



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL MOVIMIENTO DE PARTICULAS GENERADO EN  
UN LECHO GRANULAR NO COHESIVO POR UN FLUJO OSCILATORIO CON  
SUPERFICIE LIBRE DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

JUAN PABLO MARDONES BARRIONUEVO

PROFESOR GUÍA:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
YARKO NIÑO CAMPOS  
CLAUDIO FALCON BEAS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto Fondecyt N° 1161751

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: JUAN PABLO MARDONES BARRIONUEVO  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL MOVIMIENTO DE PARTICULAS GENERADO EN  
UN LECHO GRANULAR NO COHESIVO POR UN FLUJO OSCILATORIO CON  
SUPERFICIE LIBRE DE UN FLUIDO NO NEWTONIANO

A medida que la velocidad del agua en las cercanías del fondo para un flujo oscilatorio se incrementa, llega una etapa en la que se ejerce un esfuerzo de corte suficientemente alto sobre las partículas que componen el lecho el cual causa que estas se muevan. Este estudio analiza datos obtenidos experimental considerando parámetros del flujo, del fluido y de la partícula sobre el umbral de movimiento del sedimento bajo la acción de oleaje tanto para fluidos newtonianos como no newtonianos en una instalación del laboratorio de hidráulica de la Universidad de Chile. La propuesta de memoria es la continuación de un trabajo de investigación experimental realizado anteriormente, en el que se estudió la condición de arrastre incipiente debido a la acción de un flujo oscilatorio de un fluido pseudoplástico en un lecho granular no cohesivo (Vidal, 2017) . Para el estudio de Vidal se construyó un canal de oleaje en el cual se realizaron los experimentos que permitieron definir las condiciones de arrastre incipiente sobre distintos diámetros de arena de cuarzo. Los fluidos utilizados fueron agua y soluciones acuosas de carboximetilcelulosa (CMC) a diferentes concentraciones las cuales tienen un comportamiento no newtoniano.

El objetivo de esta memoria es extender los resultados de arrastre incipiente obtenidos por Vidal (2017) y extender su análisis. En dicho estudio se utilizarón dos parámetros principales para la presentación de resultados: Los números de Goddet conocidos como los adimensionales  $\Psi$  y  $X_n$  en donde el primer término corresponde a la razón entre las fuerzas coulombicas y las fuerzas de arrastre mientras que el segundo término es un adimensional propuesto por Goddet el cual considera el desarrollo de una capa límite laminar. Se incluyen resultados sobre el campo de velocidades de fluidos pseudoplásticos en flujo oscilatorios, un análisis del régimen de flujo a partir de los números de Reynolds y el número de Keulegan Carpenter junto con el estudio del movimiento de partículas utilizando los números de Goddet (1960) y el análisis de un criterio tipo Shields (Lenoff,1982).

Para ello se utiliza la misma instalación que fue utilizado en el estudio de Vidal (2017). Sin embargo, se realizaron modificaciones tanto en el sistema generador de oleaje como en el canal, con el propósito de generar las condiciones de flujo necesarias para para extender el rango de datos experimentales y complementar los resultados obtenidos anteriormente. Para obtener estos resultados se deben realizar diversos experimentos modificando en cada uno de ellos las condiciones experimentales. Se registran los datos mediante diferentes dispositivos de captura de imágenes y vídeos los que luego se procesan digitalmente para su análisis. Los resultados obtenidos a partir de los datos de laboratorio en esta memoria, se comparan con las curvas establecidas para el umbral de movimiento en estudios anteriores para así establecer el mejor criterio los cuales serán presentados en los resultados y posteriormente discutidos en las conclusiones.



# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía, don Aldo Tamburrino, por todo su apoyo, orientación y paciencia durante este largo proceso al igual que al Kevin Vidal por su gran ayuda, motivación y también mucha paciencia ya que fue quien me mostró el tema y me enseñó todo lo básico que necesitaba para comenzar y terminar este trabajo.

A mi familia comenzando con mis padres por el ánimo que me han brindado durante la carrera, el cariño que me han dado, por aguantarme en la casa todos estos años y darme de comer. También a mi abuela y a todos mis hermanos mayores, Diego, Carla, Cami y Jesu quienes son los mejores hermanos que he tenido.

A Natalia Bustamante por ayudarme a resolver muchos de los problemas técnicos que surgieron a lo largo del trabajo experimental. Al Don Manuel y Don Juan Donoso quienes me ayudaron a construir, montar y modificar lo que fuese necesario en la instalación experimental.

Al Joaquín Jil por su ayuda en programación y esas juntas de Magic junto a Tewi y Van-ray. A mis amigos de la U por los buenos momentos, el Pelao, al Joaco, Unky, Pablo, a los de la Pasta por tantos años de risas en la U, los de la sala de memoristas del tercer piso por la compañía, al igual que los pseudoplásticos en el laboratorio y sus buenos ayes. También a los jaquelines y a los amigos de Aldo por jugar esos partidos muy entretenidos. Gracias a los cabros vecinos de la salita, Carlitos Newman, Nahuel y al Edu por toda la sandía que llevaron durante el verano junto a todo tipo de comida, por las risas y esas salidas a club de baile durante febrero y marzo. A los integrantes de los grupos de música en los que estuve, Tokoriko por sus buenos cumbiones, MorasColadas y Macedonia. A Diablos por integrarme al equipo, todo el compañerismo que hay y ganas de jugar. Al Gabo, por ser mi amigo de la vida y apañarme con todo y a todo.

Al proyecto de investigación FONDECYT N° 1161751 por su financiamiento.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Organización de la memoria . . . . .	3
<b>2. Antecedentes generales</b>	<b>4</b>
2.1. Estudios anteriores . . . . .	4
2.1.1. Movimiento de sedimento en flujos oscilatorios . . . . .	5
2.1.2. Criterios de arrastre incipiente y parámetros adimensionales . . . . .	8
2.2. Características de una onda . . . . .	11
2.3. Propiedades del flujo . . . . .	11
2.4. Teoría del generador de olas . . . . .	12
2.5. Propiedades del fluido . . . . .	14
2.5.1. Comportamiento de un fluido no newtoniano. . . . .	15
2.5.2. Ley de potencia o modelo de Ostwald-de Waele. . . . .	17
2.6. Caracterización del sedimento . . . . .	18
<b>3. Diseño experimental</b>	<b>20</b>
3.1. Modificaciones montaje experimental . . . . .	21
3.1.1. Otras consideraciones del montaje experimental . . . . .	23
<b>4. Metodología</b>	<b>27</b>
4.1. Resumen de los experimentos . . . . .	27
4.2. Caracterización del fluido . . . . .	28
4.3. Caracterización del sedimento . . . . .	31
4.4. Caracterización del flujo . . . . .	32
4.4.1. Medición velocidades en el fondo . . . . .	32
4.5. Caracterización del oleaje . . . . .	36
4.6. Metodología experimental . . . . .	37
4.6.1. Experimentos sin lecho . . . . .	37
4.6.2. Experimentos de movimiento de partículas . . . . .	38
<b>5. Resultados</b>	<b>41</b>
5.1. Campo de velocidades en un fluido pseudoplástico . . . . .	41
5.2. Arrastre de sedimentos: Parámetros del flujo. . . . .	50

5.3. Parámetros del fluido . . . . .	51
5.4. Régimen de flujo . . . . .	52
5.5. Parámetros del oleaje . . . . .	55
<b>6. Análisis de resultados</b>	<b>56</b>
6.1. Criterios de arrastre incipiente de Goddet (1960) . . . . .	56
6.2. Criterios de arrastre incipiente Goddet de Modificado . . . . .	59
6.3. Criterios de arrastre incipiente tipo Shields. Criterio de Lenof, 1982 . . . . .	61
<b>7. Conclusion</b>	<b>64</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>66</b>
<b>A. Anexo I: Características del oleaje</b>	<b>70</b>
A.1. Características del oleaje . . . . .	70
<b>B. Anexo II: Resultados y errores parámetros del flujo y fluido</b>	<b>74</b>
B.1. Características del flujo . . . . .	74
B.2. Características del fluido . . . . .	77
<b>C. Anexo III: Parámetros y errores presentación de resultados</b>	<b>81</b>
C.1. Régimen de flujo . . . . .	81
C.2. Goddet y Goddet modificado . . . . .	84

# Índice de Tablas

2.1.	Parámetros adimensionales $Re_p$ , $Re_w$ y $KC$ . . . . .	9
2.2.	Parámetros adimensionales de arrastre incipiente. . . . .	10
4.1.	Resumen de los nombres designados a cada grupo de experimentos. . . . .	28
4.2.	Valores de los parámetros del fluido para el CMC donde el $K$ y el $n$ se obtuvieron experimentalmente . . . . .	29
4.3.	Diámetros característicos de cada grupo de experimentos. . . . .	31
4.4.	Número de experimentos realizados. AI corresponde a arrastre incipiente y AG arrastre generalizado. . . . .	38
4.5.	Amplitud de movimiento del flujo según su altura y el radio de giro del disco para un generador de ondas tipo pivote. . . . .	39
5.1.	Condiciones experimentales para el estudio del oleaje y campos de velocidad. . . . .	41
5.2.	Rangos de frecuencia y período de oscilación en cada grupo de experimentos para arrastre incipiente y arrastre generalizado. . . . .	50
5.3.	Rango de parámetros del flujo y errores arrastre incipiente. . . . .	50
5.4.	Rango de parámetros del flujo y errores arrastre generalizado. . . . .	51
5.5.	Rango de parámetros del fluido y errores arrastre incipiente. . . . .	51
5.6.	Rango de parámetros del fluido y errores arrastre generalizado . . . . .	52
5.7.	Rango de adimensionales número de Reynolds y número de Keulegan Carpenter para arrastre incipiente . . . . .	53
5.8.	Rango de adimensionales número de Reynolds y número de Keulegan Carpenter para arrastre generalizado . . . . .	53
5.9.	Rango de valores de las características del oleaje correspondiente a su altura y longitud de ondas para los experimentos de arrastre incipiente. . . . .	55
5.10.	Rango de valores de las características del oleaje correspondiente a su altura y longitud de onda para experimentos de arrastre generalizado. . . . .	55
6.1.	Rango de valores de los números de Goddet $\psi$ y $\chi$ y errores. . . . .	58
6.2.	Rango de valores de los números de Goddet modificado $\psi$ y $\chi_N$ y errores. . . . .	59
A.1.	Número de experimentos inicial, final y total realizados. AI corresponde a arrastre incipiente y AG arrastre generalizado . . . . .	70
A.2.	Características del oleaje arrastre incipiente . . . . .	70
A.3.	Características del oleaje arrastre generalizado . . . . .	72
B.1.	Características del flujo y errores arrastre incipiente . . . . .	74

B.2. Características del flujo y errores arrastre generalizado . . . . .	76
B.3. Características del fluido y errores arrastre incipiente . . . . .	77
B.4. Características del fluido y errores arrastre generalizado. . . . .	79
C.1. Parámetros régimen del flujo arrastre incipiente . . . . .	81
C.2. Parámetros régimen del flujo arrastre generalizado . . . . .	83
C.3. Parámetros de Goddet, Goddet modificado y errores . . . . .	84

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Dimensiones características de una onda. $H$ : corresponde a la altura de onda, $L$ : a la longitud de onda y $h$ : la profundidad de propagación(Dean & Dalrymple, 1991). . . . .	11
2.2.	Parámetros de interés en un flujo oscilatorios: Máxima velocidad orbital y máxima semiexcursión(Dean & Dalrymple, 1991). . . . .	12
2.3.	Representación del volumen desplazado por la paleta y el volumen de la cresta (Dean & Dalrymple, 1991). . . . .	13
2.4.	Tipos de paleta. a) tipo piston. b) pivote(Dean & Dalrymple, 1991). . . . .	14
2.5.	Reograma. Los fluidos newtonianos son representados mediante una línea recta. Todo el resto corresponde a fluidos no newtonianos (Chhabra & Richardson, 2008). . . . .	15
3.1.	Esquema y dimensionamiento del canal diseñado por Vidal (2017). . . . .	21
3.2.	Movimiento bateola tipo pivote. . . . .	22
3.3.	Sistema generador de olas compuesto por una paleta pivoteada en el fondo y unida en su centro mediante un eje metálico a un sistema motorizado. . . . .	22
3.4.	Montaje experimental modificado. . . . .	23
3.5.	(a) Estructura de soporte original (b) Estructura de soporte y bateola modificado. . . . .	24
3.6.	(a) Pilares anclados a la estructura en vista lateral y (b) uniones de acero vista frontal. . . . .	25
3.7.	Esquema general de la instalación experimental, no a escala. . . . .	26
4.1.	Reómetro rotacional Rheolab QC Anton Paar. . . . .	30
4.2.	Termostato Veto y Cia. modelo checktemp 1. . . . .	30
4.3.	PIV campo de velocidades en flujo oscilatorio. . . . .	33
4.4.	Esquemización del proceso de iteración para el cálculo de la capa límite. . . . .	34
4.5.	Cálculo de la máxima semi excursión de fondo mediante el área bajo la curva de la velocidad orbital $U_m$ en función del tiempo $t$ . $A$ corresponde a la trayectoria recorrida durante medio periodo. . . . .	35
4.6.	Distancias para el cálculo de las dimensiones del oleaje. . . . .	37
5.1.	a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola $H$ y $L$ y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P1. Frecuencia de oscilación $\omega = 100$ [rpm], $n = 0.674$ y $k = 0.131$ . . . . .	42

5.2.	Perfil 1 de velocidad en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con $\omega = 100$ [rpm] $n = 0.8132$ y $k = 0.0386$ . . . . .	43
5.3.	a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola $H$ y $L$ y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P2. Frecuencia de oscilación $\omega = 100$ [rpm], $n = 0.8132$ y $k = 0.0386$ . . . . .	44
5.4.	Perfil 2 de velocidad en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con $\omega = 100$ [rpm], $n = 0.8132$ y $k = 0.0386$ . . . . .	45
5.5.	a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola $H$ y $L$ y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P3. Frecuencia de oscilación $\omega = 80$ [rpm], $n = 0.674$ y $k = 0.131$ . . . . .	46
5.6.	Perfil 3 de velocidades en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con $\omega = 80$ [rpm], $n = 0.674$ y $k = 0.131$ . . . . .	47
5.7.	a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola $H$ y $L$ y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P4. Frecuencia de oscilación $\omega = 80$ [rpm], $n = 0.8132$ y $k = 0.0386$ . . . . .	48
5.8.	Perfil 3 de velocidades en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con $\omega = 80$ [rpm], $n = 0.8132$ y $k = 0.0386$ . . . . .	49
5.9.	Correlación entre la viscosidad efectiva de un fluido pseudoplastico y la razón entre la el grosor característico de la capa límite $\delta$ y la excursión de fondo $A$ . . . . .	54
6.1.	Presentación de resultados de arrastre incipiente en función de los números de Goddet $\psi$ y $\chi$ . Cada color representa un diámetro diferente mientras que cada forma corresponde a la reología característica. . . . .	57
6.2.	Gráfico bandas de error números de Goddet. . . . .	58
6.3.	Presentación de resultados de arrastre incipiente y generalizado en función de los números de Goddet $\psi$ y $\chi_N$ . Cada color representa un diámetro diferente mientras que cada forma corresponde a la reología característica. Se incluyen datos obtenidos de arrastre generalizado representados mediante cruces. . . . .	60
6.4.	Gráfico bandas de error criterio de arrastre incipiente Goddet modificado. . . . .	61
6.5.	Criterio de arrastre incipiente considerando los parámetros de Lenoff,1982. Se incluyen los datos de arrastre generalizado mediante rombos de color plateado. . . . .	63

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

El movimiento de sedimentos en las plataformas continentales ocurre bajo la influencia de flujos unidireccionales y oscilatorios y, en la mayoría de los casos, estos dos tipos diferentes de flujo interactúan para producir tensiones de corte combinadas en el fondo marino que son responsables de la existencia de movimiento en el lecho (Grant & Madsen, 1979) . El estudio del inicio del movimiento de sedimentos en flujos oscilatorios es de gran importancia en regiones costeras pues éstas están cubiertas en su mayoría con arena, limo y lodo que pueden moverse bajo la acción de las olas. Este fenómeno ha sido estudiado durante los dos últimos siglos con significativos avances y a pesar de las dificultades en el estudio de la mecánica de sedimentos en flujos oscilatorios (LeRoux, 2005) , se ha logrado una gran cantidad de descripciones matemáticas representando la condición de umbral de movimiento. Este movimiento de partículas son el resultado de la acción conjunta del fluido, el flujo y el sedimento, y su presencia resulta en cambios locales cinemáticos del flujo que modifican la resistencia hidráulica produciendo que, al superar un esfuerzo de corte límite, se produce el movimiento. Las interacciones sólido-fluido pueden ser extremadamente complejas, por lo que la forma más lógica de abordar el problema, debido al número de variables involucradas, es abordarlo desde una perspectiva principalmente experimental (Dean & Dalrymple, 1991)

Debido a la dificultad de observación, irregularidad de las olas naturales de mediciones in-situ y las condiciones de sedimento, no existen mediciones de umbral de movimiento que hayan sido obtenidas a partir del océano, o algún prototipo que asemeje estas situaciones. Debido a lo anterior, los datos recopilados hasta la fecha son datos que han sido obtenidos a partir de mediciones en canales en laboratorios en donde se pueden generar olas simples y en donde hay cierto control sobre el sedimento (Komar & Miller, 1973) . Esto produce ciertas dificultades en cuanto a la escala, pues el tamaño y tipo de oleaje junto con el periodo de oscilación alcanzados en un canal de oleaje son mucho menores que en el océano.

Los primeros estudios que abordan este problema en flujos oscilatorios lo hacen desde una perspectiva descriptiva (Hunt, 1883 ; Darwin, 1883) . Dichos autores se dieron cuenta de que se forman rizos debido al efecto de las olas, y que estos cambian dependiendo de

las características del flujo. Estos aparecen a partir de ciertas condiciones de flujo cuando se alcanza una condición límite y esta persiste en el tiempo. En los estudios de Darwin (1883) y Ayrton (1910) se describen los mecanismos de formación de ondas sedimentarias. Estas observaciones se realizaron en instalaciones sencillas o mediante visualizaciones en los sectores costeros. Sus resultados se presentan esquemáticamente mediante ilustraciones de las diferentes formas y tamaño que las formas de fondo puedan adquirir.

Bagnold (1946) es el primer autor en realizar estudios en los cuales aborda el problema cuantitativamente obteniendo diferentes ecuaciones empíricas que relacionan la frecuencia de oscilación con la velocidad horizontal, altura de flujo y otros parámetros que caracterizan ya sea el flujo, el fluido o el sedimento. Desde entonces, muchos otros autores han abordado este problema para distintas condiciones de flujo y bajo otras variantes (Voropayev et al.,1999 ; Sekiguchi y Sunamura, 2004 ; Pedocchi & García 2009 a ; Carstens et al., 1967 )

Todos estos estudios abordan el problema cuando el fluido es agua. Sin embargo, no existe literatura que aborde el problema de la generación de formas de fondo cuando el fluido es no newtoniano. En el trabajo de Vidal (2017) , se extiende el problema del arrastre de sedimento debido a flujos oscilatorios hacia los fluidos no newtonianos al utilizar como medio fluido soluciones pseudoplásticas elaboradas por medios de la disolución de carboximetilcelulosa en agua. Su investigación contempló la construcción de un canal de oleaje que genera una corriente uniforme de ondas viajeras que permiten generar las condiciones necesarias para que exista arrastre de sedimento. En este trabajo se presenta una relación empírica que define la condición de arrastre incipiente para material granular no cohesivo que incorpora la reología del fluido como variable.

Dicho lo anterior, el presente trabajo corresponde a un estudio experimental que continúa el trabajo desarrollado por Vidal (2017). Lo que se propone en esta memoria es, modificando la instalación experimental existente, poder extender el rango de condiciones experimentales que permitan visualizar movimiento en un lecho de sólidos granulares y así cuantificar la condición de arrastre incipiente y arrastre generalizado en función de las variables que definen al flujo (altura, amplitud de la onda, frecuencia), al sedimento (diámetro) y al fluido (densidad y reología).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Realizar un estudio experimental del movimiento de partículas que se generan en un lecho de sólidos granulares debido al efecto de un flujo oscilatorio con superficie libre de un fluido no newtoniano.

