

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. General . . . . .	2
1.2.2. Específicos . . . . .	2
1.3. Contenidos del informe . . . . .	3
<b>2. Antecedentes Generales</b>	<b>4</b>
2.1. Otros estudios experimentales . . . . .	4
2.2. Caracterización del flujo . . . . .	13
2.2.1. Flujo oscilatorio con superficie libre . . . . .	13
2.2.2. El problema de la capa límite . . . . .	17
2.3. Caracterización del fluido . . . . .	21
2.3.1. Clasificación de los fluidos . . . . .	21
2.3.2. Flujo de un fluido pseudoplástico . . . . .	23
2.4. Caracterización del sedimento . . . . .	24
2.5. Arrastre incipiente en flujos oscilatorios . . . . .	25
2.5.1. Equilibrio de fuerzas aplicadas sobre una partícula aislada . . . . .	26
2.5.2. Parámetro tipo Shields . . . . .	27
2.6. Velocimetría por procesamiento de imágenes: PTV-PIV . . . . .	29
2.7. Parámetros adimensionales . . . . .	31
<b>3. Diseño Experimental y Metodología</b>	<b>32</b>
3.1. Diseño experimental . . . . .	32
3.1.1. Sistema generador de oleaje . . . . .	33
3.1.2. Desarenadores y drenajes . . . . .	35
3.1.3. Estructura de soporte . . . . .	35
3.1.4. Trabajo Futuro . . . . .	37
3.2. Metodología Experimental . . . . .	37
3.2.1. Características de los fluidos . . . . .	37
3.2.2. Características de las partículas no cohesivas . . . . .	38
3.2.3. Caracterización del flujo en el fondo mediante PIV . . . . .	39
3.2.4. Características del oleaje . . . . .	41
3.2.5. Procedimiento Experimental . . . . .	42
<b>4. Desarrollo Teórico</b>	<b>46</b>

4.1. Condición de equilibrio de una partícula esférica expuesta sobre el lecho para flujo oscilatorio . . . . .	46
4.2. Condición de equilibrio para $\mathbb{R}e_p \gg 1$ . . . . .	49
4.3. Condición de equilibrio para $\mathbb{R}e_p \ll 1$ . . . . .	55
<b>5. Presentación y Análisis de Resultados</b>	<b>59</b>
5.1. Características del flujo . . . . .	59
5.1.1. Según las características del flujo en el fondo . . . . .	59
5.1.2. Según las características del oleaje . . . . .	61
5.1.3. Comparación entre la velocidad orbital medida con PIV y la predicha por la teoría lineal del oleaje para soluciones con CMC . . . . .	67
5.2. Relación experimental para el arrastre incipiente en flujo oscilatorio . . . . .	71
5.3. Evaluación del arrastre incipiente por medio del criterio para flujos oscilatorios de Komar & Miller (1973) . . . . .	79
5.4. Evaluación del arrastre incipiente por medio del criterio para flujos oscilatorios de Goddet (1960) . . . . .	82
<b>6. Conclusiones</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>93</b>
<b>Anexos</b>	<b>98</b>
<b>A. Resultados experimentales y cálculo de errores</b>	<b>99</b>
A.1. Resultados de arrastre incipiente según las características del oleaje . . . . .	99
A.2. Cálculo de errores . . . . .	102
A.3. Resultados de arrastre incipiente según los parámetros del flujo y del fluido .	103
A.4. Resultados de arrastre incipiente según los adimensionales $\mathbb{R}e_w$ , $\mathbb{R}e_p$ y $KC$ .	106
A.5. Resultados de arrastre incipiente según los parámetros de Goddet (1960) y los parámetros modificados de Tamburrino & Vidal (2017) . . . . .	110
A.6. Resultados experimentales con barras de error . . . . .	113



