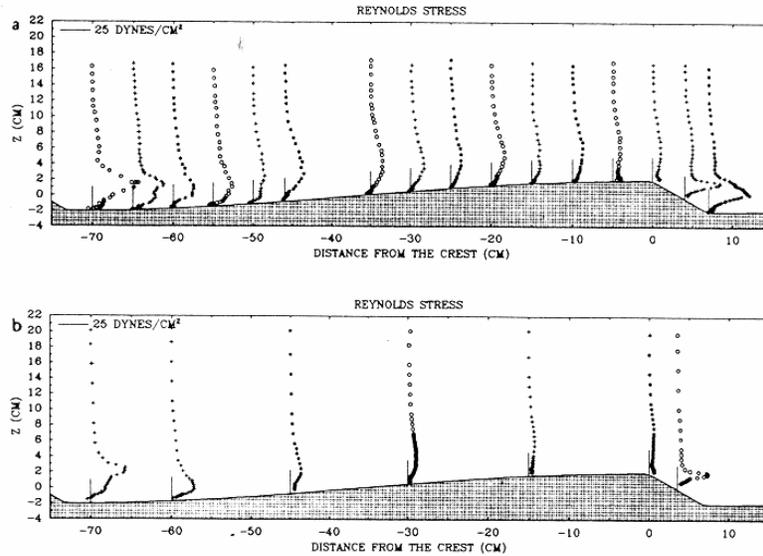


Fig. 1.2.4 a) y b) Perfiles de los esfuerzos de Reynolds ($u' w'$) horizontales y verticales respectivamente, Nelson *et al.*, (1993) [5].

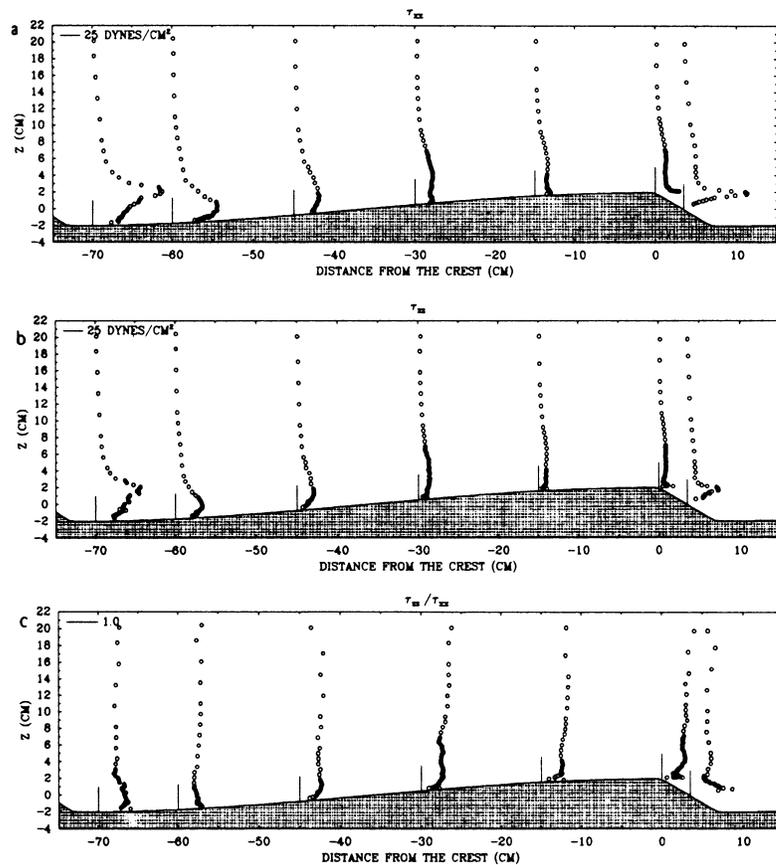


Fig. 1.2.5 a) Perfiles de intensidades de turbulencia horizontales, b) Perfiles de intensidades de turbulencia verticales, c) Perfiles de la razón (o cociente) de las intensidades de turbulencia verticales y horizontales, Nelson *et al.* (1993) [5].

I.2.2 Estructuras coherentes turbulentas sobre formas de fondo

I.2.2 a) Identificación de las Estructuras Coherentes Turbulentas

El movimiento turbulento contribuye significativamente al transporte de momento, calor y masa en la mayoría de los flujos de interés práctico y por ello tiene una influencia determinante sobre las distribuciones de velocidad, temperatura y concentración del sedimento o contaminantes en un campo de flujo, Klebanoff (1954), Kline (1967).

El fenómeno del *Bursting* sobre placa plana fue descubierto por Kline *et al.* (1967) y por Kim *et al.* (1971). Kline encontró que la estructura de la subcapa viscosa consiste de estrías de alta y baja velocidad las que se forman en un periodo de tiempo relativamente regulares. Una característica notable es que estas estrías se levantan gradualmente fuera de la pared empezando a oscilar y a interactuar con el flujo para eventualmente ser eyectadas. Estas eyecciones transportan fluido hacia la superficie formando otras estructuras. La secuencia completa de elevación, oscilación, eyección y rompimiento es usualmente llamado: *Bursting*, Nezu y Nakagawa (1993).

Para comprender mejor el mecanismo del transporte de sedimento, desde un punto de vista hidráulico, es importante conocer la caracterización completa de *Eventos Coherentes Turbulentos*, vinculados éstos a la producción de turbulencia y al transporte turbulento de cantidad de movimiento. En particular resulta de gran interés estudiar la relación entre la ocurrencia de éstos eventos y la resuspensión de sedimentos desde el lecho en canales con fondo móvil, Niño *et al.* (1994).

Actualmente se acepta que la mayor parte de la producción de la turbulencia se origina en los eventos intermitentes y cuasi-periódicos, tanto en el espacio como en el tiempo, denominados *Burts* (o eyecciones) y *Sweeps* (o eventos de barrido), López *et al.* (1996) [26].

Definición de Estructura Coherente Turbulenta

Blackwelder (1987) define a la Estructura Coherente Turbulenta como: “Una porción de fluido vorticoso que ocupa una región espacial confinada tal que ésta mantiene una relación de fase parcial entre las variables del flujo y las componentes del chorro vorticoso al evolucionar en el espacio y en el tiempo”; Nezu y Nakagawa (1993) [25]. O bien, se dice que una estructura es coherente cuando aparecen eventos turbulentos de características similares de manera cuasi-periódica, López *et al.* (1996) [26].

El término Estructura coherente turbulenta es sinónimo de otros, como: estructuras de gran escala, estructuras macroturbulentas o vórtices grandes, los cuales tienen en común la noción de correlación e implica el movimiento colectivo del fluido en una extensión espacial y durante un tiempo de duración o vida.

Ciclo de vida de una estructura coherente vorticosa

Una propiedad inherente a la definición de Blackwelder (1987) es que estas estructuras muestran movimientos dinámicos con un *ciclo de vida*. Primero, su tamaño y extensión varían de una estructura a otra. Segundo, su velocidad de convección es algo aleatoria. Siendo además ésta aleatoriedad la razón por la cual las correlaciones convencionales promediadas del periodo no pueden revelar la existencia de estructuras coherentes, por ejemplo el fenómeno del Bursting. En este sentido se reconoce que las estructuras coherentes tienen un movimiento cuasi periódico y cuasi organizado. Por lo tanto, los vórtices no son totalmente determinísticos en términos de las variables usadas para describirlos. Ocurren periódicamente en flujos laminares y de transición, mientras que en flujos cortantes turbulentos con altos números de Reynolds éstas ocurren aleatoriamente en el espacio y en el tiempo. Así, el investigador debe recurrir a un análisis estadístico que incluya una condición de detección de la estructura coherente, Nezu y Nakagawa (1993) [25].

Origen de los vórtices turbulentos coherentes

Bennett y Best (1995) obtuvieron resultados que detallan la ocurrencia de eventos de alta magnitud en flujos sobre dunas y concluyen que el origen de los vórtices coherentes turbulentos no se encuentra en el clásico Bursting en la capa límite de fondos planos, sino en las Inestabilidades de Kelvin-Helmholtz generadas por la separación del flujo. Es por lo anterior que parece razonable atribuir la diferencia en la dinámica del flujo entre rizos y dunas a la diferencia de velocidad a través de la capa cortante y por lo tanto a la magnitud de las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz. Estas inestabilidades controlan el flujo local, la estructura turbulenta y determinan los modelos de incorporación del sedimento en suspensión y sus tasas de transporte.

Turbulencia y transporte de sedimento

Evidencias experimentales y estudios de campo muestran que la *Macroturbulencia* generada detrás de formas de fondo es muy importante para comprender la dinámica del transporte de sedimento y los procesos de evolución de las formas de fondo, Bennett y Best (1995) [6], Martínez-Austria *et al.* (1998) [23].

Esta evidencia muestra que las estructuras coherentes del flujo turbulento cerca del fondo en canales son bastante eficientes para generar el transporte de sedimento sobre el lecho, particularmente aquellas estructuras relacionadas con eventos intermitentes de *eycción* de fluido desde el lecho hacia la zona externa del flujo, y de *barrido* de fluido de la zona externa hacia el fondo, Niño y García (1996).

La interacción entre la turbulencia y el transporte de sedimento sobre formas de fondo tiene gran influencia en el proceso de crecimiento y evolución hacia el equilibrio de las formas de fondo o estructuras sedimentarias [24]. Este proceso fue observado por Niño y Barahona (1998) tanto en sedimento de tamaño uniforme como en mixto.

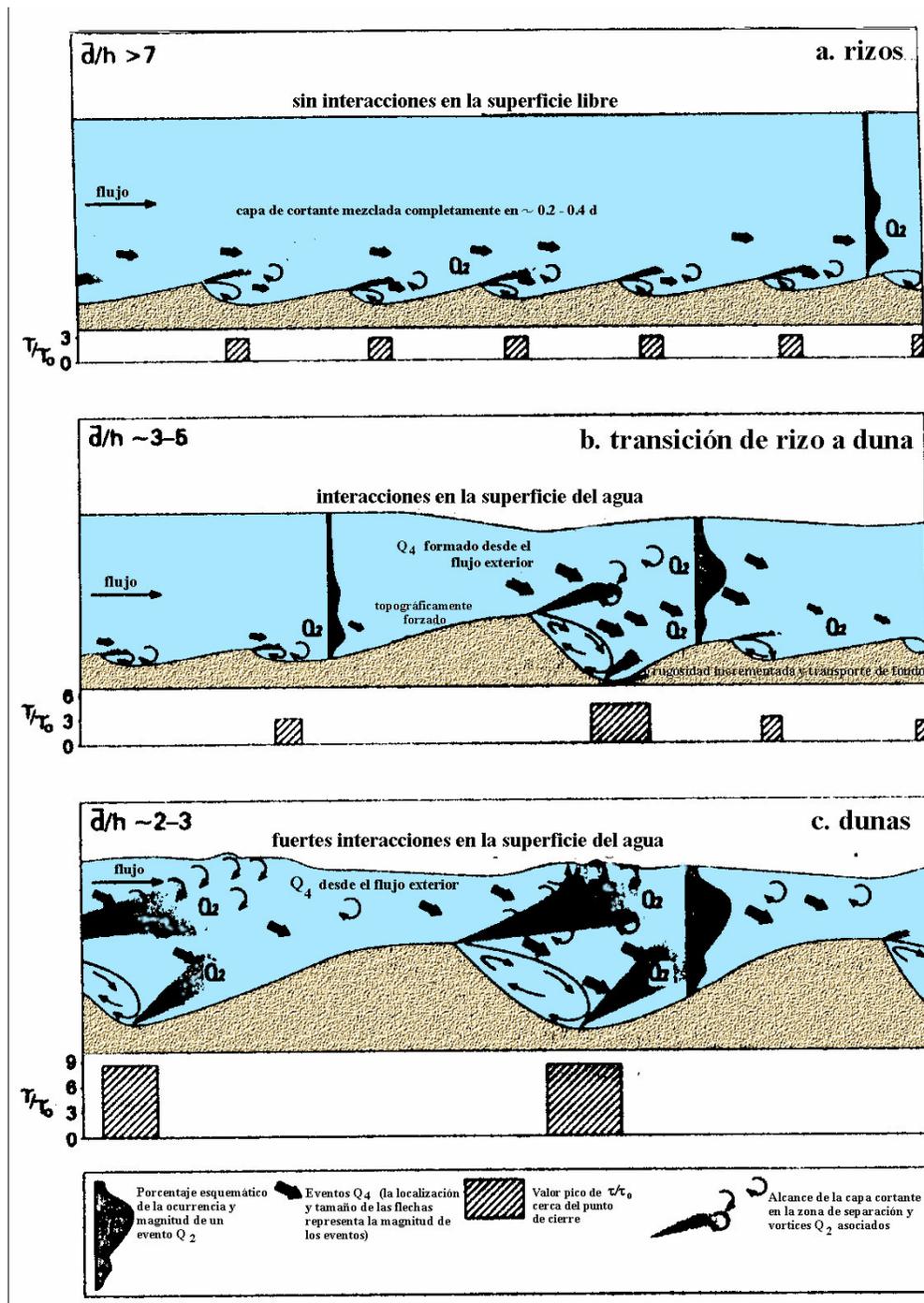


Fig. I.2.6 Modelo esquemático de la variación del flujo y de la estructura turbulenta a través de la transición de rizados a dunas. a) Flujo en equilibrio sobre un lecho con rizados. b) Flujo no equilibrado (etapa de transporte creciente) sobre un fondo con rizados. c) Flujo en equilibrio sobre un lecho con dunas. Los croquis no representan a escala las formas de fondo. Se modificó su escala vertical para destacar los procesos del flujo turbulento presentado. τ/τ_0 representa la razón aproximada entre los esfuerzos de Reynolds, en un tiempo promedio cerca del punto de cierre, y el esfuerzo de Reynolds espacialmente variado en la capa límite sobre la forma de fondo entera, Bennett y Best (1996) [7].

Diferencias entre Rizos y Dunas

Las dunas se diferencian de los rizos, entre otros aspectos, por tener una magnitud mayor y una mas alta intensidad de turbulencia que puede trasladarse a través de la profundidad entera del flujo, lo que se relaciona en general con la extensión de la capa cortante cuyo espesor vertical y longitud son del orden de la altura de la duna y de su longitud respectivamente, Bennett y Best (1995) [6].

Los eventos de eyección asociados con la capa de cortante en rizos se disipan rápidamente y se limitan, por lo tanto, a regiones cercanas al lecho. Por el contrario, los eventos de eyección asociados con la capa de cortante en dunas pueden alcanzar desde $0.6Y$ (Y , profundidad del flujo) y hasta la superficie del agua como *Boils* (ebullición en la superficie) en eventos grandes.

La frecuencia y magnitud de los eventos de eyección son más grandes en dunas que en rizos debido a que los gradientes de velocidad, a través de la capa de cortante en la zona de separación, son más grandes en dunas, Bennett y Best (1995) [6]. La diferencia en frecuencia y magnitud de los eventos de eyección también se ilustra al encontrarse que la intensidad de la turbulencia de la componente longitudinal de la velocidad a lo largo de la capa de cortante (u'_{rms}), y en el punto de cierre, es significativamente mayor en dunas que en rizos y escalones negativos. $\frac{u'_{rms}}{U_o}$ donde U_o es la velocidad cercana a la corriente libre, Bennett y Best (1995) [6].

Finalmente es claro que las intensidades de turbulencia y, la frecuencia y magnitud de los eventos de eyección asociadas con la separación del flujo sobre dunas son más grandes que las observadas sobre rizos.

Mecanismo de transición de Rizos a Dunas

Las altas concentraciones del sedimento en suspensión en el flujo externo y la ocurrencia de eventos macroturbulentos (por ejemplo los Kolk-Boils; especialmente ausentes en el flujo sobre rizos) son también una consecuencia directa del acelerado crecimiento y desarrollo de la capa de cortante durante la transición de rizos a dunas. Ver figura I.2.6.

Identificación de Estructuras Coherentes Turbulentas

En el trabajo realizado por Martínez-Austria *et al.* (1998) identificaron cinco tipos de estructuras turbulentas sobre formas de fondo fijas bidimensionales las cuales se representan en la siguiente figura:

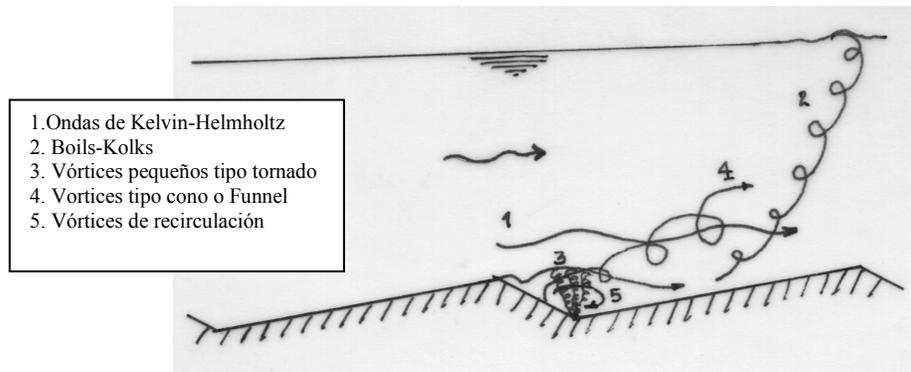


Fig. I.2.7 Representación esquemática de las diferentes estructuras turbulentas sobre formas de fondo fijas y bidimensionales en un canal de laboratorio.

1. Ondas de Kelvin-Helmholtz generadas en la capa de cortante debido a la interacción entre el flujo medio y el flujo estacionario en la zona de separación donde se presentaron inestabilidades del tipo Kelvin-Helmholtz. Estas ondas fueron identificadas por Müller (1985) y Best (1996) en condiciones semejantes a las del experimento de Martínez-Austria *et al.* En éste se observó que al aumentarse la velocidad del flujo también lo hacía la frecuencia de la estructura. Por lo que es muy probable que estas ondas cuasi periódicas produzcan cambios en la longitud de la zona de recirculación y que, sobre fondos móviles, sean las responsables del crecimiento de las formas de fondo.

2. Kolks-Boils estas estructuras resultan de la interacción del flujo topográficamente acelerado y las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz producidas por la separación del flujo detrás de la duna. Los Kolks-Boils observados aparecieron adelante del punto de cierre de la zona de recirculación, lo cual concuerda con las observaciones de Nezu (1997). Otros autores han reportado que al ir creciendo la forma de fondo también se incrementa la magnitud y frecuencia de las eyecciones alcanzando incluso la superficie libre del agua en forma de Boils (ebullición), lo que a su vez puede inducir velocidades más altas del fluido hacia el fondo.

3. Vórtices verticales semejantes a pequeños tornados. Estos vórtices se observaron en la parte más baja entre una duna y la siguiente, generándose en forma intermitente. Estos crecieron hasta alcanzar la capa de cortante donde fueron barridos por el flujo sobre la cresta. De acuerdo con Levi (1972) el mecanismo de generación de estos vórtices es el de los *vórtices sin fricción* asociados a una corriente de agua que se desacelera por el cambio de sección. Una característica de esta estructura es que su eje es vertical y normal al fondo y aparecen en condiciones de inestabilidad del flujo. En este modelo una parte del exceso de la cantidad de movimiento del flujo se transfiere a la fuerza centrípeta de los vórtices.

4. Vórtices en embudo o cono (funnel). Estos vórtices se originan en un punto sobre la pendiente más pronunciada de la forma de fondo, abriéndose en espiral al irse separando de la duna y moviéndose en dirección de la corriente principal hacia la superficie libre del agua. Este tipo de vórtices es semejante al descrito por Kaftori *et al.* (1995), visualizados en la región de pared sobre fondo plano.

5. Remolinos o vórtices de recirculación. Estos remolinos en forma elíptica, transversales a la dirección principal de la corriente, se encuentran en la zona de separación dentro de la cual el flujo recircula. Aquí es importante observar que la capa de cortante del flujo hace contacto intermitentemente a la pendiente de la siguiente forma en el punto de cierre de la zona de recirculación. En cierto momento el vórtice de recirculación se rompe, se despega la capa de cortante y se forman vértices de escalas menores, los que avanzan hacia aguas abajo.

Vórtices Kolk-Boil

Las estructuras macroturbulentas más conocidas sobre formas de fondo son las denominadas *Kolks-Boils* las que fueron estudiadas por Coleman (1969), Jackson (1976), Itakura y Kishi (1980), Nezu *et al.* (1980). Estos *Boils* parecen ser la manifestación en la superficie, como un movimiento lentamente rotativo, de un vórtice ascendente e inclinado originado en el fondo (denominado *Kolk*). Varios autores en estudios de campo recientes han cuantificado las altas concentraciones de sedimento en suspensión asociadas con estos eventos, Bennett y Best (1995) [6].

Se ha obtenido evidencia de que éstos eventos turbulentos de alta magnitud (Kolk-Boil) son capaces de arrastrar sedimento, y de que contribuyen a generar erosión y transporte sobre la pendiente suave de la duna y un alto depósito sobre la cresta de la misma. Este patrón especial de incorporación, transporte, suspensión y depósito es controlado por la formación y corrimiento, arriba y abajo, de la capa de cortante en la zona de separación, Bennett y Best (1995) [6].

Mecanismo de generación de un Kolk-Boil

Las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz generan un vórtice separado inmediatamente aguas abajo de la cresta de la duna, de la misma manera que en una capa de mezclado. Estos vórtices crecen y coalescen a medida que se acercan al punto de cierre de la zona de recirculación. Este proceso es acompañado de una entrada intermitente de fluido a la zona de recirculación que periódicamente genera movimientos de baja frecuencia en el punto de cierre de la zona de recirculación provocando que ésta fluctúe hacia aguas arriba y abajo. Como resultado de este complicado mecanismo tridimensional de regeneración (feed-back), que modifica la ubicación del punto de cierre y al típico mecanismo autoinducido de un vórtice *tipo horquilla*, se eyecta un vórtice coherente de gran escala o Kolk-Boil, desde el punto de cierre hacia la superficie del agua.

Por lo anterior la ocurrencia de los Kolk-Boil es intermitente y algo aleatoria en el tiempo. Sin embargo, éstos tienen un comportamiento cuasi cíclico similar al de los Bursting.

Los Kolk-Boil con mas energía formados sobre dunas desarrolladas transportaron una cantidad importante de sedimento hacia la superficie libre del agua. Estas características de los Kolk-Boil son semejantes a las obtenidas por Matthes (1947) en ríos.

Se concluye que los Kolk-Boil del primer tipo generados en dunas desarrolladas juegan un papel importante en el transporte de sedimento en ríos, Nezu y Nakagawa (1991^a).

Algunos investigadores experimentalistas propusieron un mecanismo de formación de un Kolk-Boil del primer tipo, mismo que se describe en el diagrama de la figura I. 2. 8, resultado de estudios visuales y mediciones con LDA (Lasser Doppler Anemometer) .

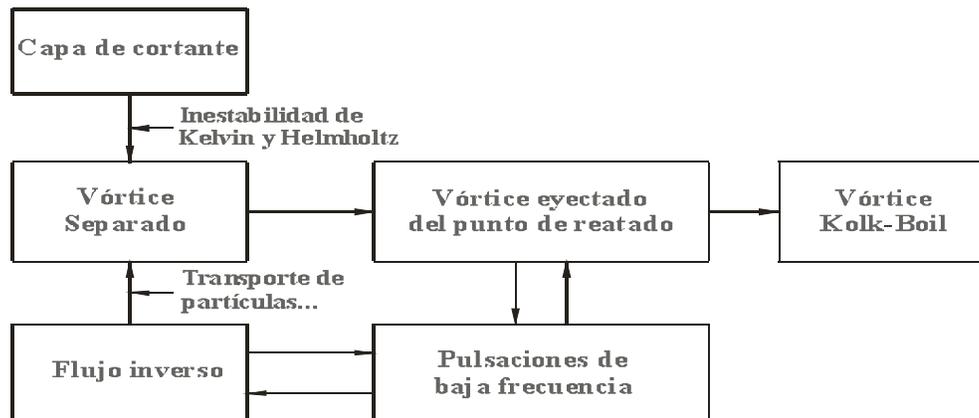


Fig. I.2.8 Mecanismo de *feed-back* o retroalimentación de estructuras coherentes detrás de dunas en canales. Entrainment.- Transporte de partículas en suspensión provenientes del fondo.

Tubo vorticoso bidimensional

Müller y Gyr (1986) también realizaron visualizaciones de vórtices coherentes generados aguas abajo de la cresta de la duna y propusieron el modelo conceptual de la formación vorticososa mostrada en la fig. I.2.9.

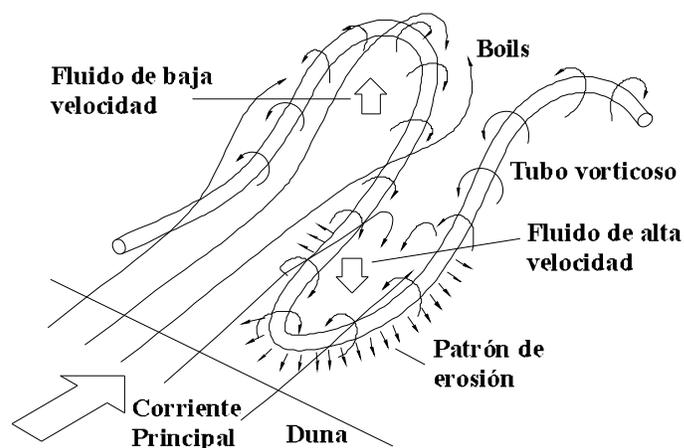


Fig. I.2.9 Modelo conceptual de la formación e inestabilidad lateral de un tubo vorticoso detrás de una duna, Müller y Gyr (1986).

Haciendo una analogía con la formación de pares de vórtices en la capa de mezclado, Müller y Gyr (1986) sugirieron que el tubo vorticoso bidimensional separado de la cresta se transforma en un vórtice semejante a una “horquilla”, debido a su inestabilidad lateral, y que la *cabeza* de éste vórtice, asociada con flujos de baja velocidad, se trasladaría en forma ascendente y aparecería como una ebullición vorticosa (Boil) en la superficie libre del agua.

I.2.2 b) Inestabilidad en un flujo

En la noción central de *inestabilidad* se establece que una configuración es *inestable* cuando pequeñas perturbaciones en el flujo tienden a amplificarse. Una *inestabilidad inicial* es generalmente la primera etapa de una secuencia de cambios en el flujo. Normalmente el resultado final de esta secuencia es que el flujo inicialmente laminar *se hace* turbulento. Con frecuencia es posible identificar las características esenciales del mecanismo de desestabilización, por lo que son importantes los estudios experimentales que aporten información sobre estas características. En algunos casos, la dinámica de los procesos de desestabilización es bastante sutil, por lo que no es posible identificar todas las configuraciones que pueden, o pudieran, hacerse inestables empleando únicamente argumentos físicos. En cualquier caso, aún cuando lo anterior pudiera lograrse, solo se podría conocer si éstas configuraciones son estables o no, sin datos cuantitativos, Tritton (1988) [30].

Inestabilidad en Flujos Cortantes

Algunos de los casos más importantes de inestabilidad en fluidos en movimiento se ubican dentro de la categoría general de la inestabilidad en flujos cortantes. Un flujo cortante es aquel en el que se presenta una diferencia de velocidades relativas, en la misma o en diferentes direcciones del flujo. Figura I.2.10. El ejemplo más simple, aunque no corresponde a una situación física inmediata, es el de un flujo con una discontinuidad finita como la que se muestra en la figura I.2.10 b.

Inestabilidades de Kelvin-Helmholtz

Las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz son la fuente de la macroturbulencia sobre dunas. Un flujo cortante sujeto a una inestabilidad finita denominada de Kelvin-Helmholtz se puede *ver* de la siguiente manera: El desarrollo de un disturbio se considera en un marco de referencia en el que dos velocidades son iguales y opuestas [Figs. I.2.10 c y d], para que, por simetría, el disturbio no viaje con el flujo. La frontera entre éstos dos flujos moviéndose en direcciones opuestas se hace ligeramente ondulada debido al esfuerzo cortante generado entre ellos. [Fig. I.2.10 e] Esto causa que el fluido sobre el lado convexo de la frontera (p.e. en A y D) se mueva ligeramente más rápido que sobre el lado cóncavo (p.e. en B y C). En un flujo en estado permanente se podría incluso aplicar la ecuación de Bernoulli a lo largo de cada tubo de corriente. El disturbio causará los cambios de presión dados por los signos + y - en la figura I.2.10 e. De ésta manera no hay posibilidad de que el disturbio adquiera un estado estable, por otro lado los gradientes de presión están en direcciones que producen una amplificación del disturbio. Esto es una aceleración del fluido sobre A y hacia fuera de ésta, y una aceleración debajo de B y hacia ésta. Tales aceleraciones amplifican la perturbación. Se ha realizado observaciones más detalladas de éste modelo en flujos estratificados, sobre todo porque la estratificación proporciona un método conveniente de producir un flujo cortante con una pequeña variación del flujo, Tritton (1988) [30].