## 1.2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos en esta memoria son:

- Desarrollo y registro de experimentos que permitan extender y validar el estudio de Vidal (2017). Lo anterior comprende desde movimiento incipiente a movimiento generalizado o deformación del lecho.
- Obtener relaciones que permitan caracterizar el umbral de movimiento realizado por flujos oscilatorios de fluidos no newtonianos.

## 1.3. Organización de la memoria

Esta memoria se apoya de la siguiente manera.

Resumen: Se presenta brevemente los aspectos principales desarrollados en esta memoria como el problema a investigar, los resultados a presentar y las conclusiones que dejó este estudio.

Introducción: En este capítulo se expone la motivación del tema y los principales objetivos de esta memoria.

Antecedentes generales: Aquí se presenta una revisión bibliográfica del tema y se desarrollan los principales conceptos que son necesarios para la obtención de resultados.

Diseño experimental: En este capítulo se describe la instalación experimental en la que se basa este trabajo y todas las modificaciones que fueron realizadas para conseguir los objetivos. También se muestra en detalle los principales equipos, dispositivos y herramientas utilizados para la realización de mediciones.

Metodología: En este apartado se presenta la metodología tanto del trabajo realizado en el laboratorio para la toma de datos, como para la obtención de algunos parámetros en el momento del procesamiento de datos.

Resultados experimentales: En este capítulo se presentan los resultados experimentales realizados en esta memoria.

Análisis de resultados: A partir del procesamiento de los datos y los diferentes parámetros obtenidos mediante los resultados principales, se presentan los resultados finales junto a su análisis.

Conclusiones: Finalmente, a partir de los resultados obtenidos y análisis realizado, se muestran las principales conclusiones.

# Capítulo 2

## Antecedentes generales

### 2.1. Estudios anteriores

Debido a la importancia del fenómeno de arrastre de sedimentos en la hidráulica marítima en sectores costeros, existe una vasta literatura que estudia el movimiento de partículas junto a la formación de formas de fondo bajo efectos de un flujo oscilatorio. Hunt (1883) fue uno de los primeros en estudiar las conocidas ondas sedimentarias bajo un flujo oscilatorio. Dicho autor, mediante observación, midió profundidades del flujo en la formación de ondulaciones sedimentarias junto a la influencia del viento y olas en la forma de estas ondulaciones. Más tarde, Darwin (1883) se une al estudio de la generación de formas de fondo, obteniendo valores del largo de la onda sedimentaria, velocidad máxima en el fondo, velocidad de formación y velocidad de transporte incipiente. Darwin descubrió experimentalmente que el tamaño de las dunas es proporcional a la amplitud del flujo. Darwin realizó diferentes tipos de experimentos. Uno consiste en la oscilación angular en torno a un eje vertical en un recipiente cilíndrico con paredes verticales, mientras que un segundo experimento consiste en ejercer sobre el flujo una oscilación longitudinal en un estanque rectangular. Dichos autores, junto a otros, estudiaron el fenómeno desde un punto de vista cualitativo. Ayrton (1910) estudió el proceso de formación de ondulación para varias profundidades y diferentes espesores de arena.

Los autores nombrados anteriormente fueron los pioneros del estudio de formación de dunas en flujos oscilatorios. Por otra parte, hubo autores los cuales le añadieron al problema, un enfoque cuantitativo, uno de los primeros en realizar esto fue Bagnold (1946). En los experimentos de Bagnold, la arena estaba contenida en una cámara suspendida de un pivote en el techo, de manera que podía ser oscilada a través de un arco circular en agua quieta dentro de un tanque. En su estudio, Bagnold comenzó depositando un lecho plano y entonces la velocidad de oscilación o frecuencia fue gradualmente aumentando hasta que los granos de arena de diferentes diámetros comenzaran a moverse.

### 2.1.1. Movimiento de sedimento en flujos oscilatorios

En los estudios de Goddet (1960) sobre el inicio de la deformación de un lecho compuesto por diferentes materiales bajo la acción del oleaje, se establecen leyes experimentales que relacionan las características del material (densidad y diámetro) y las características del oleaje al inicio del movimiento de partículas de diferentes diámetros  $D = 0.15 - 0.2 - 0.5$  mm. En su análisis se considera el efecto de la viscosidad cinemática  $\nu$  y dentro del rango de experimentos o pruebas llevadas a cabo y a partir de algunas hipótesis simples, se propone la existencia de una capa límite oscilatoria laminar cuyo espesor característico es de  $\delta = \sqrt{\nu T}$  donde  $T$  es el período de oscilación y  $\nu$  la viscosidad cinemática. Esta capa límite corresponde a una zona de transición entre el fondo, donde la velocidad es cero y la zona donde el flujo tiene una velocidad horizontal  $U_m$  correspondiente a la velocidad orbital. A través de sus experimentos, las pruebas mostraron la influencia de dos parámetros adimensionales  $\chi = \frac{D}{\sqrt{\nu T}}$  y  $Re_p = \frac{U_m D}{\nu}$ .

Chan et al. (1972) realizaron experimentos en un tubo horizontal sujeto a flujos oscilatorios en los que pudieron identificar cinco regímenes de flujo, entre los cuales se encuentran el arrastre incipiente y movimiento generalizado. Las transiciones de dichos regímenes fueron medidas en función de diferentes variables (frecuencia angular, amplitud, diámetro y densidad del sedimento, densidad y viscosidad cinemática del fluido). Diferentes tipos de partículas fueron utilizadas dentro de las cuales el tamaño de la arena estaba entre los rangos  $D = 0.21 - 0.29$  mm,  $D = 0.42 - 0.59$ ,  $D = 0.59 - 0.7$  y  $D = 1 - 1.1$  mm mientras que los líquidos estudiados fueron agua, etanol, y dos soluciones de glucosa de densidades 1, 0.787, 1.19 y  $1.291 \frac{gr}{cm^3}$  respectivamente.

Usualmente, la determinación del inicio del movimiento de una partícula, ya sea en flujo unidireccional u oscilatorio durante un experimento, es realizada de manera visual (Lenhof, 1982) por lo que la definición de arrastre incipiente no queda clara en su totalidad. Generalmente se define arrastre incipiente cuando cierta porción de la superficie del lecho comienza su movimiento pero esta difiere levemente según el autor. Vincent (1959) consideró que la condición de movimiento inicial se caracterizaba por el desplazamiento de los primeros granos. Debido a estas diferencias, la evaluación de un criterio exacto sobre el inicio de movimiento de partículas es difícil y subjetivo. Carstens et al. (1967) definieron movimiento incipiente en un lecho plano cuando aproximadamente el 10 por ciento de las partículas superficiales están rodando hacia adelante y hacia atrás. Rance y Warrent (1968) consideraron que el desprendimiento y el pequeño movimiento de los primeros uno o dos granos definía el comienzo del movimiento.

Para flujos unidireccionales constantes, es completamente aceptado el criterio de Shields (Shields 1936) para el movimiento incipiente de partículas. Este expresa la razón entre el valor crítico de las fuerzas de arrastre y los esfuerzos estabilizadores actuando sobre el sedimento en una interfaz fluido-sedimento. Las fuerzas de arrastre se relacionan con el esfuerzo de corte ejercido en el fondo y las estabilizadoras con el peso sumergido del sedimento. Es una relación empírica bastante general que se aplica a cualquier fluido, flujo y sedimento siempre que el sedimento no sea cohesivo. Para flujos oscilatorios, varios criterios empíricos han sido

desarrollados. Alguno de ellos fueron postulados por Bagnold (1946) y Vincent (1958), quienes relacionan la amplitud de las partículas cercanas al lecho o máxima excursión de fondo y el periodo de oscilación cuyas relaciones no son de la naturaleza del criterio de Shields. Komar y Miller (1975) realizaron una demostración de la validez del criterio de Shields para la descripción cuantitativa del inicio del movimiento de partículas bajo flujos oscilatorios. Komar & Miller en 1973 establecieron una ecuación para la cual el umbral de movimiento se alcanza cuando el flujo en la capa límite es todavía laminar. Dicha relación es obtenida a partir de la ecuación empírica deducida por Bagnold (1946) luego de una modificación con base teórica. Sin embargo esto se cumple para arena media fina cuyos diámetros característicos ( $D < 0.5$  mm) son menores al grosor de la capa límite y donde el régimen es laminar. Se comparan conjuntos de datos de autores anteriores y establece así que el umbral puede evaluarse para tamaños de grano tan fino como el rango de limo, para el cual se pueden esperar efectos cohesivos, y otros tamaños de hasta 50 mm. Continúan con su trabajo en 1974 realizando una extensión al realizar una revisión de estudios anteriores y, luego de incluir los resultados de otros autores, comparar los resultados del umbral bajo acción de las olas con las curvas que se han propuesto para el umbral bajo corrientes unidireccionales propuestas por Shields (1936) y Bagnold (1963). En 1975 incluyen el estudio de ondas sedimentarias.

Un año más tarde, un análisis aproximado (Madsen & Grant, 1976) muestra que la fuerza de arrastre en flujos oscilatorios es bien representada por el esfuerzo de corte en el fondo. Así es posible evaluarlo en base al parámetro de Shields  $\psi_m = \frac{\tau_m}{\rho g (\frac{\rho_s - \rho}{\rho}) d}$  obtenido a partir del esfuerzo de corte  $\tau_m = \frac{1}{2} f_w \rho U_m^2$  el cual, a su vez, está en función del factor de fricción de onda  $f_w$  (Jonsson, 1966). En lugar de presentar los resultados en un diagrama de Shields convencional, se utiliza una presentación más práctica utilizando un parámetro modificado  $S_* = \frac{D}{4\nu} \sqrt{(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}) g D}$  en lugar del número de Reynolds en donde  $\rho_s$  corresponde a la densidad del sólido,  $\rho$  a la densidad del agua,  $g$  a la aceleración de gravedad,  $D$  el diámetro de la partícula. Esto se obtiene a partir de los datos obtenidos experimentalmente en un canal de oleaje y experimentos anteriores en los cuales, para olas de laboratorio, se utilizaron arenas entre 0.2 y 1.2 mm de diámetro y periodos de oscilación comprendidos entre 1 y 2.7 s.

Lenhof (1982) establece un criterio general aplicable al inicio del movimiento del grano bajo la influencia de flujos oscilatorios. En su estudio se realizaron experimentos en un canal de oleaje y un túnel de agua en forma de  $U$ . El propósito de su trabajo fue brindar datos de diferentes fuentes juntos en una curva universal. Para ello utilizó parámetros obtenidos de un análisis dimensional y así obtener un resultado lo más aceptable posible, es decir, la obtención de una curva que represente el umbral de movimiento. Los parámetros elegidos para la representación gráfica de los datos fueron el número de Reynolds de corte  $R_* = \frac{U_* D}{\nu}$  en función del esfuerzo de corte para flujos oscilatorios y el adimensional diámetro del grano  $D_* = \sqrt[3]{\frac{R_* g}{\nu^2} D}$  en donde  $R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$  y  $\nu$  a la viscosidad cinemática.

Losada & Desiré (1985) postulan que el inicio de movimiento es una condición necesaria para la erosión y, por lo tanto, un problema de estudio de interés relacionado con la deriva litoral. Sus experimentos fueron realizados en un canal abierto rectangular de altura  $h$  con un lecho móvil horizontal compuesto por arena o grava. Con respecto a las características

del sedimento, el material formando el lecho móvil corresponde a un material cohesivo de diámetro  $D$  ( $0.1 \text{ mm} < D < 0.45 \text{ mm}$ ) y densidad específica  $\rho_s$ . Un frente de oleaje de altura  $H$  y periodo de oscilación  $T$  se propaga sobre la superficie del agua de densidad  $\rho$  y viscosidad cinemática  $\nu$ . Su metodología corresponde a calcular la altura de ola mínima requerida, para un periodo dado, a la cual un movimiento apreciable de partículas es observado. Cuando la velocidad es alta y se observa que todas las partículas en la superficie del lecho están en movimiento, es cuando se produce un movimiento general del lecho o movimiento generalizado. Luego, el arrastre incipiente y movimiento generalizado de la superficie corresponden a dos puntos de referencia que caracterizan a un fenómeno continuo. El criterio de arrastre incipiente establecido por Losada & Desire, corresponde al modelo de transporte de sedimento de Bagnold (1946) y se compararon resultados de datos obtenidos de diferentes fuentes a partir de la ecuación  $\frac{A}{D} = \alpha \left( \frac{\gamma g}{\omega^2 D} \right)^2$  para diferentes experimentos de laboratorio en donde  $D$  el diámetro de la partícula,  $\gamma$  el peso específico del sólido,  $g$  la aceleración de gravedad,  $\omega$  la frecuencia de oscilación,  $\alpha$  una constante obtenida empíricamente del ajuste de datos y  $A$  es la excursión de fondo, parámetro que se defino como la trayectoria máxima que recorre una partícula de agua en las cercanías del fondo. Durante el mismo año, la información disponible de movimiento incipiente para flujos unidireccionales y oscilatorios fue resumida según el diagrama de Shields por Wang & Shen (1985). Estos autores postulan que a partir del análisis de fuerzas instantáneas que actúan sobre las partículas de sedimento y provocan su movimiento, la velocidad orbital máxima debido a la acción de las olas es un sustituto razonable de la velocidad de corte en el flujo unidireccional.

En 1992, una nueva fórmula para el esfuerzo de corte en el fondo para flujos oscilatorios y corrientes unidireccionales fue obtenida en un canal de laboratorio (Kantardgi, 1992). El criterio utilizado por Kantardgi para flujos combinados fue definido como  $\tau_{wc} = \tau_c + \tau_w$  en donde  $\tau_c$  y  $\tau_w$  corresponden a los esfuerzos de corte para flujo unidireccional y oscilatorio respectivamente. El tipo de material utilizado fueron sedimentos finos y estos corresponden a limo arenoso ( $D = 0.03 - 0.12 \text{ mm}$ ) y arena fina ( $D = 0.12 - 0.25 \text{ mm}$ ). Los experimentos fueron realizados en un canal de laboratorio teniendo capacidad de descarga de 1 a  $200 \frac{\text{l}}{\text{s}}$ . Para generar olas regulares el canal fue equipado con un generador de olas tipo émbolo. La profundidad del agua varía entre 15 y 30 cm, la altura de ola entre 5 y 7 cm y la longitud de ola entre 60 y 70 cm. A partir de la observación visual, los siguientes etapas de comportamiento de movimiento de partículas han sido distinguidas: (a) Separación ocasional de partículas de sedimentos, (b) inicio del movimiento de los sedimentos (movimiento de partículas individuales), (c) inicio del movimiento de arrastre generalizado en el cual se presenta deformación del lecho y (d) movimiento masivo de sedimentos en el cual se mueve prácticamente todo el lecho. Los parámetros elegidos para la presentación de resultados son el parámetro de Shields y el adimensional del diámetro de la partícula ( $\psi, D_*$ ).

Las últimas dos décadas ha sido un periodo de gran aporte y desarrollo sobre el arrastre de sedimentos pues el estudio y avance sobre este tema han sido destacables. Existe también vasta literatura sobre trabajos realizados en años más recientes. Paphitis (2001) se basó en las relaciones empíricas de Komar & Miller (1973,1974) para el umbral de movimiento bajo flujos oscilatorios. Sus experimentos se llevaron a cabo en un canal de laboratorio con recirculación que contenía una placa oscilante para simular la acción de las olas, con un movimiento a lo largo del mismo eje que los flujos unidireccionales. Paphitis afirmaba que el

factor significativo de movimiento es el esfuerzo de corte crítico por lo que entre sus resultados para flujos oscilatorios incluye la función de arrastre de Shields. Los experimentos de umbral se realizaron en un canal de laboratorio de recirculación, que incorporó una placa oscilante para simular la acción de las olas. El sedimento consistía en muestras de arena de cuarzo con diámetro medio entre 0.315 y 0.513 mm.

Un año mas tarde se propone un modelo sobre el criterio general del inicio de movimiento de partículas bajo flujos oscilatorios a partir de una investigación de laboratorio. El modelo TVT propuesto por Tanaka & Van To (1995) consiste en evaluar el parámetro de Shields  $\tau_*$  para movimiento general de partículas. Gentile (2002) define una curva tipo Shields y propone un nuevo modelo representando una modificación del anterior modelo de Tanaka & Van to en donde el primer parámetro de analisis es un adimensional relacionado con las propiedades del flujo y sedimento y el segundo es el esfuerzo de corte adimensional. Su análisis experimental se basó en realizar pruebas a diferentes valores de periodo de onda y diámetro de arena. También incorporó variaciones en las condiciones del sedimento modificando parámetros como el índice de vacío o densidad relativa. Los periodos de oscilación adoptados se encuentran en el rango de  $T = 0.8$  s a  $T = 1.3$  s mientras que para el lecho se utilizaron partículas de arena con diámetros  $D = 0.8$  mm y  $D = 0.3$  mm.

Terrile et al (2006) llevaron a cabo experimentos en un canal de oleaje de gran escala. Éste tenía un largo de 42 m , ancho de 80 cm y altura de 1 m. Desde un extremo del canal se construyó una pendiente de 1:30 para simular la orilla de los sectores costero y mitigar la influencia de la reflexión de la ola. En el otro extremo se situaba un generador de olas motorizado tipo paleta o pistón. Las pruebas fueron llevadas a cabo con diferentes periodos de oleaje en el rango entre  $T = 2$  s y  $T = 4.4$  s con alturas de oleaje entre 20 y 60 cm. Terrile et al. investigaron los efectos de la aceleración del fluido en el lecho y la capacidad de movimiento sobre partículas gruesas. El criterio elegido de arrastre incipiente fue cuando se observa el inicio del movimiento de tres partículas. Sus resultados se presentan en una correlación entre el parámetro de Shields y el número de Reynolds en función de  $u_{rms}$  que se define como la raíz de la media cuadrática de la velocidad.

Con el objetivo de derivar una ecuación matemática que represente y mejor refleje la relación que rige el umbral de movimiento de sedimentos, She et al. (2006) realizaron una revisión de la dinámica de fuerzas que se ejercen sobre el sedimento bajo la acción de oleaje. De esta manera se deriva una cantidad de parámetros adimensionales asociados al umbral del movimiento de partículas en base a dicho análisis de fuerzas. Las principales fuerzas corresponden a la fuerza de arrastre, inercia (en el sentido del flujo) y empuje (normal a la dirección del flujo).

### 2.1.2. Criterios de arrastre incipiente y parámetros adimensionales

A continuación se presenta un resumen de los parametros adimensionados que han sido utilizado en la literatura para el análisis del movimiento de partículas bajo efectos de flujos oscilatorios. La tabla 2.1 muestra los parámetros que caracterizan el movimiento o régimen del flujo. Estos son: el número de Reynolds del flujo, número de Reynolds de la partícula y el número de Keulegan-Carpenter.

Tabla 2.1: Parámetros adimensionales  $Re_p$ ,  $Re_w$  y  $KC$ .

Nombre	Adimensional
Número de Reynolds de la partícula	$Re_p = \frac{U_m D_s}{\nu}$
Número de Reynolds del flujo	$Re_w = \frac{U_m A}{\nu}$
Número de Keulegan Karpenter	$KC = \frac{A}{D_s}$

En donde  $U_m$  se define como la Velocidad orbital de fondo,  $D_s$  el diámetro característico de la partícula,  $\nu$  la viscosidad cinemática y  $A$  como la máxima semi excursión de fondo. Dichos adimensionales han sido utilizados por una gran cantidad de autores y su definición será presentada en el capítulo de análisis y resultados. Mientras que la tabla 2.2 muestra un resumen de los parámetros adimensionales y criterios de arrastre incipiente en flujos oscilatorios según diferentes autores en donde algunas de las variables que se definen son:  $R$  el peso específico sumergido relativo de la partícula,  $g$  la aceleración de gravedad,  $\rho$  la densidad del fluido,  $\rho_s$  la densidad del sólido,  $D_s$  el diámetro de la partícula,  $f_m$  el factor de fricción de onda y  $D_{50}$  diámetro máximo de las partículas que constituyen la porción granulométrica del 50 %. Los parámetros tipo Shields son los que utilizan un adimensional del esfuerzo de corte.

Tabla 2.2: Parámetros adimensionales de arrastre incipiente.