# Índice de Ilustraciones

2.1.	Instalación experimental usada por Bagnold (1946). . . . .	6
2.2.	Vórtices generados durante un ciclo de oscilación. Son los responsables del desplazamiento y crecimiento del rizo, una vez excedida la altura crítica (Bagnold, 1946). . . . .	7
2.3.	Desplazamiento del rizo a lo largo del lecho debido a la presencia de vórtices (Bagnold, 1946). . . . .	8
2.4.	Esquema instalación experimental usada por Pedocchi & García (2009). . . . .	9
2.5.	Esquema instalación experimental: (1) tanque, (2) agua, (3) paleta, (4) sistema mecánico, (5) zona de prueba, (6) partícula de grandes dimensiones, (7) Probeta para medición con ADV. (Voropayev et al., 1999, 1998). . . . .	11
2.6.	Esquema instalación experimental usada por Fredsøe et al. (1999). . . . .	12
2.7.	Esquema instalación experimental usada por Sekiguchi & Sunamura (2004). . . . .	12
2.8.	Esquema conceptual de las características de una ola (Dean & Dalrymple, 1991). . . . .	13
2.9.	Comportamiento de la función tanh en función de la profundidad relativa $kh$ y $h/L$ (Dean & Dalrymple, 1991). . . . .	16
2.10.	Trayectorias de la partícula de agua según el régimen de oleaje (Dean & Dalrymple, 1991) . . . . .	17
2.11.	Diagrama para el factor de fricción bajo una corriente de olas en función de $\mathbb{R}e_w$ y $\frac{A}{k_s}$ (Kamphuis, 1975). . . . .	20
2.12.	Régimen de flujo en función de $\mathbb{R}e_w$ y $\frac{A}{k_s}$ según Kamphuis (1975). . . . .	21
2.13.	Comportamiento reológico de los fluidos. (Chhabra & Richardson, 2008). . . . .	23
3.1.	Esquema longitudinal del canal y sus componentes. . . . .	33
3.2.	Paleta acoplada a un sistema de control mecánico de frecuencia y amplitud variable. . . . .	35
3.3.	Esquema tridimensional del canal. . . . .	36
3.4.	Implementación del PIV. En la imagen, se puede observar el láser sobre el lecho y el haz de luz que este provee. Frente a la región iluminada, se posiciona la cámara que registra el flujo. . . . .	41
3.5.	Zona de prueba durante una rutina experimental. . . . .	44
4.1.	Fuerzas ejercidas sobre una partícula sumergida. . . . .	47
4.2.	Condición de arrastre incipiente en flujo oscilatorio para $\mathbb{R}e_p \gg 1$ en función del número de Reynolds para números de Keulegan-Carpenter fijos. El índice de flujo se supone $n = 0,75$ . . . . .	52

4.3.	Condición de arrastre incipiente en flujo oscilatorio para $\mathbb{R}e_p \gg 1$ en función del número de Reynolds para para distintos índices de flujo. Cada color representa un valor fijo del número de Keulegan-Carpenter siendo: (1) negro: $KC = 10$ , (2) rojo: $KC = 50$ , (3) azul: $KC = 100$ , (4) verde: $KC = 150$ y (5) magenta: $KC = 50$ . . . . .	53
4.4.	Condición de arrastre incipiente en flujo oscilatorio para $\mathbb{R}e_p \gg 1$ en función del número de Keulegan-Carpenter para números de Reynolds fijos. El índice de flujo se supone $n = 0,75$ . . . . .	54
4.5.	Condición de arrastre incipiente en flujo oscilatorio para $\mathbb{R}e_p \ll 1$ en función del número de Reynolds para números de Keulegan-Carpenter fijos. . . . .	57
4.6.	Condición de arrastre incipiente en flujo oscilatorio para $\mathbb{R}e_p \ll 1$ en función del número de Keulegan-Carpenter para números de Reynolds fijos. . . . .	58
5.1.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de W1. . . . .	62
5.2.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de W2. . . . .	63
5.3.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL1. . . . .	63
5.4.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL2. . . . .	64
5.5.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL3. . . . .	64
5.6.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL4. . . . .	65
5.7.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL5. . . . .	65
5.8.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL6. . . . .	66
5.9.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL7. . . . .	66
5.10.	Período de la ola en función de la altura de flujo $h$ y la amplitud de la paleta $R_{paleta}$ para el conjunto de experimentos de PL8. . . . .	67
5.11.	Comparación entre la velocidad orbital medida con PIV y la calculada mediante la teoría lineal del oleaje para los experimentos de PL4. . . . .	68
5.12.	Comparación entre la velocidad orbital medida con PIV y la calculada mediante la teoría lineal del oleaje para los experimentos de PL5. . . . .	68
5.13.	Comparación entre la velocidad orbital medida con PIV y la calculada mediante la teoría lineal del oleaje para los experimentos de PL6. . . . .	69
5.14.	Comparación entre la velocidad orbital medida con PIV y la calculada mediante la teoría lineal del oleaje para los experimentos de PL7. . . . .	69
5.15.	Comparación entre la velocidad orbital medida con PIV y la calculada mediante la teoría lineal del oleaje para los experimentos de PL8. . . . .	70
5.16.	Resultados para el arrastre incipiente a presentados en función de $Fr_d^2$ y $KC$ . Los colores indican el rango en el que se encuentra el valor del número de Reynolds de la partícula del registro experimental. La especificación de colores y rangos de $\mathbb{R}e_p$ se detalla en la Tabla 5.4. . . . .	72