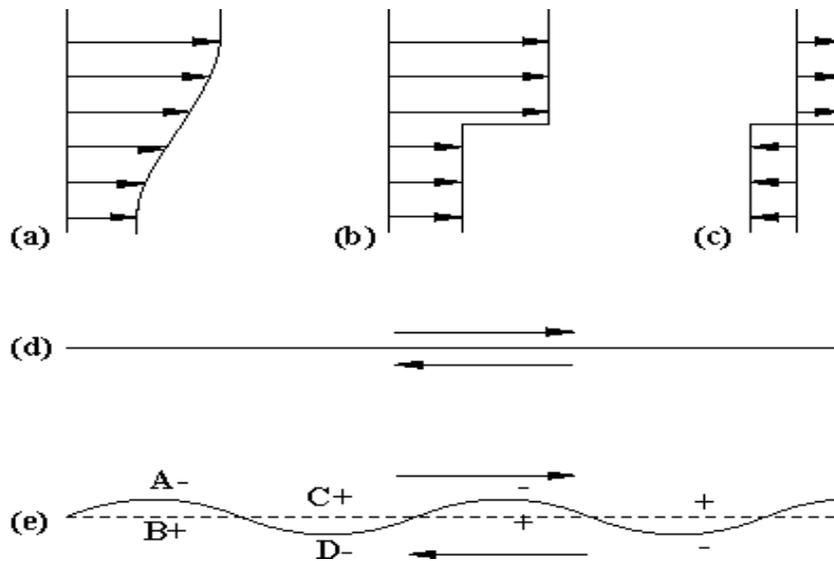


Fig. I.2.10 Esquema que ilustra la causa de las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz.

Las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz también se presentan en la capa de cortante sobre la cresta de una forma de fondo. La formación de las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz son procesos cuasi-periódicos originados por perturbaciones que generan oscilaciones con frecuencias que pueden ser amplificadas por el campo de flujo. Estas inestabilidades evolucionan en vórtices discretos que pasan por ciclos de formación de pares de vórtices a formar grandes estructuras vorticosas (fig. I.2.11). Esta zona de pares de vórtices bidimensionales puede extenderse casi 1.5 veces la altura de la duna, hacia aguas abajo de la cresta, Müller y Gyr (1987) [12].

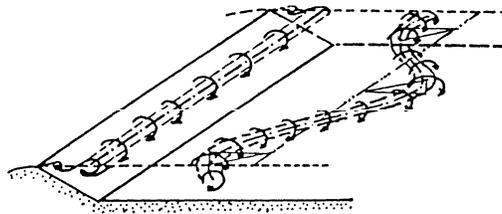


Fig. I.2.11 Esquema que muestra la formación de vórtices y la inestabilidad lateral de un tubo vorticoso, Müller y Gyr [12].

Inestabilidad Inicial

Existen dos condiciones del flujo en las que una capa de cortante se hace inestable: Cuando se forma una capa de mezclado y cuando se forma una capa de cortante. Si bien para algunos experimentalistas es más fácil estudiar una capa de mezclado estable (fig. I.2.12 a), algunos teóricos prefieren considerar una capa de cortante (Fig. I.2.12 b) que establecer simples condiciones iniciales y de frontera en una capa de mezclado. Sin embargo ambos flujos tienen algo en común, que desarrollan ondas (en diferentes longitudes de onda) que eventualmente se transforman en vórtices discretos, Müller y Gyr (1987) [12].

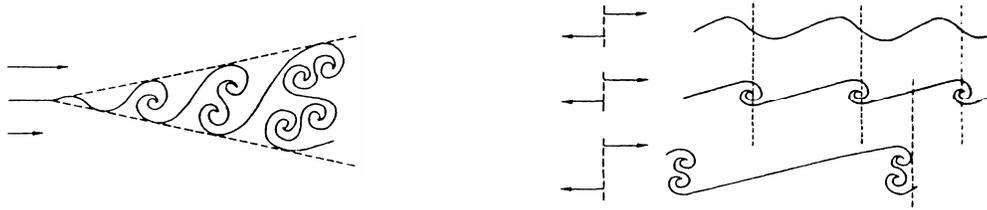


Fig. I.2.12 a) Capa de mezclado

b) Capa de cortante

Helmholtz fue el primero en describir la inestabilidad en una capa de cortante. En un análisis de estabilidad de la capa de cortante se puede calcular la evolución de $\eta(t)$, si el espesor d del plano vorticoso es pequeño comparado con la longitud de onda λ de las deformaciones η .

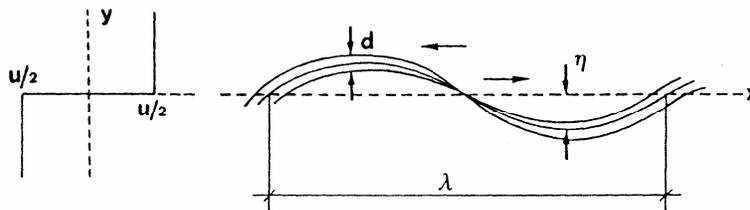


Fig. I.2.13 Esquema de la capa de cortante para el análisis de estabilidad, donde el espesor d es pequeño comparado con la longitud de onda λ .

Müller y Gyr (1987) obtuvieron en su experimento un valor de $\lambda=10d$, el cual comparado con el valor reportado por Michalke (1964) de $\lambda=7d$, está dentro de los márgenes de error.

Formación de pares de vórtices

Observando la figura I.2.12 b para una capa de cortante se tiene que: una vez que la vorticidad se concentra en una hilera de vórtices se inicia una segunda inestabilidad por encima de ésta. Si la distancia entre vórtices adyacentes disminuye debido a un pequeño disturbio, estos vórtices empiezan a interactuar entre sí dando lugar a un proceso de formación de pares de vórtices. La estabilidad de una hilera de vórtices en líneas paralelas fue analizada en dos dimensiones por Lamb (1945) [12] concluyendo que es más probable

que se da del proceso de *coalescencia* en dos vórtices que en tres o más. Una vez que la primera generación de vórtices “pasa” el proceso de formación de pares de vórtices, éstos están listos para el siguiente proceso de formación y así sucesivamente, dando lugar a una *cascada* de ciclos de formación de vórtices.

Jiménez (1983) [12] visualizó vórtices longitudinales interconectados al tubo vorticoso transversal, lo que indica que el flujo aún sobre dunas bidimensionales es altamente tridimensional. Por otro lado, Aref (1983) [12] señaló que los vórtices pierden coherencia durante el proceso de formación de pares de manera que el número de pares que se pueden formar es limitado. Por lo anterior es lógico que la capa de mezclado detrás de dunas naturales no se comporte exactamente como la capa de mezclado detrás de dunas fijas en un canal de laboratorio cuidadosamente diseñado.

Angulo de difusión de la Capa de Mezclado

El ángulo de difusión (α) de la capa de mezclado (fig. I.2.14) [12] está dado por el tamaño del radio (r_n) del vórtice de la n -ésima generación dividido entre la distancia (x_n) del origen al vórtice.

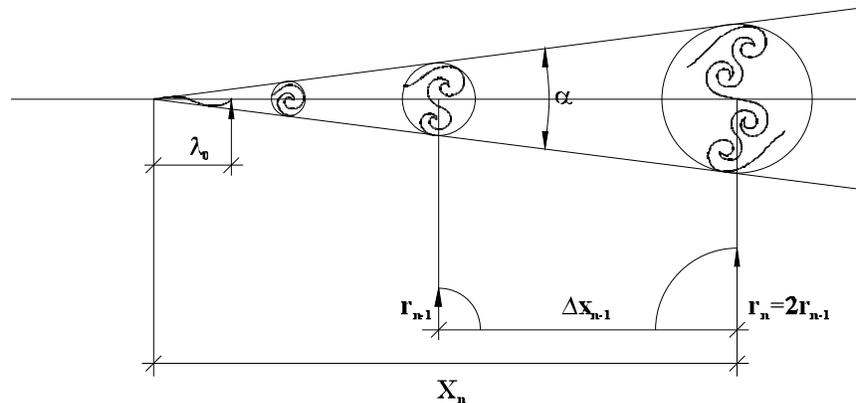


Fig. I.2.14 Angulo de difusión, tamaño y distancia en la formación de pares de vórtices en una capa de mezclado [12].

El radio (r_n) y la longitud de onda (λ_0) se pueden relacionar con el valor de la inestabilidad inicial y viceversa.

$$r_{n+1} = 2r_n = 2^n r_0$$

$$\lambda_{n+1} = 2\lambda_n = 2^n \lambda_0$$

por lo que:

$$\alpha = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{r_{n+1}}{2\Delta x_n} \right)$$

donde la distancia (x_n) se puede calcular mediante la velocidad convectiva, si se conoce el intervalo Δx_n entre pares de vórtices.

Utilizando los resultados numéricos de Acton (1976)¹, Müller y Gyr (1986) señalan que el intervalo de tiempo no adimensionalizado ΔT_n del n-ésimo proceso de formación de pares de vórtices corresponde a un tiempo Δt_n de:

$$\Delta T_n = \frac{tU}{2\lambda_n} = 1.6$$

$$\Delta t_n = \frac{1.6 * 2\lambda_n}{U}$$

Donde la distancia Δx_n es igual a:

$$\Delta x_n = \frac{\Delta t_n U}{2} = 1.6 \lambda_n$$

Y, por lo tanto, el ángulo de difusión se hace:

$$\alpha = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{r_n}{1.6 \lambda_n} \right) = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{r_0}{1.6 \lambda_0} \right)$$

Donde, el radio del vórtice inicial puede relacionarse con el área correspondiente del plano vorticoso enrollado de espesor (d): $\pi r_0^2 = \lambda_0 d$ que conduce a un ángulo de difusión:

$$\alpha = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\sqrt{\frac{d}{\pi \lambda_0}}}{1.6} \right)$$

El cual depende directamente del espesor (d) del vórtice inicial plano (ver fig. I.2.13) y de la longitud de onda de la inestabilidad inicial λ_0 .

¹ Acton (1976) reportó un experimento numérico sobre el desarrollo de una capa cortante finita, que fue modelada por una banda de vórtices discretos perturbada en una longitud de onda λ . Muestra gráficamente los resultados numéricos de la inestabilidad y la formación del primer par vorticoso en la banda o estrato vorticoso.

I.2.2 c) Frecuencia de las estructuras

Ley de Strouhal, una ley universal

Las observaciones de la producción de Kolks en ríos o de su manifestación en la superficie en forma de borbollones (Boils), permiten concluir que en dicho proceso existe cierta periodicidad. Korchokha (1968) fue el primero en señalar claramente este hecho, resultado de observaciones que llevó a cabo en el río Pomolet cuando estudiaba el movimiento de las dunas del fondo. Luego Roscoe Jackson (1976) realizó mediciones sistemáticas en la parte baja del río Wabash y, juntando sus resultados con los de Korchokha, halló que el periodo

adimensionalizado en promedio: $T_b = \frac{T \bar{U}}{Y} = 7.6$ (1) siendo \bar{U} la velocidad media del río,

T el periodo de aparición de los Boils y Y la profundidad del río.

Levi (1978) [41] realizó un trabajo experimental en el Laboratorio Hidráulico de la Universidad de Padua para averiguar la periodicidad de los vórtices formados aguas arriba de un vertedor rectangular de pared delgada, encontrando valores aproximados al de la formula (1). Levi continuó su investigación en México con diferentes alturas de pantalla y gastos, obtuvo valores de $T_b = 5.9$ a 7.1 , con un promedio de 6.50 (2)

Posteriormente en sus estudios sobre vórtices que nacen tras una pantalla cuando la corriente pasa por debajo, Levi encontró que su periodicidad promedio fue de $T_b = 5.8$ (3).

Y como la frecuencia f es el inverso del periodo T , el parámetro $T_b = \frac{T \bar{U}}{Y}$ es el inverso del

número de Strouhal $S = \frac{f Y}{\bar{U}}$. Invertidos los parámetros T_b (2) y (3), obtuvo $S = 0.154$ y

0.176 , respectivamente, valores muy próximos a $S = 0.16$ encontrado por Roshko para una estela, considerando Y como el ancho de la misma.

Vórtices de estela, de vertedor y de pantalla, tan distintos en su naturaleza, parecían obedecer a la misma Ley de Strouhal. La razón de esto se explica con detalle en capítulo VIII del libro de Levi "El Agua según la ciencia". En este trabajo el número adimensional de Strouhal expresa la frecuencia adimensional de desprendimiento de vórtices o estructuras en la duna experimental correspondiente a una velocidad media del flujo externo. Esta frecuencia adimensional no debe confundirse con el concepto estadístico de frecuencia f , en la expresión del número S .

La ley de Strouhal o ley general de Inestabilidad se ha usado para describir muchas características casi periódicas de actividad turbulenta, incluyendo la generación de Kolk-Boils en ríos y estuarios, Babakaiff y Hickin (1996) [33]. Kostaschuk y Church (1993) sugieren que la relación de Strouhal puede describir adecuadamente la periodicidad (T) de

formación de los vórtices Kolk-Boil: $T = \frac{2\pi Y}{\bar{U}}$

Periodicidad de los Kolk-Boil sobre dunas

Jackson (1976) obtuvo empíricamente la periodicidad de los Boils sobre dunas, como:

$$T_b = \frac{TU}{Y} \approx 3 - 7$$

donde T es el periodo del Boil, U es la velocidad media y Y es la profundidad del flujo. Según Rao (1971) el valor del periodo $T_b \cong 3-7$ es idéntico a la periodicidad de los Bursting en la capa límite turbulenta. Jackson (1976) y Yalin (1977) concluyeron que la fuente de los Boil, y por lo tanto el origen de las formas de fondo, debe estar relacionado con los Bursting en la capa límite sobre fondo plano. Jackson sugiere además que el hecho de que el periodo del Bursting y del Boil obedezcan ambos a la función de densidad log-normal, apoya su hipótesis en el sentido de que los Boils están relacionados con los Bursting en la capa límite turbulenta. Pese a su amplio reconocimiento, la ubicación y mecanismos de desarrollo del Boil aún no se conocen totalmente, Nezu y Nakagawa (1993) [25].

Por otro lado, la fluctuación del punto de cierre de la zona de recirculación en un canal es similar a la observada tanto en flujos sobre escalones, Eaton y Johnston (1982); como en flujos separados de un borde delantero, Cherry *et al.* (1984) y Kiya y Sasaki (1985). Así, una estructura coherente en la forma de un Kolk-Boil es el resultado de la fluctuación del punto de cierre. Jackson (1976) encontró en observaciones de campo que el periodo medio de las fluctuaciones de baja frecuencia de la velocidad y de la presión en la pared cerca del punto de cierre es solo ligeramente menor que los valores del periodo medio del Boil calculados con la ecuación siguiente: $\bar{T}_{boil} U_{max}/Y \cong 7.6$.

Es bien conocido que el vórtice tipo *ojo* detrás de rizos y dunas tiene una vida intermitente en el tiempo y en el espacio. La frecuencia de ocurrencia del vórtice satisface en promedio la siguiente expresión: $f A_r = 1/T$ donde f es la frecuencia de ocurrencia del vórtice, T es el periodo de ocurrencia del vórtice y A_r el área representativa ocupada por el vórtice. De acuerdo con Ikeda y Asaeda (1983) la frecuencia adimensional expresada en la siguiente ecuación es una constante $UT/h = cte$. Asaeda *et al.* (1989) para confirmar la ecuación y su valor constante diseñaron un experimento en canal con fondo rizado de 20 m de largo y 0.40 m de ancho y video grabaron la formación de los vórtices para investigar su periodo de formación. Con los resultados construyó una grafica que muestra el valor de la frecuencia adimensional como una función del número de Reynolds y de la cual concluye que esta frecuencia adimensional es constante y que adquiere un valor de 7.5, valor muy semejante al presentado por otros investigadores. Conviene aquí mencionar que Tamai *et al.* (1987) hallaron que la duración del vórtice es aproximadamente igual al periodo de desprendimiento del mismo vórtice.

Periodo adimensional de formación de estructuras coherentes sobre dunas, $T * \bar{U}/Y$		
Korchokha (1968)	7.6	Kolks-Boils en rios.
Jackson (1976)		
Jackson (1976)	7.6	Unión capa cortante, observaciones de campo.
Rao (1971)	3.2 a 6.8	Bursting, capa límite turbulenta
Jackson (1976)	3.0 a 7.0	Boils, formulas empíricas.
Asaeda <i>et al.</i> (1989)	5.05-8.2	Boils,
Espinoza (---)	7.2	Boils, Re = 18,400.
Periodo adimensional de formación de vórtices, $T * \bar{U}/d$		
Levi (1978)	7.6	Vórtices aguas arriba en flujo bajo pantalla
Levi (---)	5.9 a 7.1 Prom = 6.5	Para diferentes alturas de pantalla y gastos
Levi (---)	5.68	Detrás de pantalla con descarga de fondo
Periodo de formación de estructuras, $T = \frac{f * \bar{U}}{h_0}$		
Best y Reid (2000)	5 a 7	Separación de vórtices discretos, Dunas
No de Strouhal $S = f * Y/U$ Frecuencia adimensional de desprendimiento de estructuras coherentes		
Levi (1978)	0.154 a 0.176	Vórtices, flujo bajo pantalla.
Roshko (1954)	0.16	Ancho de Estela detrás del cuerpo
Bennett y Best (1995)	0.17	Propagación vorticiosa, dunas, 2-3.5 Hz, tirante 2 cm.
Bennett y Best (1995)	0.83	Propagación vorticiosa, dunas, 1.0-1.5 Hz, tirante 4 cm.
Levi (1983-1991)	≈0.6	Macro turbulencia, propagación vorticiosa sobre dunas
Itakura y Kishi (1980)	0.14 a 0.16	Propagación vorticiosa sobre dunas
Levi (1983-1991)	0.14 a 0.16	Propagación vorticiosa sobre dunas
Von Kármán	≈ 0.20	Desprendimiento de vórtices detrás de un cilindro. 1,000<Re<200,000
Asaeda <i>et al.</i> (1989)	0.122-0.198	Boils sobre dunas, 14250<Re<25750
Espinoza (---)	0.139	Boils sobre dunas, Re=18,400

Tabla I.2.1 Periodo adimensional, Periodo y Frecuencia adimensional del desprendimiento de estructuras coherentes turbulentas detrás de dunas.

Frecuencia de propagación vorticiosa

Levi (1983, 1991) sugirió que la macroturbulencia sobre dunas se debe a la propagación vorticiosa, cuya frecuencia f , se determina mediante la relación de Strouhal:

$$S_t = \frac{fY}{U} \approx 0.6$$

donde S_t es el número de Strouhal, Y es la profundidad del agua sobre la duna y U es la velocidad media. Bennett y Best (1995) obtuvieron los siguientes valores de la frecuencia de propagación vorticiosa de los principales eventos turbulentos que ocurren en el flujo sobre dunas; de 2 a 3.5 Hz y de 1.0 a 1.5 Hz para 2 y 4 cm de profundidad sobre la duna respectivamente. Estas frecuencias de propagación produjeron números de Strouhal de entre 0.17 y 0.83, valores similares fueron obtenidos por Levi (1983, 1991) e Itakura y Kishi (1980) de 0.16 y 0.14.

Respecto del rango de frecuencias encontrado en éstos experimentos Müller y Gyr (1986) opinan que éste refleja la propagación intermitente de vórtices de diferente tamaño y periodo, además de la *amalgamación* o *coalescencia vorticiosa* y la formación de pares de vórtices a lo largo de la capa de cortante.

Frecuencia de las Ondas de Kelvin-Helmholtz

Las ondas de Kelvin-Helmholtz son movimientos de periodo largo de la capa de cortante generadas detrás de dunas. Estas ondas tienen una frecuencia adimensional de $f_s < 0.1$, donde $f_s = \frac{fX_r}{U}$; Simpson (1989), Nelson *et al.*, (1993), y una frecuencia no adimensional de aproximadamente 0.3 Hz. Sin embargo los pocos datos de muestreo no permiten un examen adicional de ésta propuesta. Además es probable que la capa de mezclado esté asociada con vórtices longitudinales generados a lo largo del “trenzado” entre inestabilidades de Kelvin-Helmholtz, lo que también contribuye a la eyección del fluido a la corriente exterior, Bennett y Best (1995) [6].

Frecuencia de las Ondas de Kelvin-Helmholtz en un escalón negativo

La visualización de la separación del flujo detrás de un escalón negativo hecha por Simpson (1989) muestra que el punto de cierre de la zona de recirculación tiene un corrimiento hacia aguas arriba y abajo. Después mediante mediciones se encontró que la localización del punto de cierre promediado en un tiempo corto fluctúa en ± 2 alturas de escalón, respecto de la localización del mismo punto durante un largo tiempo. La

frecuencia adimensional de éste movimiento es: $\frac{fX_R}{U_0} \approx 0.6 - 0.8$, de acuerdo con los

resultados de Driver *et al.* Donde: X_R es la distancia media desde el escalón hasta el punto de cierre y, U_0 es la velocidad del flujo externo hacia aguas arriba del escalón. El valor anterior de 0.6 coincide con el valor de la frecuencia de propagación vorticiosa de eventos turbulentos sobre dunas encontrado por Levi (1983, 1991) determinada mediante la relación de Strouhal lo cual sugiere una relación entre ambos fenómenos.

1.2.3 Separación del flujo

I.2.3 a) Definición

En esta sección se describe el comportamiento de los *flujos con separación* bidimensionales, los que ocurren debido a gradientes de presión adversa alrededor de cuerpos hidrodinámicos y no hidrodinámicos.

Se entiende por *separación* al proceso entero de desprendimiento de la capa límite del flujo de las paredes de un cuerpo. Esta separación se caracteriza por un rápido crecimiento de la capa límite y por valores altos de la componente de la velocidad normal a la pared del cuerpo, Simpson (1989) [29].

Debido a que la *separación* está estrechamente relacionada con la resistencia viscosa del fluido, el número de Reynolds (Re) es un indicador del inicio de la separación, ya que éste parámetro adimensional es la razón entre las fuerzas inerciales y las viscosas.

I.2.3 b) Separación de la capa límite

Con un gradiente de presión adverso, el fluido que se encuentra cerca de la frontera se retarda continuamente y se puede llegar a invertir el flujo. La inversión ocurrirá cuando $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$ para $y = 0$. La condición de continuidad obligará a que el fluido en la capa límite se desvíe de tal forma que se separa de la pared. Este fenómeno se conoce como *separación de la capa límite*, cuyo patrón de líneas de corriente se muestra en la figura I.2.15. Esta clase de separación se presenta siempre que el gradiente de presión sea adverso y severo o se presente a lo largo de una gran distancia.

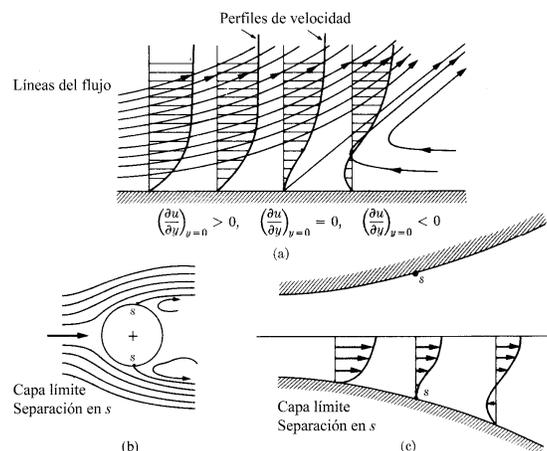


Fig. I.2.15 a) Patrón de líneas de corriente en la vecindad del punto de separación. b) Separación de la capa límite a través de un cilindro c) Separación de la capa límite en un difusor.

En la figura anterior se muestran tres ejemplos clásicos de separación de la capa límite por un gradiente de presión adverso. Sobre una placa plana, a través de un cilindro y en un difusor.

Condiciones de separación.

En la discusión de cómo y cuando ocurre la *separación*, la atención se centra en el flujo uniforme y bidimensional. Estas características del flujo son suficientes para ilustrar los principios implicados en la *separación* debido a que los detalles del flujo tridimensional e inestable son considerablemente más complejos. El término inestable como lo emplea Simpson (1989) se refiere a un movimiento organizado dependiente del tiempo, en contraste con el movimiento de la turbulencia relativamente sin periodo.

Ahora bien, la cuestión de si ocurrirá o no la separación estriba en la posibilidad de que se desarrolle un gradiente de presión adverso sobre una pared lo suficientemente grande para que se dé tal separación.

Los flujos inversos ocurren en regiones de baja energía cinética y son causados por las fuerzas de levantamiento de estructuras vorticosas de gran escala y gradientes de presión adversos, Simpson (1989) [29].

Estas estructuras vorticosas de gran escala suministran energía de turbulencia al *flujo separado* cerca de la pared. Las fluctuaciones de la velocidad en la región del flujo inverso son más grandes que, o al menos comparables, las velocidades medias del flujo inverso.

Separación en números de Reynolds altos.

Como se verá adelante la *separación* es evidentemente un fenómeno que puede ocurrir en condiciones muy variables. Por diferentes razones la separación en altos números de Reynolds, ha recibido mucha más atención que la separación en bajos números de Reynolds. Lo anterior tal vez se debe a que:

1. Se ha encontrado que existe un mayor número de flujos para números de Reynolds altos.
2. Existen algunas configuraciones del flujo en que solo ocurre la separación para números de Reynolds altos.
3. La separación para números de Reynolds altos puede afectar profundamente toda la estructura del flujo hacia aguas abajo.
4. La mayoría de los flujos separados que tienen importancia práctica ocurren para números de Reynolds altos.

El caso típico de los flujos que pasan por cuerpos hidrodinámicos es aquel que pasa a través de un cilindro circular y en el cual solamente existe separación para números de Reynolds altos. Es por lo tanto natural que estos flujos se discutan en términos de la separación de la capa límite. Sin embargo, los números de Reynolds más bajos para los que

puede ocurrir la separación bien pueden ser aquellos en que la incipiente capa límite empieza a separarse.

Separación para números de Reynolds bajos.

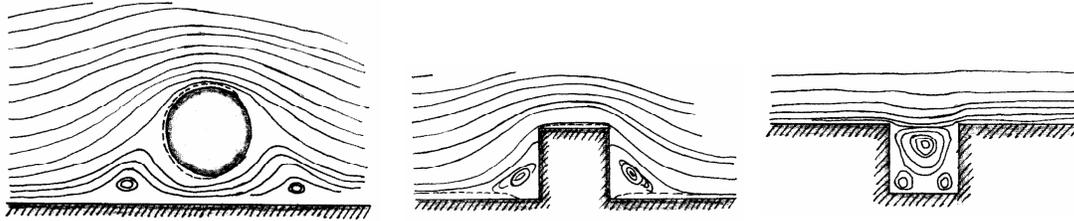


Fig. I.2.16 Ejemplos de flujos separados para números de Reynolds bajos. a) Flujo pasando un cilindro cercano a la pared, b) Flujo bidimensional pasando un bloque sobre una pared, $Re = 0.02$ y c) Flujo pasando una cavidad en una pared.

Reversibilidad en flujos con números de Reynolds bajos significa que existe simetría en las líneas de corriente al pasar por un cuerpo también simétrico, de manera que si se invirtiera el sentido del flujo se tendría aproximadamente el mismo esquema de líneas de corriente. Por ejemplo, en la figura I.2.16 a) se observa una región de recirculación al frente del bloque la cual “se equilibra” con otra región detrás de éste, producida esta última por una segunda separación, que hace simétrico el patrón de líneas de corriente. Esta simetría es aparente en los ejemplos utilizados, ya que, por ejemplo, en la figura I.2.16 a) si se tuviera un flujo con $Re = 3,300$ se tendría de nuevo una segunda separación, pero, el patrón completo sería completamente diferente y asimétrico.

El flujo puede dividirse en una región externa a la capa límite (o región no viscosa) y en una región de capa límite o interna, siendo en esta última donde se presenta la separación. En la capa límite el gradiente de presión longitudinal es impuesto por el flujo externo y cuyo valor puede encontrarse mediante la ecuación de Bernoulli. La separación puede presentarse en capas límite laminares o turbulentas.

En las capas límite laminares (dependiendo del perfil de velocidades) comúnmente se requiere solo de una región relativamente corta para que se produzca la separación. Por otro lado, en las capas límite turbulentas la separación se da con menor facilidad. En el caso de una capa límite turbulenta las líneas de flujo de la fig. I.2.15 a) pueden interpretarse como un patrón de líneas de corriente del flujo medio.

La separación del flujo conlleva la disipación de una gran cantidad de energía de turbulencia debido a que la corriente principal suministra continuamente energía de turbulencia al movimiento de recirculación y, a que, el alto gradiente de velocidad en la superficie de separación genera una alta turbulencia, la cual es arrastrada por el flujo hacia aguas abajo y disipada en forma de calor, Daily y Harleman (1966) [32].