Autor	Fecha	Adimensional 1	Adimensional 2	
Bagnold	1946	$a \left(\frac{A}{D}\right)^2 D^{0,15}$	$\frac{U_m^2}{RgD}$	$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \alpha = cte$
Goddet	1960	$\frac{A}{D}$	$1275,7 Re^{-\frac{1}{6}} R^{\frac{8}{3}} \left(\frac{g}{\omega^2 A}\right)^{\frac{8}{3}}$	$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$
		$Rg \frac{D^2}{U_m \nu}$	$\frac{D}{\delta}$	$\delta = \sqrt{\nu T}$
Komar & Miller	1974	$\frac{\rho U_m^2}{(\rho_s - \rho)gD}$	$0,21 \left(\frac{A}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$	$D < 0,05mm$
		$\frac{\rho U_m^2}{(\rho_s - \rho)gD}$	$0,46 \left(\frac{A}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$	$D > 0,05mm$
	1975	$\frac{0,5f_m^2}{(\rho - \rho_s)gD}$	$\frac{U_m D}{\nu}$	Parámetro tipo Shields
Mandsen	1977,1977	$\frac{0,5f_m^2}{(\rho - \rho_s)gD}$	$\frac{D}{4\nu} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} gD}$	Parámetro tipo Shields
Lenhof	1982	$\left(\frac{Rg}{\nu}\right)^{\frac{1}{3}} D_{50}$	$\frac{U_m D_{50}}{\nu}$	
Wang & Shen	1985	$\frac{0,5f_m^2}{(\rho - \rho_s)gD}$	$\frac{\sqrt{\frac{1}{2} f_w U_m^2 D}}{\nu}$	Parámetro tipo Shields
Kantagardi	1992	$\frac{0,25f_m^2}{(\rho - \rho_s)gD}$	$\left(\frac{(\rho_s - \rho)g}{\rho \nu^2}\right)^{\frac{1}{3}} D$	Parámetro tipo Shields
Gentile	2002	$\frac{0,5f_m^2}{(\rho - \rho_s)gD}$	$\frac{\sqrt{(\frac{\rho}{\rho_s} - 1)gD}}{4\nu}$	Parámetro tipo Shields
Terrile	2006	$\frac{A}{D}$	$\sqrt{\frac{8(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)}{w^2 D}}$	
		$\frac{0,5f\rho(Aw)^2}{(\rho - \rho_s)gD}$	$\frac{U_{rms} D}{\nu}$	Parámetro tipo Shields

Con respecto a el movimiento de partículas en flujos oscilatorios, los antecedentes presen-

tados en el actual capítulo corresponden a criterios impuestos por diversos autores en cuyos trabajos el fluido utilizado ha sido agua o fluidos newtonianos como glucosa.

## 2.2. Características de una onda

Rara vez se puede observar un cuerpo de agua expuesto a la atmósfera que no presente algún tipo de ondulaciones en su superficie. Estas ondas son una manifestación de fuerzas que actúan sobre el fluido y tienden a deformarlo contra la acción de la gravedad y la tensión superficial (Dean & Dalrymple, 1991) . Estas manifestaciones pueden presentarse en varias formas y tamaños dependiendo de la magnitud de las fuerzas actuando en el agua.

Los parámetros importantes que describen una onda son su longitud (distancia horizontal entre dos crestas o valles sucesivos), altura (distancia entre cresta y valle) y profundidad sobre la cual se están propagando. La Figura 2.1 muestra un esquema de la características de una onda.

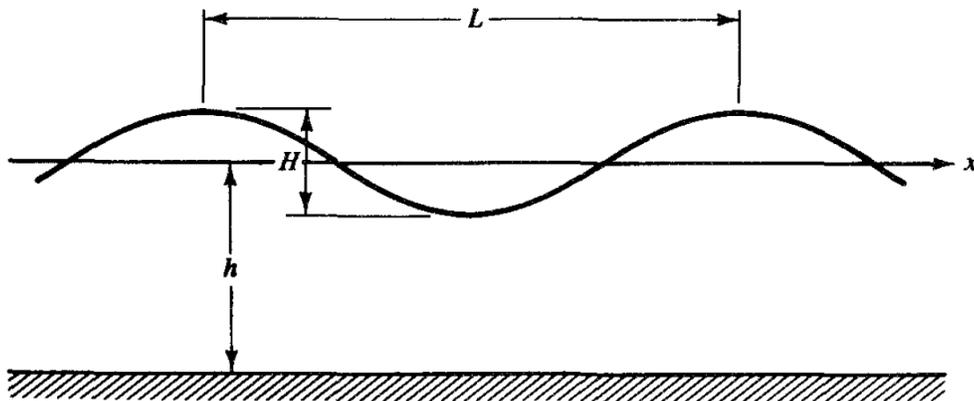


Figura 2.1: Dimensiones características de una onda.  $H$  : corresponde a la altura de onda,  $L$  : a la longitud de onda y  $h$  : la profundidad de propagación(Dean & Dalrymple, 1991).

El tiempo requerido para que dos crestas sucesivas (o valles sucesivos) pasen por el mismo punto se conoce como periodo de onda o periodo de oscilación  $T$ .

## 2.3. Propiedades del flujo

En fluidos newtonianos, se considera que el potencial de velocidad en un flujo oscilatorio esta bien representado por la teoría lineal del oleaje (TLO). Sin embargo, actualmente no

existen relaciones que describan el flujo para fluidos no newtonianos en flujos oscilatorios. Si bien existe literatura para describir el flujo en una variedad de geometrías, la teoría para el caso de esta memoria, es decir, un canal rectangular con flujo oscilatorio en superficie libre, es nula. Debido a esto, los diferentes parámetros necesarios para realizar el análisis debieron ser medidos en el laboratorio y obtenidos empíricamente los cuales se presentan a continuación.

Los parámetros de interés de flujo para el estudio de arrastre de sedimentos en flujos oscilatorios son la velocidad orbital  $U_m$ , y la máxima semiexcursión de fondo  $A$ . En de la Figura 2.2 se presenta un esquema del oleaje indicando dichos parámetros.

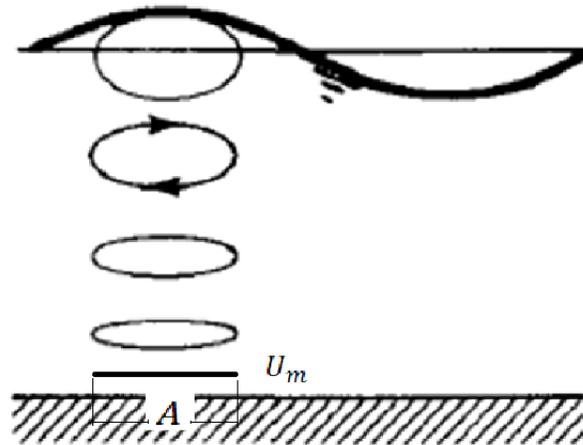


Figura 2.2: Parámetros de interés en un flujo oscilatorios: Máxima velocidad orbital y máxima semiexcursión(Dean & Dalrymple, 1991).

Se define la velocidad orbital como la máxima velocidad de fondo. Sin embargo, cuando el fluido no es ideal, o bien, no newtoniano, el valor de la velocidad orbital se calcula como la velocidad a una altura correspondiente a la del espesor de la capa límite  $\delta = \sqrt{\nu T}$  (Goddet, 1960). Luego, el parámetro  $A$ , o máxima semiexcursión de fondo corresponde a la trayectoria que recorre una partícula de fluido en el fondo a una velocidad  $U_m$  y altura  $\delta$ .

## 2.4. Teoría del generador de olas

Hasta la fecha, la mayoría de las estudios experimentales de estructuras flotantes, o montadas en el fondo de la playa, junto con los estudios de arrastre de sedimentos y otros fenómenos relacionados, han utilizado tanques de oleaje como montaje experimental que generalmente se caracterizan como recipientes rectangulares largos y estrechos con algún tipo de generador de ondas en un extremo. El oleaje generado por estos generadores se produce gracias al movimiento oscilatorio de una paleta a una amplitud de movimiento  $S$ . En aguas superficiales, una simple teoría para la generación de olas por parte de un generador de olas fue propuesta

por Galvin y Eagleson (1964) , quienes suponían que el volumen del agua desplazada por el aparato debe ser igual al volumen de la cresta de la onda. En la Figura 2.4 se puede observar un esquema del movimiento en un canal de oleaje junto con los volúmenes ya mencionados.

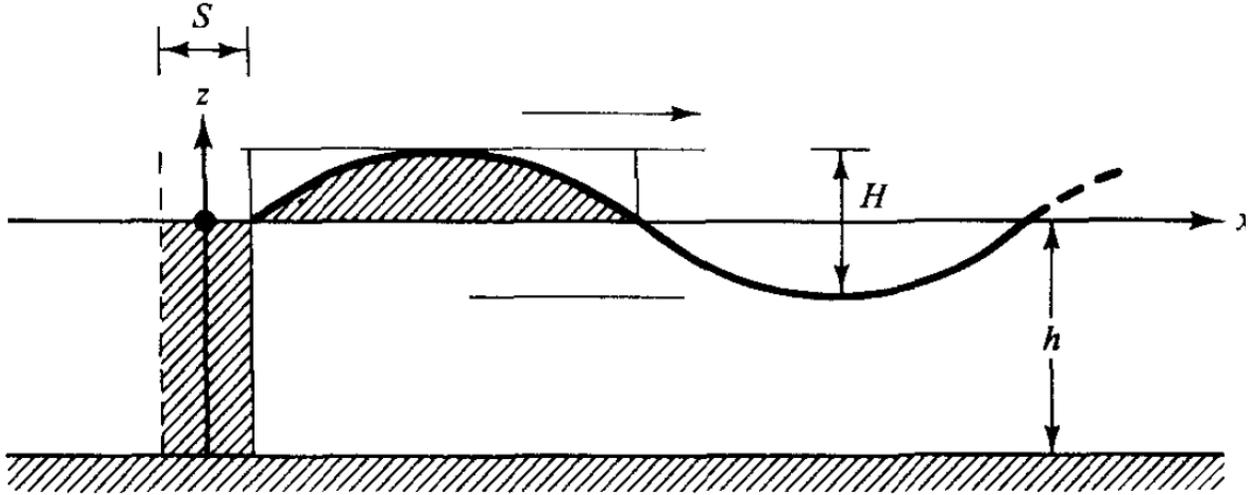


Figura 2.3: Representación del volumen desplazado por la paleta y el volumen de la cresta (Dean & Dalrymple, 1991).

El volumen del agua en la cresta de la ola es  $\int_{x=0}^{\frac{L}{2}} (H/2) \sin kx dx = \frac{H}{k}$ . Mientras que el volumen del agua desplazada es  $Sh$ . Igualando ambos volúmenes se tiene.

$$Sh = \frac{H}{k} = \frac{H}{2} \left( \frac{L}{2} \right) \frac{2}{\pi} \quad (2.1)$$

donde  $S$  corresponde a la amplitud de movimiento,  $H$  la altura de onda,  $L$  la longitud de onda y  $k$  un factor llamado número de onda definido como  $k = \frac{2\pi}{L}$  .

Dentro de los componentes de los generadores de olas, hay diferentes tipos de paleta. En el estudio de Vidal (2017), se tenía un canal de oleaje con un generador de ola, o paleta, tipo pistón cuyo movimiento es horizontal. En esta memoria su realizaron experimentos en la misma instalación diseñada por Vidal (2017) y se modificó el tipo de paleta a una pivoteada en el fondo y cuyo movimiento es angular.

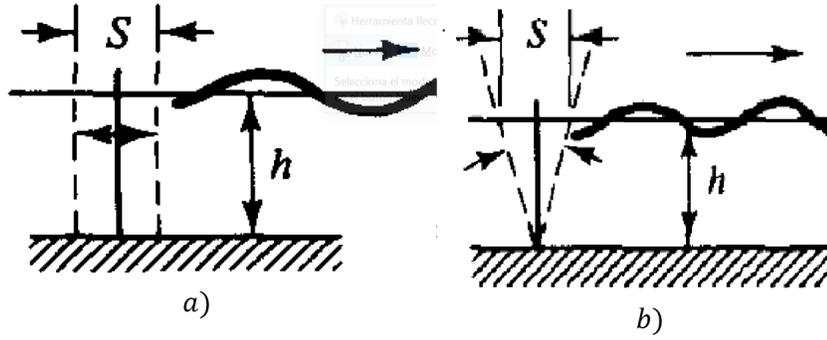


Figura 2.4: Tipos de paleta. a) tipo piston. b) pivote(Dean & Dalrymple, 1991).

La ecuación 2.3 también se puede expresar

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{piston} = \frac{2\pi h}{L} \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{H}{S}\right)_{pivote} = \frac{\pi h}{L} \quad (2.3)$$

## 2.5. Propiedades del fluido

En la mecánica de fluidos existen dos formas de clasificar los fluidos, estas son, los newtonianos y los no newtonianos. Un fluido newtoniano es aquel cuya viscosidad no varía respecto al tiempo y el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la tasa de deformación (ejemplo: agua, aire).

Definición fluido newtoniano

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

$$\dot{\gamma}_{ij} = \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.5)$$

donde

$\tau$ : esfuerzo de corte  $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

$\mu$ : viscosidad dinámica  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$ .

$\dot{\gamma}_{ij}$ : tasa de deformación  $\left[\frac{1}{s}\right]$ .

La constante de proporcionalidad o viscosidad newtoniana  $\mu$  es independiente del esfuerzo la tasa de deformación. El gráfico del esfuerzo de corte y tasa de deformación se conoce como reograma. Para fluidos newtonianos corresponde a una línea recta con pendiente  $\mu$ , mientras que, por definición, todos aquellos fluidos que no siguen la ecuación 2.4 son no newtonianos.

### 2.5.1. Comportamiento de un fluido no newtoniano.

La clasificación de los fluidos no newtonianos es de acuerdo a su respuesta bajo aplicación de presiones externas y a efectos producidos bajo la acción de esfuerzos de corte. En la figura 2.5 se presenta el esquema conocido como reograma el cual resume los diferentes comportamientos de fluidos de acuerdo al esfuerzo de corte y la tasa de deformación.

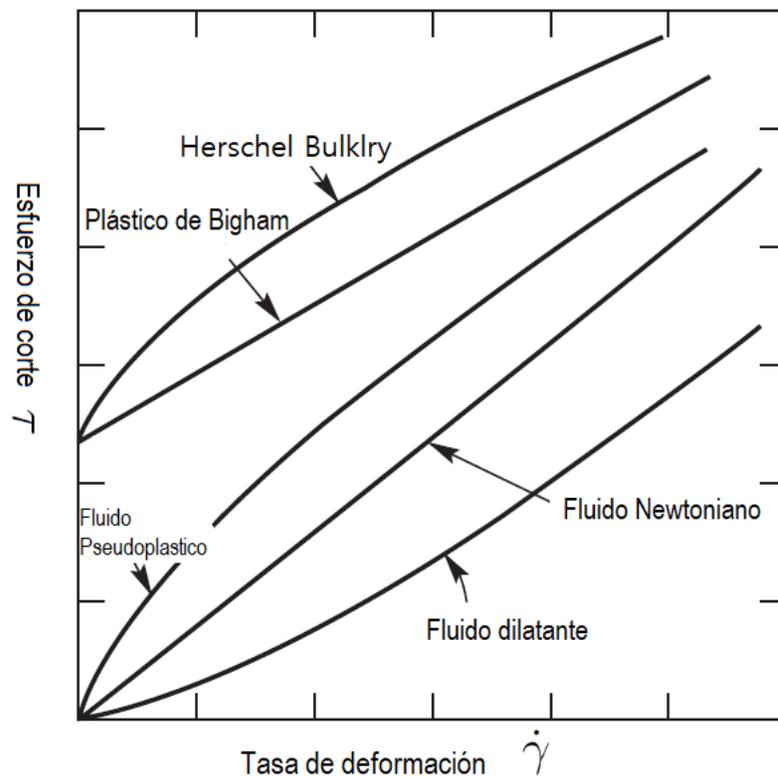


Figura 2.5: Reograma. Los fluidos newtonianos son representados mediante una línea recta. Todo el resto corresponde a fluidos no newtonianos (Chhabra & Richardson, 2008).

Un fluido no newtoniano es aquel que su curva de esfuerzo de corte versus tasa de deformación es no lineal o cuya curva no pasa a través del origen, como se observa en el reograma de la figura 2.5. Es decir, la viscosidad aparente (razón entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación) no es constante a una temperatura y presión dada, pero es dependiente de condiciones del flujo tal como la geometría de flujo, tasa de corte, etc. Dichos materiales pueden ser convenientemente agrupados dentro de tres clases generales (Chhabra & Richardson,

2008) .

(1) Fluidos para los cuales la tasa de deformación de cualquier punto está determinado únicamente por el valor del esfuerzo de corte en un instante dado. Estos fluidos son conocidos como “tiempo independiente”, “puramente viscosos”, “inelásticos” o “fluidos newtonianos generalizados”.

(2) Fluidos más complejos los cuales la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de deformación depende, en adición, de la duración del esfuerzo de corte y su historia cinemática. Son llamados “fluidos tiempo dependiente” y finalmente;

(3) Sustancias que presentan características tanto de fluidos ideales como de sólidos elásticos y que muestran recuperación elástica parcial, después de la deformación; estos se clasifican como fluidos viscoelásticos.

Este esquema de clasificación es arbitraria y la mayoría de los materiales reales frecuentemente existen como una combinación de dos o incluso tres tipos de características de fluidos no newtonianos. En esta memoria se trabajó con el primer grupo de fluidos, es decir, los tiempo independientes.

### **Comportamiento del fluido independiente del tiempo.**

Para esfuerzo de corte simple, el comportamiento del flujo de esta clase de materiales puede ser descrito por un componente constitutivo lo cual implica que el valor de la tasa de deformación en cualquier punto está determinado solo por el valor actual del esfuerzo de corte en ese punto o viceversa (Chhabra & Richardson, 2008). Estos fluidos pueden estar, a su vez, subdivididos en tres grupos.

(1) Dilatantes ("Shear thickening"): son aquellos fluidos que aumentan su viscosidad al aumentar la velocidad de deformación aplicada. Como ejemplo podríamos citar el almidón de maíz o las arenas movedizas.

(2) Pseudoplásticos o adelgazantes ("Shear thinning"): son aquellos fluidos que disminuyen su viscosidad al aumentar la velocidad de deformación aplicada. Como ejemplo podríamos citar zumos de frutas y diversas emulsiones.

(3) Viscopelásticos o de comportamiento plástico: Estas sustancias fluyen cuando se aplica en ellas un esfuerzo de corte, pero tienen la particularidad de recuperar parcialmente su estado inicial.

## Fluidos pseudoplásticos o adelgazantes.

El tipo más común de fluido no newtoniano no dependiente del tiempo es de comportamiento pseudoplástico. Se caracteriza por una viscosidad aparente que decrece a medida que incrementa la tasa de deformación. Se han propuesto muchas expresiones matemáticas de diferente complejidad y forma en la literatura para modelar las características de este tipo de comportamiento, algunos de estos son intentos directos de ajuste de curvas, que proporcionan relaciones empíricas para el esfuerzo de corte. El más utilizado corresponde al modelo de Ostwald-de Waele.

### 2.5.2. Ley de potencia o modelo de Ostwald-de Waele.

Un fluido de ley de potencia, o la relación de Ostwald-de Waele, es un tipo de fluido newtoniano generalizado (independiente del tiempo del fluido no newtoniano) para el el esfuerzo cortante,  $\tau_{ij}$ , viene dado por

$$\tau_{ij} = k(\dot{\gamma})^{n-1}\dot{\gamma}_{ij} \quad (2.6)$$

En donde  $k [P_a s^n]$  y  $n[-]$  son parámetros empíricos,  $k$  es el índice de consistencia y  $n$  es el índice de comportamiento de flujo con  $\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_{ij}\dot{\gamma}_{ij}}$  expresión que, para un flujo 2D, es equivalente a  $\dot{\gamma} = \sqrt{\dot{\gamma}_{xx}^2 + 2\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yy}^2}$  y, por lo tanto, la ecuación 2.6 del fluido de ley de potencia (o Ostwald-de Waele) esta dada por:

$$\tau_{ij} = k \left( \sqrt{\dot{\gamma}_{xx}^2 + 2\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yy}^2} \right)^{n-1} \dot{\gamma}_{ij} \quad (2.7)$$

El término  $k \left( \sqrt{\dot{\gamma}_{xx}^2 + 2\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yy}^2} \right)^{n-1}$  se denomina “viscosidad aparente” y este no es constante, dependiendo directamente de la velocidad de corte mientras que  $\dot{\gamma}_{xy}$  está definido como  $\left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$  (ecuación 2.5).