5.17. Resultados para el arrastre incipiente para el agua, presentados en función de $Fr_d^2$ y $KC$ . Los colores indican el rango en el que se encuentra el valor del número de Reynolds de la partícula del registro experimental. Las curvas que se presentan corresponden a la ecuación para el rango $Re_p \gg 1$ predicha en el Capítulo 4 para $n = 1$ . La especificación de colores y rangos de $Re_p$ se detalla en la Tabla 5.5. . . . .	74
5.18. Resultados para el arrastre incipiente para soluciones con CMC, presentados en función de $Fr_d^2$ y $KC$ . Los colores indican el rango en el que se encuentra el valor del número de Reynolds de la partícula del registro experimental. Las curvas que se presentan corresponden a la ecuación para el rango $Re_p \ll 1$ predicha en el Capítulo 4. La especificación de colores y rangos de $Re_p$ se detalla en la Tabla 5.6. . . . .	75
5.19. Condición de arrastre incipiente en función de $Fr_d^2$ y $KC$ . La curva superpuesta corresponde a la ecuación 5.1. Los colores indican el rango en el que se encuentra el valor del número de Reynolds de la partícula del registro experimental. La especificación de colores y rangos de $Re_p$ se detalla en la Tabla 5.4. . . . .	78
5.20. Resultados de arrastre incipiente para los experimentos con diámetro de partícula $D_s < 0,5$ mm, según el criterio de Komar & Miller (1973). La curva superpuesta corresponde a la ecuación 5.4. Los colores que se muestran, indican que el valor del número de Reynolds de la partícula que toma el dato experimental se encuentra dentro del rango indicado en la Tabla 5.4. . . . .	80
5.21. Resultados de arrastre incipiente para los experimentos con diámetro de partícula $D_s < 0,5$ mm, según el criterio de Komar & Miller (1973). La curva superpuesta corresponde a la ecuación 5.4. Los colores que se muestran, indican que el valor del número de Reynolds de la partícula que toma el dato experimental se encuentra dentro del rango indicado en la Tabla 5.4. . . . .	81
5.22. Resultados de arrastre incipiente de acuerdo a los parámetros adimensionales de Goddet (1960). . . . .	85
5.23. Resultados de arrastre incipiente de acuerdo a los parámetros de Tamburrino & Vidal (2017). . . . .	86
5.24. Condición de arrastre incipiente de acuerdo a los parámetros de Tamburrino & Vidal (2017). La recta corresponde a la ecuación 5.8. . . . .	87
A.1. Resultados para el arrastre incipiente a presentados en función de $Fr_d^2$ y $KC$ . Sobre los datos experimentales se presentan los errores $\sigma_{Fr_d^2}$ y $\sigma_{KC}$ asociados. . . . .	114
A.2. Resultados de arrastre incipiente de acuerdo a los parámetros adimensionales de Goddet (1960). Sobre los datos experimentales se presentan los errores $\sigma_\Psi$ y $\sigma_X$ asociados. . . . .	115

# Índice de Tablas

2.1.	Régimen de oleaje según $\frac{h}{L}$ . . . . .	16
2.2.	Valores de $\alpha, p$ y $n$ para la condición límite para el primer movimiento de los granos presentados en el estudio de Losada y Desiré (1988). . . . .	26
2.3.	Cuadro comparativo entre sistemas PIV y PTV. . . . .	30
3.1.	Soluciones utilizadas y sus características. . . . .	38
3.2.	Material no cohesivo utilizado. . . . .	39
3.3.	Conjunto de experimentos agrupados según reología y diámetro de partículas. . . . .	43
5.1.	Rango de las parámetros adimensionales $\mathbb{R}e_w$ , $\mathbb{R}e_p$ y $KC$ para las distintas condiciones experimentales. En la columna adyacente a cada adimensional, se presenta el máximo error absoluto $\Delta$ asociado a cada conjunto de experimentos. . . . .	60
5.2.	Rango de las características del oleaje definidos por su altura $H$ , longitud $L$ , período $T$ , altura de flujo $h$ y amplitud de oscilación de la paleta $R_{paleta}$ para las distintas condiciones experimentales. . . . .	61
5.3.	Mínimo y máximo error absoluto asociados al cálculo de la velocidad orbital por medio de la teoría lineal del oleaje cuando se compara con los registros realizados mediante PIV. . . . .	70
5.4.	Escala de colores de la Figura 5.16. Cada uno representa un rango diferente para el adimensional $\mathbb{R}e_p$ . . . . .	73
5.5.	Escala de colores de la Figura 5.17. Cada uno representa un rango diferente para el adimensional $\mathbb{R}e_p$ . . . . .	76
5.6.	Escala de colores de la Figura 5.18. Cada uno representa un rango diferente para el adimensional $\mathbb{R}e_p$ . . . . .	76
A.1.	Resultados de arrastre incipiente según las características del oleaje . . . . .	99
A.2.	Resultados de arrastre incipiente según los parámetros del flujo y del fluido . . . . .	103
A.3.	Resultados de arrastre incipiente según los adimensionales $\mathbb{R}e_w$ , $\mathbb{R}e_p$ y $KC$ . . . . .	106
A.4.	Resultados de arrastre incipiente según los parámetros de Goddet (1960) y los parámetros modificados de Tamburrino & Vidal (2017) . . . . .	110