Localización de la separación

La localización del *punto de separación* en un cuerpo romo, por ejemplo, un cilindro, depende de las características del flujo en la capa límite, de la rugosidad de la superficie, de la turbulencia del flujo que alcance al cuerpo y del gradiente de presión sobre la superficie del cuerpo.

En corrientes libres, o no confinadas, con flujos permanentes bidimensionales sobre superficies de cuerpos no hidrodinámicos, la separación se inicia intermitentemente en un punto dado; es decir, el flujo inverso ocurre solo durante una fracción pequeña del tiempo total en que el flujo se mantiene “pegado” a la pared del cuerpo. Progresivamente la separación se inicia en puntos mas alejados hacia aguas abajo donde cada vez el tiempo que el flujo que permanece “pegado” es menor.

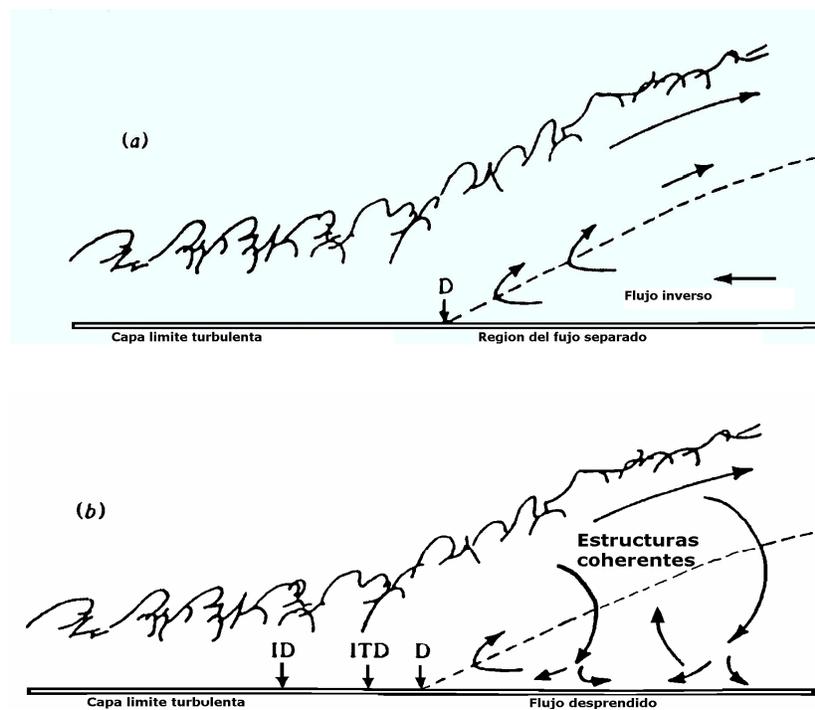


Fig. I.2.17 a) Esquema típico de la separación de la capa límite turbulenta con el flujo inverso medio viniendo desde lejos de aguas abajo, b) Modelo de flujo donde las estructuras coherentes turbulentas suministran parte del flujo inverso medio. En ambos casos la línea discontinua indica los puntos donde $U = 0$. $D = S$, $ITD = STI$, $ID = SI$ Simpson (1989) [29].

Simpson (1989) [29] propuso el siguiente juego de definiciones cuantitativas para la separación de la capa límite turbulenta en corrientes libres y permanentes. Estas definiciones de la separación se basan en la fracción de tiempo que permanece el flujo “pegado” a la pared del cuerpo; γ_{pu} .

SI, separación incipiente, ocurre en flujos inversos instantáneos con 1% del tiempo $\gamma_{pu} = 99$;

STI, separación transitoria intermitente, ocurre en flujos inversos instantáneos con 20% del tiempo $\gamma_{pu} = 0.80$;

ST, separación transitoria, ocurre en flujos inversos instantáneos con 50% del tiempo $\gamma_{pu} = 0.50$; y

S, separación, ocurre cuando el esfuerzo cortante en la pared, en un tiempo promedio, es cero, $\overline{\tau_w} = 0$.

Separación incipiente (SI): La SI se ha observado experimentalmente en flujos con trazadores, filamentos teñidos dentro del líquido, cuando estos se desprenden de la pared. La zona justo aguas abajo de la SI es importante ya que en ella el espesor de la capa límite se incrementa rápidamente.

Separación transitoria intermitente (STI): La STI se ha observado experimentalmente cuando el “manejo” de filamentos teñidos se desprenden de la pared durante una fracción de tiempo obviamente mas grande que “ocasionalmente”. Sandborn y Kline (1961) indicaron que ésta localización corresponde a la “separación turbulenta” o “separación intermitente”. Sandborn (1970) identificó el perfil de velocidades en esta posición como (no relajada) inestable.

Separación transitoria (ST): Si la distribución de probabilidad de la velocidad longitudinal en esta posición es simétrica, los puntos ST y S tendrán la misma localización.

Separación (S): Es el punto sobre la pared en el cual la separación es ya permanente, Sandborn y Kline (1961). Sandborn (1970) notó que el perfil de velocidades en este punto es (relajado) estable.

Hasta fechas recientes varios investigadores solo se preocuparon por la ubicación del punto S, ignorando el hecho de que, en general, el proceso de separación se inicia aguas arriba de este punto, aunque en casos singulares SI y S pueden tener la misma posición, Simpson (1989) [29].

La longitud de la región entre los puntos SI, STI, ST y S depende de la geometría de la superficie del cuerpo y de las características del flujo, sin embargo la definición de los puntos no cambia, fig. I.2.17.

La variable γ_{pu} es insuficiente para describir el comportamiento del flujo, ya que ésta solo representa una fracción de la distribución de probabilidad de la velocidad longitudinal (que es positiva). Sin embargo Simpson (1989) considera importante que la variable γ_{pu} sea documentada en cualquier trabajo futuro.

Efecto de la curvatura de la superficie del cuerpo

Aún cuando son mas comunes los casos de *separación* sobre paredes curvas no se ha hecho una descripción cualitativa completa de los efectos de una curvatura significativa en la pared, Simpson (1989) [29].

En una pared curva la localización de la *separación* y el comportamiento del flujo inverso están determinados por la tasa con la que el flujo externo suministra energía al fluido en la capa límite a lo largo de la pared divergente.

El flujo turbulento sobre una superficie curva tiene un retraso en su respuesta debido a que los vórtices que contienen una gran energía no responden instantáneamente a los rápidos cambios de las condiciones de frontera, lo que provoca una condición de inestabilidad. Esta condición de inestabilidad afecta fuertemente a los flujos con *separación*.

Separación del flujo sobre un escalón.

El flujo sobre un escalón es el ejemplo clásico de los flujos con *separación*, debido a su facilidad para conseguir la bidimensionalidad y la sencillez de su geometría. Si bien la estructura del flujo separado sobre un escalón negativo es la más sencilla, el campo de flujo es aún muy complejo. En un escalón, la capa de cortante en la zona de *separación* difiere de la capa de mezclado en una placa plana en un aspecto importante: En un escalón, el flujo sobre la cara de velocidad baja de la capa de cortante es muy turbulento, lo opuesto ocurre en una capa de mezclado en un típico experimento sobre una placa plana.

Parte del fluido de la capa de cortante se defleca dentro de la zona de recirculación debido a un fuerte gradiente de presión adversa. La capa de cortante está sometida a los efectos de un fuerte gradiente de presión adversa por lo que ésta se curva bruscamente hacia abajo y se impacta sobre el fondo, Castro y Haque (1987).

Persistencia de vórtices de gran escala en la *separación* de un escalón

Aguas abajo del punto de cierre de la zona de recirculación, los esfuerzos de Reynolds continúan decayendo rápidamente a una distancia de varias alturas de escalón, Simpson (1989) [29]. Simultáneamente, una nueva capa límite empieza a crecer hacia aguas abajo del punto de reatado. Los resultados de Simpson (1989) mostraron que la región de la capa de cortante reatada conserva la mayoría de las características de la capa de cortante libre durante aproximadamente 50 alturas de escalón hacia aguas abajo del punto de reatado. Esta observación demuestra la persistencia de vórtices de gran escala que se desarrollan en la *separación* de la capa de cortante libre. Este flujo es altamente inestable el cual se refiere a un movimiento organizado dependiente del tiempo.

Pronchick (1983) encontró que el flujo inverso consiste de fluido turbulento de escala menor creado por vórtices que chocan sobre la pared y se dirigen hacia arriba debido al gradiente de presión adversa, sin embargo no encontró estructuras de gran escala dentro de la zona de recirculación.

La estructura de los flujos turbulentos con separación es muy diferente de aquella para flujos sin separación. Como se observa en la fig. I.2.17, en una placa plana, los esfuerzos turbulentos mas grandes ocurren sobre la capa de cortante, línea punteada en la figura I.2.17, y se deben principalmente a las estructuras turbulentas de gran escala que se producen por la separación del flujo.

I.2.3 c) Separación detrás de dunas

Patrón dinámico del flujo en la zona de separación.

Para detectar e interpretar los patrones de flujo asociados con la formación de estructuras coherentes turbulentas en la zona de separación son muy importantes tanto las técnicas de visualización del flujo como la medición de las velocidades puntuales que permitan construir los perfiles instantáneos de velocidad en diferentes secciones de la duna. Resulta de suma importancia conocer la evolución de los patrones de flujo debido a que estos juegan un papel importante en el transporte de energía y momentum. Dado que existe una relación directa entre los patrones de flujo y el ciclo de vida de las estructuras coherentes, desde su formación hasta su decaimiento, los patrones instantáneos de las líneas de corriente muestran, o dan indicios sobre, algunas características de los vórtices en chorro, de las ondas y de flujos más complejos como la separación tridimensional.

Longitud de la separación del flujo detrás de dunas

En la figura I.2.1 se muestra una zona (2) de separación y recirculación del flujo donde la longitud de la separación del flujo detrás de dunas se considera como la distancia entre la cresta de la duna y el punto donde cae la capa de cortante sobre la pendiente suave de la siguiente duna. A este punto se le puede considerar como punto de cierre de la zona de recirculación del flujo. Este punto no permanece fijo para un gasto constante sino que varía en función del *ondeamiento* de la capa de cortante de manera que este punto se mueve dentro de una zona sobre la cara de la siguiente duna. A lo anterior se debe agregar que el vórtice tipo cilindro elíptico se rompe intermitentemente debido a las fuertes interacciones del flujo en su interior. Al romperse el vórtice anterior se desprende una estructura coherente denominada Boil la cual arrastra sedimento del fondo hacia el flujo medio y cerca de la superficie. Por esta razón la estructura de recirculación detrás de dunas juega un papel importante en el transporte de sedimentos en suspensión y con el movimiento de migración y evolución de las formas de fondo.

Conocer la longitud de la separación del flujo es útil en la solución de varios problemas de la hidráulica fluvial. Por ejemplo Crickmore (1970) y Engel y Lau (1980) [38] consideran esta longitud de separación como una variable importante en el calculo del transporte de sedimento, tanto de fondo como en suspensión, a partir del perfil de las formas de fondo que migran. Vanoni y Hwang (1967) propusieron una ecuación para calcular un factor de fricción a partir de la proyección de la cara aguas arriba de las formas de fondo, en la que se requiere conocer la longitud de la separación y la reconocen como una variable importante. Engel, P. (1981) [38] concluye que la longitud de la separación sobre dunas es independiente del numero de Froude y virtualmente independiente de la

profundidad del flujo para números de Froude menores a 0.5 y valores de $h_m/d \approx 5$, donde h_m es la profundidad media del flujo y d la altura de la duna. Resultados de la literatura indican que la longitud de la separación detrás de dunas puede variar de 5 a 10 veces al altura de la duna.

Puntos críticos en el campo de flujo

En un patrón de flujo las líneas de corriente, las líneas de traza y las líneas de trayectoria muestran puntos críticos. Un punto crítico es aquel donde la velocidad puntual es cero y en el que la pendiente de la línea de corriente es indeterminada. Los puntos críticos son una importante característica del flujo, ya que, de su distribución en el campo y de su tipo se podría deducir la geometría y la topología del campo de flujo completo. Lo anterior equivale a obtener una descripción física mas completa del campo de flujo, Perry y Chong (1987). Bajo el concepto de los puntos críticos, se identifican los *nodos* o *centros* (N, nodes) y las *sillas* (S, saddles) en el plano del cortante principal de un flujo separado detrás de dunas. Los puntos N, se identifican, en el flujo, como los puntos centrales de vórtices horizontales y transversales al flujo y los puntos S se presentan en la intersección de convergencia, entre las líneas de corriente y el fondo, y en separatrices divergiendo. Las líneas de corriente en los puntos S tienen un ángulo de $\pm 45^\circ$ respecto de la dirección del flujo principal, Antonia *et al.* (1986). En los casos de líneas de frontera se formarán medios nodos y medias *sillas*, Hunt *et al.* (1978).

Secuencia de evolución de los patrones de líneas de corriente

Espinoza y Martínez-Austria (2000) empleando técnicas de visualización lograron identificar cuatro configuraciones o patrones de líneas corrientes las cuales conforman las fases de una secuencia de evolución que se repite periódicamente.

1ª fase: Formación de ondas de Kelvin y Helmholtz, las cuales generaron una serie de vórtices en un plano casi horizontal. Después estos vórtices evolucionaron en el tiempo, interactuaron y se amalgamaron enrollándose unos sobre otros hasta formar el vórtice de la segunda fase.

2ª fase: Formación de un vórtice transversal y de gran tamaño en forma elíptica bajo la línea de corriente de separación, desde la cresta de la duna y hasta el punto de cierre de la zona de recirculación sobre la pendiente de la siguiente duna. En el punto de separación se formó una media silla S_1 y otra media silla en el punto de cierre S_2 , el vórtice cerrado N compensa las dos medias sillas. Dentro del vórtice se observaron otras órbitas concéntricas cerradas. Una observación importante en esta fase es que las velocidades instantáneas en un plano a la altura de la cresta de la duna permanecieron casi horizontales y el campo de velocidades se mostró muy estable, es decir, sin cambios fuertes de dirección de las velocidades instantáneas.

3ª fase: Formación de otros vórtices dentro del vórtice de la fase anterior, se formaron dos nuevas sillas: S_4 y S_5 y, el nodo N_2 que los compensa, la silla S_3 y los nodos N_1 y N_3 . Esta topología fue claramente observada por Müller y Gyr (1995).

4ª fase: Ruptura de las estructuras observadas en la fase anterior resultado de la separación de la línea corriente del fondo de la duna debida ésta a fuertes inestabilidades. Desaparece del fondo la silla S_2 de la fase 3 en la fig. I.2.18. Al presentarse la ruptura de las estructuras de la fase anterior se producen una gran cantidad de vórtices de menor escala los cuales a su vez rompen en otros pequeños vórtices o vorticillos en los que se disipa la energía del flujo.

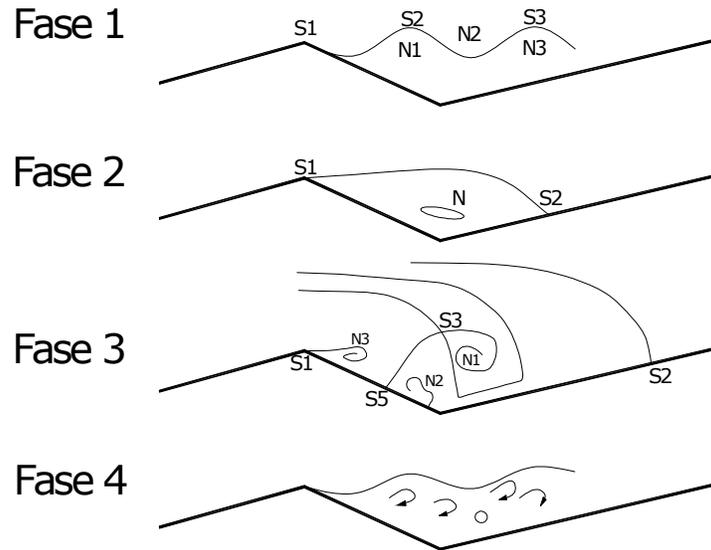


Figura I.2.18 Estados de fase secuenciales, usando la técnica de inyección de tinta, obtenidos por Espinoza y Martínez-Austria (2000).

De manera simultánea a la cuarta fase se está generando la primera fase de la secuencia de evolución mencionada arriba. El desprendimiento de la línea de corriente en la 4ª fase se relaciona con las estructuras Kolk-Boil generadas por la separación violenta del fluido atrapado dentro de la región de recirculación hacia el flujo medio y que llega a interactuar con la superficie libre del agua. En el estudio realizado por Espinoza y Martínez-Austria (2000) los autores identificaron otros dos puntos de separación sobre la cara de mayor pendiente, en la 3ª fase, de los cuales se desprenden tres tipos de Boils.

Los cambios topológicos son simultáneos a los cambios en las propiedades de transporte del flujo los cuales se deben a la variación de la interacción entre las fuerzas dominantes en el flujo; fuerzas de gravedad, de presión, inerciales, viscosas y sus combinaciones. Bajo una condición cercana al equilibrio entre fuerzas dominantes es importante la variación, aún pequeña, de ésta relación entre estas fuerzas, ya que ésta proporciona los mecanismos responsables de la transformación de la energía. Un pequeño cambio en una fuerza relevante causará un cambio en la fase, la que cualitativa y cuantitativamente será diferente de la anterior.

II. INSTALACIÓN, EQUIPO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

II.1 Instalación experimental

La instalación experimental se ubica en el Laboratorio de hidráulica “Ing. David Hernández Hueramo” de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

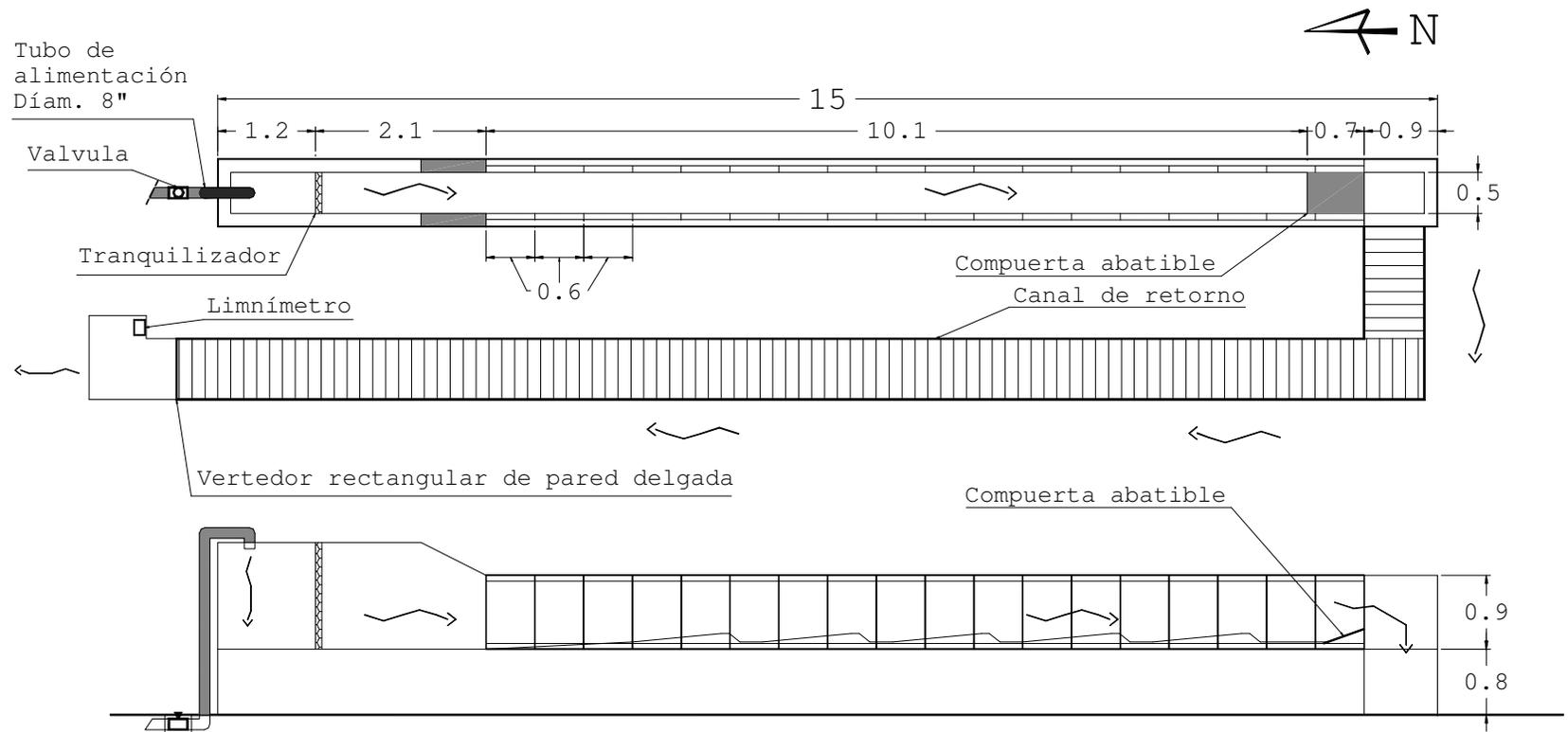
La instalación experimental consiste de un canal *Reebock* el cual fue rehabilitado para alojar las formas de fondo y cuenta con un sistema de alimentación y uno de descarga. La infraestructura del canal se compone de un equipo de bombeo que impulsa el agua hacia un tanque elevado de carga constante del cual baja por una tubería hacia el canal experimental, posteriormente el agua utilizada se orienta hacia un canal de retorno que descarga a la cisterna bajo el equipo de bombeo para reiniciar el ciclo.

El sistema de alimentación consiste de una tubería de acero de 8” y una válvula del mismo diámetro para el control del flujo. A 1.2 m de la descarga se ubica un *tranquilizador* del flujo el cual consiste de un marco de fierro ángulo con tres capas de malla de entramado fino ubicado en forma transversal al flujo. El sistema de descarga consta de una compuerta abatible ubicada en el extremo de aguas abajo del canal sobre la cual descarga el agua, permitiendo de ésta manera controlar tanto la velocidad media como el nivel del agua en el canal. Esta compuerta se compone de una placa de acero fija a un eje en su parte inferior y sujeta a un mecanismo elevador en la parte superior el cual permite además fijar la compuerta en la posición requerida. (figuras II.1.1 y II.1.2).

El canal tiene una longitud total de 15 m, ancho de plantilla de 0.50 m y fondo plano horizontal. Las paredes son de lámina acrílica transparente para permitir la visualización en el interior del flujo en una longitud de 10.10 m y una altura de 0.90 m. La ventana de visualización se ubica entre la cresta de la tercera duna y el punto de cierre de la cuarta, en una longitud de aproximadamente 60 cm. Sobre el canal de retorno y antes de descargar a la cisterna se ubica un vertedor rectangular de pared delgada conectado a un limnómetro para calcular, empleando la ecuación de calibración, los gastos descargados.

Geometría de las formas de fondo

Debido a que la migración y tridimensionalidad de las formas de fondo naturales darían al estudio, como se mencionó anteriormente, una alta complejidad, se excluyó ésta posibilidad del programa experimental optándose por el uso de formas de fondo fijas y bidimensionales. Estas formas fijas permiten la medición y la observación visual del flujo y sus estructuras coherentes turbulentas reproducibles en un tiempo promedio. Sin embargo, éstas formas de fondo artificiales deben ser sometidas a las condiciones del flujo con las que las formas naturales fueron generadas, Bennett y Best (1995) [6].



Acotaciones en metros

Figura II.1.1 Croquis en planta y en corte de la instalación experimental. Canal de Reebok.



Figura II.1.2 a) Instalación experimental en su conjunto.



Figura II.1.2 b) Dunas sobre “tarrajas” se madera cubiertas con lámina de acrílico.

El presente estudio se basó en el trabajo de los investigadores Müller y Gyr (1986) [12] haciendo coincidir la forma de la duna y las condiciones del flujo medio utilizadas por ellos. La forma de las dunas fijas y bidimensionales empleadas por los autores fue definida por la forma en que naturalmente se desarrollaron dunas de fondo móvil en un experimento de transporte de sedimento llevado a cabo por O. Eggenberger (1986) para su tesis doctoral “Umstromung von Dunen”, ETH-Zurich.

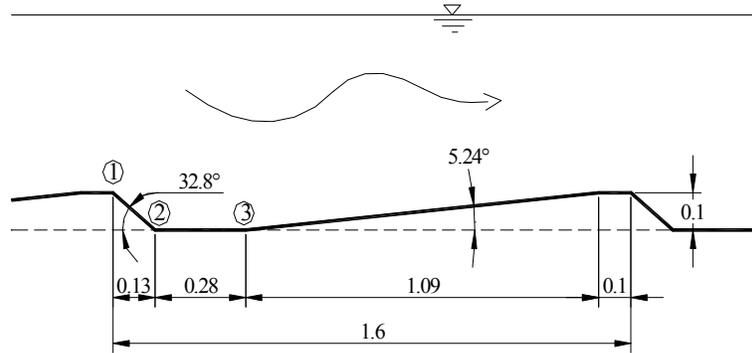


Figura II.3.1 Geometría de las dunas empleadas en el estudio (1999). Los números 1, 2 y 3 indican la posición de los inyectores de tinta.

Empleando arena uniforme con un tamaño de grano de 0.7 mm Müller y Gyr (1986) formaron una hilera de cinco dunas artificiales bidimensionales las que fueron expuestas a un flujo de $0.064 \text{ m}^3/\text{s}$ para dejar que su forma evolucionara naturalmente a través del transporte de la carga de fondo. Este procedimiento condujo a formas de la duna que fueron idénticas dentro de $\pm 0.01 \text{ mm}$. Resultando una profundidad media del flujo de $D = 0.21 \text{ m}$, y una relación $L/D = 0.7$, donde L es la longitud de la duna. En la cresta de la duna la profundidad del flujo fue de 0.16 m , la profundidad total de 0.26 m y su correspondiente velocidad media de 0.4 m/s .

La geometría de las dunas empleadas en el presente estudio se indican en la figura II.3.1 destacándose que la longitud de onda de la duna fue de 1.6 m , una altura de 0.10 m y un ángulo de la pendiente más pronunciada de la duna de 32.82° respecto de la horizontal. Dentro del canal se instaló una serie de 5 dunas las cuales fueron construidas de lámina acrílica sobre tarrajas de madera tratada para soportar las láminas y dar la forma adecuada de las dunas.

II.2 Descripción del equipo

Para la medición de las velocidades puntuales se empleó un tubo de Prandtl, primero, conectado a un manómetro diferencial con acetato de etilo como líquido manométrico cuya densidad es menor que la del agua (0.901 a 20° C), después, empleando sus mangueras como piezómetros simples para obtener la presión diferencial. Para medir la profundidad del flujo sobre la duna de pruebas y las diferentes profundidades en las que se obtuvo la velocidad puntual, se empleó un limnómetro montado sobre el canal. Para medir el gasto medio se utilizó un vertedor rectangular de pared delgada de 0.61 m de ancho y una placa de acero de 0.45 m de altura. Las imágenes obtenidas de las técnicas de visualización

empleadas fueron video grabadas, en primera instancia, con dos cámaras profesionales de video grabación, una en posición lateral al canal y otra en planta, para obtener imágenes de las trayectorias de inyección de tinta en ambos planos. Posteriormente se empleó solo una cámara de video grabación por considerarse que las imágenes en planta aportaban muy poco a la interpretación y análisis del fenómeno de la separación del flujo y de las estructuras coherentes turbulentas en estudio.

II.3 Procedimiento experimental y de visualización

Los objetivos del estudio son los de caracterizar el campo de flujo sobre las dunas de acuerdo con los perfiles de velocidad media, identificar las estructuras coherentes turbulentas generadas por la separación del flujo detrás de dunas e investigar las características espacio-temporales de las estructuras del flujo detrás de dunas, como son: a) Longitud de las ondas de Kelvin-Helmholtz, b) Ángulo de la estela de dispersión de turbulencia, c) Longitud de la separación del flujo, d) Periodo medio del desprendimiento de vórtices.

Para conocer las características espacio-temporales de las estructuras del flujo respecto del número de Reynolds y cumplir con la condición de que las formas de fondo deben estar sometidas a las condiciones de flujo en que estas fueron generadas, se varió la posición de la compuerta de descarga y se suministró el gasto necesario para mantener constante el tirante sobre la duna. Lo anterior permitió mantener semejantes las características del flujo medio a las empleadas por Müller y Gyr (1987). Para lograr establecer en el canal experimental las condiciones del flujo utilizadas por Müller y Gyr, dado que existen algunas diferencias entre canales, por ejemplo: en los anchos de plantilla, en la rugosidad del fondo y en la longitud efectiva de los canales, se llevó a cabo una calibración del canal cuya descripción y resultados se anotan en el subcapítulo III.1.