Luego, para un flujo 2D o gradualmente variado se tiene que  $\frac{\partial u_y}{\partial x} \ll \frac{\partial u_x}{\partial y}$  y  $u_y \ll u_x$  por lo que  $\dot{\gamma}_{xx}^2 = 0$  y  $\dot{\gamma}_{yy}^2 = 0$ . La ecuación 2.7 queda

$$\tau_{ij} = k \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^{n-1} \dot{\gamma}_{ij} \quad (2.8)$$

donde la viscosidad aparente, o viscosidad efectiva, corresponde al término  $k \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^{n-1}$ .

El modelo de ley de potencia de Ostwald-de Waele puede modelar fluidos pseudoplásticos cuando el exponente que caracteriza la ley, o índice de flujo "n", es menor que uno. Esta ley modela los fluidos newtonianos cuando n es igual a uno, y cuando n es mayor que uno,

representa a fluidos dilatantes.

En el presente trabajo,  $\frac{\partial u}{\partial y}$  se aproxima a  $\frac{u_{rms}}{\delta}$ , donde  $u_{rms}$  corresponde a la velocidad la media cuadrática a una distancia  $\delta$  correspondiente al espesor de la capa límite  $\sqrt{\nu T}$  utilizado por Goddet (1960):

$$\mu_{eff} = k \left( \frac{u_{rms}}{\delta} \right)^{n-1} \quad (2.9)$$

Considerando que la viscosidad dinámica se puede escribir en función de la viscosidad cinemática  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , la ecuación  $\sqrt{\nu T}$ . queda de la siguiente manera.

$$\delta = \sqrt{\frac{\mu_{eff} T}{\rho}} \quad (2.10)$$

Elevando al cuadrado y sustituyendo la Ecuación 2.12

$$\delta^2 = \frac{\mu_{eff} T}{\rho} \sim \frac{kT}{\rho} \left( \frac{u_{rms}}{\delta} \right)^{n-1} \quad (2.11)$$

$$\delta^{2+n-1} \sim \frac{kT}{\rho} (u_{rms})^{n-1} \quad (2.12)$$

$$\delta^{n+1} \sim \frac{kT}{\rho} (u_{rms})^{n-1} \quad (2.13)$$

Finalmente:

$$\delta \sim \left( \frac{kT}{\rho} \right)^{\frac{1}{1+n}} (u_{rms})^{\frac{n-1}{n+1}} \quad (2.14)$$

Lo cual corresponde a una estimación en el cálculo del espesor de la capa límite para un fluido ley de potencia bajo efectos de flujos oscilatorios. Con esta ecuación, junto a la ecuación 2.9, se obtiene la viscosidad efectiva  $\nu_{eff}$  de un fluido tiempo independiente, una modificación de la expresión utilizada en el trabajo anterior (Vidal, 2017).

Un ejemplo de fluido pseudoplástico es la solución acuosa de carboximetilcelulosa (CMC) lo cual corresponde a un compuesto orgánico utilizado como espesante. Este espesante es de gran utilidad en la industria de alimentos por sus propiedades de transparencia y viscosidad, entre otros. Los experimentos montados en este estudio comprenden pruebas realizadas con agua y pruebas con soluciones acuosas con CMC a diferentes concentraciones. Para el segundo caso se calcula la viscosidad efectiva a partir de la ecuación 2.9 y los coeficientes  $n$  y  $k$  se obtienen empíricamente de la reología de la solución.

## 2.6. Caracterización del sedimento

Se distinguen dos grupos de sedimentos desde el punto de vista del comportamiento de atracción interna entre partículas y su resistencia a ser transportados (Fredsoe y Deigaard,

1992) . Estos son los sedimentos cohesivos y los no cohesivos. Los sedimentos no cohesivos corresponde a material granular constituido por granos gruesos o partículas sueltas como las gravas y arenas siendo el peso de las partículas quien se opone a las fuerzas de arrastre de una corriente a diferencia de los no cohesivos los cuales están constituidos por partículas muy finas como las arcillas. En este caso la fuerza de cohesión es mucho más importante que el peso propio de las partículas en cuanto a la oposición a las fuerzas de arrastre de dicha corriente. El comportamiento dinámico de los granos sólidos en fluidos es una función de su tamaño, forma y densidad. Los experimentos de esta memoria fueron realizados sobre un lecho no cohesivo de arena de cuarzo de diferentes tamaños de partícula.

## Tamaño de la partícula

El método más conveniente y usualmente utilizado para el análisis de distribución del tamaño de partículas es el análisis granulométrico el cual es aplicable para partículas de diámetro mayor a 0.06 mm. El tamaño determinado por este análisis se expresa como el diámetro  $D_m$ , que se considera como el tamaño de la esfera más grande que pasaría a través de la malla de un tamiz de granulometría. Sin embargo, las dimensiones reales dependen en gran medida de las formas del grano y los resultados están influenciados por las diferencias en los procedimientos (LeRoux, 2005) . Otra medida del tamaño de partícula diferente del diámetro del tamiz es el diámetro equivalente definido como el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula dada. Sin embargo, este método no toma en cuenta la forma del grano y el método de granulometría fue el utilizado para la selección de sedimentos en la presente memoria. De esta manera se obtuvieron cuatro tamaños diferentes de partículas de arena de cuarzo para realizar los experimentos. Estos son  $D = 0.3 - 0.55 - 0.7 - 1$  mm.

## Gavedad específica

Se define como la razón entre el peso unitario del material y el peso unitario del agua. Se calcula mediante la siguiente expresión.

$$S = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (2.15)$$

$\rho_s$ : peso específico del sólido  $[\frac{kg}{m^3} \frac{m}{s^2}]$

$\rho_w$ : peso específico del agua  $[\frac{kg}{m^3} \frac{m}{s^2}]$

y se define el adimensional  $R$  llamado peso específico sumergido relativo del grano como

$$R = S - 1 = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (2.16)$$

# Capítulo 3

## Diseño experimental

Los experimentos reportados en esta memoria se llevaron a cabo en un canal ubicado en el Laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Domínguez del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Dicho canal corresponde a la misma instalación utilizada por Vidal (2017) quien la puso en marcha y realizó un conjunto de experimentos sobre arrastre incipiente entre los años 2016 y 2017. Sin embargo, para alcanzar los objetivos de esta memoria, fue necesario realizar modificaciones tanto en el diseño de la estructura como en la metodología experimental.

La modificación más importante que se hizo en el canal fue el cambio del sistema generador de oleaje ubicado en un extremo del canal. Más precisamente se rediseñó la paleta, llamada bate-ola, cuyo movimiento permite la generación del oleaje en un fluido. Se consideró y llevó a cabo la ampliación y el reforzamiento de las paredes laterales del canal de manera que la capacidad de contener un mayor volumen de líquido sea posible.

### Montaje original

El montaje experimental original corresponde a un canal rectangular de 4 metros de largo, 15 cm de ancho y 40 cm de alto elevado mediante una estructura a 1 m del suelo. Se equipó un generador de ondas de tipo pistón en un extremo del canal. Dicho generador abarca un dominio de 93 cm desde el extremo. Luego, Entre los 93 y 308 cm, se localiza el lecho correspondiente a la zona de mediciones de un ancho de 15 cm y grosor de 4 cm. En esta se depositaron sedimentos de arena de diferentes tamaños.

La capacidad limitada del canal, en cuanto a la amplitud de movimiento por parte de la paleta que compone el generador, es el motivo principal para hacer cambios en su diseño. Esto se traduce en que el arrastre de sedimento que se podía observar era de una baja magnitud pues no se observó mayor movimiento que el arrastre incipiente, es decir, el movimiento de un par de granos de arena. El mecanismo generador de oleaje consistía en un sistema mecanizado tipo pistón el cual ejecuta un movimiento horizontal oscilatorio mediante un eje conectado a una paleta vertical a lo largo del eje longitudinal. En un extremo del eje se encuentra la paleta

vertical, mientras que en el otro extremo está un disco conectado al motor del sistema de tal modo que la regulación de las revoluciones por minuto junto al radio de giro sea posible. Esto implica que, para un radio de disco dado, o radio de giro, la amplitud de movimiento de la paleta dentro del canal será independiente de la altura de flujo y estará condicionado tan solo por el radio de giro del disco. Para sostener el canal y controlar las vibraciones producidas por el motor, se montó una estructura de acero inoxidable, la cual eleva el canal un metro sobre el suelo y se ancla a las paredes de éste por medio de pernos. Otros componentes de interés del canal son los desarenadores, drenajes, disipadores de energía y rectificador del flujo. Los disipadores de energía se ubican en los últimos 91 cm y estos corresponden a una playa en la cual rompen las olas y una malla de acero ubicada sobre ella. La acción conjunta de estos dos elementos permite una disipación suficiente de energía y así evitar la posible reflexión de onda que se produce cuando la ola impacta en la pared final del canal. De esta manera y junto al rectificador de flujo, que se ubica al inicio del canal inmediatamente después de la paleta generadora de oleaje, se evita la perturbación de las olas generadas. La Figura 3.1 muestra un esquema de la versión original de la instalación antes nombrada.

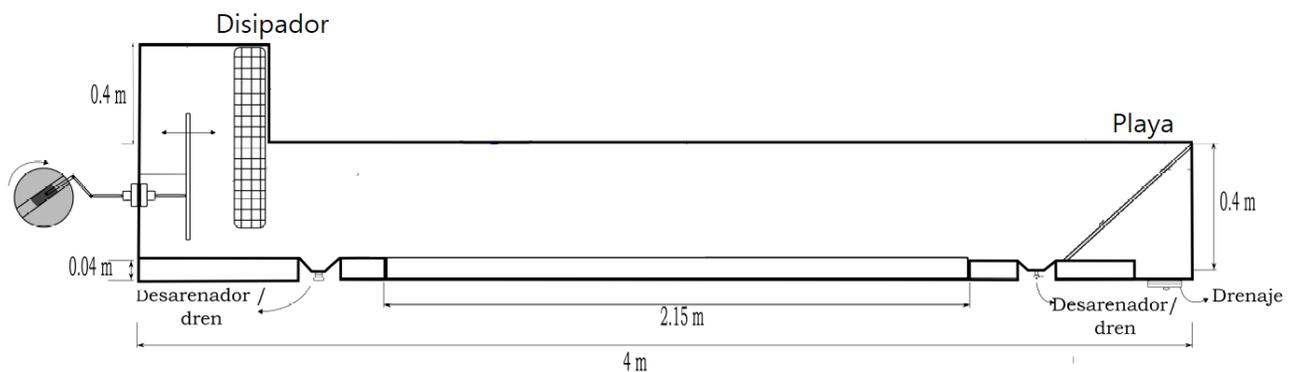


Figura 3.1: Esquema y dimensionamiento del canal diseñado por Vidal (2017).

A continuación se presentarán en detalle las modificaciones realizadas y la versión final de la instalación experimental.

### 3.1. Modificaciones montaje experimental

#### Sistema generador de oleaje

Entre los componentes del sistema, se cambió el diseño de la paleta tipo pistón, o bateola, a una paleta pivoteada en el fondo del canal y cuyo acoplamiento permite un movimiento

angular. Dicho pivote consiste en un anclaje flexible el cual está representado en la Figura 3.2.

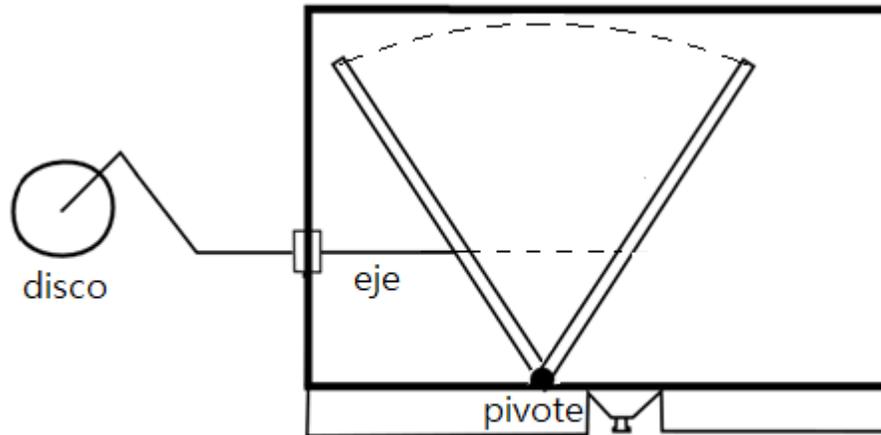


Figura 3.2: Movimiento bateola tipo pivote.

Mediante un eje, se une la paleta con el disco conectado a un motor y para obtener una mejor movilidad, se ensambla el eje a la paleta mediante un sistema de articulaciones metálicas. De acuerdo a la ecuación 2.5, la amplitud de movimiento del flujo en la superficie es directamente proporcional a la altura del fluido dentro del canal. Lo anterior implica que, para lograr amplitudes mayores de movimiento y generar un mayor oleaje se deben realizar experimentos con alturas mayores. De esta forma se producen velocidades en el fondo que son capaces de acarrear mayor cantidad de material. La Figura 3.3 muestra la paleta unida mediante un eje de acero al sistema mecánico que permite su movimiento y el rango de amplitud máximo de este.

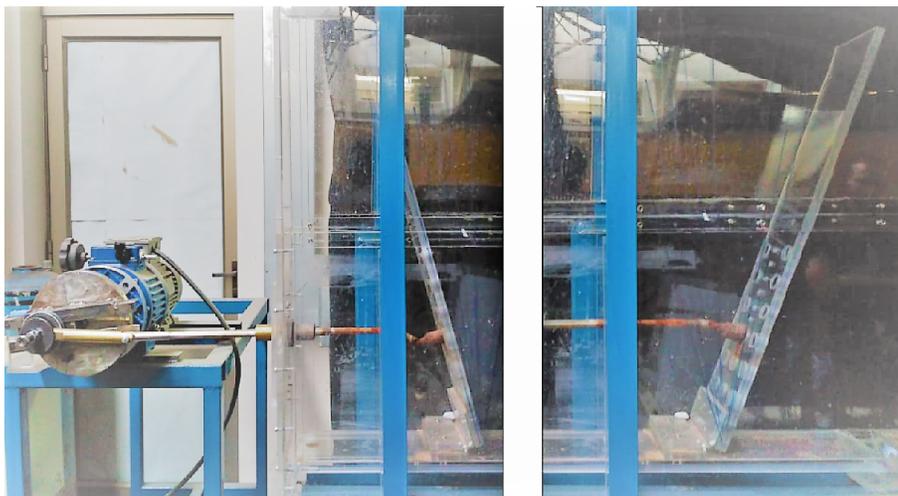


Figura 3.3: Sistema generador de olas compuesto por una paleta pivoteada en el fondo y unida en su centro mediante un eje metálico a un sistema motorizado.

## Ampliación del canal

Dado que se obtuvieron condiciones con mayores alturas de flujo y con dimensiones del oleaje mayores, se vio en la necesidad de peraltar las paredes del canal y así poder contener mayor volumen de fluido de tal modo que este no rebalse fuera del canal. La altura de la pared en el canal original es de 80 cm en el sector donde se ubica el generador, es decir, en los primeros 93 cm del canal. Luego, partir de ese punto hasta el final del canal, las paredes tienen una altura de 40 cm las cuales, para esta memoria, fueron ampliadas.

Las modificaciones a las paredes consisten en aumentar a 80 cm de alto de las paredes de una altura original de 40 cm. Para ello se utilizó el mismo material de acrílico de 8 mm de espesor al igual que las paredes originales. La siguiente Figura 3.5 muestra un esquema transversal del canal con las modificaciones principales realizadas junto a la estructura de soporte.



Figura 3.4: Montaje experimental modificado.

### 3.1.1. Otras consideraciones del montaje experimental

#### Estructura de soporte

El aumento de la altura del flujo dentro del canal se traduce en un aumento en el volumen de agua que este deberá que contener y una mayor masa que soportar. Debido a esto, las fuerzas hidrostáticas que se ejercen sobre las paredes modificadas del canal aumentan considerablemente al punto de aumentar la flexión sobre las paredes laterales del canal. Por lo tanto, fue necesario un reforzamiento en fortificando ciertos lugares, como esquinas y uniones mediante acrílico, pernos y refuerzos de acero. De igual manera se debió ampliar la estructura metálica de soporte de acuerdo a la ampliación del canal y así mantener la estructura firme y que la forma rectangular de esta no se vea afectada.

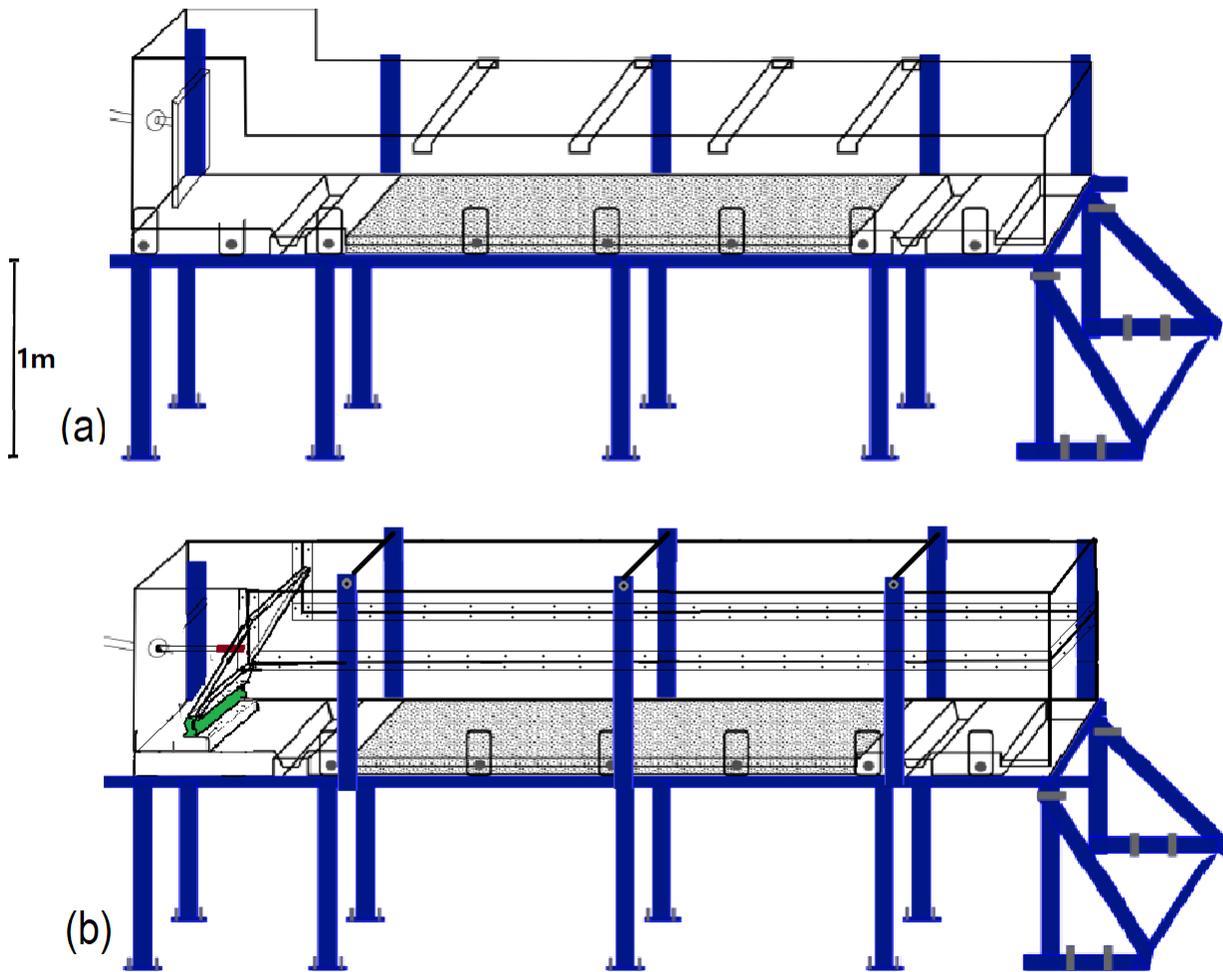


Figura 3.5: (a) Estructura de soporte original (b) Estructura de soporte y bateola modificado.