Perfil de velocidades

En el presente estudio se obtuvieron perfiles de velocidad en aproximadamente las mismas secciones transversales de la duna en que fueron obtenidas por Müller y Gyr (1987) [12], con la finalidad de hacer comparaciones entre perfiles y validar nuestro trabajo experimental. La validación consiste en lo siguiente: si el resultado de la comparación arroja que las distribuciones de velocidad normalizada obtenidas en el presente estudio son similares a las obtenidas por Muller y Gyr, se podría afirmar que la construcción física y la medición de las velocidades puntuales fueron correctas. Las principales diferencias son: a) las formas de fondo fueron construidas con diferentes materiales lo que implica, por supuesto, diferencias en la rugosidad del fondo, b) longitudes diferentes en los canales utilizados y c) los diferentes equipos de medición utilizados.

Técnicas de visualización

En el presente estudio se emplearon las técnicas de visualización de a) inyección de tinta y b) incorporación de partículas como trazadores.

a) Inyección de tinta. Para emplear esta técnica se colocaron tres agujas hipodérmicas bajo la lámina acrílica, sobresaliendo de ella solo 3 mm, definiendo cada extremo de la aguja como punto de inyección. Se ubicaron sobre el fondo del canal tres puntos de inyección de la siguiente manera; uno sobre la cresta de la duna en el borde con la cara de mayor pendiente (punto 1), otro al pie de la misma cara y el origen de la siguiente (punto 2) y un tercero sobre la pendiente suave de la siguiente duna a 41 cm del primer inyector y a 28 cm del segundo (punto 3), todos ellos ubicados al centro de cada sección transversal del canal (figura II.3.1). Cada equipo inyector consta de un recipiente elevado conteniendo una mezcla de agua y azul de metileno, un pequeño recipiente conectado al tanque que filtra la mezcla y el ingreso de aire, una manguera plástica y una aguja hipodérmica por la cual sale la mezcla hacia la corriente de agua (figura II.3.2). El procedimiento es básicamente el siguiente: dispuesta la mezcla en el tanque elevado se abre el opresor colocado en la manguera plástica para permitir que por gravedad fluya la mezcla hasta el extremo de la aguja tiñendo continuamente un grupo localizado de moléculas de agua las que se desplazan dentro del fluido en movimiento formando una *línea de traza*.

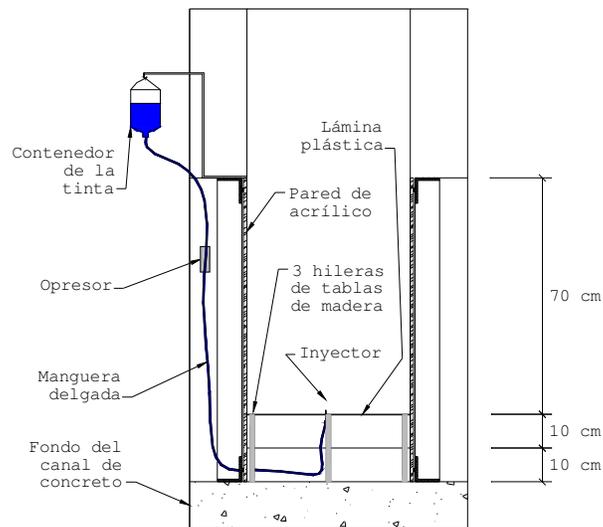


Figura II.3.2 Sección transversal del canal en la que se muestra el equipo empleado en la técnica de visualización de inyección de tinta.

b) Incorporación de partículas como trazadores. Esta técnica consiste en incorporar al flujo partículas de flotabilidad neutra. Dado que no se logró encontrar partículas de flotabilidad neutra se emplearon partículas de arena negra de origen volcánico de baja densidad probándose que éstas pudieran ser arrastradas por el flujo y encontrar, aunque de manera aproximada, la línea de traza siguiendo una partícula de arena. La arena utilizada fue la que pasó la malla 8 y quedó retenida en la malla 16. Como se pudo comprobar físicamente y se puede observar en las imágenes video grabadas el tamaño de las partículas empleadas fue el adecuado. La incorporación del chorro de arena se hizo a aproximadamente 50 cm aguas arriba de la cresta de la duna de pruebas vertiéndolo directamente sobre la superficie libre del agua. Como se puede apreciar en la video grabación la aplicación de la técnica resultó adecuada para identificar las líneas de traza en la zona de recirculación del flujo.

II.4 Programa experimental

El trabajo experimental se llevó a cabo bajo el siguiente programa:

Validación de la instalación

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos en la instalación experimental se llevó a cabo el siguiente procedimiento: a) Obtención de velocidades puntuales en las cuatro secciones indicadas de la duna de pruebas (fig. II.4.1). b) Construcción de las curvas de distribución adimensionalizadas con la altura de la duna. c) Comparación de las curvas adimensionalizadas con las curvas obtenidas por Müller y Gyr. En el caso de que las curvas comparadas coincidan se considerará que los resultados obtenidos en la instalación experimental son válidos

Velocidades puntuales y distribuciones de velocidad.

Las velocidades puntuales se midieron verticalmente a cada dos centímetros desde el fondo y hasta la superficie libre del agua. Las secciones sobre la duna en las cuales se obtuvieron las distribuciones de velocidad son aproximadamente las mismas que fueron empleadas por Müller y Gyr. (1986)

Sección	x/H	x (cm)
1	0	0
2	2	20
3	5	50
4	10	100

donde x es la distancia horizontal a partir de la cresta de la duna y $H = 10$ cm es la altura de la misma.

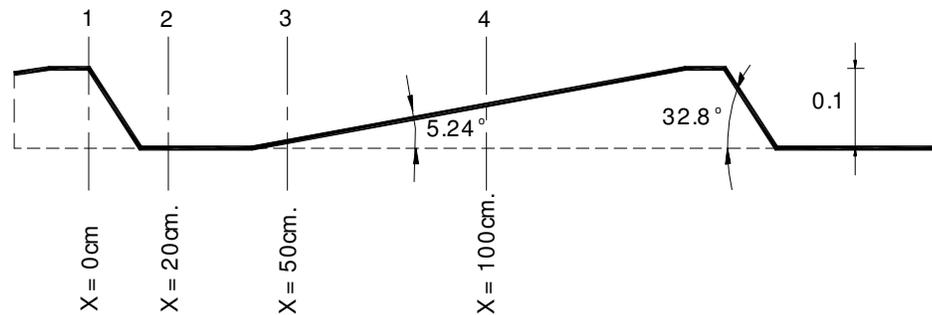


Figura II.4.1 Corte longitudinal de la duna de pruebas y las secciones de medición.

Video grabación de imágenes

Se llevo a cabo la videograbación del experimento para identificar las estructuras coherentes turbulentas relacionadas con la separación del flujo detrás de dunas y para lo cual se emplearon las técnicas de visualización descritas en el subcapítulo II.3. Se video grabaron imágenes para seis números de Reynolds, tres de ellos menores y dos mayores que el utilizado por Müller y Gyr (1986) en su experimento. El número de Reynolds empleado por estos investigadores fue de $Re = 105,925$, velocidad media $V_m = 0.5079$ m/s y viscosidad cinemática de $\nu = 1.007 \times 10^{-6}$ para agua a 20 °C.

Análisis del fenómeno de la separación del flujo detrás de dunas.

El objetivo de la videograbación fue la de facilitar la identificación de las estructuras y permitir el análisis de las imágenes para obtener las características espacio-temporales de las estructuras del flujo detrás de las dunas de prueba. Después de digitalizar las imágenes que originalmente se obtuvieron en cinta magnética (video casete formato VHS) el análisis de las imágenes se realizó en el monitor de una computadora utilizando el programa de cómputo Reproductor de Windows Media. Las características espaciales se graficarán para su análisis respecto del número de Reynolds y de las características temporales se obtendrá la frecuencia del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos.

III. RESULTADOS

III.1 Calibración de la instalación experimental

Para medir el gasto en el canal experimental se utilizó un vertedor de pared delgada rectangular sin contracciones laterales ubicado en el canal de retorno. La ecuación utilizada para calcular el gasto en el vertedor fue la obtenida por W.R. White (1975) y modificada por la Hydraulics Research Station (H.R.S.) en Wallingford, Inglaterra, para mejorar su exactitud dentro de los rangos que se especifican. La H.R.S. realizó cuidadosas pruebas de laboratorio para afinar los coeficientes de la ecuación de White y lograr una mayor exactitud de los gastos medidos de acuerdo con lo descrito en el capítulo 3 del libro “Weirs and flumes for measurement” de P. Ackers *et al.* (1978) [37]. La ecuación es la siguiente:

$$Q = 0.564 \left(1 + \frac{0.150 y}{p} \right) b \sqrt{g} (y + 0.001)^{\frac{3}{2}}$$

Donde: y = tirante sobre el vertedor, p = altura de la placa y b = ancho del canal, para los siguientes límites de aplicación:

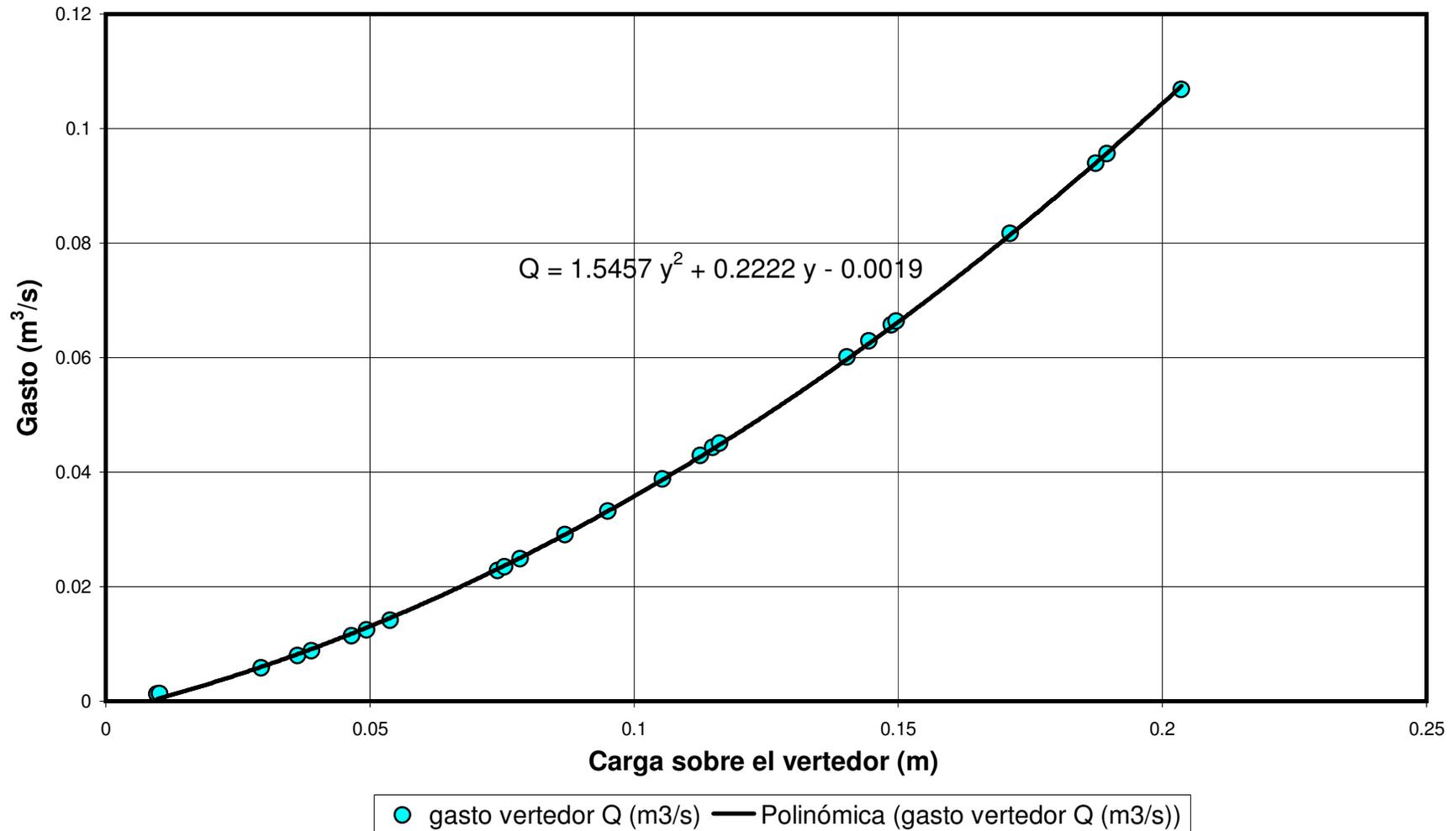
$y > 0.02$ m; $y_{\max} = 0.20$ m, cumple $p \geq 0.15$ m; $p = 0.45$ m, cumple
 $y/p \leq 2.2$; $y/p = 0.44$, cumple $h_p/p = 2.27$; $h_p = 1.20$ m, medido $h_p = 1.00$ m;
 no cumple. La exactitud de la ecuación disminuye cuando $y < 0.075$ m o $h_p/p > 1.8$.

En nuestro caso: $p = 0.45$ m y $b = 0.61$. Los valores de las columnas del tirante (y) sobre el vertedor y su correspondiente gasto (Q) se graficaron en la figura III.1.1 y se encontró que la ecuación de mejor ajuste es la polinomial: $Q = 1.5457 y^2 + 0.2222 y - 0.0019$, lo anterior para obtener cualquier gasto a partir de la carga hidráulica medida sobre el vertedor, de una manera sencilla, con la ecuación o gráficamente.

Calibración del canal experimental

Dicha calibración consistió en la construcción de una familia de curvas para diferentes posiciones de la compuerta abatible, de esta familia se seleccionó una curva que permitió igualar las condiciones del flujo empleadas por Müller y Gyr (1987) (Tabla III.1.1 y figura III.1.2). Cada curva se construyó graficando los gastos transitados en el canal (eje vertical) contra su correspondiente profundidad del flujo sobre la duna (eje horizontal) y para tres diferentes posiciones de la compuerta abatible ($D = 0$ cms, $D = 5$ cms y $D = 10$ cms). En la figura III.1.2 el punto donde se intercepta el tirante $y = 0.16$ con el gasto $Q = 0.0533 \text{ m}^3/\text{s}$, nos señala un punto intermedio entre las curvas obtenidas para $D = 0$ y $D = 5$ cms. La ecuación de la curva que pasa por ese punto es la siguiente: $Q = 1.7154 y^2 + 0.0989 y - 0.0063$ y se comprobó que la posición de la compuerta abatible que permitió igualar el gasto unitario $q = 0.10667 \text{ m}^3/\text{s}$, el tirante sobre la duna $h_0 = 0.16$ m y la velocidad media sobre la duna $V_m = 0.4$ m/s, fue aquella cuyo borde superior de la compuerta está a 2.5 cm arriba del origen ($D = 2.5$). Este origen coincide en un plano horizontal con la cresta de las dunas.

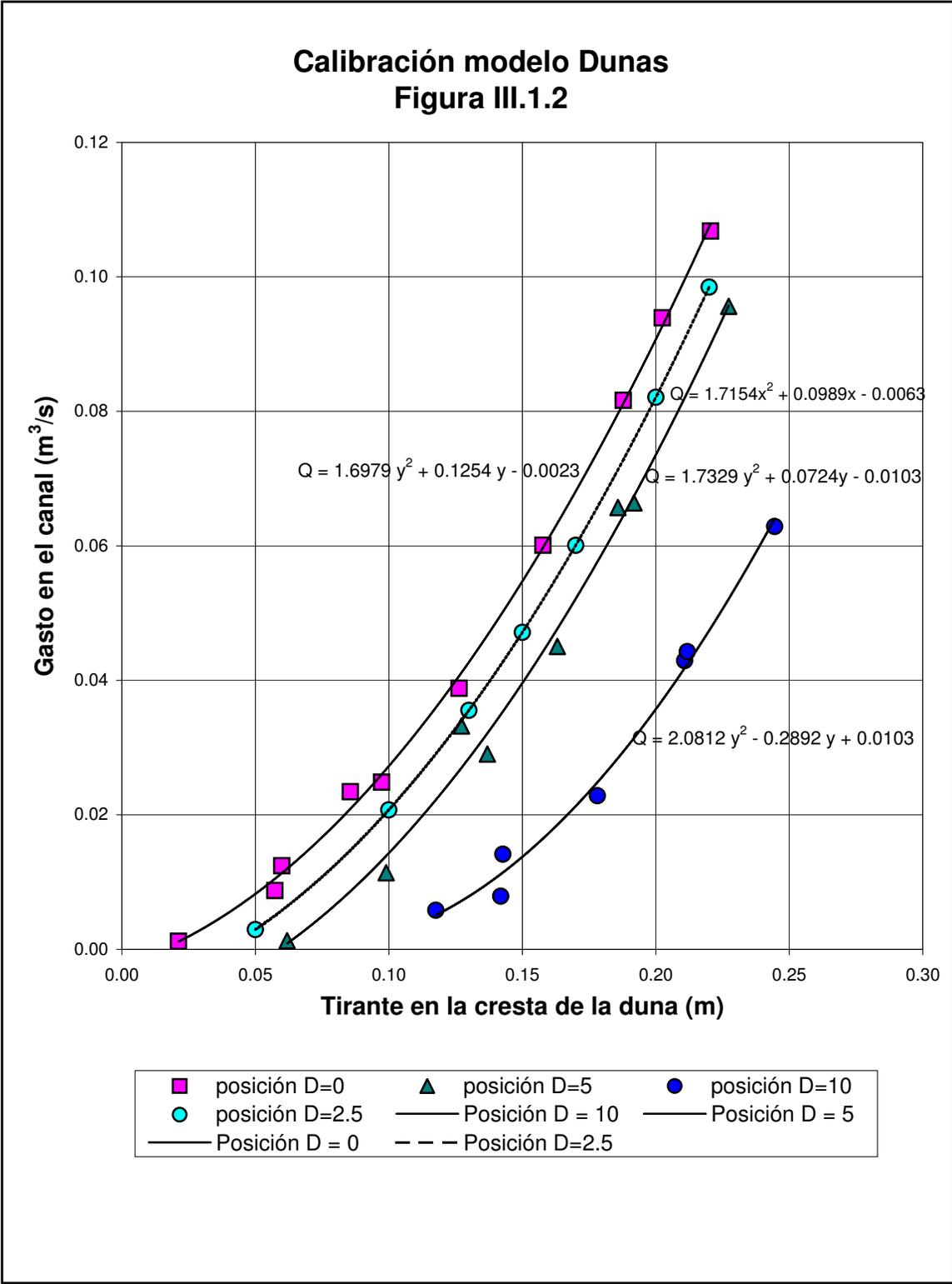
CURVA DE CALIBRACIÓN
Vertedor rectangular de pared delgada, Q (m³/s)
figura III.1.1



Calibración de la Instalación experimental

Tabla III.1.1								
	Posición de la compuerta	limnómetro s/duna	limnómetro s/vertedor	tirante s/duna	tirante s/vertedor	gasto vertedor	vel. s/duna	Reynolds
	D (cm)	(cm)	(cm)	d (m)	y (m)	Q (m ³ /s)	v (m/s)	Re (adim)
origen		4.12	31.32					
1	0	6.37	32.29	0.0212	0.0097	0.00120	0.11437	2,407.7
2	0	9.98	35.22	0.0573	0.039	0.00876	0.30882	17,572.1
3	0	13.98	39.17	0.0973	0.0785	0.02486	0.51618	49,875.6
4	0	16.88	41.86	0.1263	0.1054	0.03883	0.62108	77,897.7
5	0	20.02	45.35	0.1577	0.1403	0.06009	0.76979	120,552.0
6	0	23.03	48.44	0.1878	0.1712	0.08164	0.87820	163,779.5
7	0	24.49	50.06	0.2024	0.1874	0.09390	0.93726	188,383.1
8	0	26.30	51.68	0.2205	0.2036	0.10681	0.97859	214,278.5
9	0	12.81	38.87	0.0856	0.0755	0.02344	0.55330	47,033.4
10	0	10.24	36.26	0.0599	0.0494	0.01243	0.41924	24,938.1
1	5	10.44	32.34	0.0619	0.0102	0.00129	0.04195	2,578.9
2	5	14.15	35.98	0.0990	0.0466	0.01140	0.23261	22,868.0
3	5	17.94	40.02	0.1369	0.0870	0.02903	0.42843	58,244.9
4	5	20.56	42.94	0.1631	0.1162	0.04504	0.55794	90,367.0
5	5	23.43	46.29	0.1918	0.1497	0.06638	0.69921	133,176.6
6	5	26.98	50.28	0.2273	0.1896	0.09562	0.84983	191,824.6
7	5	22.83	46.19	0.1858	0.1487	0.06570	0.71439	131,811.4
8	5	16.97	40.83	0.1272	0.0951	0.03322	0.52759	66,643.2
1	10	18.44	34.96	0.1419	0.0364	0.00791	0.11265	15,873.4
2	10	22.06	38.74	0.1781	0.0742	0.02284	0.25907	45,820.3
3	10	25.33	42.58	0.2108	0.1126	0.04294	0.41148	86,136.0
4	10	28.70	45.77	0.2445	0.1445	0.06287	0.51950	126,135.0
5	10	25.43	42.81	0.2118	0.1149	0.04428	0.42234	88,830.6
6	10	18.52	36.71	0.1427	0.0539	0.01415	0.20036	28,393.3
7	10	16.01	34.27	0.1176	0.0295	0.00581	0.09987	11,663.4

Calibración modelo Dunas
Figura III.1.2



III.2 Mediciones

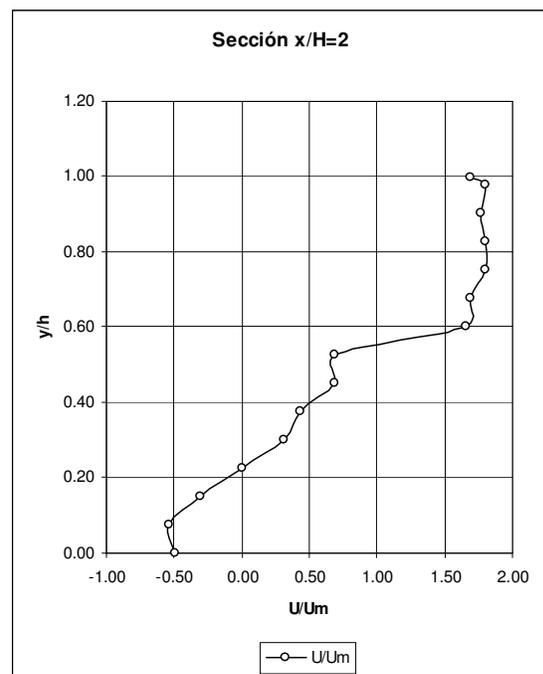
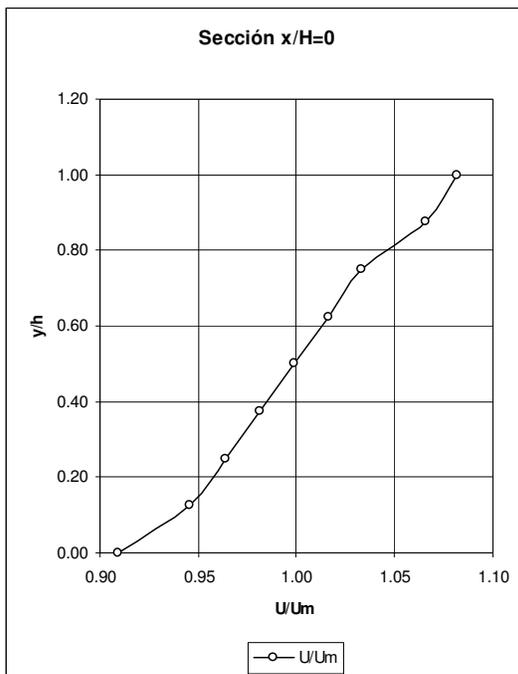
III.2.1 Velocidades puntuales

Se llevaron a cabo mediciones de velocidad puntual en cuatro diferentes secciones de la duna de pruebas. En cada sección las mediciones se hicieron sobre una línea vertical a cada dos centímetros a partir del fondo y hasta la superficie libre del agua. Los valores medidos se anotan en la tabla III.2.1, donde h y U_m representan la profundidad del flujo y la velocidad media, respectivamente. Las mediciones se realizaron con tubo de Pitot estático con nariz redondeada o tubo de Prandtl utilizando sus mangueras como piezómetros simples. La ecuación empleada para calcular la velocidad puntual es $U = C\sqrt{2gh}$, la cual representa una correlación de la carga dinámica con la velocidad puntual del fluido, donde g es la aceleración local de la gravedad y C la constante de calibración del elemento primario (adimensional). Para este tubo de Prandtl con nariz redondeada $C = 0.9241$. La posición de la compuerta abatible (en la descarga del canal experimental) fue $D = 2.5$ cm sobre la cresta de las dunas. En la figura III.2.1. se muestran los perfiles de las velocidades puntuales adimensionalizadas, en las cuales se puede observar las velocidades negativas en la parte inferior de las secciones $x/H=2$ y $x/H=5$.

PERFIL DE VELOCIDADES									
Mediciones puntuales de velocidad									
Sección $x/H=0$					Sección $x/H=2$				
profundidad medición	$h=16$ cm adim.	lectura diferencial	velocidad puntual	$U_m=0.6978$ adim.	profundidad medición	$h=26.58$ cm adim.	lectura diferencial	velocidad puntual	$U_m=0.42$ adim.
y (cm)	y/h	L (cm)	U (m/s)	U/U_m	y (cm)	y/h	L (cm)	U (m/s)	U/U_m
0	0.000	2.4	0.6341	0.9087	0	0.000	0.25	-0.2047	-0.4873
2	0.125	2.6	0.6600	0.9459	2	0.075	0.30	-0.2242	-0.5338
4	0.250	2.7	0.6726	0.9639	4	0.150	0.10	-0.1294	-0.3082
6	0.375	2.8	0.6849	0.9816	6	0.226	0.00	0.0000	0.0000
8	0.500	2.9	0.6971	0.9989	8	0.301	0.10	0.1294	0.3082
10	0.625	3.0	0.7090	1.0160	10	0.376	0.20	0.1831	0.4358
12	0.750	3.1	0.7207	1.0328	12	0.451	0.50	0.2894	0.6891
14	0.875	3.3	0.7436	1.0656	14	0.527	0.50	0.2894	0.6891
16	1.000	3.4	0.7548	1.0816	16	0.602	2.90	0.6971	1.6597
					18	0.677	3.00	0.7090	1.6880
					20	0.752	3.40	0.7548	1.7970
					22	0.828	3.40	0.7548	1.7970
					24	0.903	3.30	0.7436	1.7704
					26	0.978	3.40	0.7548	1.7970
					26.58	1.000	3.00	0.7090	1.6880

Sección x/H=5					Sección x/H=10				
profundidad medición	h=26.08 cm adim.	lectura diferencial	velocidad puntual	Um=0.4281 adim.	profundidad medición	h=21.49 cm adim.	lectura diferencial	velocidad puntual	Um=0.5195 adim.
y (cm)	y/h	L (cm)	U (m/s)	U/Um	y (cm)	y/h	L (cm)	U (m/s)	U/Um
0	0.000	0.00	0.0000	0.0000	0	0.000	1.20	0.4484	0.8631
2	0.077	0.10	-0.1294	-0.3024	2	0.093	1.20	0.4484	0.8631
4	0.153	0.05	-0.0915	-0.2138	4	0.186	1.20	0.4484	0.8631
6	0.230	0.00	0.0000	0.0000	6	0.279	1.40	0.4843	0.9323
8	0.307	0.40	0.2589	0.6047	8	0.372	1.70	0.5337	1.0273
10	0.383	1.10	0.4293	1.0028	10	0.465	2.00	0.5789	1.1143
12	0.460	2.10	0.5932	1.3856	12	0.558	2.20	0.6071	1.1687
14	0.537	2.50	0.6472	1.5118	14	0.651	2.20	0.6071	1.1687
16	0.613	2.60	0.6600	1.5417	16	0.745	2.30	0.6208	1.1949
18	0.690	2.70	0.6726	1.5711	18	0.838	2.45	0.6407	1.2333
20	0.767	2.70	0.6726	1.5711	21.49	1.000	2.40	0.6341	1.2206
22	0.844	2.70	0.6726	1.5711					
24	0.920	2.50	0.6472	1.5118					
26.08	1.000	2.50	0.6472	1.5118					

Tabla III.2.1 Mediciones puntuales de velocidad, realizadas con tubo de Prandtl, en cuatro secciones de la duna. La altura de la duna es $H = 10$ cm.