La Figura 3.5 muestra las modificaciones realizadas en la estructura metálica. En el diseño original (Figura 3.5 (a)) los pilares de acero se adhieren a un solo lado del canal pues la cantidad de agua utilizada en dicho diseño no producía deformaciones en las paredes laterales. Luego, debido al aumento de fluido dentro del canal y al tener paredes más largas, estas presentaron una significativa flexión por lo se vio en la necesidad de anclar pilares de acero por ambas paredes del canal y unirlos de un lado a otro en la parte superior del canal por medio de cables de acero (Figura 3.5 (b)). En la Figura 6.5 (a) se observan ,desde un punto de vista lateral, los pilares anclados al canal los cuales son del mismo largo que las paredes de este junto a la unión a partir de los cables de acero (Figura 6.5 (b)) cuyo objetivo es evitar que ocurra flexión en las paredes.



Figura 3.6: (a) Pilares anclados a la estructura en vista lateral y (b) uniones de acero vista frontal.

### **Implementación fondo falso**

Para ciertos experimentos se desea estudiar la evolución de los perfiles de velocidad en la dirección longitudinal junto al decaimiento del oleaje en la superficie libre. Dicho decaimiento será apreciable de mejor manera para casos en donde se desarrolle una mayor cantidad de olas (sinusoides) dentro del canal lo que se consigue para condiciones de baja amplitud de movimiento de la paleta, altas frecuencias de oscilación y bajas alturas de flujo dando como resultados flujos bajos. Estos flujos menores no son capaces de mover material pues las velocidades en el fondo están muy por debajo de la necesaria para alcanzar el umbral de movimiento. Debido a esto, se utilizó un fondo falso de acrílico para rellenar el espacio del lecho en el fondo del canal diseñado para depositar sedimento, pues para la medición de perfiles de velocidad no se utilizará lecho. El fondo falso consiste en una placa rectangular de acrílico lo suficientemente pesado para que éste no flote o vibre con la acción del flujo y de dimensiones 215 cm, 15 cm, 4 cm de largo, ancho y alto respectivamente.

### **Estanque de mezcla**

Para aumentar la altura de flujo en el canal se requiere mayor volumen de líquido por lo que se reemplazó el estanque de mezcla original de 180 litros por uno de 500 litros de capacidad instalado en una torre a 5 metros de altura. En este estanque se realizan las mezclas de agua

con CMC para luego vaciarlo en el canal de oleaje mediante diferencias de altura por medio de una manguera de 1 pulgada de grosor que conecta al estanque con el canal.

### Estanque de mezcla

A continuación, en la Figura 3.7, se presenta un esquema de la instalación experimental compuesta por el el estanque de mezcla ubicado sobre la torre y conectado al canal de oleaje.

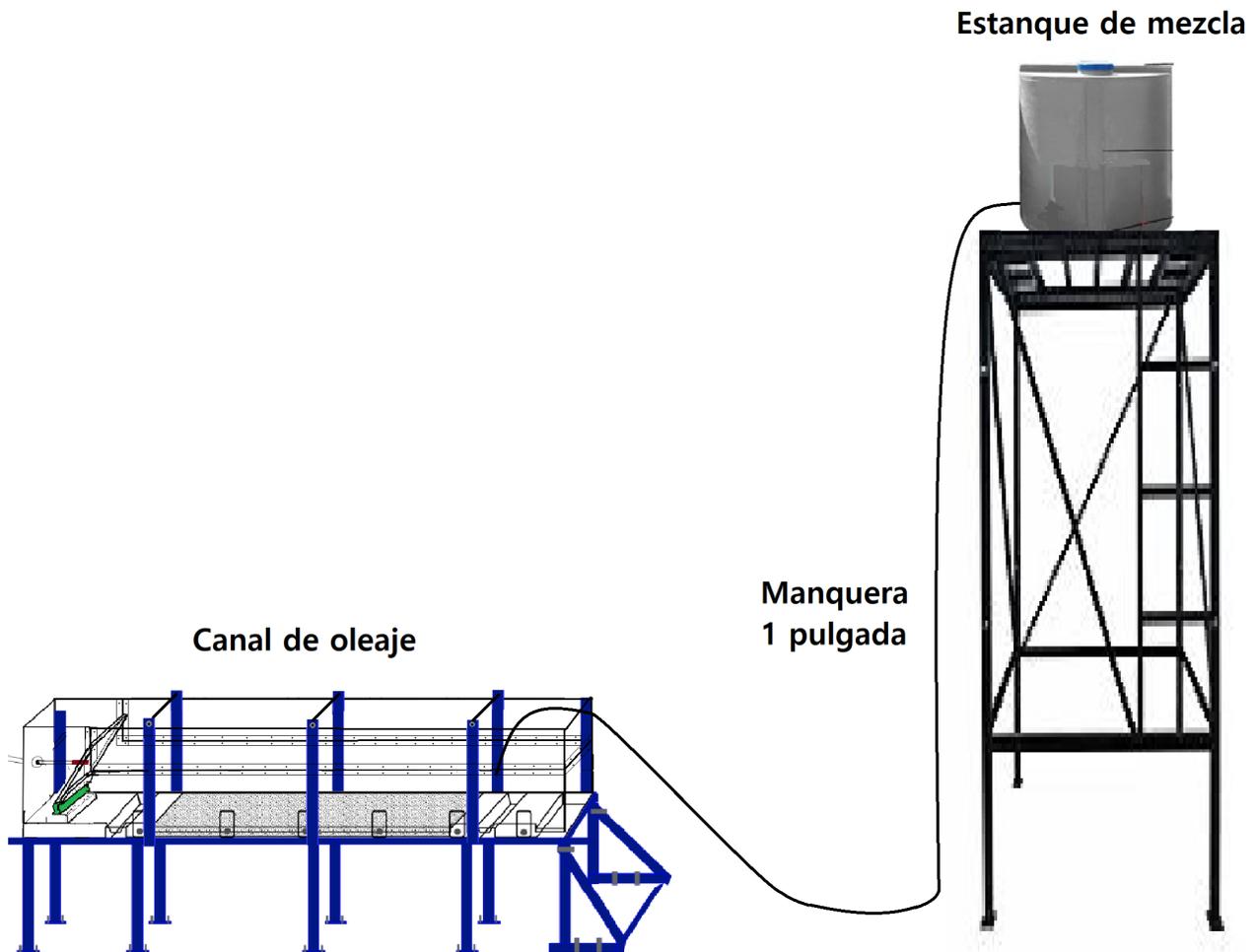


Figura 3.7: Esquema general de la instalación experimental, no a escala.

# Capítulo 4

## Metodología

En la siguiente sección se presenta en detalle todo el procedimiento experimental junto a la metodología para calcular los parámetros de interés a partir de los datos obtenidos en el laboratorio. Dichos parámetros cuantifican las características del fluido, sedimento y oleaje. Para obtener cada uno de ellos se tiene un procedimiento experimental propio con sus respectivos equipos y dispositivos de medición junto a la manera de realizar los cálculos y las herramientas empleadas para ello. A continuación se presenta las características de cada uno de ellos junto a la metodología de trabajo general.

### 4.1. Resumen de los experimentos

En esta memoria se realizaron diferentes tipos de experimentos. Los primeros consistieron en medir los perfiles de velocidad en flujos oscilatorios con fluido pseudoplástico para estudiar los cambios de su comportamiento en la dirección longitudinal y visualizar el decaimiento del oleaje que existe en la superficie libre para este tipo de fluido pues se comprobó visualmente a partir de pruebas de laboratorio, que en dicha dirección la amplitud del oleaje disminuye. Para estas pruebas se utilizó un fondo plano y liso de material de acrílico y se registraron mediciones del perfil de velocidades en tres posiciones del canal mediante el método PIV el cual consiste en un método de cálculo de velocidades mediante el procesamiento de imágenes de partículas.

En el segundo tipo de experimentos realizados se desea estudiar el movimiento de partículas y las pruebas realizadas fueron de arrastre incipiente y de arrastre generalizado, para los cuales se registraron mediciones sólo en las cercanías del fondo en una posición del canal. Para los experimentos de arrastre de sedimentos se utilizó un lecho de arena de cuarzo y estos se dividen en 4 grupos representados por 4 diámetros de partículas diferentes. Cada uno de ellos tiene asociado, junto al tamaño de sedimento, tres reologías distintas. De acuerdo a la revisión bibliográfica y a trabajos anteriores, los diámetros utilizados fueron escogidos de acuerdo su movimiento y resistencia al fluido de producir arrastre. Estos presentan movimiento en el rango entre 0.2 y 1.1 mm de diámetro. De igual manera se escogieron reologías de acuerdo al comportamiento que presenta el fluido sobre el sedimento. En este trabajo se utilizaron

soluciones acuosas de CMC las cuales, a grandes concentraciones de espesante, adquieren propiedades altamente viscosas imposibilitando el acarrear material y dificultando el llenado del canal pues para esto se requiere transportar el fluido desde el estanque de mezcla ubicado en una torre a 4 metros de altura al canal utilizando una manguera de diámetro interno de 1 pulgada y de 17 metros de largo. Lo anterior implica que se produzcan considerables pérdidas friccionales provocando que el tiempo de llenado del canal sea muy alto (al menos 3 horas). La Tabla 4.1 muestra un resumen de la clasificación de los experimentos realizados en forma general en donde  $E_i$  corresponde al diámetro "i", llamado  $D_i$ , y el segundo componente -0i (-01,-02 y -03) indica el fluido utilizado en cada uno de los experimentos. Soluciones de CMC en agua con concentraciones peso/peso de 0, 0.2 y 0.3 % fueron utilizados respectivamente. En cada uno de estos grupos se realizaron  $n$  experimentos, donde  $n$  corresponde a la cantidad de experimentos exitosos, es decir, al número de pruebas en las que se observó movimiento de material. Para estos, se registró movimiento incipiente y movimiento generalizado. En las siguientes secciones se mostrarán más detalle de los parámetros experimentales utilizados, sus valores y procedimiento experimental.

Tabla 4.1: Resumen de los nombres designados a cada grupo de experimentos.

	Agua	CMC 1	CMC 2
$D_1$	E1-01	E1-02	E1-03
$D_2$	E2-01	E2-02	E2-03
$D_3$	E3-01	E3-02	E3-03
$D_4$	E4-01	E4-02	E4-03

## 4.2. Caracterización del fluido

Como se ha mencionado anteriormente, el fluido no newtoniano utilizado en esta memoria es una solución que resulta de la mezcla de agua con el espesante carboximetilcelulosa o CMC. Este fluido tiene comportamiento pseudoplástico y ha sido utilizado ya en numerosos estudios recientes, Tamburrino et al. (2016), Vidal (2017), Traslaviña (2017) y Calvo (2017). Las soluciones acuosas de CMC son elaboradas en el estanque de mezcla ubicado en la torre a 4 metros de altura el cual tiene una capacidad de 500 l de volumen. La mezcla se preparan mezclando cierto volumen de agua con el porcentaje deseado de CMC en peso. Las concentraciones de espesante utilizadas en los experimentos fueron de 0.2 % y 0.3 % lo cual significa que, dado un peso de agua, se requiere dicho porcentaje en peso de CMC para realizar la mezcla. Para llenar el canal a una altura de flujo de 44 cm se necesitaron 300 l, por lo tanto se utilizaron aproximadamente 600 g de CMC para preparar una mezcla de 0.2 % y 900 g de CMC para preparar una mezcla al 0.3 %.

Con respecto a las características del fluido, se desea calcular la viscosidad efectiva del fluido, por lo tanto, los parámetros de interés son la temperatura, el índice de flujo  $n$  y el índice de consistencia  $k$ . En la Tabla 4.2 se presentan los valores de dichos parámetros, junto a la temperatura de cada experimento y su densidad correspondiente.

Tabla 4.2: Valores de los parámetros del fluido para el CMC donde el  $K$  y el  $n$  se obtuvieron experimentalmente

exp	$k[Pa s^n]$	$n[-]$	$T[C]$	$\rho [\frac{kg}{m^3}]$
E1-01	0.001	1	15	999.19
E1-02	0.021	0.886	16	999.03
E1-03	0.113	0.743	16	999.03
E2-01	0.001	1	15	999.19
E2-02	0.033	0.863	17	998.86
E2-03	0.091	0.762	20	998.29
E3-01	0.001	1	15	999.19
E3-02	0.015	0.932	20	998.29
E3-03	0.170	0.690	15	999.19
E4-01	0.001	1	15	999.19
E4-02	0.039	0.805	16	999.03
E4-03	0.114	0.724	15	999.19

Los grupos de experimentos E1-01, E2-01, E3-01 y E4-01 corresponden a pruebas realizadas con agua en donde  $k$  corresponde a la viscosidad dinámica y  $n=1$ .

A partir de los datos de la Tabla 4.2, junto al periodo de oscilación  $T$  y la velocidad  $u_{rms}$ , se puede obtener el valor estimado de la capa límite  $\delta$  mediante la ecuación 2.14 y luego la viscosidad efectiva  $\nu_{eff}$  a partir de la ecuación 2.9.

## Medición de la temperatura y reología

El instrumento utilizado para obtener la reología es un rotacional Rheolab QC Anton Paar equipado con un peltier para el control de la temperatura el cual, a partir de una muestra de fluido dentro de un vaso cilíndrico, permite registrar la tasa de deformación y el esfuerzo de corte para ciertos intervalos y a una temperatura dada. A partir del anterior conjunto de datos es posible obtener los parámetros del fluido mediante una regresión potencial, de donde se obtiene  $k$  y  $n$ .



Figura 4.1: Reómetro rotacional Rheolab QC Anton Paar.

El instrumento para medir la temperatura es un termostato Veto, cuyo sensor de temperatura se instala de manera tal que el fluido dentro del canal haga contacto con dicho dispositivo. Se registra el valor de la temperatura en grados celsius pues este es el dato de entrada que se necesita ingresar al reómetro para que pueda calcular los parámetros ya mencionados.

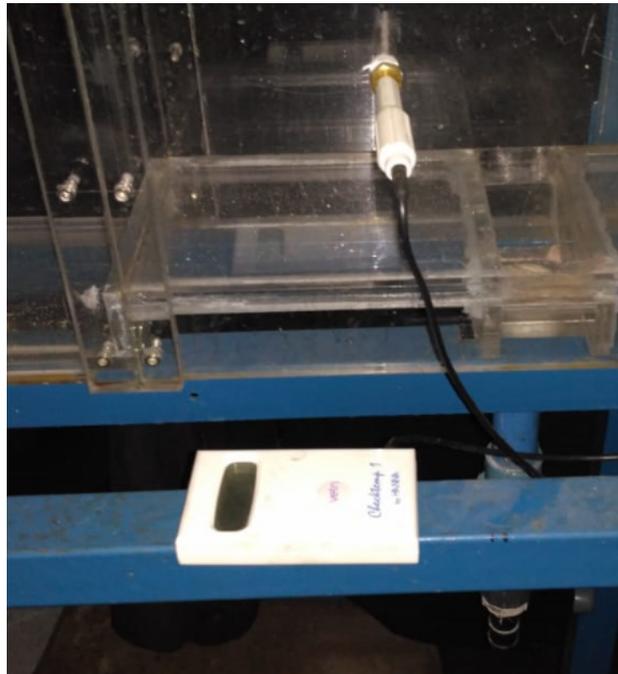


Figura 4.2: Termostato Veto y Cia. modelo checktemp 1.

Debido a los posibles cambios de temperatura que ocurren en el fluido, ya sea por el movimiento de flujo oscilatorio o por la temperatura ambiente, se debe registrar la temperatura antes y después de cada jornada de experimentos para obtener los valores de  $k$  y  $n$  en ambos

momentos y luego promediar los valores de dichos parámetros. Estos valores corresponden a los parámetros del fluido.

### Cálculo de la viscosidad cinemática

Como se vio en el capítulo 2, el cálculo de la viscosidad dinámica efectiva para un fluido no newtoniano está dada por la ecuación 2.9. Combinando esta ecuación con la definición de viscosidad cinemática  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  se tiene lo siguiente:

$$\nu_{eff} = \frac{k}{\rho} \left( \frac{u_{rms}}{\delta} \right)^{n-1} \quad (4.1)$$

En donde  $u_{rms}$  corresponde a la varianza de la velocidad orbital y  $\delta$  a una estimación del valor característico de la capa límite. La velocidad orbital se mide experimentalmente mediante velocimetría por imágenes de partículas (PIV) y  $\delta$  se obtiene mediante un proceso de iteración a partir de la ecuación 2.14. Para esta ecuación, se debe iterar el valor  $u_{rms}$  a una altura  $\delta'$  hasta que el valor de  $\delta'$ , que se mide experimentalmente, converja al valor  $\delta$  de la ecuación 2.14.

## 4.3. Caracterización del sedimento

Como se dijo anteriormente, a cada uno de los grupos de experimentos está asociado un diámetro característico o diámetro de tamizado de partícula. El material utilizado corresponde a partículas de arena de cuarzo, uno de los materiales más utilizados en el estudio de arrastre de sedimentos debido a la importancia de conocer los fenómenos que ocurren en sectores costeros. Se utilizó el método del tamiz granulométrico para obtener cantidades de sedimento con los tamaños requeridos cuyos diámetros medio sean lo más representable posible. Estos están resumidos en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Diámetros característicos de cada grupo de experimentos.

exp	$D$ [mm]	$\rho$ [ $\frac{g}{cm^3}$ ]
E1	0.30	2.65
E2	0.55	2.65
E3	0.70	2.65
E4	1.00	2.65

Para diámetros menores, el lecho presenta un comportamiento cohesivo mientras que para diámetros mayores, el peso de las partículas es muy alto para que el esfuerzo de corte que produce el flujo en el fondo pueda dar movimiento a las partículas que componen el lecho.

## 4.4. Caracterización del flujo

A continuación se mostrará como obtener los parámetros que caracterizan al flujo oscilatorio en un canal rectangular con superficie libre. Los parámetros del flujo son: Velocidad máxima orbital  $U_m$ , máxima semi excursión de fondo  $A$ , altura de flujo  $h$ , periodo de oscilación de onda  $T$ .

### 4.4.1. Medición velocidades en el fondo

La velocidad de fondo corresponde a la velocidad orbital o máxima velocidad en las cercanías del fondo. Esta velocidad se obtuvo experimentalmente a partir del método de PIV, un método de procesamiento de imágenes de partículas.

#### Velocimetría de imagen de partículas (PIV)

El sistema de velocimetría por análisis de imágenes de partículas, o PIV, es una técnica de medición que permite obtener el campo de velocidades de flujos de manera instantánea y con alta resolución espacial. La técnica se basa en determinar sobre la base de dos imágenes capturadas en un intervalo de tiempo conocido, el desplazamiento de las partículas que son depositadas en el flujo. Las partículas utilizadas para esta técnica fueron partículas de acrílico teñidas con rodamina B (Fuentes, 2017), la cual es un compuesto químico empleado como colorante violeta y a menudo se utiliza como colorante de seguimiento en un líquido para rastrear la tasa y dirección de su flujo y transporte. El tamaño óptimo de este trazador es de 150-300  $\mu m$  cuando el fluido es agua y 300-450  $\mu m$  para el caso de soluciones acuosas con CMC (Vidal, 2017). La particularidad de las partículas de rodamina es que al ser expuestas a un láser estas comienzan a brillar cuyo efecto se puede apreciar siempre y cuando el canal se encuentre completamente oscuro. Para lograr tal oscuridad se montó una cámara oscura fabricada de tela negra y PVC. Por lo tanto, para poner en marcha el método PIV se necesita un láser que excite las partículas teñidas con rodamina para que estas brillen y una cámara que sea capaz de capturar una cantidad apropiada de imágenes consecutivas en un intervalo de tiempo.

La instalación de los equipos para realizar PIV es la siguiente. El láser se debe ubicar por sobre el canal de tal manera que el haz de luz provenga desde la superficie libre y cuyo plano debe estar paralelo a las paredes del canal. De esta manera se creará un plano de luz perpendicular a la cámara de alta velocidad. La potencia del láser debe ser regulada y su nivel de intensidad se ajustará de acuerdo a la imagen de la cámara buscando generar un contraste adecuado entre el flujo y las partículas trazadoras. Para visualizar las imágenes capturadas por la cámara se utilizó el programa PFV (Photron Fast Viewer) de la compañía Photron el cual conecta la cámara Photron a un computador y permite regular los parámetros como los cuadros por segundo o región específica mediante una interfaz.

Los equipos disponibles para poner en marcha el sistema PIV son: Láser Optoelectronics Tech. Co. Ltd. DPSSL Driver, cámara de alta velocidad modelo Mini UX PHOTRON FAST-CAM de capacidad hasta de 2000 fotos por segundo y un lente modelo AF-S Micro-Nikkon 60 mm.