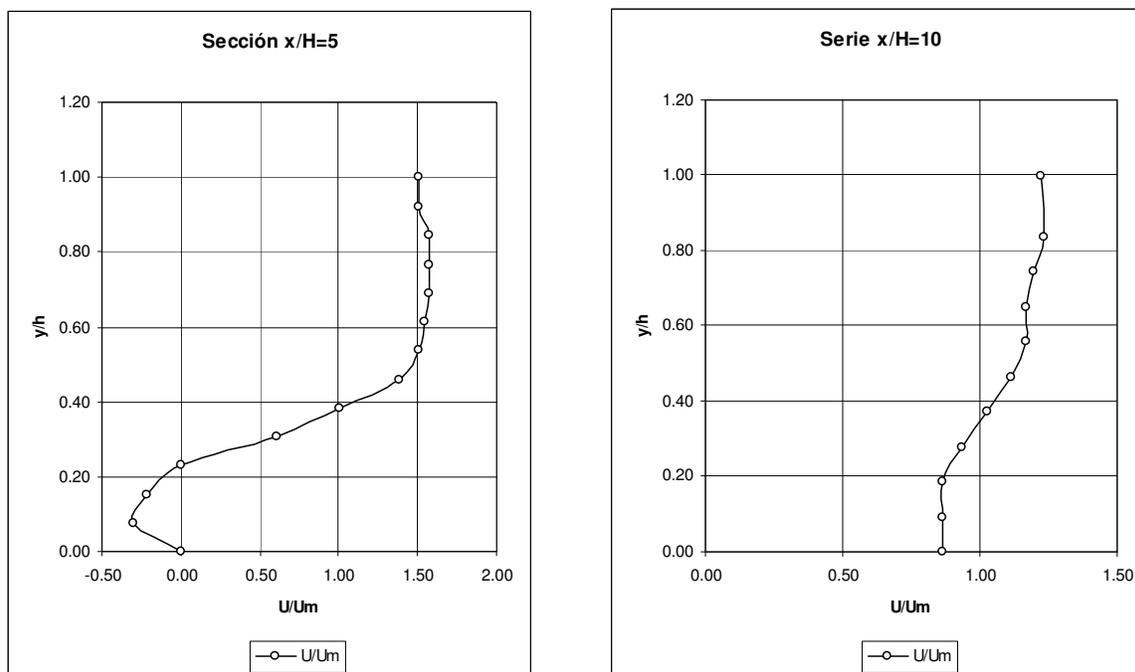


Figura III.2.1 Perfiles de velocidad adimensionalizados.

Autores	Gasto unitario q (m^2/s)	Velocidad media, $h_0=0.16m$ U_m (m/s)	Reynolds, $h_0=0.16m$ Re (adim)	Velocidad media, $h_t=0.26m$ U_m (m/s)	Reynolds, $h_t=0.26m$ Re (adim)
Müller y Gyr (1986)	0.10667	0.6667	105,931	0.4102	105,936
Presente estudio	0.11164	0.6978	110,864	0.4294	110,868

Tabla III.2.2 Comparación de las características del flujo medio con las de Müller y Gyr (1986) [12].

III.2.2 Perfiles de velocidad

Se dibujaron los perfiles de las velocidades puntuales en la dirección longitudinal con la finalidad de obtener información del campo de flujo en la región de la duna de pruebas del canal experimental.

Validación de los resultados obtenidos

Las dunas fijas bidimensionales de éste proyecto se construyeron con la misma geometría que la utilizada por Müller y Gyr (1986) con las diferencias que ya se mencionaron y por otro lado se procuró igualar las características hidráulicas del experimento de los mismos autores, tabla III.2.2. Lo anterior con la finalidad de validar los resultados obtenidos en el presente estudio. Se pretende obtener esta validación del resultado de la comparación, en primer término, de los perfiles de velocidades obtenidas en

el presente estudio con las de nuestros autores base, Müller y Gyr, (1986) y en segundo término con perfiles de otros autores cuyas características geométricas e hidráulicas en sus experimentos tengan alguna similitud con las del presente estudio.

La comparación efectuada con los perfiles de velocidad de: Bennett y Best (1995), Makiola y Ruck (1990), Martínez-Austria *et al.* (1998) y Nelson *et al.* (1993), se debió a que, como se puede observar en la figura III.2.2, únicamente se contó con datos de velocidades puntuales sobre la cresta de la duna, sección $x/H = 0$, para trazar el perfil de velocidades de Müller y Gyr (1986). En la tabla siguiente, la III.2.3, se muestra la velocidad media calculada con el tirante medio (h_m) y su correspondiente número de Reynolds.

Autores	Características del flujo		
	h_m	U_m (m/s) (h_m)	Re (adim)
Müller y Gyr (1986)	0.21	0.5079	105,918
Bennett y Best (1995)	0.12	0.4750	56,604
Makiola y Ruck (1990)	0.03	-	47,000
Nelson <i>et al.</i> (1993)	0.195	0.5100	98,759
Martínez-Austria (1998)	0.08	0.2300	18,400
Presente estudio (2000)	0.21	0.5316	110,860

Tabla III.2.3 Velocidad media y número de Reynolds de los flujos sobre dunas experimentales.

En la sección $x/H = 0$ de la figura III.2.2 el perfil de velocidades del presente estudio es una línea casi recta la cual coincide con precisión con perfil de velocidades de nuestros autores base y también con el de Bennett y Best (1995). Por lo anterior se puede concluir que se ha logrado una aceptable aproximación a las características hidráulicas y geométricas empleadas en el trabajo experimental de Müller y Gyr (1986) y que, sobre esta base, **se pueden aceptar como válidos los resultados de las mediciones hechas en la instalación experimental del presente estudio.**

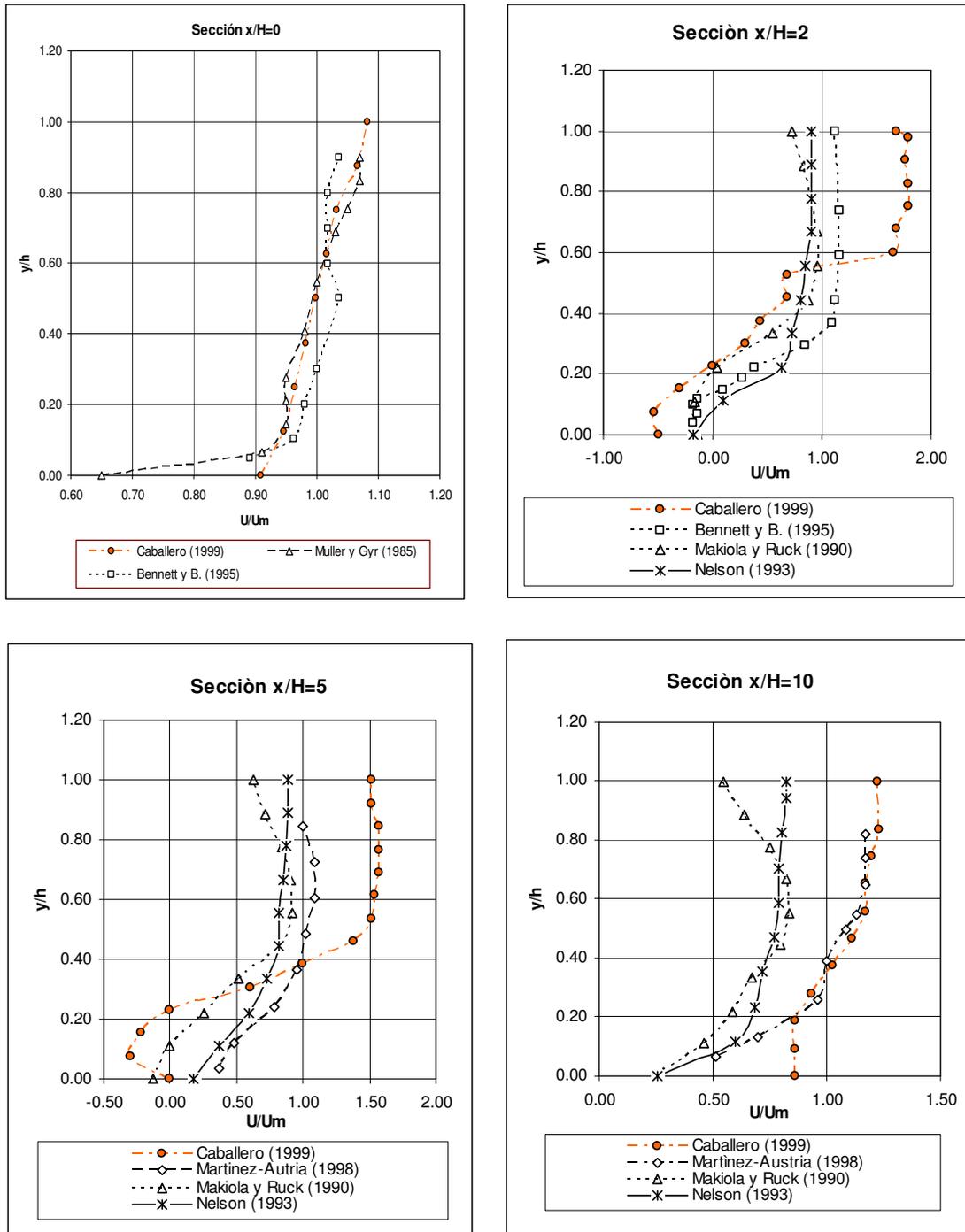


Figura III.2.2 Comparación de los perfiles de velocidades del presente estudio con las de Müller y Gyr (1986) y con los de otros autores. Ver tablas III.2.3 y III.2.4

En la siguiente tabla, la III.2.4, se muestran los números de Reynolds correspondientes a las velocidades medias, en cada sección de la duna, con las cuales se adimensionalizaron las velocidades puntuales y se trazaron los perfiles de velocidad de la figura III.2.2.

Autor	Tirante h (m)	Plantilla b (m)	Vel. media U_m (m/s)
Sección x/H = 0			
Caballero (2000)	0.1600	0.50	0.6978
Müller y Gyr (1985)	0.1600	0.60	0.6667
Bennett (1995)	0.1000	0.30	0.5700
Sección x/H = 2			
Caballero (2000)	0.2658	0.50	0.4200
Bennett (1995)	0.1353	0.30	0.4212
Makiola y Ruck (1990)*	0.0360	0.48	***
Nelson et al.(1993)	0.1800	0.70	0.5525
Sección x/H = 5			
Caballero (2000)	0.2608	0.50	0.4281
Martínez-Austria (1998)	0.0826	1.00	0.2228
Makiola y Ruck (1990)*	0.0360	0.48	***
Nelson et al.(1993)	0.1800	0.70	0.5525
Sección x/H = 10			
Caballero (2000)	0.2149	0.50	0.5195
Martínez-Austria (1998)	0.0769	1.00	0.2393
Makiola y Ruck (1990)*	0.0360	0.48	***
Nelson et al.(1993)	0.1700	0.70	0.5850

Tabla III.2.4 Velocidades medias utilizadas para adimensionalizar las velocidades puntuales en cada sección del canal experimental. *Los experimentos de Makiola (1990), se realizaron en un túnel de viento con un escalón de 30° en sotavento.

Observaciones de la comparación

Como se puede observar en la figura III.2.2 en las secciones $x/H=0$ y $x/H=10$ los valores de la velocidad puntual cerca del fondo obtenidos por los otros autores son bastante menores que los obtenidos en el presente estudio, ésta diferencia pudiera atribuirse a que se utilizó el sistema Tubo de Prandtl-Piezómetro simple el cual no fue capaz de registrar estas bajas velocidades muy cerca del fondo.

En las secciones $x/H=2$ y $x/H=5$ del presente estudio en las que se presentan velocidades negativas, el punto donde la velocidad longitudinal es cero se encuentra en ambas secciones a una altura, $y/h=0.23$, igual a 6 cm. sobre el fondo de la duna, estos puntos coinciden con los ejes de rotación del o los vórtices en la zona de recirculación.

En la sección $x/H=2$ la elevación de la cresta de la duna coincide a 10 cm del fondo ($y/h = 0.376$), en la misma sección a la altura de 14 cm del fondo ($y/h = 0.527$) y hasta el punto a 16 cm ($y/h = 0.602$) en la sección $x/H=5$ se presenta un importante salto de la

velocidad puntual lo cual pudiera atribuirse a que el primer punto se ubica dentro de la región de la estela de turbulencia y el segundo punto se encuentra fuera de esta, es decir en la corriente externa, donde la velocidad del flujo es mas alta. Por otro lado también se puede atribuir a que es muy fuerte el cambio en la geometría del fondo entre las secciones $x/H = 0$ y las secciones $x/H=2$ y $x/H=5$.

En la sección $x/H=10$ el perfil de velocidades obtenido coincide en su parte superior con el de Martínez-Austria (1998).

Tanto en el trabajo experimental de Makiola y Ruck (1990) realizado sobre un escalón como en el de Nelson *et al.* (1993) sobre dunas se utilizó una pendiente de sotavento de 30° respecto de la horizontal, semejante a la utilizada en el presente estudio de 32.8° e igual a la empleada por Müller y Gyr (1987).

Por otro lado también son coincidentes las secciones utilizadas por los autores mencionados $x/H=0$, $x/H=2$, $x/H=5$ y $x/H =10$ con las del presente trabajo. Estas son las razones por las cuales se decidió hacer una comparación con estos perfiles de velocidades. La parte superior de los perfiles de velocidades de Makiola y Ruck (1990) en las secciones $x/H=2$, $x/H=5$ y $x/H=10$ se desvían a la izquierda de las otras distribuciones debido al efecto de fricción del fluido (aire, en este caso) con la pared superior del túnel de viento en que se efectuaron las pruebas.

III.3 Visualización de estructuras coherentes

Uno de los objetivos del presente trabajo es el de estudiar a las estructuras coherentes turbulentas generadas por la separación del flujo detrás de dunas con la finalidad de contribuir a la comprensión de los diversos mecanismos de transporte de sedimentos y su relación con la estabilidad de las dunas.

Resultado del empleo de las técnicas de inyección de tinta y partículas trazadoras se logró identificar y obtener algunas características espacio-temporales de las estructuras coherentes generadas en el campo de flujo de las dunas de pruebas. Las imágenes generadas con las técnicas de visualización mencionadas se video grabaron con una cámara profesional y transferidas a cinta magnética (video casete VHS), tiempo después digitalizadas y analizadas en un monitor de computadora utilizando el programa Reproductor de Windows Media.

Video grabación de imágenes

El Reynolds utilizado por Müller y Gyr (1986) en su trabajo experimental es de 105,925, calculado con la velocidad media obtenida con el $h_m = 0.21$ m. El valor mas cercano a éste número que fue posible lograr en el canal experimental, para la video grabación de imágenes, fue de $Re = 107,469$. Se video grabaron imágenes para seis números de Reynolds diferentes, tres menores a 107,469 y dos mayores, con la finalidad de conocer la variación de algunas características de las estructuras respecto del número de Reynolds. Las características hidráulicas del flujo durante la sesión de video grabación en la que se procuró igualar las condiciones hidráulicas del experimento de Müller y Gyr (1986) [12], se pueden consultar en la tabla III.3.1. Las características de las estructuras coherentes que fue posible medir utilizando las imágenes video grabadas fueron: la longitud de las ondas de Kelvin y Helmholtz, el ángulo de dispersión de la estela de turbulencia, la identificación de algunas estructuras coherentes, dos patrones de flujo y la frecuencia del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos.

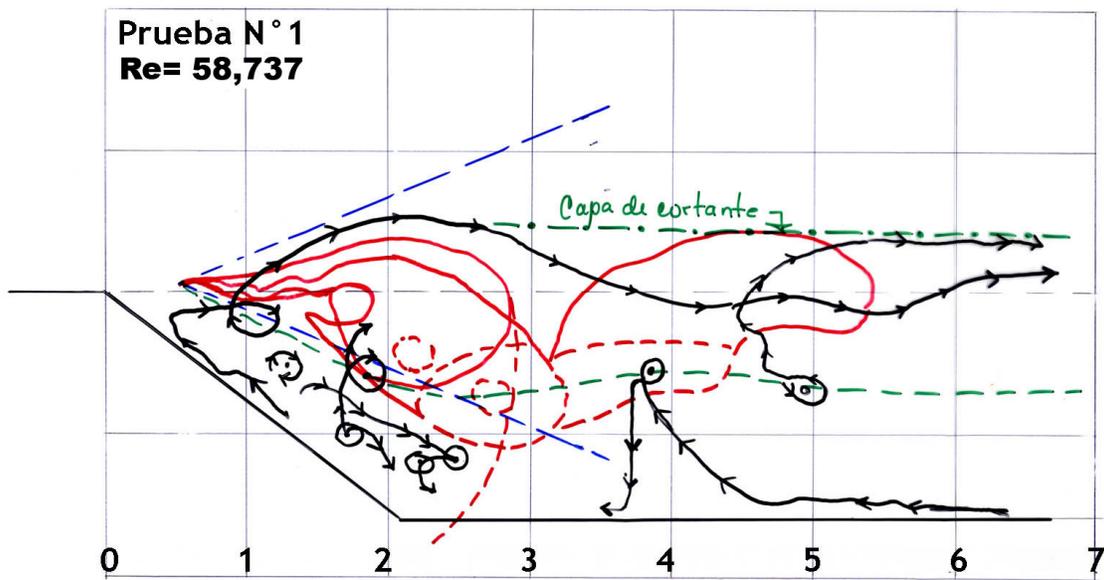
Prueba Nº	Posición de la compuerta H (cm)	Tirante s/cresta duna h_o (m)	Gasto vertedor Q (m ³ /s)	Vel. media s/cresta duna $h_o = 0.16$ m	Vel. media, tirante medio $h_m = 0.21$ m	Reynolds $Re = \frac{U_m h_m}{\nu}$ (h_m)
				Vm_o (m/s)	Vm_m (m/s)	Re (adim)
1	7.50	0.16	0.02957	0.36968	0.28166	58,737
2	5.00	0.16	0.03985	0.49811	0.37951	79,144
4	2.50	0.16	0.05230	0.65375	0.49809	103,872
3	2.50	0.16	0.05411	0.67639	0.51534	107,469
5	0.00	0.16	0.05550	0.69378	0.52859	110,233
6	-2.50	0.16	0.05885	0.73563	0.56048	116,882

Tabla III.3.1 Características del flujo en la sesión de video grabación.

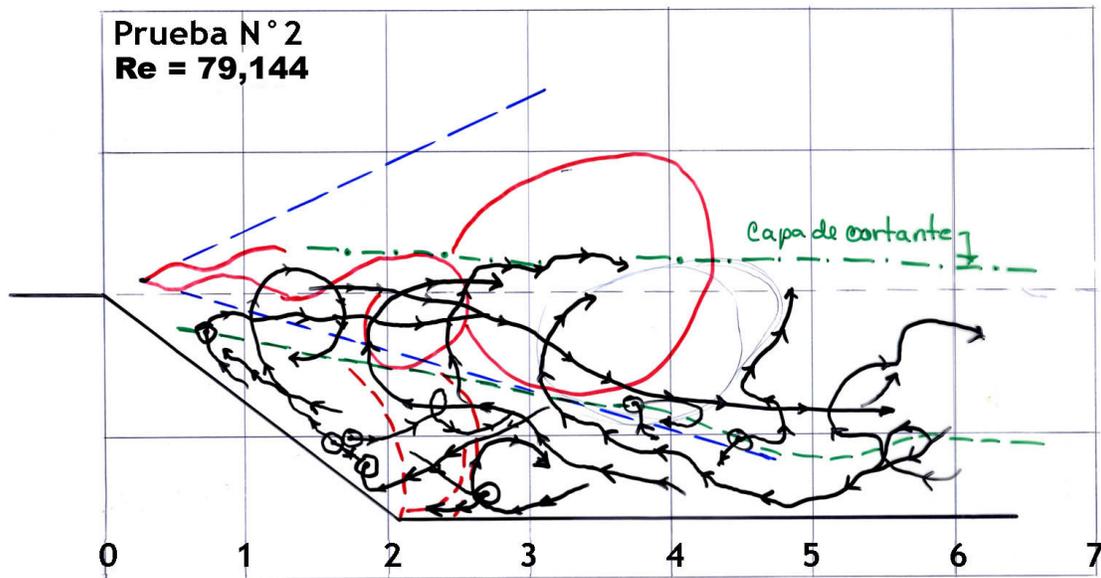
La descripción detallada de la instalación experimental, del equipo utilizado, del procedimiento experimental y de visualización, etc., se puede consultar en el capítulo II.

Trazos del campo de flujo detrás de la duna de pruebas.

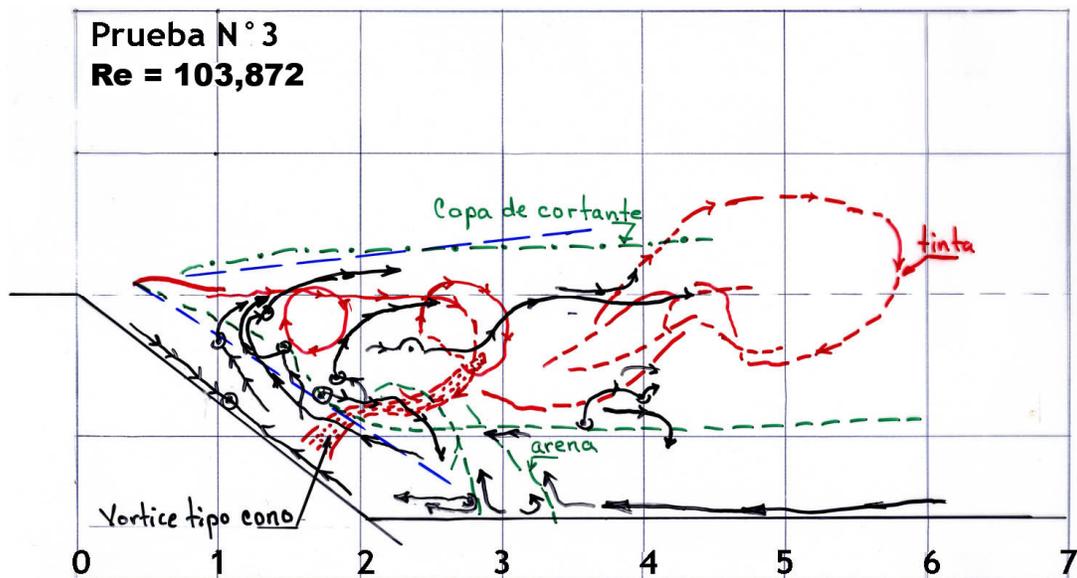
Estos trazos se realizaron sobre hojas transparentes de acetato para analizar y medir las estructuras identificadas en las imágenes video grabadas. En las que se puede observar: 1. Líneas de traza de partículas de flotabilidad neutra representadas con línea continua de color negro y flechas que indican el sentido del flujo, donde los pequeños círculos son giros de la partícula en torno a un punto durante un intervalo de tiempo. 2. En color rojo: trazos de los vórtices discretos visualizados con la técnica de inyección de tinta. 3. La línea discontinua inferior en color verde representa la frontera inferior de la estela de dispersión. 4. La línea discontinua superior, raya punto raya, en color verde, representa la capa cortante y 5. Las líneas discontinuas azules contienen el ángulo de la estela de dispersión.



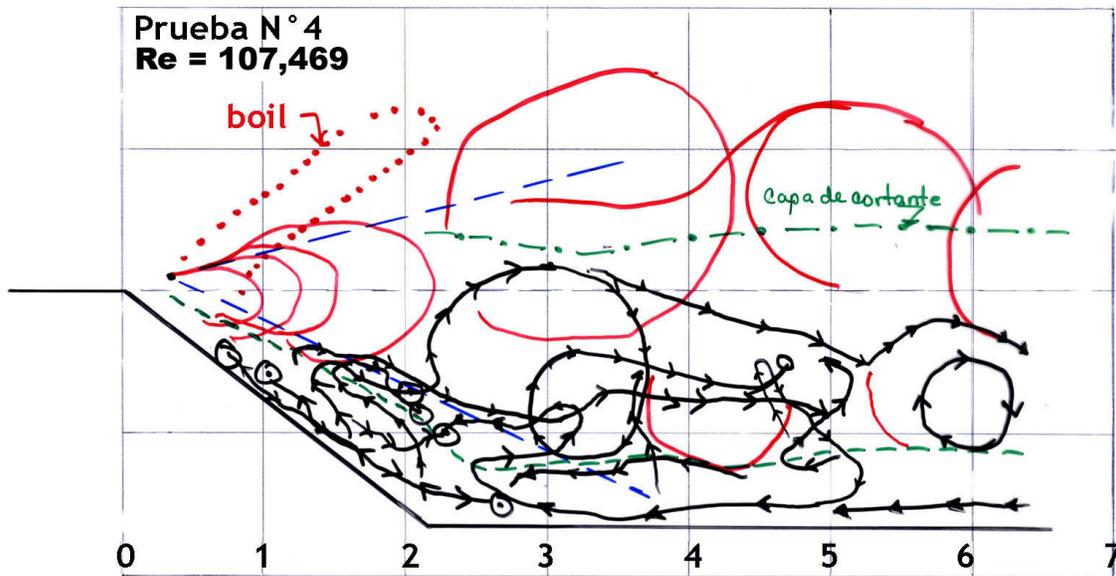
Prueba No 1. La línea inferior de la estela de dispersión fue trazada uniendo los puntos de pequeños círculos, sugiriéndose que la partícula se encuentra en la interfase del flujo en el sentido de la corriente y el flujo inverso. Retícula de 5 x 5 cms.



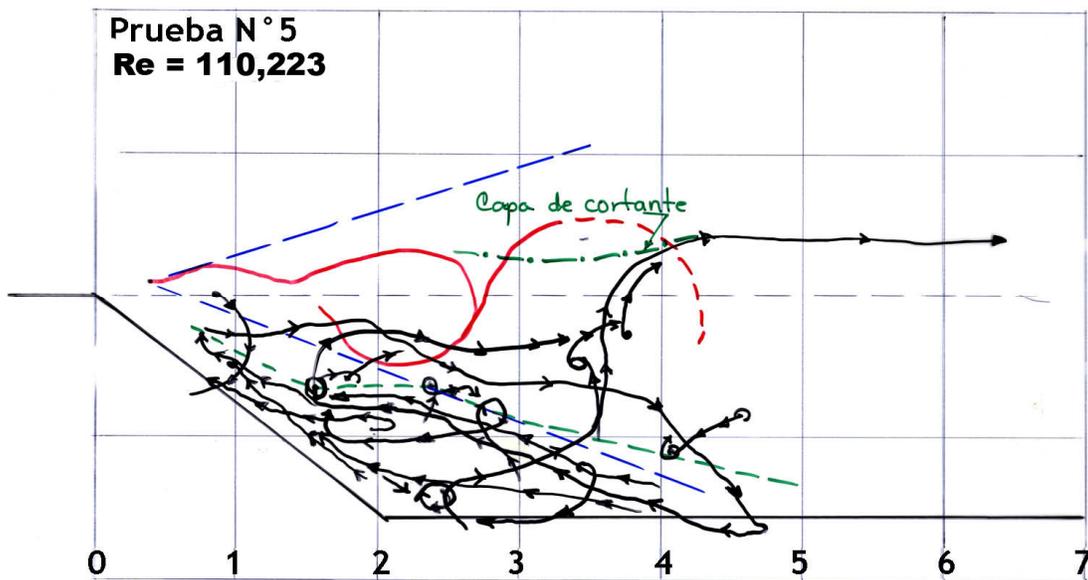
Prueba No 2. Obsérvese una entrada clara de eyecciones de fluido del flujo inverso al interior de la estela de dispersión. La líneas rojas verticales discontinuas indican el avance de las partículas de arena relacionadas con la formación y avance de los vórtices discretos.



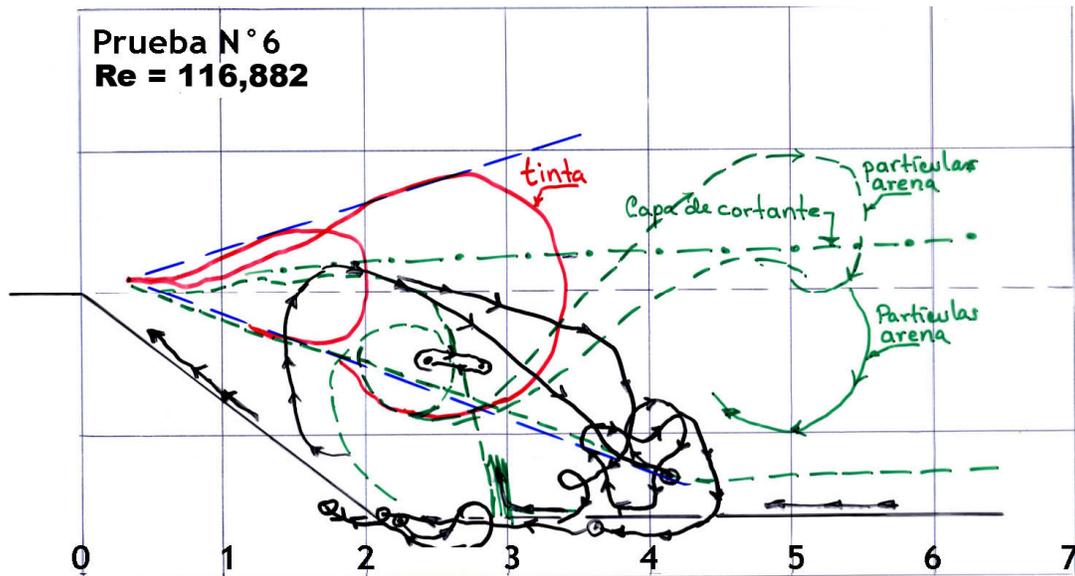
Prueba No 3. Obsérvese el trazo de un vórtice tipo cono el cual se eyecta desde la pendiente pronunciada de la duna en dirección de la corriente principal. Obsérvese también eyecciones de flujo del fondo hacia la superficie al interceptarse *barridos* del flujo, relacionados con el desplazamiento rotatorio del vórtice discreto, con el flujo inverso.