La posición de la cámara con respecto al canal depende del tipo de experimento realizado. Para el registro del perfil de velocidades, la cámara se ubica más alejada del canal y a mayor altura que para cuando se miden velocidades en las cercanías del fondo. Con respecto a los primeros experimentos, midieron los perfiles de velocidad en tres sectores o posiciones del canal, a 20 cm, a 115 cm y a 200 cm del inicio de la zona del lecho. En esta zona se dispuso un fondo falso de acrílico con el fin de obtener un fondo plano y liso. Para medir perfiles se ubica la cámara a una distancia de 0.9 metros perpendicular al canal a una altura de 1.4 metros del suelo (el canal de oleaje se encuentra elevado a una altura de 1 metro del suelo) mientras que para medir arrastre incipiente o generalizado la cámara se posiciona tan solo a una distancia horizontal de 30 cm, perpendicular al canal, y a 1.15 m sobre el piso. Para el arrastre de sedimento la posición de la cámara y registros de PIV fueron al inicio del lecho pues en ese sector se observó con mayor frecuencia movimiento de partículas. Se registraron fotos a 125 cuadros por segundo durante 34.96 segundos, es decir, por cada experimento se tienen 4634 fotografías. Una vez registradas, se procesan dichas fotos mediante un programa de Matlab llamado PIVlab el cual, a partir de imágenes, es capaz de generar campos de velocidades analizando el cambio de la posición de partículas trazadoras entre dos imágenes, es decir, en un intervalo de tiempo. Mediante el PIVlab se tiene el campo de velocidad en archivos de texto los cuales contienen posición, velocidad horizontal y vertical. Estos datos son procesados en una rutina de Matlab de la cual obtienen los parámetros del flujo correspondiente a la velocidad orbital  $U_m$ , la media cuadrática de la velocidad  $u_{rms}$ , la distancia del fondo  $\delta$  correspondiente al valor de la capa límite y  $A$  a la máxima excursión de fondo. La Figura 4.3 muestra el procesamiento de imágenes utilizando el programa PIVlab.

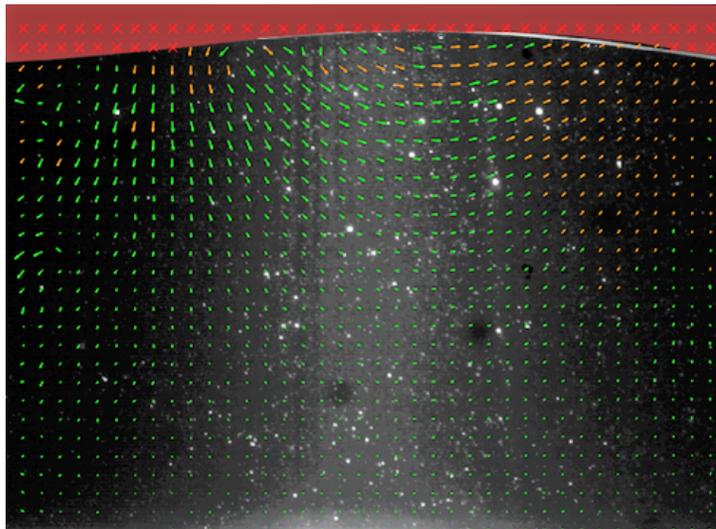


Figura 4.3: PIV campo de velocidades en flujo oscilatorio.

## Cálculo del espesor de la capa límite

Como se vio en el capítulo 2.5., se utiliza la ecuación 2.14 en el cálculo de la estimación del espesor de la capa límite para un fluido pseudoplástico bajo efectos de flujos oscilatorios. Dicha expresión corresponde a  $\delta = \left(\frac{kT}{\rho}\right)^{\frac{1}{1+n}} (u_{rms})^{\frac{n-1}{n+1}}$  y esta depende de la media cuadrática de la velocidad  $u_{rms}$  definida como  $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n u_i}$  donde  $u_i$  es la velocidad en las cercanías del fondo y cuyo valor es medido mediante PIV.

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n u_i} \quad (4.2)$$

El calculo del espesor de la capa límite es un proceso iterativo. Se define la distancia  $d_i$  como la distancia desde el fondo medida a partir de los valores obtenidos del programa PIVlabGUI correspondiente a la velocidad medida  $u_i$ . Se define también la distancia  $\delta_i$  como la distancia obtenida a partir de la ecuación 2.14 de la iteración  $i$ . Luego, el procedimiento es el siguiente:

1. Se obtiene la velocidad  $u_{rms1}$  a una distancia  $d$  del fondo y se evalúa la velocidad en la Ecuación (2.14)  $\left(\frac{kT}{\rho}\right)^{\frac{1}{1+n}} (u_{rms})^{\frac{n-1}{n+1}}$  para calcular un  $\delta_1$  en donde el período de oscilación  $T$  se obtiene de la frecuencia de oscilación  $\omega$  [rpm]  $T = \frac{60}{\omega}$ .

2. Si la distancia  $d_1$  respecto al fondo tiene un valor similar al  $\delta$  calculado entonces el valor de la capa límite es  $\delta_1$ . Si no lo es, se utiliza otro valor de velocidad,  $u_{rms2}$  a una distancia  $d_2$ , y se vuelve al primer paso para calcular otro valor de la capa límite  $\delta_2$  y se compara con la distancia del fondo  $d_2$ . Se repite el proceso hasta que  $\delta_n \sim d_n$  a una velocidad  $u_{rmsn}$ . El proceso de iteración queda representado en el gráfico de la distancia  $d_n$  en función de la velocidad  $u_{rmsn}$  de la Figura 4.4.

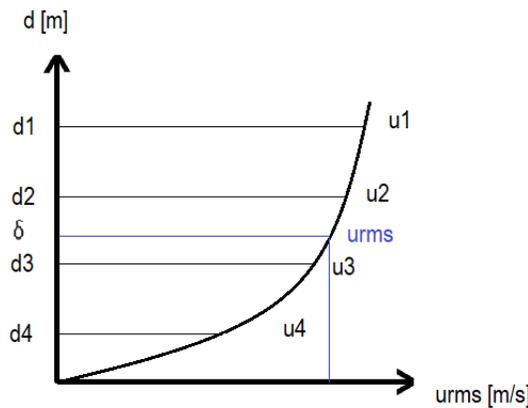


Figura 4.4: Esquematización del proceso de iteración para el cálculo de la capa límite.

## Cálculo de la máxima excursión de fondo

Uno de los parámetros de interés en flujos oscilatorios es la máxima trayectoria de fondo  $A$  que recorre el fluido en las cercanías del fondo por lo que este debe ser calculado tanto para fluidos newtonianos como no newtonianos. Cuando se tiene agua, se acepta válida la teoría lineal del oleaje cuya expresión para el cálculo de la excursión de fondo, la que viene dada por:

$$A = \frac{U_m T}{2\pi} \quad (4.3)$$

Para el caso en el que se tiene un fluido pseudoplástico, como es en este caso, no existe literatura al respecto sobre el flujo oscilatorio de un fluido no newtoniano ni una expresión para obtener este parámetro por lo que este cálculo deberá ser medido u obtenido indirectamente. Debido a que no fue posible realizar una medición directa de  $A$  en el laboratorio y que la ecuación 4.3 es válida para cuando el fluido es agua, se utilizó el valor de la máxima excursión de fondo como la integral respecto al tiempo de la velocidad orbital en la mitad del periodo  $T$ .

$$A = \int_0^{\frac{T}{2}} u dt \quad (4.4)$$

Lo que equivale al área bajo la curva del gráfico  $u$  vs  $t$ .

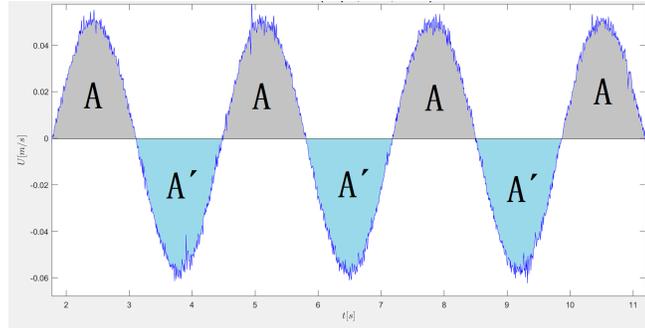


Figura 4.5: Cálculo de la máxima semi excursión de fondo mediante el área bajo la curva de la velocidad orbital  $U_m$  en función del tiempo  $t$ .  $A$  corresponde a la trayectoria recorrida durante medio periodo.

Si cada curva que define las áreas  $A$  y  $A'$  de la Figura 4.5 se divide en  $n$  trapecios donde  $n$  es igual a  $\frac{1}{2} \frac{T}{\Delta t}$ , es posible obtener dichas áreas como la suma del área de cada trapecio o, equivalentemente, mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{1}{2} \Delta t \left[ u_1 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} u_i + u_n \right] \quad (4.5)$$

## 4.5. Caracterización del oleaje

Los principales parámetros que caracterizan a una ola son su altura y longitud. Las olas se formarán en la superficie libre según las condiciones experimentales impuestas, estas corresponden a la frecuencia de oscilación, amplitud de movimiento y altura de flujo. A partir de los resultados obtenidos es posible evaluar el decaimiento de la altura del oleaje en la dirección longitudinal para fluidos pseudoplásticos, compararlos con una solución acuosa y analizar el efecto de la reología o viscosidad sobre la forma del oleaje. Cabe señalar que para un flujo oscilatorio, las velocidades en el fondo y sus efectos sobre el lecho dependen de aquellos parámetros mencionados anteriormente, es decir, la altura  $H$  y su longitud  $L$  razón por la cual se desea medir el desarrollo del oleaje que se encuentra sobre el lecho. Esto se realizará mediante un método de procesamiento de imágenes a partir de vídeos registrados por una cámara fotográfica. Se dispone de una cámara Cannon T5i para registrar estas mediciones. Para que la región que visualiza la cámara pueda abarcar todo el largo de la zona de pruebas es necesario ubicar la cámara sobre un trípode nivelado a una distancia perpendicular al canal de 2,16 m y a una altura variable dependiendo de la altura del flujo. Este método consiste en transformar los vídeos a fotos y luego medir los contornos de estas mediante rutinas computacionales hechas en Matlab y Python. Estas rutinas permiten obtener el contorno del oleaje y calcular sus dimensiones correspondientes a altura y longitud. Para estas mediciones se requerirá la instalación de un sistema de iluminación compuesto por 3 focos de luz junto a un fondo blanco de acrílico que permitan obtener una imagen cuyo contraste tenga una sola escala de colores. La duración de los vídeos es tal que permita registrar al menos dos periodos de oscilación de tal manera que se pueda obtener las dimensiones del oleaje para más de un período y luego promediar los valores que estén desfasados por sus respectivos períodos de oscilación. Debido a la gran viscosidad de las soluciones de CMC, la longitud de ola decae con la distancia por lo que el parámetro  $H$  debe ser medido como la distancia entre la cota máxima y la cota mínima que alcanza el oleaje durante un periodo en una posición dada. Mientras que la longitud de ola  $L$  se mide como la distancia horizontal entre dos crestas o valles consecutivos.

$$H = z_{max}(t) - z_{min}(t + T/2) \quad (4.6)$$

$$L = x_{valle}(i + 1) - x_{valle}(i) = x_{cresta}(i + 1) - x_{cresta}(i) \quad (4.7)$$

donde  $z_{max}$  y  $z_{min}$  corresponden a las cotas máxima y mínima que alcanza el oleaje respectivamente durante un periodo, es decir el valle y la cresta de la ola mientras que  $x_{valle}(i)$  y  $x_{cresta}(i)$  son las posiciones horizontal del valle y cresta respectivamente en la posición  $x(i)$ .

La Figura 4.6 muestra un esquema de las distancias que se utilizaron para el cálculo de  $H$  y  $L$  en un instante dado.

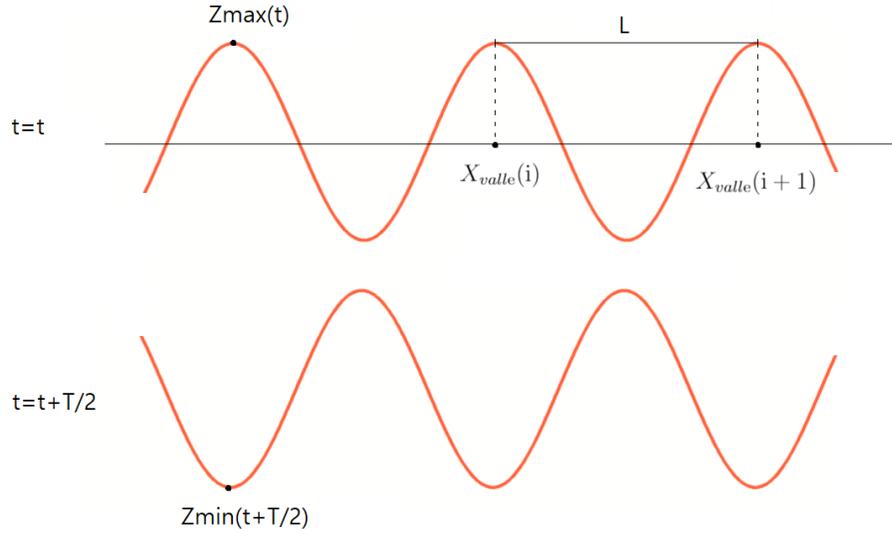


Figura 4.6: Distancias para el cálculo de las dimensiones del oleaje.

Luego, considerando que  $H$  y  $L$  son periódicos en el tiempo, las siguientes ecuaciones se utilizaron para calcular los promedios de las dimensiones principales de una ola:

$$\langle H(x_0) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(x_0, t + 2\pi i) \quad (4.8)$$

$$\langle L(x_0) \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(x_0, t + 2\pi i) \quad (4.9)$$

Donde  $x_0$  corresponde a la posición horizontal,  $t$  al instante en el que se realizó la medición y  $N$  la cantidad de periodos que se utilizaron para obtener dicho promedio.

## 4.6. Metodología experimental

### 4.6.1. Experimentos sin lecho

El objetivo principal de realizar este tipo de experimentos es ver el comportamiento que tiene el campo de velocidades en la dirección longitudinal y estudiar el decaimiento del oleaje que se produce en la superficie libre cuando se tiene un fluido pseudoplástico.

Para el primer caso, es decir, la medición de perfiles de velocidades, se realizó PIV en tres posiciones del canal, a 20 cm, a 115 cm y a 200 cm del inicio de la zona del lecho. En esta zona se dispuso un fondo falso de acrílico con el fin de obtener un fondo plano y liso. Luego,

se ubica la cámara a una distancia de 0.9 metros perpendicular al canal a una altura de 1.4 metros del suelo de tal modo que la cámara de alta velocidad capture todo el perfil. Una vez realizadas las mediciones en los tres sectores, se cambian las condiciones experimentales (frecuencia y/o altura de flujo) y se vuelve a registrar los perfiles en dichas posiciones. El detalle de los experimentos realizados se muestra en el capítulo de análisis y resultados.

#### 4.6.2. Experimentos de movimiento de partículas

Se realizaron un total de 140 experimentos entre los cuales 92 de ellos son de arrastre incipiente, formando parte de una extensión de los resultados obtenidos por Vidal (2017), mientras que los otros 48 experimentos son de movimiento generalizado, definido como un movimiento mayor de partículas que arrastre incipiente pero sin presentarse deformación del lecho. El objetivo consiste en determinar las frecuencias de oscilación del generador de oleaje para las cuales se producen velocidades cuya acción, en conjunto a los parámetros del flujo y oleaje, permite la visualización de movimiento de partículas. Por cada grupo de experimento, se observaron diferentes comportamiento con respecto al movimiento de partículas, por lo tanto, el número de pruebas difiere en cada uno de ellos. En la Tabla 4.4 se presenta el detalle del número de experimentos realizados.

Tabla 4.4: Número de experimentos realizados. AI corresponde a arrastre incipiente y AG arrastre generalizado.

exp	AI	AG
E1-01	7	5
E1-02	10	5
E1-03	11	6
E2-01	10	8
E2-02	11	7
E2-03	6	2
E3-01	6	4
E3-02	8	3
E3-03	7	3
E4-01	5	2
E4-02	6	3
E4-03	7	1

Recordando, los grupos E1, E2, E3 y E4 corresponden a experimentos asociados a un diámetro de partícula diferente y los subíndices -01, -02 y -03 corresponden una solución acuosa y dos con CMC a concentraciones distintas respectivamente. Luego, en cada grupo de experimentos  $E_i - 0j$  ( $i=1,2,3,4$  y  $j=1,2,3$ ) se evaluarán tres radios de giro; 4, 5 y 6 cm para diferentes alturas. Antes de comenzar a medir se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones: El CMC debe mezclarse aproximadamente 8 horas para que la mezcla quede completamente homogénea y las partículas teñidas con rodamina se aplican en el mismo estanque de mezcla. Para concentraciones de 0.2 % se requieren 600 gr de CMC mientras que para 0.3 % se requieren 900 gr de CMC. Antes de verter el líquido se debe poner el lecho de

arena en el canal y asegurarse esté completamente plano utilizando una paleta aplanadora móvil a una altura fija. Esta paleta se desliza a lo largo del canal y su altura fija permite que todo desnivel o perturbaciones por sobre un cierto nivel, en este caso los 4 cm del grosor de la trampa de arena, sea removido. Una vez nivelada el lecho, instalados los equipos de medición y montado todo lo necesario para medir, se puede comenzar a realizar los experimentos. El procedimiento experimental es el siguiente.

1. Se llena el canal con la solución acuosa de CMC hasta la altura inicial la cual corresponde a la altura máxima de medición y su valor es de 44 cm. Dicha altura no está impuesta por la altura del canal sino que por el volumen de líquido que puede llegar desde el estanque de mezcla. Factores como la carga del estanque y las pérdidas friccionales en el tramo estanque-canal influyen en esto.

2. Para dicha altura, llamada  $h_1$ , se fija el mayor radio de giro permitido, es decir,  $R = 6$  cm correspondiente a una amplitud de oscilación de 12 cm del eje conectado al motor. Como se trata de un generador de oleaje compuesto por una paleta anclada al fondo, esta tendrá una amplitud de movimiento máxima en la cota de altura de agua y su movimiento será nulo en el fondo. A continuación se presenta una tabla con los valores de la amplitud de movimiento para una altura de flujo variable y a un radio de dado.

Tabla 4.5: Amplitud de movimiento del flujo según su altura y el radio de giro del disco para un generador de ondas tipo pivote.

$h[cm]$	$R_1 = 6[cm]$	$R_2 = 5[cm]$	$R_3 = 4[cm]$
44	26.0	20.5	15.5
43	25.3	20.0	15.1
42	24.7	19.5	14.7
41	24.1	19.0	14.3
40	23.5	18.5	13.9
39	22.9	18.0	13.5
38	22.3	17.5	13.1
37	21.7	17.0	12.7
36	21.1	16.5	12.3
35	20.5	16.0	11.9
34	19.9	15.5	11.5
33	19.3	15.0	11.1
32	18.7	14.5	10.7
31	18.1	14.0	10.3
30	17.5	13.5	9.9
29	16.9	13.0	9.5
28	16.3	12.5	9.1
27	15.7	12.0	8.7
26	15.1	11.5	8.3
25	14.5	11.0	7.9

Una vez fijado el radio de giro  $R_1 = 6$  cm y la altura inicial  $h_4 = 44$  cm se enciende el motor a una frecuencia mínima de unas 10 [rpm]. Luego, la frecuencia de oscilación se aumenta gradualmente hasta encontrar arrastre incipiente, cuyo criterio fue el comienzo de movimiento de más de dos partículas. Para esta frecuencia de arrastre incipiente  $\omega_{AI_1}$  se registra su valor y se realiza una medición de PIV. En este punto se tiene un valor de  $\omega_{AI_1}$  para  $h_1$  y  $R_1$ .

3. A continuación, a partir de la frecuencia  $\omega_{AI_1}$ , se vuelve a aumentar gradualmente hasta encontrar arrastre generalizado  $AG$ , cuyo criterio visual es que las partículas en toda la sección de un punto se muevan. Este movimiento no tiene que ser en todo el canal, sino que puede ocurrir en uno o varios puntos de éste, al igual que el arrastre incipiente. Se designa el valor de dicha frecuencia de arrastre generalizado como  $\omega_{AG_1}$  y una vez obtenidos ambos valores  $\omega_{AI_1}, \omega_{AG_1}$  para una altura  $h_1$  y radio de giro  $R_1$ , se realiza el mismo procedimiento pero variando el radio de giro de  $R_1$  a  $R_2$  y finalmente a  $R_3$ , poniendo en marcha el motor a la frecuencia de oscilación inicial de 10 [rpm] en cada uno de estos radios para la altura  $h_1$ .

En resumen se obtienen los siguientes pares de frecuencias.

$$h_1 : [R_1 : (\omega_{AI_1}, \omega_{AG_1}); R_2 : (\omega_{AG_2}, \omega_{AI_2}); R_3 : (\omega_{AI_3}, \omega_{AG_3})]$$

4. A continuación, luego de registrar las frecuencias de arrastre incipiente y generalizado para los tres radios de giro, para la altura inicial  $h_1$ , se procede a cambiar la altura de flujo. Para crear condiciones diferentes, se disminuye la altura de agua  $h_1$  entre 2 a 3 cm para llegar a una altura  $h_2 = 41$  cm. Se realiza el mismo procedimiento, es decir punto 2. y 3. para la segunda altura  $h_2$ , hasta llegar a la altura  $h_n$  donde  $n$  es el número de alturas para cada grupo de experimentos (Tabla 4.4). El proceso se detiene cuando la altura de flujo no permite observar movimiento de partículas.

Por lo tanto, por cada jornada se obtienen los siguientes datos:

$$\begin{aligned} h_1 &: [R_1 : (\omega_{AI_1}, \omega_{AG_1}); R_2 : (\omega_{AG_2}, \omega_{AI_2}); R_3 : (\omega_{AI_3}, \omega_{AG_3})] \\ h_2 &: [R_1 : (\omega_{AI_1}, \omega_{AG_1}); R_2 : (\omega_{AG_2}, \omega_{AI_2}); R_3 : (\omega_{AI_3}, \omega_{AG_3})] \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ h_n &: [R_1 : (\omega_{AI_1}, \omega_{AG_1}); R_2 : (\omega_{AG_2}, \omega_{AI_2}); R_3 : (\omega_{AI_3}, \omega_{AG_3})] \end{aligned}$$

Donde los subíndices AI y AG corresponden a arrastre incipiente y arrastre generalizado respectivamente.

# Capítulo 5

## Resultados

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados. Para comenzar, un estudio sobre campo de velocidades junto al decaimiento del oleaje en un fluido pseudoplástico. Luego, se presentan resultados de los 140 experimentos realizados sobre arrastre de sedimentos.

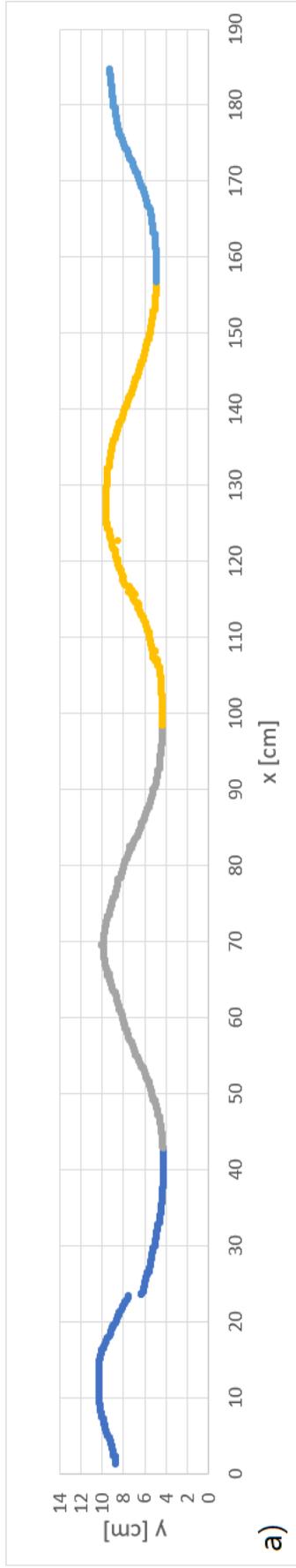
### 5.1. Campo de velocidades en un fluido pseudoplástico

Para estudiar el comportamiento del campo de velocidades y el decaimiento del oleaje en la superficie libre se realizaron pruebas con diferentes condiciones experimentales. Los fluidos corresponden a dos soluciones acuosas de CMC a diferentes concentraciones. En la Tabla 5.1 se muestran los valores de los parámetros del fluido utilizado ( $n$ ,  $k$ ) junto a las condiciones experimentales impuestas tales como frecuencia de oscilación  $\omega$ , radio de giro del disco  $R_{\text{disco}}$  y altura de flujo  $h$ .

Tabla 5.1: Condiciones experimentales para el estudio del oleaje y campos de velocidad.

exp	$n$	$K$	$\omega[rpm]$	$R_{\text{disco}}[cm]$	$h[cm]$
P1	0.674	0.1310	100	5	24
P2	0.813	0.0386	100	5	24
P3	0.674	0.1310	80	5	24
P4	0.813	0.0386	80	5	24

Se registró las dimensiones del oleaje, su desarrollo y mediciones del perfil de velocidades en tres posiciones del canal. Estas son, el sector inicial, medio y final de la zona del lecho. Las Figuras 5.1, 5.5, 5.5 y 5.7 muestran el decaimiento del oleaje en la dirección longitudinal para las cuales se calculó la altura de la ola como la distancia entre el punto máximo de la onda en un tiempo  $t$  con el punto mínimo de la onda en la misma posición en un tiempo  $t + \frac{T}{2}$ . Las Figuras 5.2, 5.4, 5.6 y 5.8 corresponden a los perfiles de velocidad respectivos.



b)

Amplitud de onda [cm]			
H1	H2	H3	H4
6.25	5.97	5.28	4.31

Longitud de onda [cm]	
L1	57.51
L2	58.34
L3	57.12
L prom	<b>57.66</b>

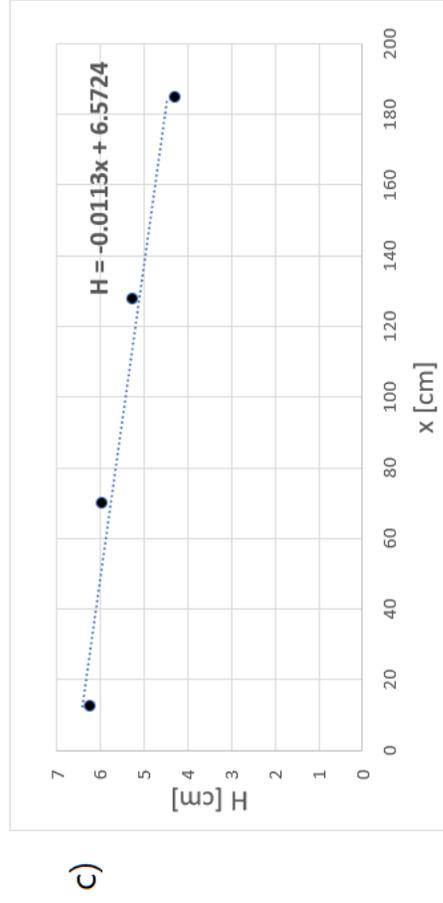


Figura 5.1: a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola  $H$  y  $L$  y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P1. Frecuencia de oscilación  $\omega = 100$  [rpm],  $n = 0.674$  y  $k = 0.131$ .

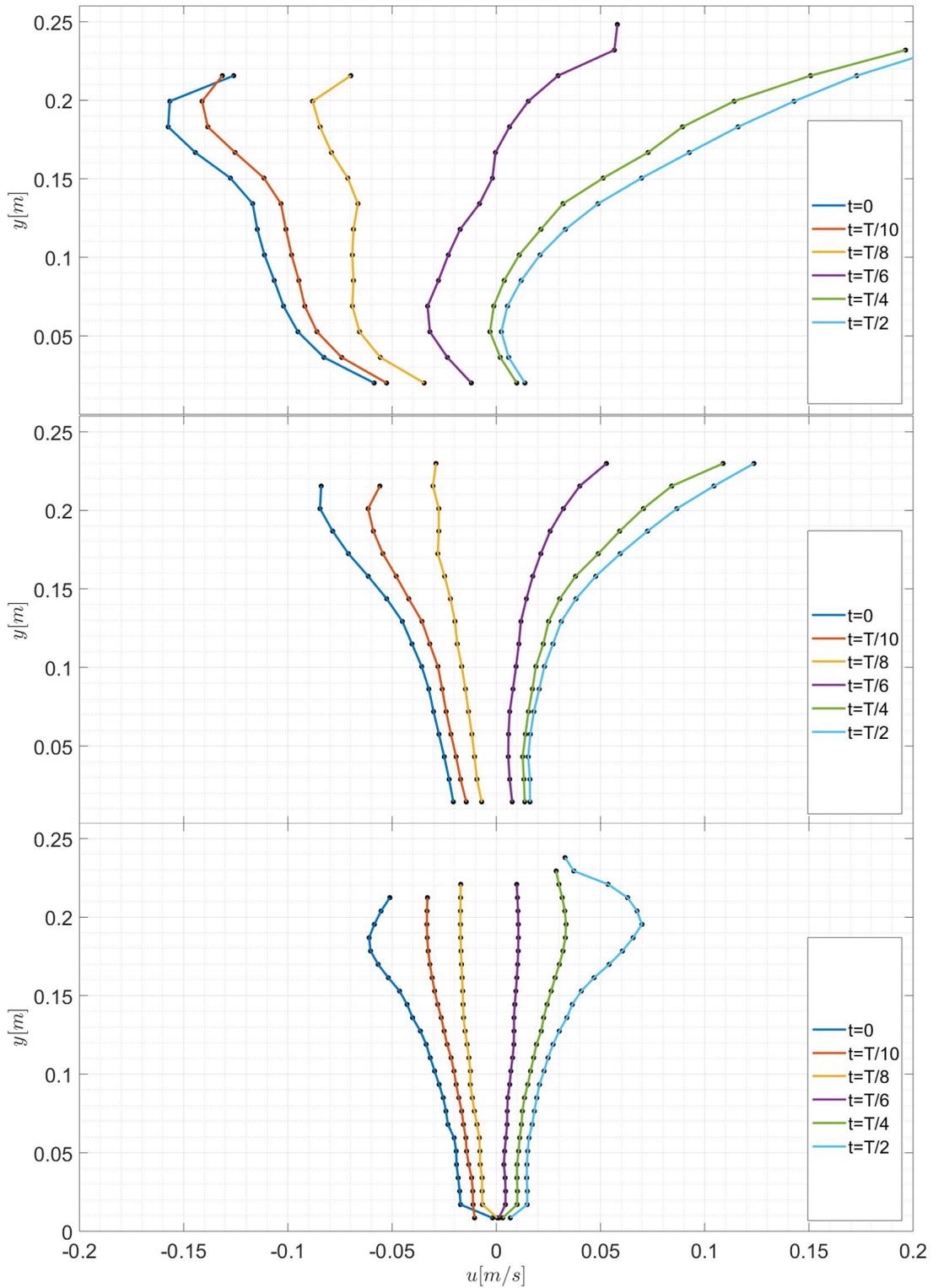
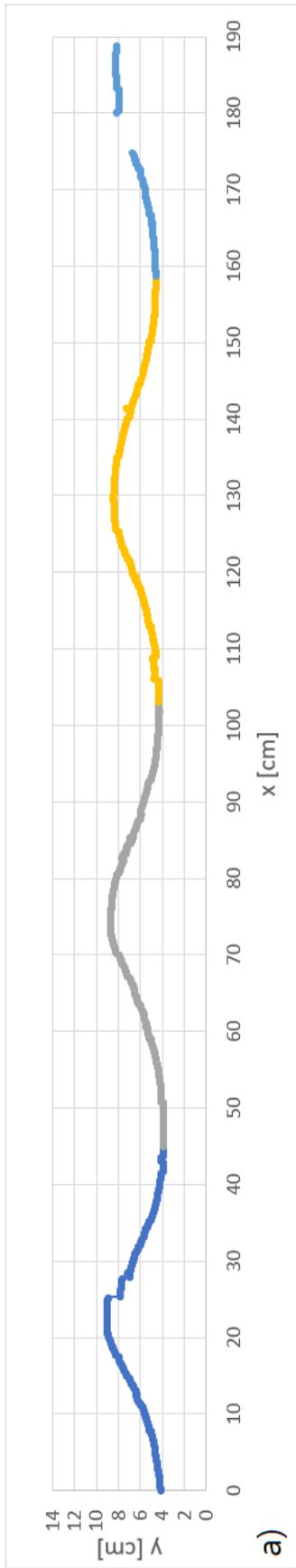


Figura 5.2: Perfil 1 de velocidad en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con  $\omega = 100$  [rpm]  $n = 0.8132$  y  $k = 0.0386$ .



b)

Amplitud de onda [cm]			
<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>H4</b>
5.37	4.63	4.15	3.54

Longitud de onda [cm]	
<b>L1</b>	53.52
<b>L2</b>	54.21
<b>L3</b>	55.34
<b>L prom</b>	<b>54.36</b>

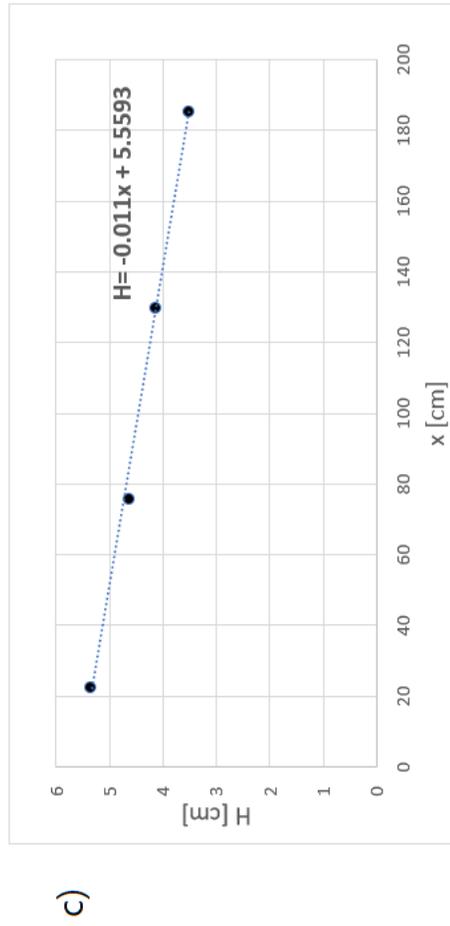


Figura 5.3: a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola  $H$  y  $L$  y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P2. Frecuencia de oscilación  $\omega = 100$  [rpm],  $n = 0.8132$  y  $k = 0.0386$ .

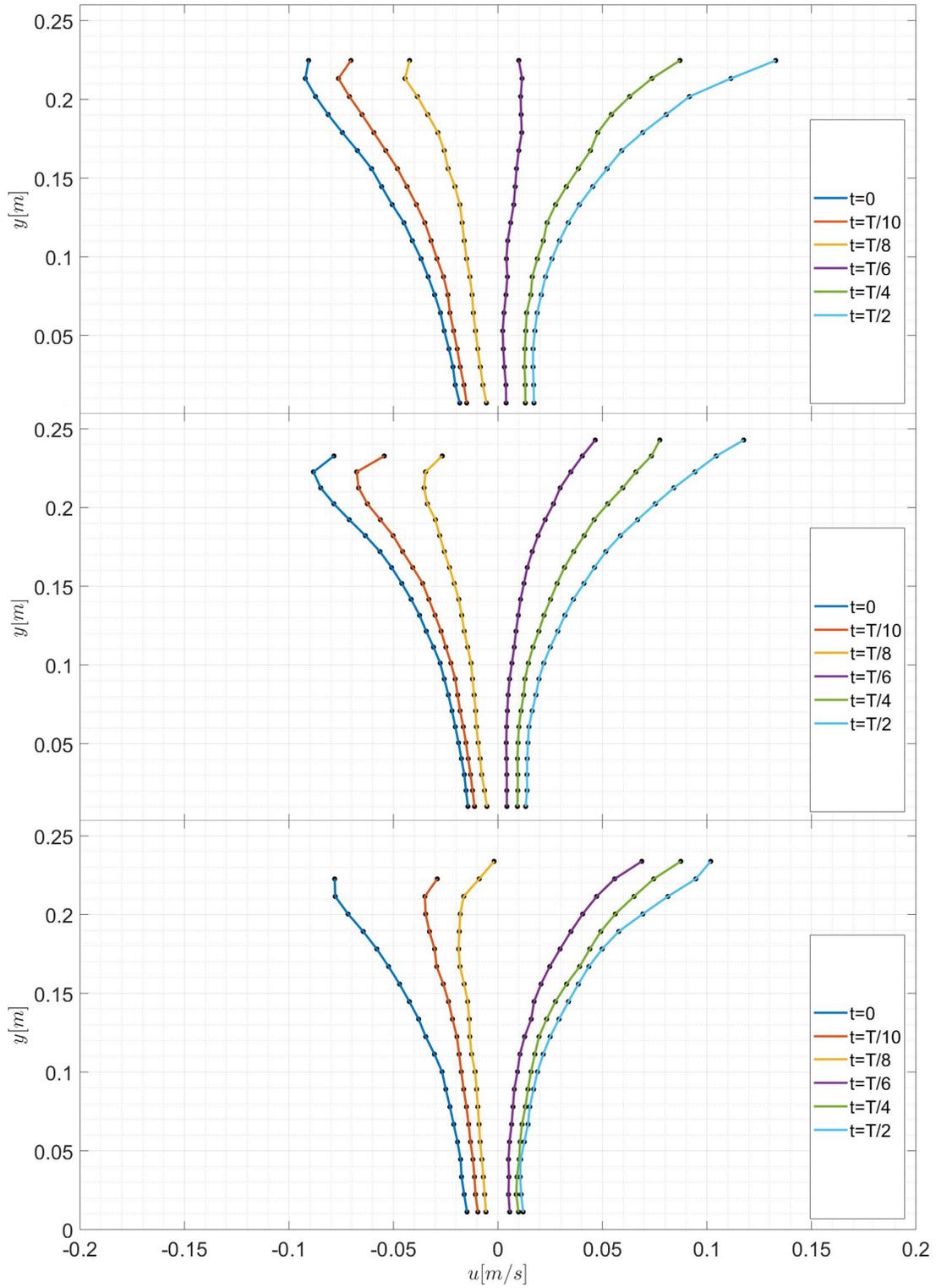
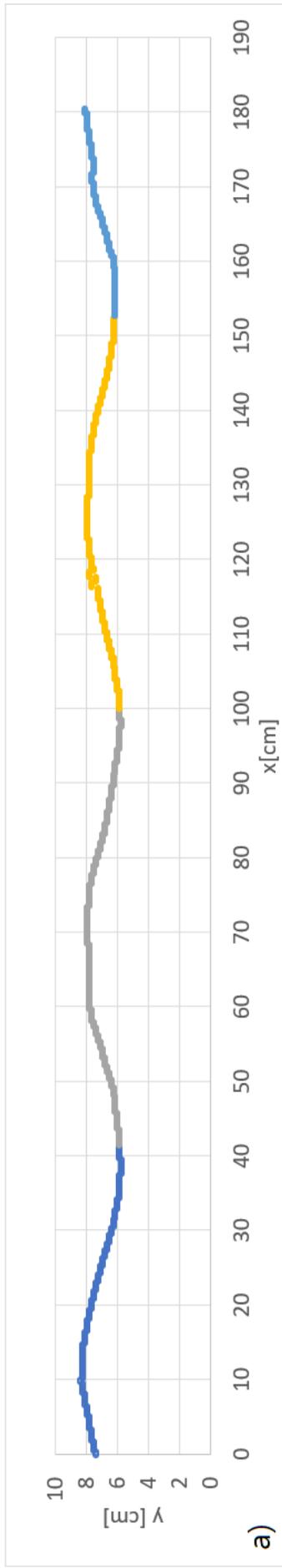


Figura 5.4: Perfil 2 de velocidad en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con  $\omega = 100$  [rpm],  $n = 0.8132$  y  $k = 0.0386$ .



b)

Amplitud de onda [cm]			
H1	H2	H3	H4
2.50	2.22	2.08	1.81

Longitud de onda [cm]	
L1	56.36
L2	59.41
L3	58.55
L prom	<b>58.11</b>

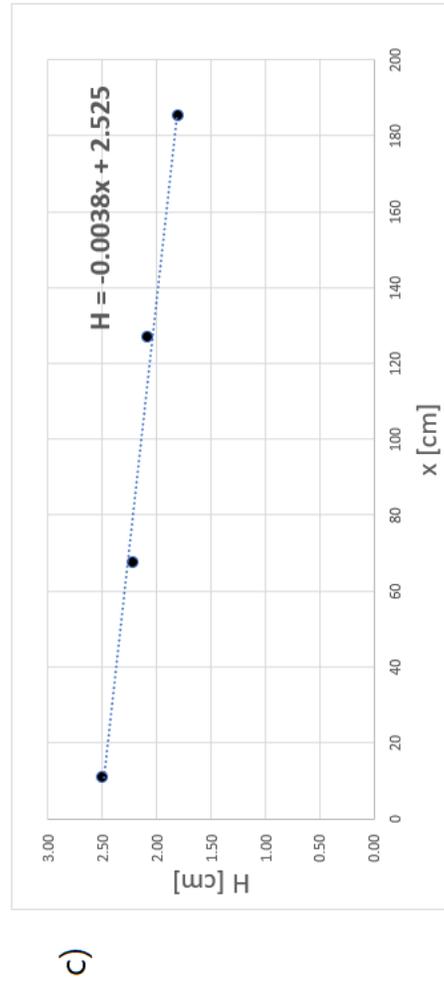


Figura 5.5: a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola  $H$  y  $L$  y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P3. Frecuencia de oscilación  $\omega = 80$  [rpm],  $n = 0.674$  y  $k = 0.131$ .