Prueba No 4. Obsérvese el desprendimiento de un *Boil* desde la cresta de la duna, con una inclinación de 36° , el cual no alcanza la superficie libre del agua.



Prueba No 5. En esta figura se puede observar que el desplazamiento del flujo inverso es casi paralelo a la línea inferior de la estela de dispersión y la formación de pequeños vórtices dentro de la zona del flujo inverso cercano a la pendiente pronunciada de la duna.



Prueba No 6. En estos trazos puede observarse nuevamente eyecciones verticales ascendentes de fluido debido al choque de flujos descendentes, *barridos*, y el flujo inverso.

El punto de inyección de tinta se encuentra ubicado en la cresta de la duna sin embargo en estos trazos parece estar desplazada hacia delante lo cual es un efecto de perspectiva debido a que la ubicación de la cámara de video grabación no se ubicó perpendicular a la cresta de la duna, sino aproximadamente a la mitad del área visualizada. La misma explicación tienen los trazos que parecen salir de las paredes del fondo de la duna experimental.

III.3.1 Identificación de Estructuras Coherentes Turbulentas

La identificación de las estructuras se hizo por medio de la visualización directa en el canal experimental y mediante el análisis de las imágenes video grabadas.

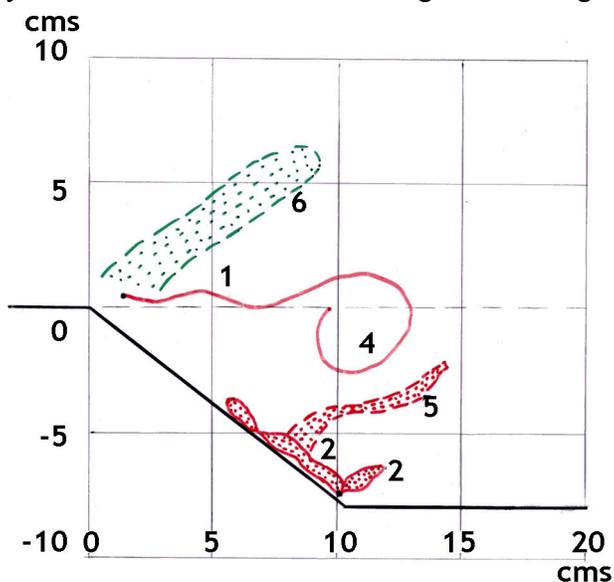


Figura III.3.1 Esquema de los diferentes tipos de estructuras identificadas detrás de la duna de pruebas.

Se describen a continuación las estructuras identificadas en el esquema de la figura III.3.1 excepto la estructura No 3 que corresponde a los vórtices tipo cilindro elíptico o vórtice *ojo*. No se cuenta con imágenes video grabadas de la estructura completa.

1. Ondas de Kelvin-Helmholtz.

Estas ondas se generan en la capa de cortante debido a la interacción entre el flujo medio y el flujo estacionario detrás de la cresta de la duna en la zona de separación. El tren de ondas de Kelvin-Helmholtz (K-H) tiene un movimiento de *ondeamiento* en el sentido del flujo con eje en la cresta de la duna. Después de la primera o segunda onda de K-H se empieza a formar un vórtice discreto el cual toma una posición inicial arriba, abajo o coincidiendo con un plano horizontal en la cresta de la duna dependiendo de la posición en que se encuentre la capa cortante en su movimiento de ondeamiento.

Martínez-Austria *et al.* (1998) afirman que al incrementarse la velocidad del flujo las ondas de K-H aumentaron su frecuencia por lo que consideran como muy probable que este tipo de ondulaciones periódicas produzcan cambios en la longitud de la separación lo cual se puede afirmar como se pudo observar físicamente en el canal experimental.

2. Vórtices pequeños tipo tornado

En la parte baja de la cara con mayor pendiente donde inicia la parte horizontal de la siguiente duna, se ubicó un inyector de tinta el cual permitió visualizar pequeños vórtices tipo tornado los cuales se desplazan sobre esta cara de la duna y se separan de la misma en

forma intermitente. Estos vórtices se forman debido al flujo vertical ascendente sobre la cara de mayor pendiente proveniente del flujo inverso dentro de la zona de recirculación. La intermitencia de su formación y separación de la cara de la duna está estrechamente relacionada con la formación y avance de los vórtices discretos.

3. Vórtices tipo cilindro elíptico o vórtice *ojo*.

Se identificó visualmente la formación de un vórtice transversal de gran tamaño en forma de cilindro elíptico bajo la capa de cortante donde el flujo recircula y el cual se corresponde con la fase 2 (fig. I.2.19) de la secuencia de evolución de patrones de líneas de corriente descrita por Espinoza y Martínez (2000) [36]. A esta estructura coherente turbulenta o vórtice horizontal y transversal al flujo se conoce, por su forma, como vórtice *ojo*.

4. Vórtices separados de la capa de cortante

En las imágenes videograbadas se aprecian los vórtices separados o discretos resultantes de la evolución de las ondas de K-H y visualizados gracias al inyector de tinta ubicado en el borde de la cresta de la duna. El fluido teñido permitió observar con claridad la formación de los vórtices discretos y la técnica de partículas trazadoras facilitó identificar la afectación de los vórtices separados bajo la estela de dispersión. El vórtice de gran tamaño en forma de tubo elongado o vórtice *ojo*, fase 2 de la secuencia de evolución, se disipa para dar paso a la fase 3 en la cual los vórtices separados pasan a formar parte de los vórtices de recirculación. Lo anterior se pudo determinar al observar las imágenes videograbadas del mismo experimento, sin cambio en las condiciones hidráulicas, con las dos técnicas de visualización empleadas, aunque no de manera simultánea. Con la técnica de inyección de tinta los vórtices separados se visualizan aproximadamente en la línea de la capa de cortante pero al emplear partículas trazadoras se observa que hay una afectación de los vórtices separados bajo la estela de dispersión dentro de la zona de recirculación.

5. Vórtices tipo Cono (*funnel*). Estos vórtices se desprenden de la cara más pronunciada de la duna y avanzan en trayectoria espiral en dirección del flujo. El vórtice sale de la zona de recirculación y se inserta en la zona de estela de dispersión. Se forma periódicamente y pudiera tener como origen una diferencia de presión en la zona del flujo inverso sobre la cara de mayor pendiente haciendo que se eyecte un chorro de flujo hacia la corriente principal.

6. Boil. Se observa el desprendimiento de un *Boil* de la cresta de la duna formando un ángulo de 36° respecto de la horizontal, el cual no alcanza la superficie libre del agua. Se trazó en color verde para indicar que su identificación se hizo con partículas de arena. El número de Reynolds del flujo fue de 107,469.

III.3.2 Patrones de flujo

El movimiento del flujo dentro de la zona de recirculación es bastante aleatorio por lo que encontrar un patrón de flujo es bastante difícil, sin embargo, pueden reconocerse algunas características del movimiento que nos acercan a un patrón de flujo para un número de Reynolds. Se presentan dos patrones de flujo representativos del rango de números de Reynolds utilizado, $58,737 \leq Re \leq 116,882$, en este trabajo experimental.

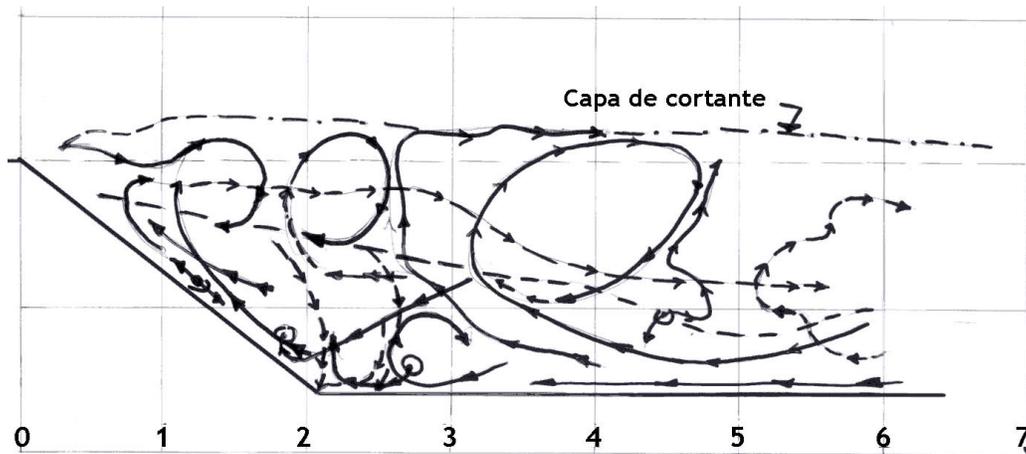


Figura III.3.2 Patrón de flujo obtenido para un $Re = 79,144$ utilizando líneas de traza y la técnica de inyección de tinta. La malla o retícula tiene una separación de 5×5 cms.

En la figura III.3.2 se muestra el patrón de flujo de la prueba No 2 para un $Re = 79,144$. Este patrón se dibujó utilizando las líneas de traza de algunas partículas sólidas en la visualización con inyección de tinta durante los 30 segundos de la video grabación por lo que el patrón no corresponde un instante del movimiento, como en una fotografía, sino que muestra la suma de diferentes instantes del flujo dentro de la zona de recirculación.

De la figura III.3.2 se pueden desprender las siguientes observaciones, algunas otras serán comunes con el patrón de la figura III.3.3.

1. El patrón de flujo dentro de la zona visualizada varía en función del *Ondeamiento* de la capa de cortante y de la secuencia de formación, crecimiento y desprendimiento de los vórtices discretos.
2. Las líneas de traza definen claramente la posición de la capa de cortante por sobre un plano horizontal en la cresta de la duna. En las imágenes de la video grabación se observó que cuando la partícula trazadora en su ascenso alcanza la capa de cortante ésta avanza rápidamente a la velocidad del flujo exterior.
3. Los pequeños círculos con un punto al centro sobre las líneas de traza son pequeños vórtices en los que la partícula trazadora realizó giros en torno un punto por encontrarse en la interfase de dos corrientes de sentido contrario. Estos puntos ayudaron en el trazo de la línea que separa la estela de dispersión del flujo inverso. Esta línea discontinua no

permanece estática y varía a cada momento en función de la estructura del campo de flujo que generan los vórtices discretos.

4. En la zona del flujo inverso se puede observar los siguientes aspectos:

a) La formación de pequeños vórtices, similares a los vórtices discretos, y eyecciones del flujo del fondo hacia la superficie (*Burts*) son provocados por el encuentro intermitente de un flujo descendente con el flujo inverso. Este flujo descendente puede ser identificado con los *Barridos* descritos por Bennett y Best (1995).

c) Con un flujo principalmente inverso sobre la cara de mayor pendiente de la duna se deslizan partículas pendiente abajo y partículas que ascienden y descienden sobre la parte media de la misma cara generan el proceso de avance de dunas naturales. También se observan pequeños giros como los descritos arriba en el inciso 3.

d) Como puede observarse en el patrón de flujo y en los trazos de las pruebas gran parte del flujo inverso se eleva para reintegrarse a la estela de dispersión a formar parte nuevamente de los vórtices discretos arrastrando consigo partículas sólidas del fondo.

El patrón de la figura III.3.3 se construyó utilizando como base los trazos de la prueba No 4 con $Re = 107,469$.

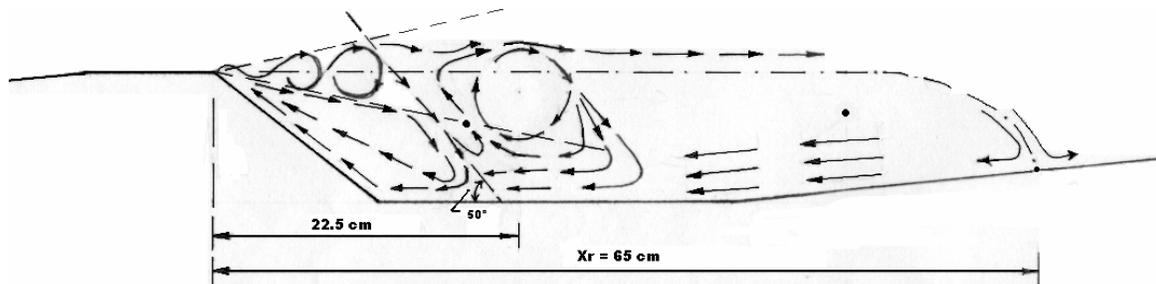


Figura III.3.3 Patrón de flujo obtenido para un $Re = 107,469$, utilizando líneas de traza y la técnica de inyección de tinta.

En el trabajo experimental de Espinoza y Martínez (2000) se describen cuatro configuraciones o patrones de líneas de corriente, las cuales se repiten de manera secuencial y por lo tanto a cada patrón se le considera como una fase del ciclo denominado *secuencia de evolución de patrones de líneas de corriente*. Debido a que la fase 3 (fig. I.2.18) descrita en el inciso I.2.3. c) presenta algunas similitudes con los patrones de las figuras III.3.2 y III.3.3 es probable que exista alguna relación o correspondencia entre ambos patrones pese a la diferencia en los números de Reynolds empleados. Las líneas de corriente en los punto S tienen un ángulo de $\pm 45^\circ$ respecto de la dirección del flujo principal, Antonia *et al.* (1986). Este valor de 45° es cercano al valor encontrado de 50° en la figura III.3.2, por lo que pudiera existir alguna relación o semejanza.

Del patrón de la figura III.3.3 se pueden desprender las siguientes observaciones:

1. Después de la formación del segundo vórtice una partícula trazadora baja, formando un ángulo de 50° respecto de la horizontal, hasta aproximadamente un 65% de la altura de la duna, posteriormente la misma partícula sube con el mismo ángulo de inclinación hasta que ésta es atrapada y arrastrada por el vórtice a su derecha o por el flujo exterior sobre la capa de cortante. Este patrón se repite en la mayoría de los experimentos video grabados.
2. Observando la figura y coincidiendo con la descripción del inciso anterior se observan “barridos” hacia el fondo del canal, de acuerdo con el estudio de Bennett y Best (1995) en el que utilizaron el método del cuadrante para evaluar las contribuciones de eventos turbulentos sobre formas de fondo y en el que se puede apreciar que coinciden en las mismas zonas. Estos “barridos” son flujos producidos por la fuerza centrífuga de los vórtices que avanzan girando hacia aguas abajo.
3. El patrón de la figura III.3.3 se forma de manera intermitente coincidiendo con el movimiento de *Ondeamiento* de la capa cortante y la formación de vórtices separados los cuales avanzan girando y creciendo en el sentido del flujo. En este patrón el signo • indica un punto dentro del flujo en el cual la velocidad medida es cero, ver los perfiles de velocidad en la figura III.2.1 y la tabla III.2.1. Ambos puntos • se ubican a $y/h = 0.23$, igual a 6 cm sobre el fondo de la duna, el primero en la sección $x/H=2$, el segundo en $x/H=5$. El punto • de la sección $x/H=2$ se ubica en un sitio entre flujos de sentido contrario y coincidiendo también con la línea inferior de la estela de dispersión.
4. Sobre la zona de separación del flujo y a lo largo de la capa de cortante se observó la formación y evolución de vórtices discretos dentro de una región casi triangular con origen en la cresta de la duna y dentro de dos líneas imaginarias sin un extremo derecho definido. Al ángulo formado por dichas líneas se le ha denominado ángulo de dispersión de la estela de dispersión.

III.4 Características de las estructuras del flujo en la separación para $58,737 \leq Re \leq 116,882$.

En el presente estudio se llevó a cabo la medición de las siguientes características espacio-temporales del flujo detrás de la duna de pruebas: Longitud de las ondas de Kelvin y Helmholtz, Angulo de la Estela de dispersión de la turbulencia, Longitud de la separación del flujo, Estructura típica y, Ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos, Frecuencia del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos. Los resultados se describen en los siguientes incisos.

La medición de las características espaciales se llevó a cabo de la siguiente manera: Se colocó una lámina de acetato sobre el monitor de la computadora y se trazaron cuidadosamente las estructuras coherentes visualizadas con las técnicas de inyección de tinta y la incorporación de partículas. Previamente en una pared del canal experimental y justo en el campo de flujo de la duna de pruebas se trazó una retícula de 5x5 cms para mantener la escala del modelo. Sobre las hojas de acetato y con la referencia de la cuadrícula se midieron directamente las características espaciales mencionadas, excepto la longitud del reatado la cual se midió físicamente en el canal experimental cuando se trabajó con partículas trazadoras.

III.4.1 Longitud de las Ondas de Kelvin y Helmholtz

La longitud de las ondas de Kelvin y Helmholtz λ_0 fue adimensionalizada con el tirante sobre la cresta de la duna h_0 . El número de Reynolds fue calculado con la siguiente ecuación: $Re = \frac{U_m h_m}{\nu}$ donde U_m es la velocidad media, h_m el tirante medio y la viscosidad cinemática $\nu = 1.007 \times 10^{-6}$.

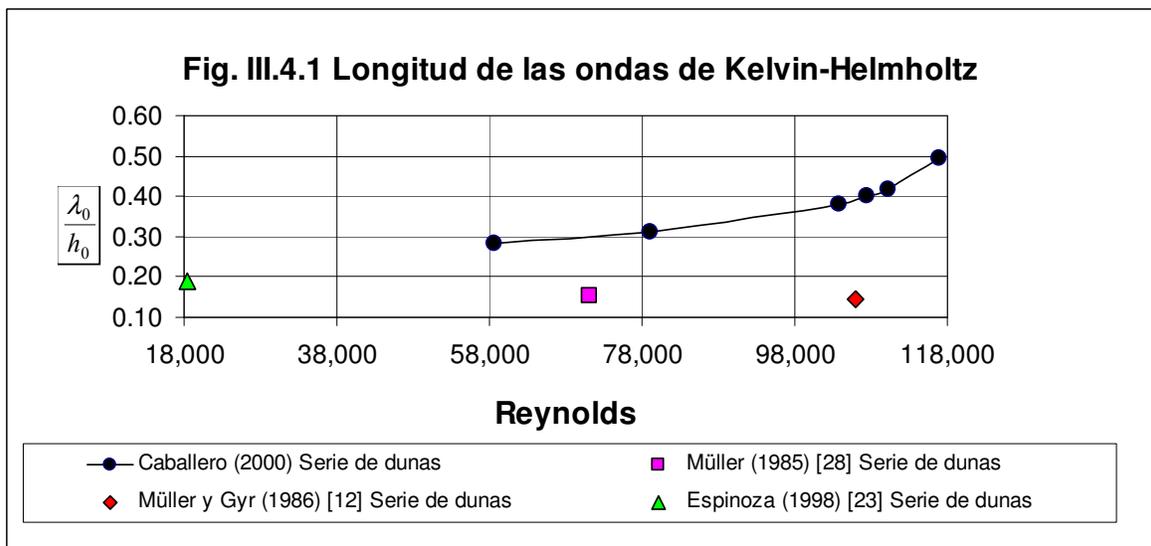


Figura III.4.1 Longitud de las ondas de Kelvin y Helmholtz detrás de duna de pruebas.

Como se puede observar en la figura los valores de λ_0 para el rango de números de Reynolds de $58,737 \leq Re \leq 116,882$, de este trabajo, muestran una variación creciente respecto del número de Reynolds.

III.4.2 Angulo de la Estela de dispersión de la turbulencia.

El ángulo (α) de la estela de dispersión de la turbulencia, en la tabla siguiente, se midió sobre los trazos del inciso anterior y se consideró como el ángulo formado por las líneas imaginarias dentro de las cuales se forma el primer vórtice discreto.

Se calculó el ángulo (α) utilizando ecuación No 1 de Müller y Gyr (1986) [12] que se describe en el inciso I.2.2 b) y que se anota adelante. Este calculo se realizó utilizando en principio los datos de Acton (1976) quien realizó un experimento numérico sobre el desarrollo de una capa de cortante modelada por una banda de vórtices discretos y perturbada para obtener una longitud de onda λ , en la que se muestra claramente la inestabilidad del estrato y la formación del primer par vorticoso. Posteriormente se utilizó la ecuación (No 2) con los datos medidos del presente estudio.

Müller y Gyr (1986) [12], utilizando los resultados numéricos de Acton (1976), señalan que el intervalo de tiempo adimensionalizado ΔT_n del n-ésimo proceso de formación de pares de vórtices corresponde a un tiempo:

$$\Delta T_n = \frac{tU}{2\lambda_n} = 1.6$$

Por otra parte, la distancia Δx_n es igual a: $\Delta x_n = \frac{\Delta t_n U}{2} = 1.6\lambda_n$

Finalmente los autores concluyen que, el ángulo de difusión es:

$$\alpha = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{r_0}{1.6\lambda_0} \right) \quad \text{Ec. No 1}$$

Donde r_0 es el radio del primer vórtice discreto y λ_0 es la longitud de onda de la inestabilidad inicial.

En el caso del presente estudio se encontró que el tiempo de formación de un par vorticoso es de aproximadamente $t = 0.333$ segundos, este valor fue obtenido observando los trazos en los acetatos en los que se formaron aproximadamente tres pares vorticosos en un segundo. Se hizo de esa manera ya que el Reproductor de Windows Media utilizado no cuenta con un contador con centésimas de segundo. El valor obtenido del intervalo ΔT_0 es de 1.45, calculado de la siguiente manera:

$$\Delta T_0 = \frac{tU}{2\lambda_0} = \frac{0.333 \times 0.51534}{2 \times 0.059} = 1.45$$

Donde U es la velocidad media del flujo con $y_m = 0.21$ m.

Finalmente la ecuación obtenida fue la siguiente:

$$\alpha = 2 \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{r_0}{1.45\lambda_0} \right) \quad \text{Ec. No 2}$$

	Reynolds,	Radio vórtice discreto	Longitud de onda	Angulo de la estela	Angulo de la estela	Angulo de la estela
Prueba No	Vel. Media $h_0 = 0.21$ m	r_0 (medido)	λ_0 (medido)	Ec. No 1 con datos de Acton	Ángulos medidos Caballero	Ec. No 2 con datos de Caballero
	(adim)	(m)	(m)	(grados)	(grados)	(grados)
1	58,737	0.02554	0.0590	30.28	34.75	33.24
2	79,144	0.02490	0.0650	26.93	30.50	29.60
3	103,872	0.02460	0.0800	21.76	28.40	23.95
4	107,469	0.02437	0.0840	20.55	28.30	22.63
5	110,233	0.02420	0.0880	19.50	26.40	21.48
6	116,882	0.02400	0.1040	16.41	23.30	18.09

Tabla III.4.1 Ángulos de la estela de dispersión de turbulencia, medidos y calculados. El ángulo medido promedio es de 28.61°.

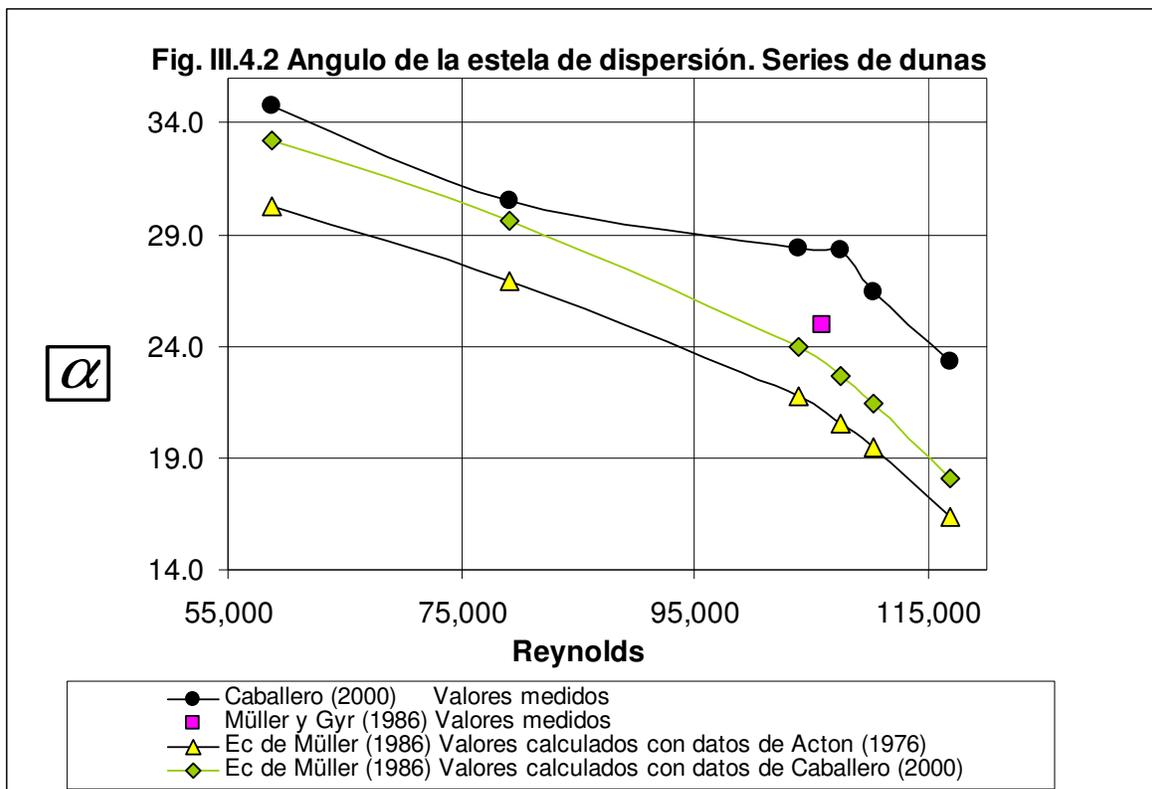


Figura III.4.2 Ángulos de la estela de dispersión de turbulencia, medidos y calculados.

Como se puede observar en la grafica de la Figura III.4.2 los valores calculados con las ecuaciones No 1 y 2 y el valor único de Müller y Gyr (1986) [12] se corresponden bastante bien con los valores medidos del presente estudio.

Ángulo máximo (α_{\max}) de la estela de dispersión de la turbulencia

Dado que la capa de cortante tiene un *ondeamiento* se puede conocer el ángulo máximo dentro del cual se forman los vórtices discretos y al que se podría denominar como ángulo máximo (α_{\max}) de la estela de dispersión de la turbulencia.

Los valores del ángulo máximo (α_{\max}) de la estela de dispersión anotados en la tabla III.4.2 fueron medidos, como ya se indicó, sobre las hojas de acetato considerando el ángulo máximo formado por la líneas imaginarias dentro de las cuales se formaron los primeros tres vórtices discretos durante los aproximadamente 30 segundos de video grabación.

Tabla III.4.2 Ángulo máximo de la estela de dispersión de la turbulencia	
No de Reynolds, Vel. Media, $h_m = 0.21$ m	Valores medidos Caballero (2000) α_{\max}
58,737	44.83
79,144	41.00
103,872	39.13
107,469	39.00
110,233	38.00
116,882	38.00

Tabla III.4.2 Ángulo máximo de la estela de dispersión de la turbulencia. El ángulo máximo promedio es de 40° .

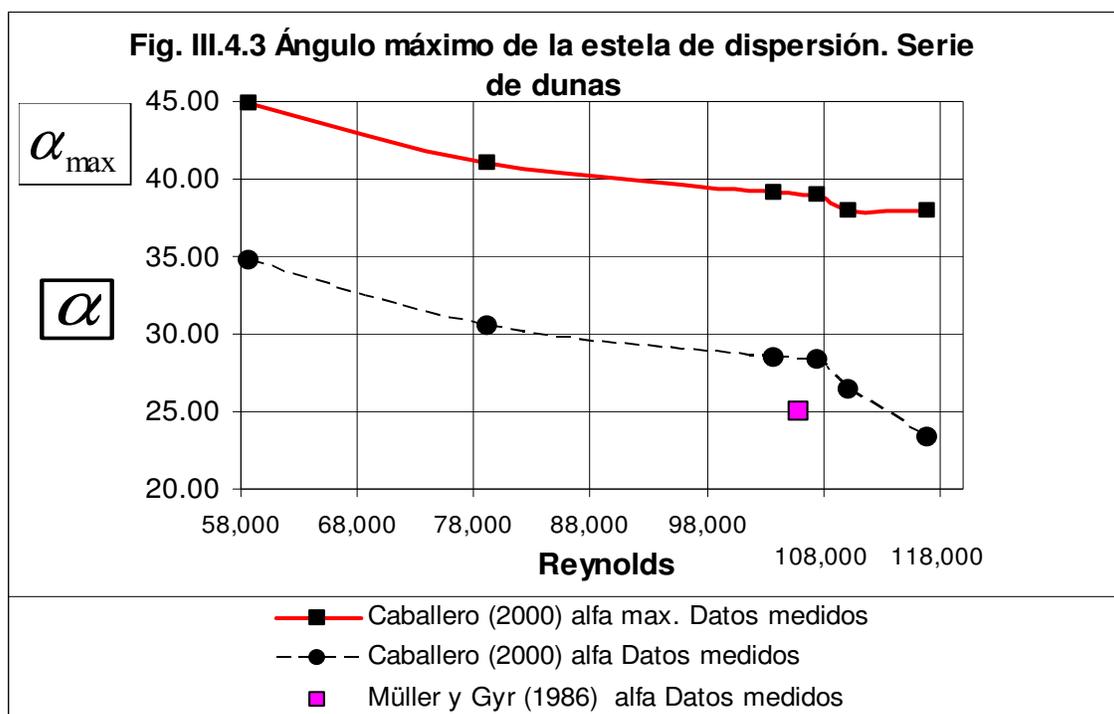


Figura III.4.3 Ángulo máximo de la estela de dispersión, curva superior y, ángulo normal de la estela en la curva con línea discontinua y valor inferiores.

En la gráfica anterior se puede observar que ambas curvas, α y α_{\max} , son casi paralelas excepto en el último tramo, lo cual indica que después del 5° punto experimental, correspondiente a un $Re=110,233$, ya no disminuye más el α_{\max} . Diferente de la tendencia de la curva de α que siguió disminuyendo hasta el último valor de Re experimentado. El ángulo promedio de α_{\max} es 39.825% más grande que el ángulo promedio del α normal, ambos medidos en este estudio.

III.4.3 Longitud de la separación del flujo

La longitud de la separación del flujo detrás de dunas, X_r , se considera como la distancia entre la cresta de la duna de pruebas y el punto donde cae la capa de cortante sobre la pendiente suave de la siguiente duna. A este punto se le considera también como punto de cierre de la zona de recirculación del flujo el cual se desplaza longitudinalmente dentro de una región de aproximadamente $\pm h_s$.

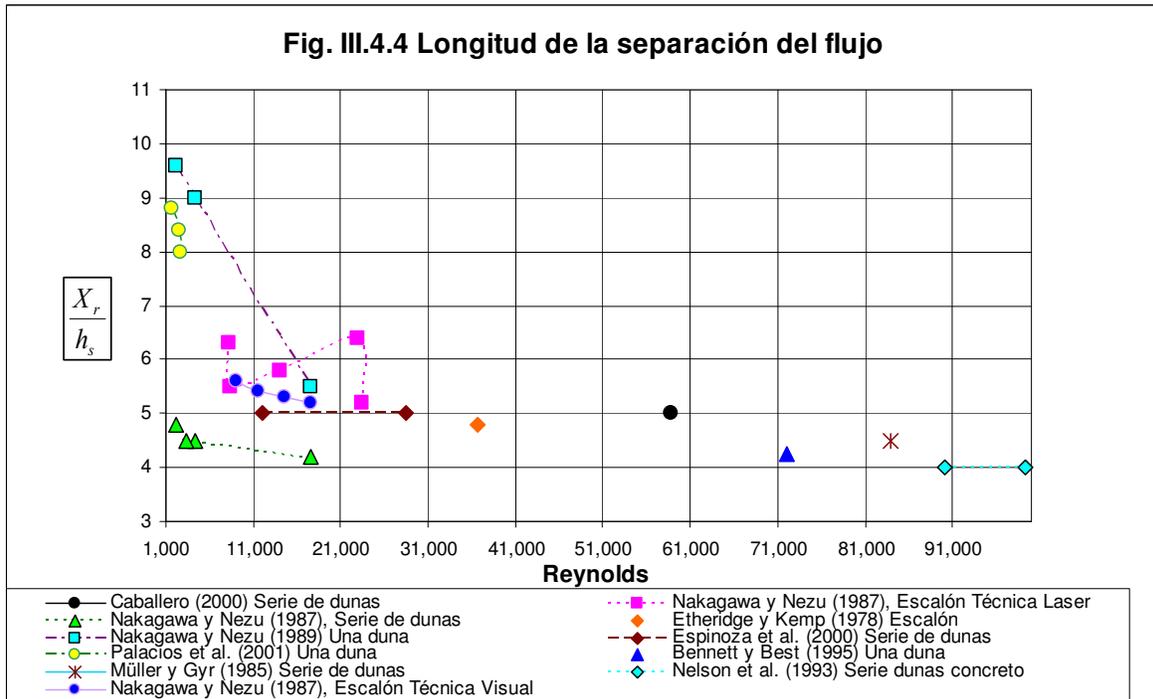


Figura III.4.4 Longitud de la separación del flujo adimensionalizada con la altura de la duna (h_s) respecto del número de Reynolds.

Algunas observaciones de los valores experimentales de la figura anterior:

1. Al crecer los números de Reynolds la variación de la longitud de separación va disminuyendo, hasta hacerse casi constante, sobre todo en series de dunas.
2. Es claro que las longitudes de separación para una serie de dunas es menor que para una sola duna y también para el caso de escalones.
3. La máxima longitud de separación se presenta en escalones. Debido a que el flujo sobre un escalón se considera un caso especial de duna con una longitud de onda λ infinita a diferencia de las formas de fondo que tienen pendientes pronunciadas hacia aguas arriba y por lo tanto una longitud de onda acotada.
4. El punto único medido en este estudio para un número de Reynolds de 58,737 tiene una longitud de separación adimensionalizada de 5, en línea con los valores de

Espinoza *et al.* (2000) para una series de dunas. Este punto fue medido físicamente en el canal.

Los resultados reportados en la literatura muestran que la variación de la longitud adimensionalizada varía entre 4 y 10 tanto para una duna, series de dunas y escalones, excluyendo a los rizos.

III.4.4 Estructura típica y, ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos.

Estructura típica de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas.

Los vórtices discretos que se desprenden de la cresta de una duna son estructuras que muestran una gran variación en su forma, no hay una igual que otra, sin embargo, es posible distinguir algunas características generales que permiten una aproximación a lo que se pudiera considerar como una estructura típica para las mismas condiciones experimentales y diferentes números Reynolds. Se trató de capturar el momento de la formación del par vorticoso antes de la coalescencia o amalgamiento de los vórtices discretos. El procedimiento consistió en escoger de los trazos en hojas de acetato una estructura que pudiera ser representativa para ese número de Reynolds.

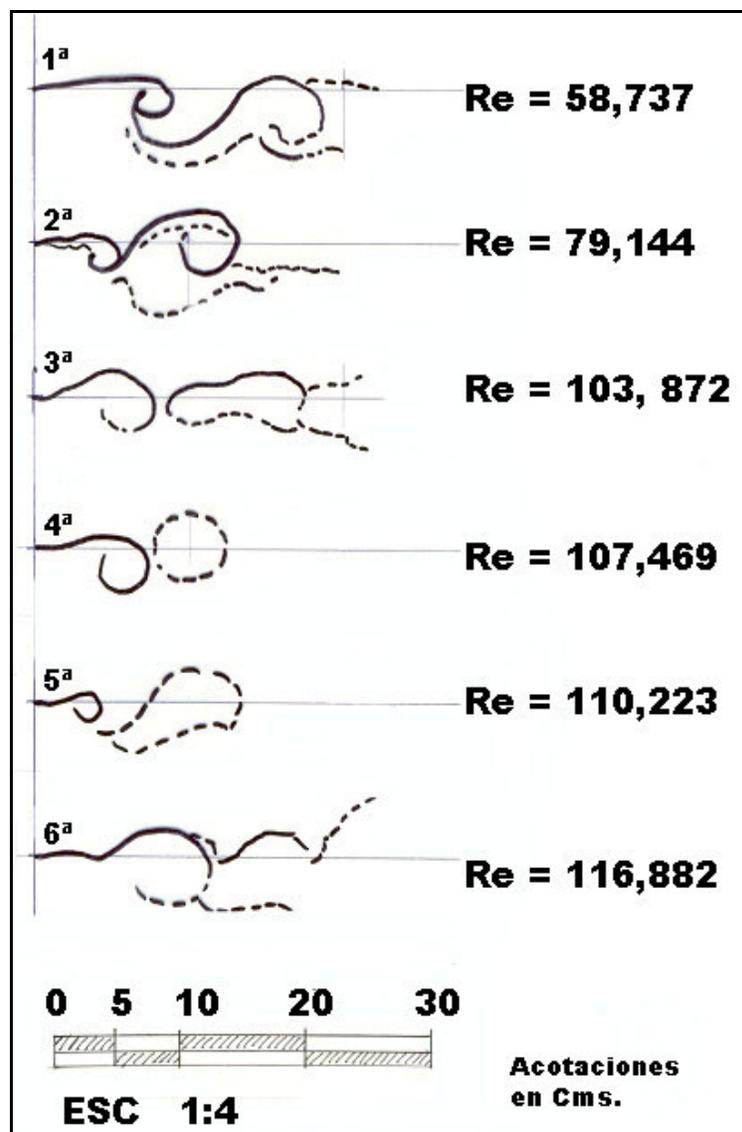


Figura III.4.5 Estructura típica de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas.

De la figura anterior se describen las características de la estructura típica de los vórtices discretos formados detrás de la duna de pruebas para los siguientes números de Reynolds.

1ª estructura, $Re = 58,737$. Se observa un primer vórtice, el más avanzado en el sentido del flujo, del cual se desprende, a la derecha, un tramo corto de la estela de dispersión de turbulencia y a la izquierda un segundo vórtice bien definido. Tanto la corta estela como la parte baja del primer vórtice se aprecian difusos en la imagen.

2ª estructura; $Re = 79,144$. Un segundo vórtice se desprende del más avanzado, ambos bien definidos y se observa una estela difusa bajo el vórtice derecho.

3ª estructura: $Re = 103,872$. El vórtice de la izquierda se presenta bien definido y separado del vórtice de la derecha el cual tiene una forma alargada y difusa en la parte baja.

4ª estructura: $Re = 107,469$. El primer vórtice se observa bien definido y separado del vórtice derecho el cual se encuentra muy cercano del anterior en forma de círculo difuso.

5ª estructura: $Re = 110,223$. El vórtice izquierdo se presenta muy claro y el segundo más avanzado tiene una forma elongada y difusa.

6ª estructura: $Re = 116,882$. Para este alto número de Reynolds el vórtice izquierdo se presenta claro en la parte superior y difuso en la inferior, no alcanza a permanecer el primer vórtice formado y queda una estela de turbulencia que se aprecia difusa en la imagen.

En el rango de números de Reynolds en que se trabajó se distingue una variación coherente de la estructura típica de los vórtices discretos y que va desde vórtices definidos con mucha profundidad y hasta vórtices poco definidos arrastrados por las altas velocidades del flujo.

Ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas.

Este ciclo fue extraído del análisis de cinco series del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna experimental, las se muestran en las figuras III.4.6 y III.4.7. Estas series se obtuvieron de las imágenes digitalizadas del trabajo experimental para un número de Reynolds de 58,737 y un intervalo $\Delta_t = 0.30 s$.

Este ciclo de compone de los cuatro pasos siguientes:

1. El vórtice discreto avanza y crece en tamaño seguido de las ondas de Kelvin-Helmholtz.
2. A partir de las ondas de Kelvin-Helmholtz se forman, al mismo tiempo, uno, dos y hasta tres nuevos vórtices discretos.
3. En todos los casos fueron los dos vórtices discretos mas avanzados los que coalescen o se amalgaman formando uno de mayor tamaño.
4. El vórtice mas adelantado avanza y se disipa dejando atrás un nuevo vórtice con el que se reinicia el ciclo.

De la figura III.4.6, se pueden hacer algunas observaciones adicionales, como:

1. El intervalo de tiempo entre un trazo y otro es de aproximadamente 0.30 s. La duración de un ciclo de formación de los vórtices discretos para un $Re = 58,737$ varía entre 1.5 y 2.1 segundos.
2. Las fluctuaciones u *ondeamiento* de la capa de cortante determina las características espacio-temporales de la formación y evolución de los vórtices discretos. De la misma manera que esta fluctuación determina la dinámica de los estados-fase descritos por Espinoza *et al.* (2000).

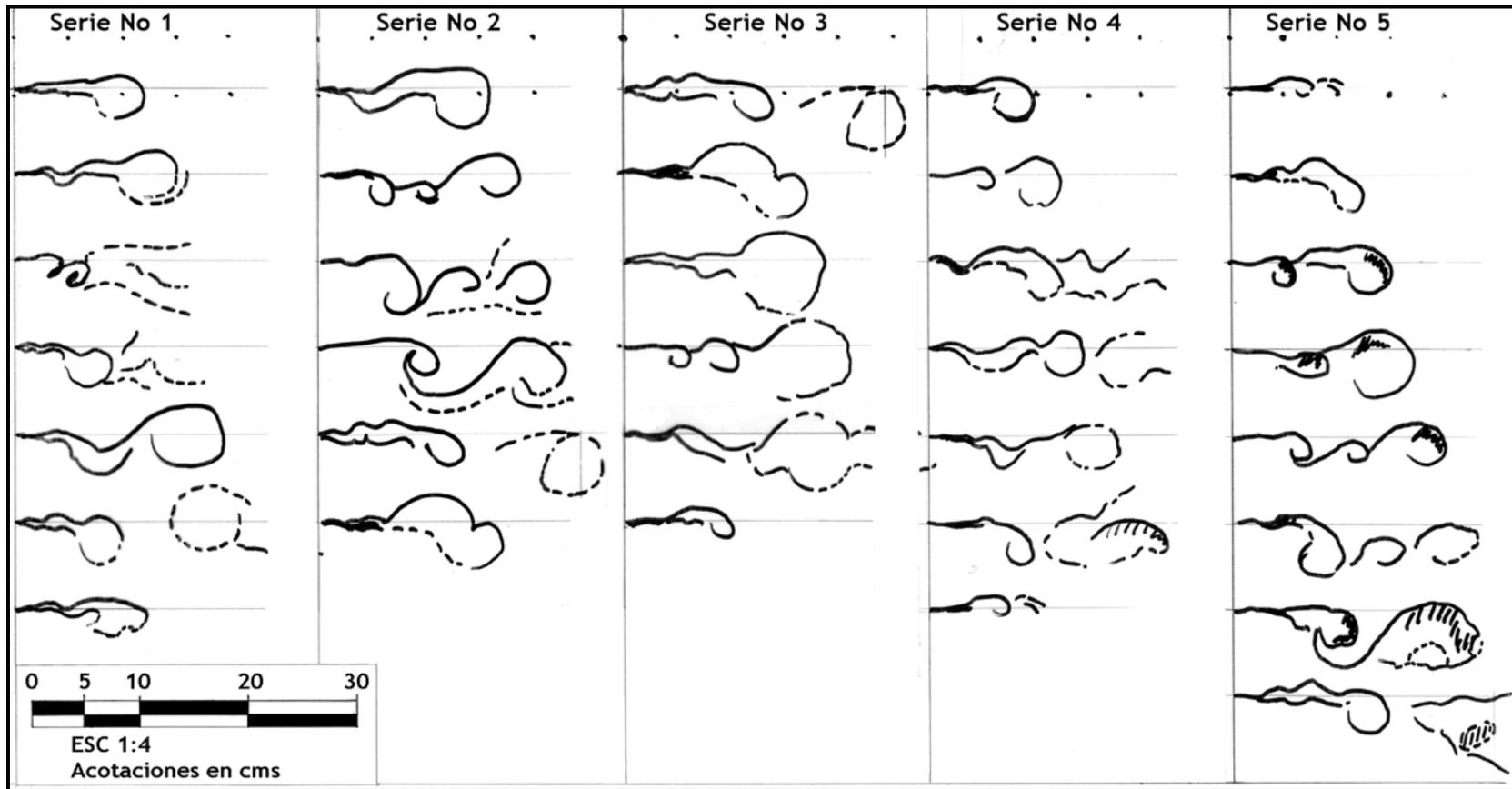
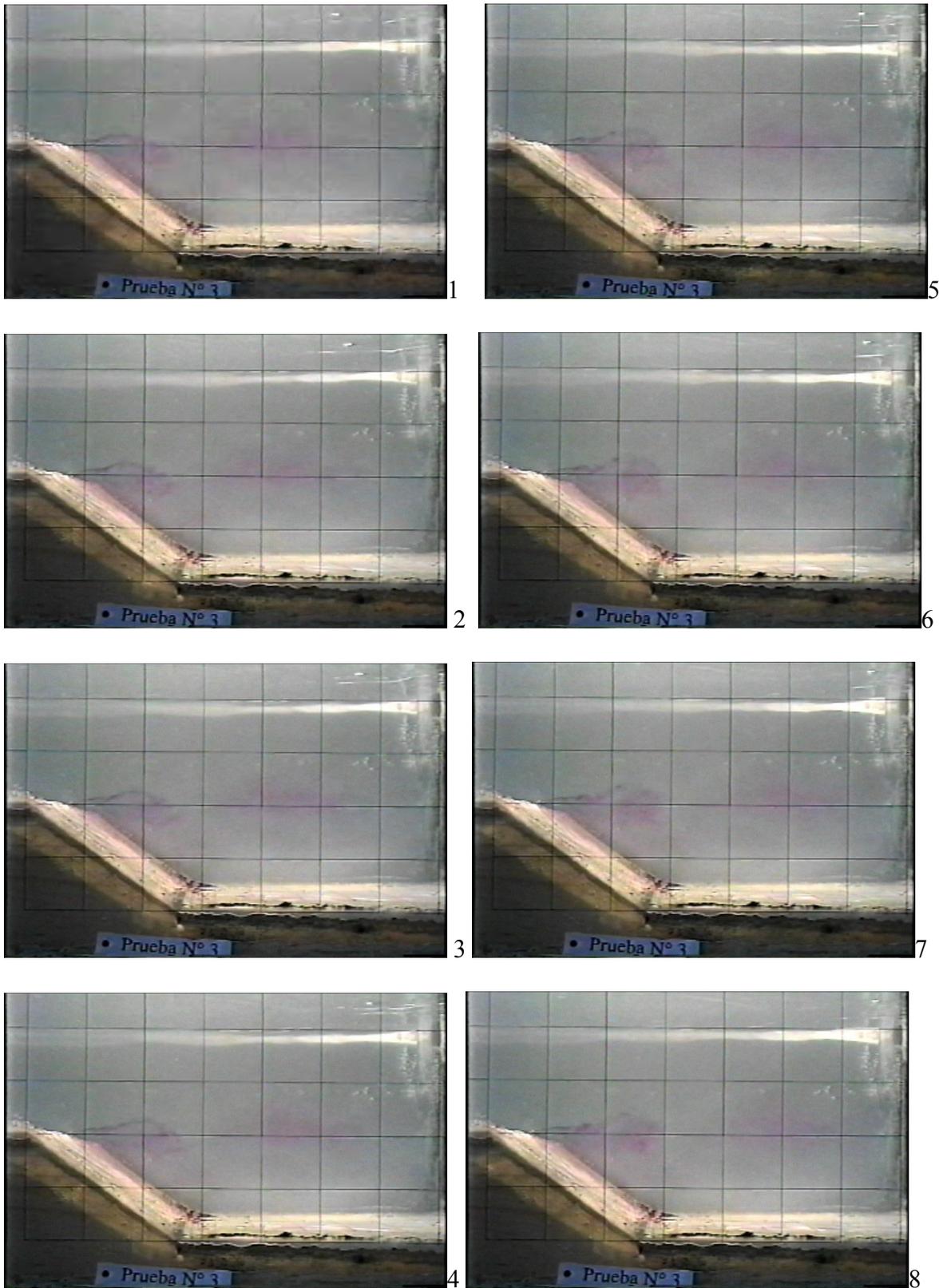
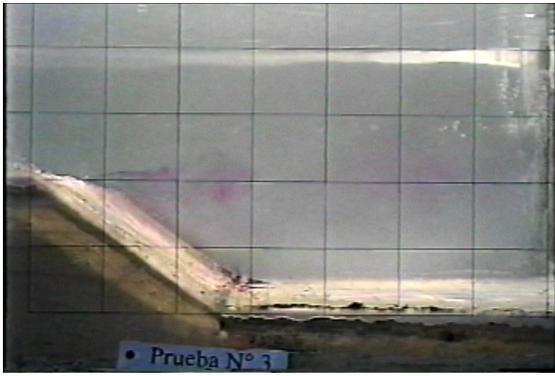


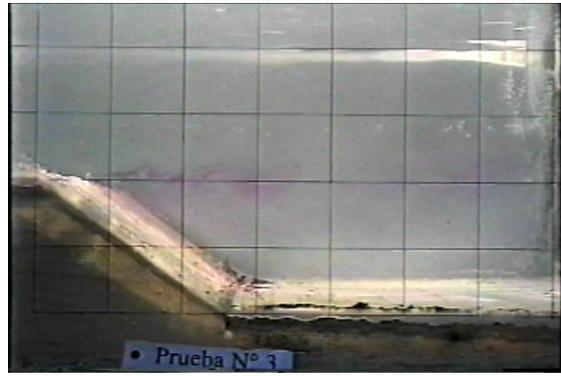
Figura III.4.6 Series del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna experimental para un número de Reynolds de 58,737. $\Delta t = 0.30s$

Fig. III.4.7 Secuencia de imágenes del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna experimental. Inyección de tinta. $Re=58,737$. $\Delta t = 0.033 s$.

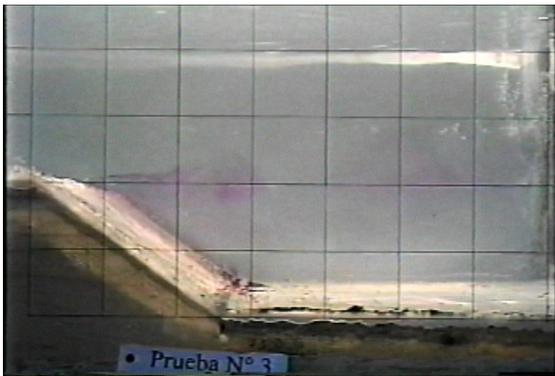




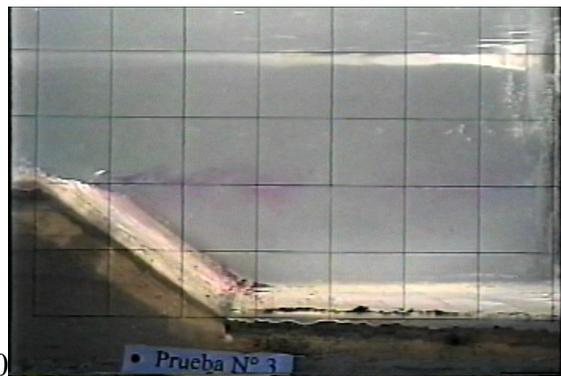
9



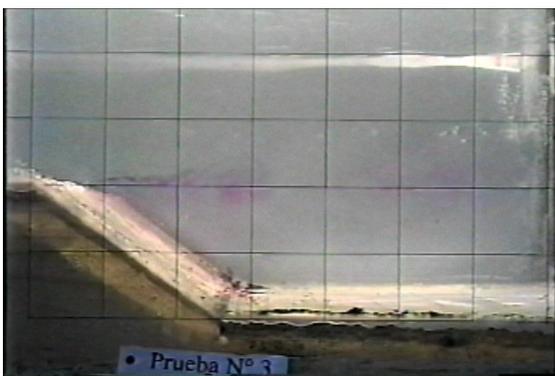
13



10



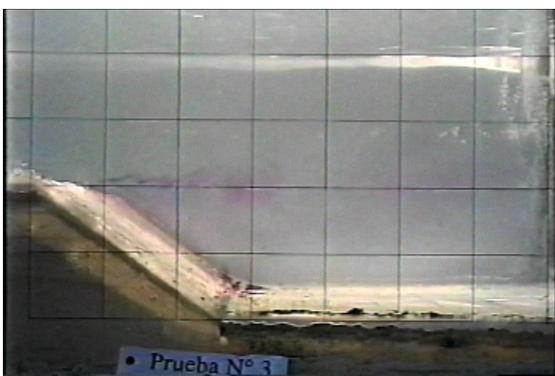
14



11



15



12



16



17

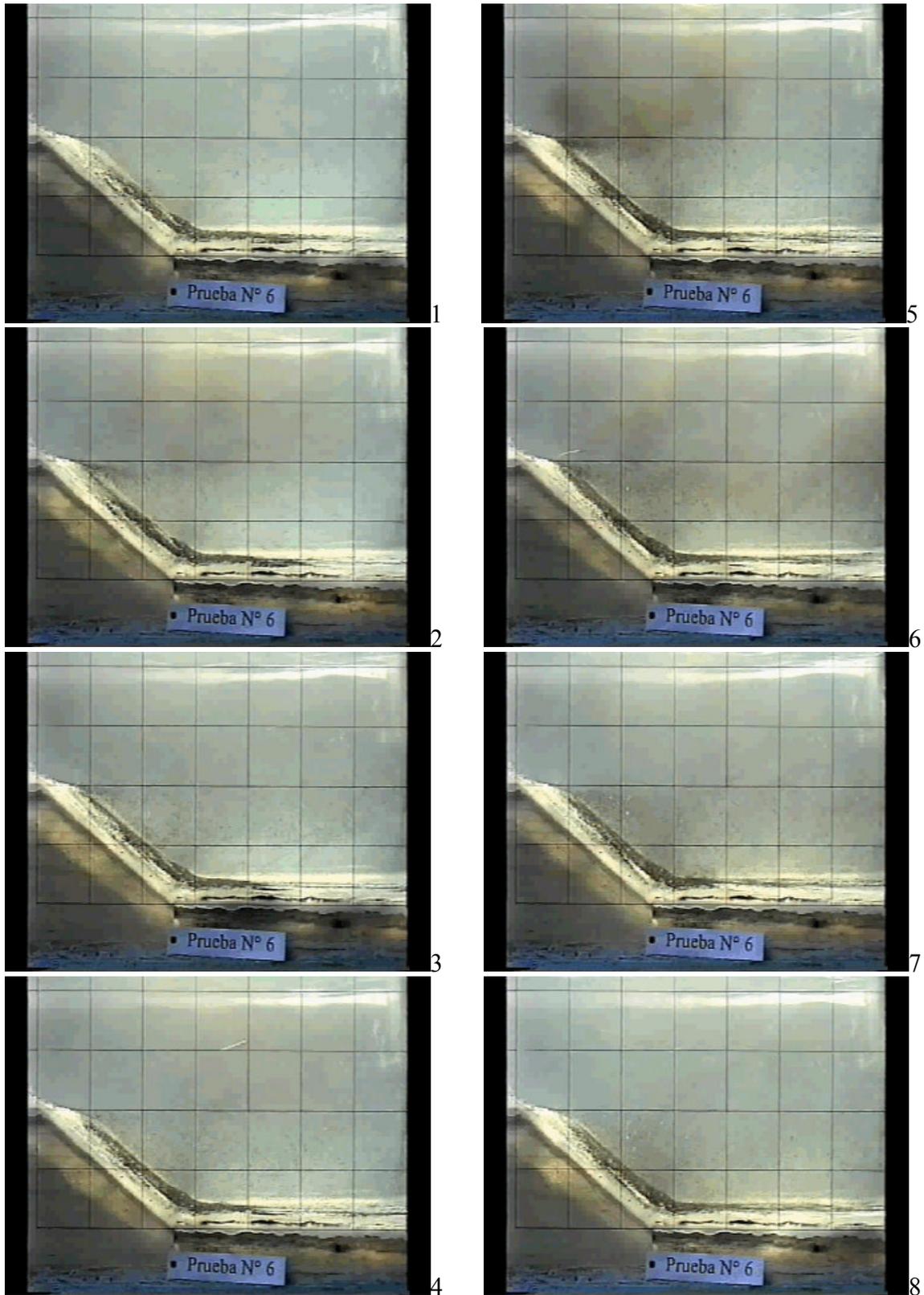


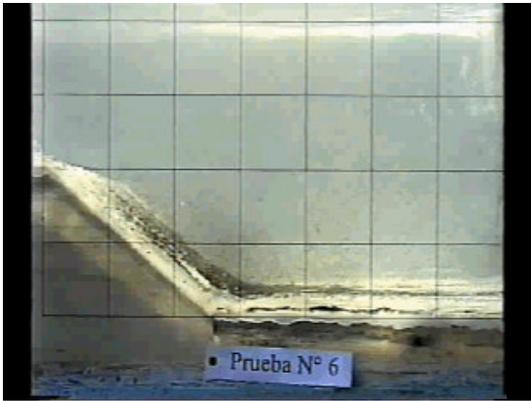
18



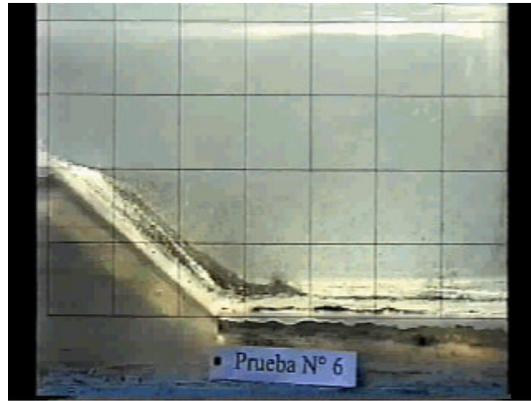
19

Fig. III.4.8 Secuencia de imágenes del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna experimental. Partículas trazadoras. $Re=103,872$. $\Delta_t = 0.033 s$

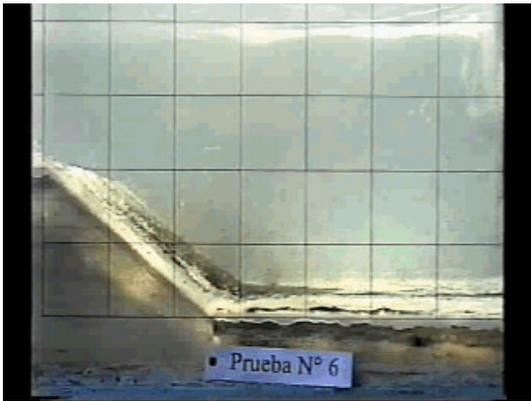




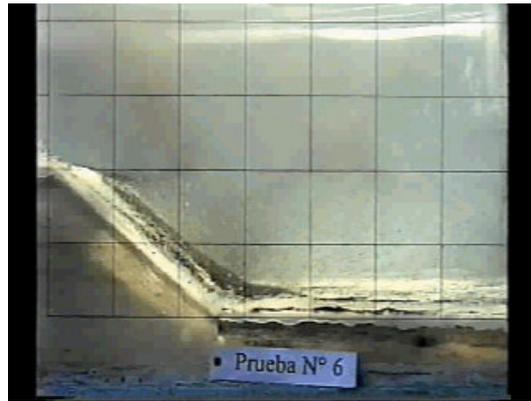
9



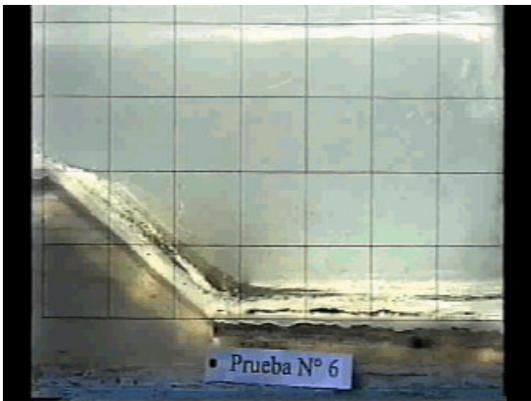
13



10



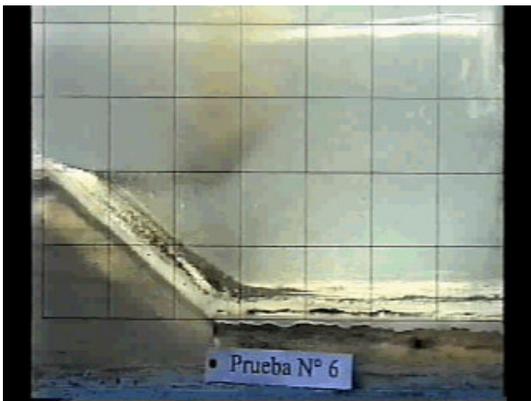
14



11



15



12



16

III.4.5 Frecuencia de formación del Par vorticoso.

A continuación se calcula el número de Strouhal (S) del Par vorticoso y se grafica contra el número de Reynolds. En este trabajo el número adimensional de Strouhal expresa la frecuencia adimensional de formación del par vorticoso. Esta frecuencia adimensional no debe confundirse con el concepto estadístico de frecuencia f , en la expresión usada del número de Strouhal : $S = \frac{f D}{\bar{U}}$, donde f es la frecuencia del par, D el ancho medido de la estela y \bar{U} la velocidad media externa.

El número de Strouhal (S) de formación del *Par vorticoso*, o coalescencia de dos vórtices discretos, se obtuvo considerando la frecuencia f como el inverso del tiempo de formación del ciclo entre dos, considerando, del análisis de las imágenes, que se forman en promedio dos pares vorticosos por ciclo.

No orden	Re, No de Reynolds, $d_m=0.21m$	D, ancho prom. de estela	U, vel. media $d_m= 0.21m$	t, tiempo formación de un ciclo	f, frecuencia ciclo de formación
	(adim)	(m)	(m/s)	(seg)	(ciclos/seg)
1	58,737	0.05433	0.28166	2.364	0.4231
2	79,144	0.06133	0.37951	2.153	0.4645
3	103,872	0.06400	0.49809	2.000	0.5000
4	107,469	0.06600	0.51534	1.692	0.5909
5	110,223	0.06867	0.52859	1.556	0.6429
6	116,882	0.06967	0.56048	1.087	0.9200

Tabla III.4.3 Frecuencia (f) del ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas, del presente estudio.

El ancho promedio de la estela para cada número de Reynolds se midió a partir de los trazos observados en la visualización. Estos trazos se muestran en el capítulo anterior, el III.3.

No orden	Re, No de Reynolds, $d_m=0.21m$	S, No Strouhal, $t/2$, Par vorticoso
	(adim)	(adim)
1	58,737	0.1632
2	79,144	0.1501
3	103,872	0.1285
4	107,469	0.1514
5	110,233	0.1670
6	116,882	0.2287
	Prom:	0.165

Tabla III.4.4 Número de Strouhal o frecuencia adimensional del par vorticoso.

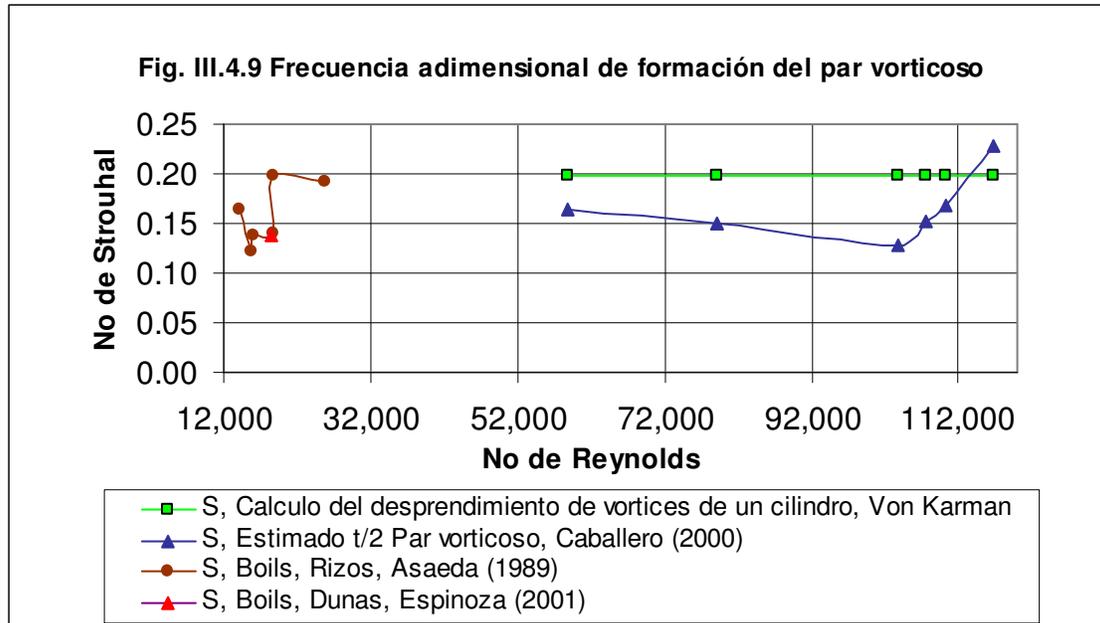


Figura III.4.9 Frecuencia adimensional de formación del par vorticoso detrás de la duna de pruebas.

En la figura III.4.9 la curva obtenida del número S del par vorticoso se puede dividir en dos tramos de acuerdo con su comportamiento. En el primer tramo se muestra una pendiente con valores descendentes de S hasta $S = 0.1285$ para un $Re = 103,872$, luego la curva sube con una pendiente pronunciada hasta el valor máximo del número de Reynolds utilizado. El valor promedio obtenido es de $S = 0.165$ muy similar a 0.16 valor promedio de Asaeda *et al.* (1989) para Boils sobre rizos y un poco mas bajo que el valor promedio de $S = 0.20$ calculado con la expresión empírica de Von Kármán (1911) para calcular la frecuencia adimensional de desprendimiento de vórtices de un cilindro y cuya expresión es la siguiente: $\frac{fD}{U_0} = 0.198(1 - \frac{19.7}{Re})$, cuando $1,000 < Re < 200,000$, donde D es el ancho de la estela y U_0 la velocidad media. En la expresión anterior los números de Reynolds utilizados corresponden a los del presente trabajo. Espinoza *et al.* (2001) para un $Re = 18,400$ obtuvo un número de Strouhal de 0.14 valor también cercano al obtenido de 0.165 . De lo anterior se puede concluir que la hipótesis propuesta de que se forman en promedio dos pares vorticosos por ciclo es una buena aproximación.

IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

IV.1 Conclusiones

En el presente trabajo se estudió experimentalmente el fenómeno de la separación del flujo detrás de dunas para comprender la física de los procesos que ocurren en la región a través del uso de técnicas de visualización.

El trabajo experimental se llevó a cabo en un canal Reebeck con formas de fondo fijas bidimensionales y consistió básicamente en proporcionar velocidades del flujo medio con números del Reynolds de $58,737 \leq Re \leq 116,882$ y video grabar el campo de flujo detrás de la duna de pruebas.

La coincidencia casi exacta de los perfiles de velocidad con los de Müller y Gyr (1986) y otros autores permitió validar los resultados obtenidos en la instalación experimental.

De la visualización directa y del análisis de las imágenes video grabadas se logró identificar las estructuras coherentes turbulentas, obtener un patrón de flujo típico para el rango de números de Reynolds anotado arriba y datos que permitieron conocer seis características espacio-temporales de la estructura del flujo detrás de las dunas de pruebas.

Se presentan a continuación los resultados mas relevantes obtenidos y se anotan las principales conclusiones del mismo:

1. De la visualización de estructuras coherentes. Del análisis de las hojas de trazos, en las que se conjunta en una sola los trazos de la inyección de tinta, la incorporación de partículas trazadoras y partículas aisladas trazadoras, se logró obtener suficiente información de las características de las estructuras coherentes.
 - a. La utilización de partículas aisladas trazadoras permitió identificar con claridad la interfase entre el flujo exterior y la capa cortante y, la separación de la estela de turbulencia de la zona de flujo inverso.
 - b. Estas interfases no permanecen fijas, por el contrario, están en movimiento en función del *ondeamiento* de la capa cortante y de los vórtices discretos.
2. Identificación de estructuras coherentes turbulentas.
 - a. Ondas de Kelvin-Helmholtz. Generadas en la capa cortante inmediatamente aguas abajo de la cresta de la duna debido a la interacción entre el flujo medio y el flujo estacionario:
 - i. El tren de ondas de K-H tiene un movimiento de *ondeamiento* que afecta la totalidad del campo de flujo detrás de la duna.
 - ii. Detrás de la primera o segunda onda de K-H se empieza a formar un vórtice discreto.
 - iii. Se comprobó que al incrementarse la velocidad del flujo crece también la frecuencia de las ondas de K-H y que esta variación produce cambios en la longitud de separación.

-
- b. Vórtices pequeños tipo tornado. Estas estructuras se desplazan sobre la cara mas pronunciada de la duna y se separa de la misma en forma intermitente.
 - i. Se forman debido al flujo vertical ascendente sobre la cara de mayor pendiente proveniente del flujo inverso.
 - ii. La intermitencia de su formación y separación está gobernada por el *ondeamiento* de la capa cortante y la formación y evolución de los vórtices discretos.
 - c. Vórtices tipo cilindro elíptico o vórtice *ojo*. Se identificó visualmente la formación de un vórtice transversal de gran tamaño en forma de cilindro elíptico bajo la capa de cortante donde el flujo recircula y el cual se corresponde con la fase 2 (fig. I.2.19) de la secuencia de evolución de patrones de líneas de corriente descrita por Espinoza y Martínez (2000) [36].
 - d. Vórtices separados de la capa de cortante. El fluido teñido permitió observar con claridad la formación de los vórtices discretos y la técnica de partículas trazadoras facilitó identificar la afectación de los vórtices separados bajo la estela de dispersión.
 - e. Vórtices tipo Cono (*funnel*).
 - i. Estos vórtices se desprenden de la cara mas pronunciada de la duna y avanzan en trayectoria espiral en dirección del flujo.
 - ii. El vórtice sale de la zona de recirculación y se inserta en la zona de estela de dispersión.
 - iii. Se forma periódicamente y pudiera tener como origen una diferencia de presión en la zona del flujo inverso sobre la cara de mayor pendiente haciendo que se eyecte un chorro de flujo hacia la corriente principal.
 - f. Boil. Se observa el desprendimiento de un *Boil* de la cresta de la duna formando un ángulo de 36° respecto de la horizontal, el cual no alcanza la superficie libre del agua, $Re = 107,469$.
3. Patrones de flujo. Se obtuvieron dos patrones de flujo representativos del rango de números de Reynolds utilizado, $58,737 \leq Re \leq 116,882$. Se dibujaron utilizando las líneas de traza durante los 30 segundos de la video grabación por lo que estos no corresponden a un instante del movimiento, como en una fotografía, sino que muestran la suma de diferentes instantes del flujo. De estos patrones se pueden extraer las siguientes observaciones:
- a. El patrón de flujo dentro de la zona visualizada varía en función del *Ondeamiento* de la capa de cortante y de la secuencia de formación, crecimiento y desprendimiento de los vórtices discretos.
 - b. En el primer patrón se logra identificar con claridad la línea imaginaria que separa la estela de dispersión del flujo inverso. Esta línea también es función del mencionado *ondeamiento* de la capa cortante.
 - c. En la zona de flujo inverso se observaron eyecciones del flujo, del fondo hacia la superficie (*burts*), y pequeños vórtices, similares a los vórtices discretos, formados por el encuentro entre un flujo descendente (*Barridos*) con el flujo inverso.
 - d. Estos *Barridos* son flujos producidos por la fuerza centrífuga de los vórtices que avanzan girando hacia aguas abajo

- e. El proceso de avance de las dunas consiste en partículas de arena que se deslizan abajo sobre la cara de mayor pendiente y se encuentran con partículas en sentido contrario del flujo inverso.
 - f. Gran parte del flujo inverso se eleva para reintegrarse dentro de la estela de dispersión a formar parte nuevamente de los vórtices discretos resuspendiendo partículas del fondo a la estela de dispersión.
4. Características de las estructuras en la separación. Rango: $58,737 \leq Re \leq 116,882$.
- a. Longitud de las Ondas de Kelvin y Helmholtz. (λ_0)
 - i. Como se puede observar en la fig. III.4.1 los valores adimensionalizados de λ_0 muestran una variación creciente al incrementarse al número de Reynolds. La diferencia con los valores obtenidos por Müller y Gyr (1985 y 1986) pudiera atribuirse a que en el presente estudio se utilizó un material bastante menos rugoso que el empleado por estos autores.
 - b. Angulo de la Estela de dispersión de la turbulencia. Este ángulo de la estela se dibujó abarcando únicamente el primer vórtice que se desprende de la duna.
 - i. En el rango del Re utilizado el valor del ángulo α de la Estela de dispersión disminuye gradualmente al incrementarse el Re, de 34.28° a 23.30° , y se hace mas pronunciada la disminución con los tres últimos valores del Re. El ángulo α medio es de 28.61° . Ver Figura III.4.2.
 - ii. Utilizando la ecuación propuesta por Müller y Gyr (1986) con $\Delta T_n = 1.6$ de Acton (1976), ec. No 1 del inciso III.4.2, para calcular el ángulo de la estela de dispersión se observa una buena correspondencia con la curva de los valores medidos.
 - iii. Utilizando nuevamente la ecuación de Müller y Gyr (1986) con $\Delta T_n = 1.45$, definido por Caballero (2000), la correspondencia con los valores medidos se hace aún mejor.
 - c. Angulo máximo de la estela de dispersión. (α_{max})
 - i. Se introduce este concepto y se define como el ángulo máximo dentro del cual se forman los vórtices discretos considerando el *ondeamiento* de la capa de cortante.
 - ii. Como se puede observar en la fig. III.4.3, ambas curvas son aprox. paralelas hasta un $Re = 107,469$ donde el valor de α sigue disminuyendo pero el α_{max} ya no lo hace. El ángulo α_{max} medio es de 39.99° el cual es 39.776% mas grande que el ángulo α promedio.
5. Longitud de la separación del flujo. Observaciones de la figura III.4.4.
- a. Al crecer los números de Reynolds la variación de la longitud de separación va disminuyendo, hasta hacerse casi constante, sobre todo en series de dunas.
 - b. Las longitudes de separación para una serie de dunas es menor que para una sola duna y también para el caso de escalones.
 - c. La máxima longitud de separación se presenta en escalones. Un escalón es un caso especial de duna con la longitud de onda λ infinita.
 - d. El punto único medido para $Re = 58,737$ es $X_r = 5$ alineado con los valores de Espinoza *et al.* (2000) para una series de dunas y dentro del rango de entre 4 y

10 reportado en la literatura para una duna, series de dunas y escalones, excepto rizos.

6. Estructura típica y, ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos.
 - a. Estructura típica de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas.
 - i. En el rango de números de Reynolds en que se trabajó se distingue una variación coherente de la estructura típica de los vórtices discretos y que va desde vórtices definidos con mucha profundidad y hasta vórtices poco definidos arrastrados por las altas velocidades del flujo.
 - b. Ciclo de formación y evolución de los vórtices discretos detrás de la duna de pruebas.
 - i. Para un $Re = 58,737$ y $\Delta_t = 0.30 s$ se encontró que el ciclo mencionado se compone de cuatro pasos, anotados en el inciso III.4.4.
 - ii. La duración de un ciclo de formación de los vórtices discretos para el número de Reynolds utilizado varía entre 1.5 y 2.1 segundos.
 - iii. Las fluctuaciones u *ondeamiento* de la capa de cortante determina las características espacio-temporales de la formación y evolución de los vórtices discretos. De la misma manera que esta fluctuación determina la dinámica de los estados-fase descritos por Espinoza *et al.* (2000).
7. Frecuencia de formación del Par vorticoso.
 - a. El valor promedio obtenido es de $S = 0.165$ muy similar a 0.16 valor promedio de Asaeda *et al.* (1989) para Boils sobre rizos y situado entre $S = 0.20$ obtenido con la expresión empírica de Von Kármán (1911) para calcular la frecuencia adimensional de desprendimiento de vórtices de un cilindro y $S = 0.14$ obtenido por Espinoza *et al.* (2001) para el desprendimiento de Boils sobre una serie de dunas. Se puede concluir que la hipótesis propuesta de que se forman en promedio dos pares vorticosos por ciclo es una buena aproximación.
8. Conclusiones finales:
 - a. La totalidad del campo de flujo, y por lo tanto la totalidad de las estructuras coherentes turbulentas, está dominada por la frecuencia de las ondas de Kelvin y Helmholtz y por el movimiento de fluctuación u *ondeamiento* de la capa cortante.
 - b. El análisis de las imágenes fue difícil de realizar por los altos números de Reynolds utilizados, $58,737 \leq Re \leq 116,882$ y, por otra parte, con pocos valores para comparar ya que en la literatura se presentan experimentos con bajos números de Reynolds.

IV.2 Recomendaciones

1. Se recomienda utilizar la técnica de incorporación de partículas aisladas trazadoras. En este trabajo resultó de gran utilidad utilizar partículas aisladas trazadoras de flotabilidad neutra (o casi neutra) debido a que se facilitó el seguimiento de las mismas en el análisis de las imágenes video grabadas y su trazo sobre hojas de acetato. Fue posible complementar bastante bien los trazos en hojas de acetato de las imágenes obtenidas con inyección de tinta, incorporación de partículas trazadoras y partículas aisladas trazadoras, para realizar la medición de características espaciales e incluso temporales de las estructuras coherentes.
2. Se recomienda utilizar preferentemente otras técnicas y equipos de medición no invasivos como el anemómetro láser doopler LDA, acústico doopler o anemometría de película caliente, Particle image velocimetry PIV, perfilador acústico, etc..

Bibliografia

1. Nakagawa, Hiroji and Nezu, Iehisa (1987) *Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel*, J. Hydraulic Research, vol 25(1), pp 67-88.
2. Makiola, B. and Ruck, B. (1990) *Experimental investigation of a sigle-sided backward-facing step flow whith inclined step geometries*, Elsevier Science Publishing Co., Inc. Engr Turbulence Modelling and Experiments, Rodi and Ganic, Ed.
3. Nigim, Hani H. (1990) *Measurements and modelling of turbulent boundary layers down strem obstacles*, Elsevier Science Publishing Co., Inc. Engr. Turbulence Modelling and Experiments, Rodi and Ganic, Ed.
4. Lyn, D.A. (1993) *Turbulence measurements in open-Channel flows over artificial bed forms*, J. Hydraulic Engineerig, ASCE vol 119 (3) PP 306-326.
5. Nelson, Jonathan M. and McLean, Stephen R.; Wolfe, Stephen R. (1993) *Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed forms*, J. Water Resour. Research, vol 29 (12), pp 3935-3953.
6. Bennett, S. J. and Best, J. L. (1995) *Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: implications for sediment transport and bedform stability*, J.Sedimentology, vol 42, pp 491-513.
7. Bennett, S. J. and Best, J. L. (1996) *Mean flow and turbulence structure over fixed ripples and the ripple-dune transition*, Coherent Flow Structures in Open Channels. Ed. P.J. Ashworth, et al. John Wiley & Sons Ltd. pp 281-304.
8. Raudkivi, A. J. (1963) *Study of sediment ripple formation*, J. hydraulic Division, ASCE vol. 89 (HY6) pp 15-33.
9. Haque, M.I. and Mahmood, K. (1985) *Geometry of ripples and dunes*, J. Hydraulic Engineering, ASCE vol 111 (1), pp 48-63.
10. Ditchfield, R. and Best, J. (1990) *Development of bed features*, J.---- vol 116 (9), pp 647-655.
11. Raudkivi, A. J. (1976) *Loose boundary hydraulics*, University of Auckland, New Zealand, - Pergamon press, pp 54-91.
12. Müller, A. and Gyr, A. (1987) *On the vortex formation in the mixing layer behind dunes*, J. Hydraulic Reseach vol 24 (5), pp 359-375.
13. McCorquodale, J. A. and Giratalla M. K., *Flow over natural and artificial ripples*,

International Assoc. for Hydraulic Research, University of Windsor, Ontario, Canada, pp167-172.

14. Nelson, J. M. and Smith J. D. (1989) *Mechanics of flow over ripples and dunes*, J. Geophysical Research vol 94 (C6), pp 8146-8162.

15. Zanke, Ulrich (1985) *Turbulence and suspension related to different bed roughness*, Euromech 192: Transport of suspended solids in open channel/Neubiberg, pp 157-160.

16. Coleman, Neil L. (1986) *Effects of suspended sediment on open-Channel velocity distribution*, J. Water Resources Research vol 22 (10), pp 1377-1384.

17. Coleman, Neil L. (1981) *Velocity profiles with suspended sediment*, J. Hydraulic Research vol 19 (3), pp 211-229.

18. Itakura, Tadaoki and Kishi, Tsutomu (1980) *Open channel flow with suspended sediments*, ASCE J. Hydraulics Division vol 106 (HY8), pp 1325-1343.

19. McLean, S. R.; Nelson, J. M. and Shreve, R. L. (1996) *Flow-sediment interactions in separating flows over bedforms*, Coherent Flow Structures in Open Channels. Ed. P.J. Ashworth, et al. John Wiley & Sons Ltd., pp 203-226.

20. Imamoto, H. and Ishigaki, T. (1990) *Flow visualization in a cross section of an open channel flow*, Elsevier Science Publishing Co., Inc. Engr. Turbulence Modelling and Experiments, Rodi and Ganic, Ed. pp 335-343.

21. Karaham, M. E. and Peterson, A. W. (1980) *Visualization of separation over sand waves*, ASCE J. Hydraulics Division vol 106 (HY8), pp 1345-1352.

22. Maza, J. A. y García, M. (1984) "HIDRODINAMICA". *Bases para hidráulica fluvial*. UNAM Series del Instituto de Ingeniería N° D-20.

23. Martínez-Austria, P. Rojas, J., Espinoza, J. (1998) *Características del flujo en un canal con formas de fondo fijas obtenidas con visualización y anemometría de película caliente*, IAHR-AMH, pp 955-963.

24. Niño, I. y Arcena, D. (1998) *Fenómenos de segregación y transporte de sedimentos sobre formas de fondo*, IAHR-AMH, pp 99-107.

25. Nezu, I. y Nakagawa, H. (1993) *TURBULENCE IN OPEN-CHANNEL FLOWS*, Chapter 7 *Introduction to coherent structures* pp 159-167 A: A: Balkema, Rotterdam, Netherlands, Ed.

26. López, F., Niño, Y. y García, M. (1996) *Estructuras coherentes turbulentas en canales abiertos con fondo liso*, J. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XI, N° 1, pp 5-13.

27. Espinoza, J., et al. (--) *Flow visualization and velocity measurements in the turbulent*

boundary layer of a laboratory shallow Channel, Advances in Fluid Mechanics II pp 355-363.

28. Mueller, A., (1985) *An Experimental Investigation of the Mixing Layer behind Dunes with Combined Flow Visualization and Velocity Measurement*, International Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements.

29. Simpson, R.L., (1989) *Turbulent Boundary-Layer Separation*, Annual Reviews Fluid Mechanic, 21: pp 205-234.

30. Tritton, D.J., (1988) "FHYSICAL FLUID DYNAMICS", Capitulo 12 *Separation and Attachment* p. 139-152, Ed. Oxford University Press.

31. White, F.M. (1979) "MECÁNICA DE FLUIDOS" Capitulo 7 *Flujo en la capa límite*, p. 429-480, Ed. Mc. Graw Hill-Interamericana de México.

32. Daily, J.W: y Harleman, D.R.F. (1966) "DINÁMICA DE FLUIDOS", Capitulo 10 *Capas límite laminares* p. 225-236, Ed. Trillas, S.A. México.

33. Babakaiff, C.S., Hickin, E.J. (1996) *Coherent Flow Structures in Squamish River Estuary, British Columbia, Canada*, Ed. Ashworth, P.J. et al. John Wiley and Sons Ltd.

34. Muller, A., Gyr, A. (1982) *Visualization of the mixing layer behind dunes*, Euromech 156: Mechanics of Sediment Transport/Istanbul/12-14 July, p.p. 41-45.

35. Kadota, K., Nezu, I. (1999) *Three-dimensional of space-time correlation on coherent vortices generated behind dune crest*, J. of Hydraulic Research, vol. 37, N° 1.

36. Espinoza J. y Martínez, P. (2000) *Experimental study of turbulent Macro-structures venid dunes*, Instituto mexicano de Tecnología del Agua, México.

37. Ackers, et. al. (1980) *Weirs and flumes for flor measurement*, Editorial: John and Suns, LTD. Irlanda del Norte.

38. Engel, Peter (1981) *Length of flow separation over dunes*, ASCE, Vol. 107, No. HY10, Burlington, Ontario, Canada.

39. Best, J., Reid, I. (--) *Sedimentological applications of UDVP at Leeds – Bedform dynamics-Dunes*, University of Leeds, UK.

40. Asaeda, T. et al. (1989) *Sediment Entrainment in Channel with Rippled Bed*, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 115, No 3, pp. 327-339, Univ. of Tokyo, Japan.

41. Levi, E. (1989) "EL AGUA SEGÚN LA CIENCIA", Capitulo VIII *Fenómenos periódicos*, p. 502, Ed. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT y Ediciones Castell Mexicana S.A., México.