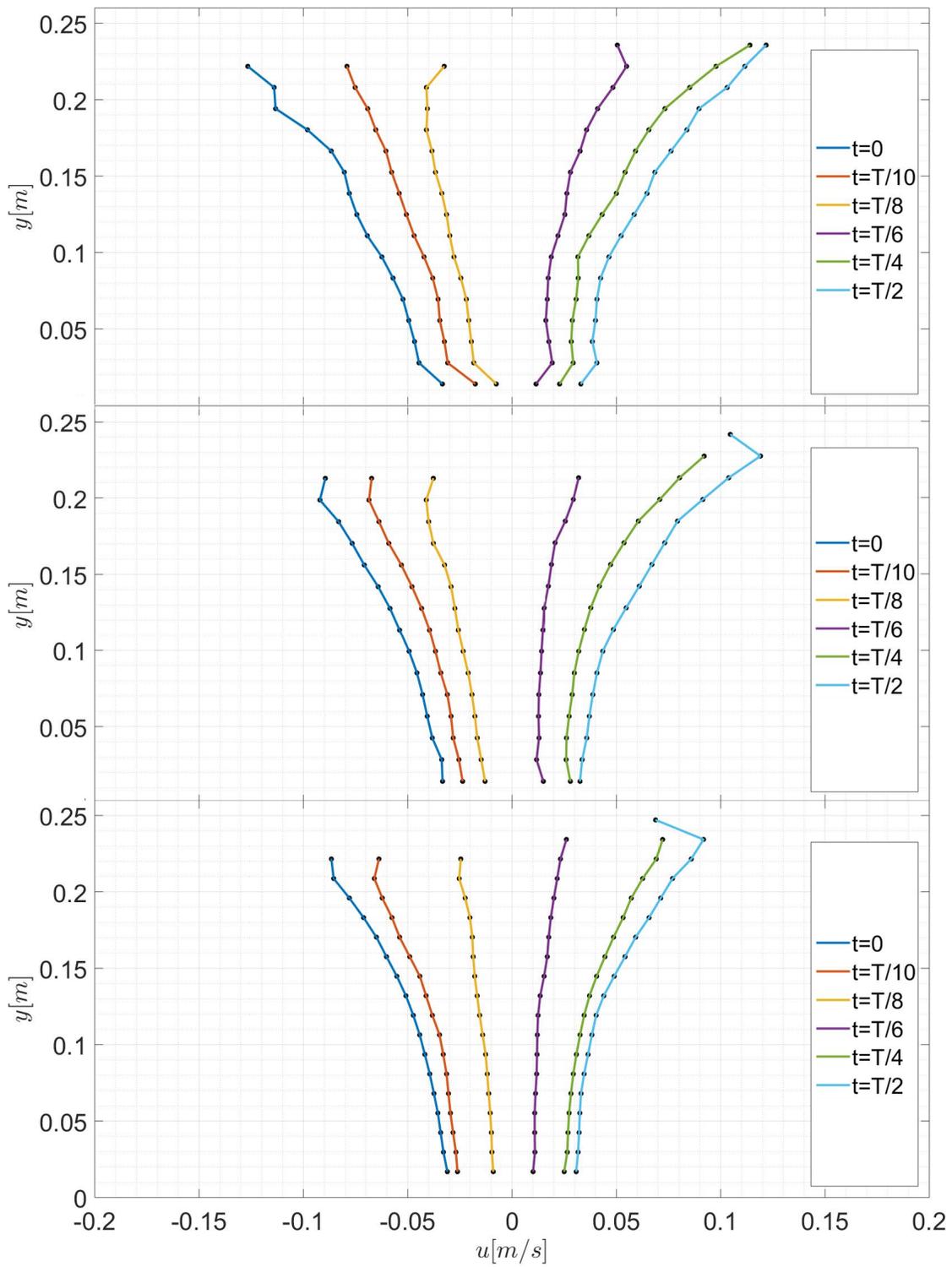
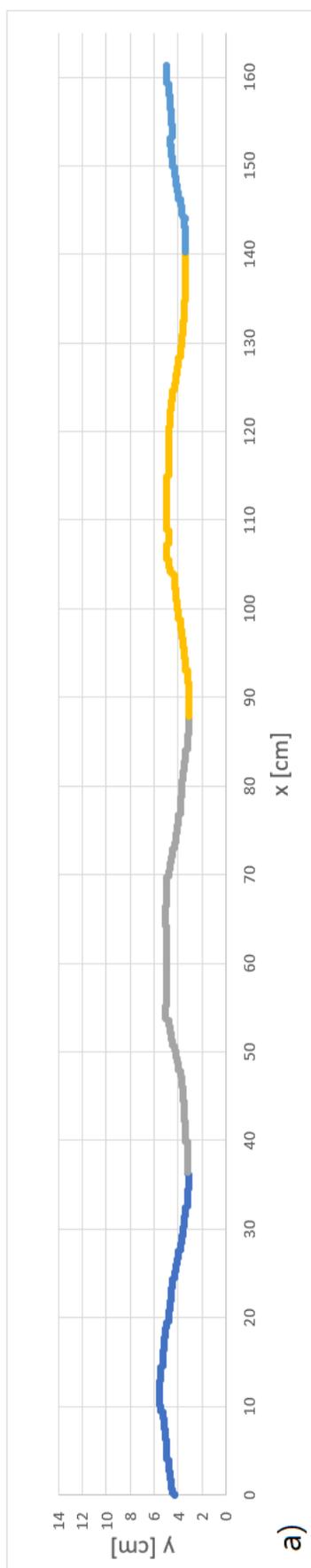


Figura 5.6: Perfil 3 de velocidades en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con  $\omega = 80$  [rpm],  $n = 0.674$  y  $k = 0.131$ .



b)

Amplitud de onda [cm]			
H1	H2	H3	H4
2.20	1.95	1.83	1.59

Longitud de onda [cm]	
L1	50.55
L2	52.02
L3	50.34
<b>L prom</b>	<b>50.97</b>

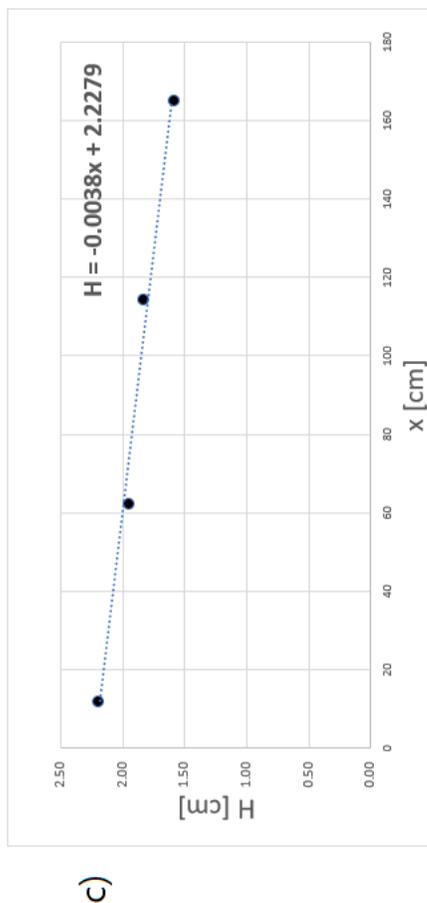


Figura 5.7: a) Forma de la superficie libre del oleaje en un instante, b) valores promedios de las dimensiones características de la ola  $H$  y  $L$  y c), decaimiento de la amplitud de onda experimento P4. Frecuencia de oscilación  $\omega = 80$  [rpm],  $n = 0.8132$  y  $k = 0.0386$ .

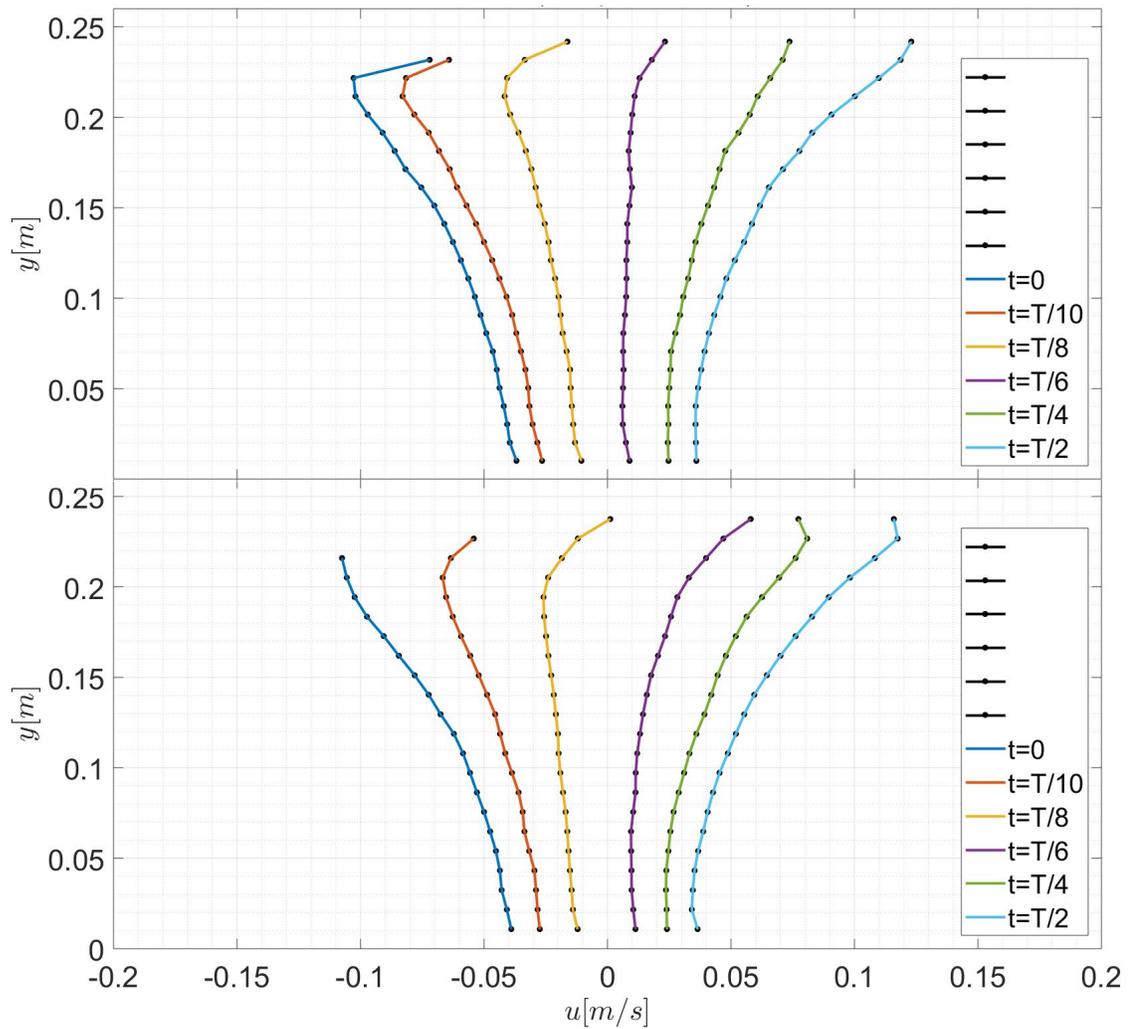


Figura 5.8: Perfil 3 de velocidades en tres puntos diferentes de la zona de medición. a) Al inicio del lecho, b) en el centro y c) al final del lecho con  $\omega = 80$  [rpm],  $n = 0.8132$  y  $k = 0.0386$ .

## 5.2. Arrastre de sedimentos: Parámetros del flujo.

Los parámetros del flujo son la velocidad orbital máxima  $U_m$ , el periodo de oscilación  $T$ , y la excursión en el fondo  $A$ . En las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4 se resumen los valores mínimos y máximos de dichas variables y de  $u_{rms}$ .

Tabla 5.2: Rangos de frecuencia y período de oscilación en cada grupo de experimentos para arrastre incipiente y arrastre generalizado.

exp	AI		AG	
	$\omega$ [rpm]	$T[\frac{1}{s}]$	$\omega$ [rpm]	$T[\frac{1}{s}]$
E1-01	38.4-49.3	1.22-1.56	43.4-50.9	1.18-1.38
E1-02	29.7-58.8	1.02-2.02	38.7-56.8	1.06-1.55
E1-03	25.9-57.9	1.04-2.32	32.5-53.1	1.13-1.85
E2-01	28.0-49.2	1.22-2.14	29.2-54.0	1.11-2.05
E2-02	26.6-49.2	1.22-2.26	29.5-43.5	1.38-2.03
E2-03	30.5-45.6	1.32-1.97	37.7-46.5	1.29-1.59
E3-01	39.6-52.7	1.14-1.52	49.3-62.4	0.96-1.22
E3-02	39.1-48.3	1.24-1.53	48.6-56.9	1.05-1.23
E3-03	30.3-44.7	1.34-1.98	40.7-51.9	1.16-1.47
E4-01	39.2-57.1	1.05-1.53	56.8-56.8	1.06-1.06
E4-02	46.5-59.3	1.01-1.29	50.2-57.3	1.05-1.20
E4-03	45.7-50.2	1.20-1.31	48.5-48.5	1.24-1.24

En las Tablas 5.3 y 5.4 se encuentra el resumen de los parámetros del flujo para arrastre incipiente y arrastre generalizado respectivamente. Las variables presentadas corresponden a la velocidad orbital  $U_m$ ,  $u_{rms}$  y la máxima semi excursión de fondo  $A$ . Se presenta también el error asociado a cada variable.

Tabla 5.3: Rango de parámetros del flujo y errores arrastre incipiente.

<i>exp</i>	$U_m[m/s]$	$eU_m[m/s]$	$u_{rms}[m/s]$	$eu_{rms}[m/s]$	$A[cm]$	$eA[cm]$
E1-01	0.038-0.083	0.002-0.030	0.0163-0.0359	0.0005	1.556-4.301	0.003-0.004
E1-02	0.030-0.058	0.002-0.005	0.0166-0.0299	0.0005	0.822-2.474	0.003-0.005
E1-03	0.015-0.048	0.002-0.005	0.0052-0.0171	0.004	0.195-1.585	0.02-0.04
E2-01	0.028-0.085	0.004-0.010	0.0117-0.0387	0.0004	1.143-5.980	0.003-0.004
E2-02	0.024-0.050	0.002-0.010	0.0073-0.0313	0.0002	0.268-1.260	0.002
E2-03	0.065-0.114	0.005-0.010	0.0064-0.0419	0.0004	0.265-1.230	0.003-0.004
E3-01	0.079-0.153	0.006-0.010	0.0507-0.0746	0.0008	2.994-6.191	0.005-0.006
E3-02	0.121-0.179	0.004-0.020	0.0480-0.1070	0.001	1.830-4.591	0.007
E3-03	0.104-0.133	0.004-0.020	0.0514-0.0690	0.0002	1.530-2.959	0.002
E4-01	0.088-0.279	0.006-0.010	0.0440-0.1580	0.001	3.287-11.791	0.008-0.01
E4-02	0.096-0.179	0.002-0.006	0.0640-0.1090	0.002	1.805-3.340	0.01-0.01
E4-03	0.129-0.168	0.002-0.009	0.0600-0.1000	0.01	1.642-3.004	0.08-0.09

Tabla 5.4: Rango de parámetros del flujo y errores arrastre generalizado.

exp	$U_m[m/s]$	$eU_m[m/s]$	$u_{rms}[m/s]$	$eu_{rms}[m/s]$	$A[cm]$	$eA[cm]$
E1-01	0.072-0.211	0.004-0.010	0.0201-0.0451	0.0005	2.918-9.526	0.003-0.004
E1-02	0.054-0.088	0.002-0.005	0.0229-0.0324	0.0005	1.342-4.252	0.004
E1-03	0.034-0.061	0.004-0.010	0.0060-0.0190	0.004	0.500-3.500	0.03-0.04
E2-01	0.065-0.109	0.003-0.010	0.0185-0.0416	0.0004	2.610-7.199	0.003
E2-02	0.047-0.067	0.002-0.009	0.0150-0.0295	0.0002	0.693-2.591	0.002
E2-03	0.110-0.130	0.020-0.030	0.0070-0.0242	0.0004	1.898-1.898	0.003
E3-01	0.163-0.184	0.005-0.010	0.0351-0.1024	0.0008	5.212-7.390	0.005
E3-02	0.180-0.240	0.010-0.020	0.0510-0.1030	0.001	5.746-8.591	0.006-0.007
E3-03	0.155-0.180	0.007-0.010	0.0551-0.0927	0.0002	3.603-5.555	0.002
E4-01	0.220	0.030	0.0860	0.001	22.965-22.965	0.008
E4-02	0.146-0.232	0.004-0.020	0.0880-0.1170	0.002	6.990-8.790	0.01
E4-03	0.203-0.203	0.006	0.0900	0.01	5.720	0.08

### 5.3. Parámetros del fluido

Estos corresponden a los parámetros reológicos, es decir los parámetros obtenidos a partir del índice de consistencia  $k$  e índice de flujo  $n$ . En las Tablas 5.5 y 5.6 se muestran los rangos de valores de dichas variables junta a la viscosidad efectiva  $\nu_{eff}$  y el espesor característico de la capa límite  $\delta$  en los experimentos de arrastre incipiente y generalizado respectivamente. Del mismo modo se presenta también el error asociado a cada variable.

Tabla 5.5: Rango de parámetros del fluido y errores arrastre incipiente.

exp	$n[-]$	$e_n[-]$	$k[Pa s^n]$	$e_k[Pa s^n]$	$\nu_{eff}[\frac{cm^2}{s}]$	$e\nu_{eff}[\frac{cm^2}{s}]$	$\delta[cm]$	$e\delta[cm]$
E1-01	1.000	0	0.0010	0	0.01	0	0.11-0.13	0.0002
E1-02	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.17-0.19	0.001-0.002	0.42-0.62	0.002-0.003
E1-03	0.743	0.005	0.113	0.004	1.00-1.46	0.07-0.3	1.03-1.72	0.02-0.03
E2-01	1.000	0	0.001	0	0.01	0	0.11-0.15	0.0002
E2-02	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.27-0.34	0.002-0.003	0.60-0.82	0.003-0.003
E2-03	0.762	0.001	0.0918	0.0005	0.64-1.12	0.004-0.02	0.94-1.49	0.004-0.005
E3-01	1.000	0	0.0010	0	0.01	0	0.11-0.12	0.0002
E3-02	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.13	0.001-0.001	0.40-0.45	0.003
E3-03	0.691	0.002	0.170	0.002	1.05-1.11	0.01-0.01	1.20-1.48	0.008-0.009
E4-01	1.000	0	0.0010	0	0.01	0	0.10-0.12	0.0002
E4-02	0.805	0.002	0.0395	0.0004	0.21-0.24	0.002-0.003	0.47-0.54	0.004
E4-03	0.724	0.002	0.1140	0.0010	0.59-0.67	0.02-0.02	0.86-0.89	0.006

Tabla 5.6: Rango de parámetros del fluido y errores arrastre generalizado

exp	$n[-]$	$e_n[-]$	$k[Pa s^n]$	$e_k[Pa s^n]$	$\nu_{eff}[\frac{cm^2}{s}]$	$e\nu_{eff}[\frac{cm^2}{s}]$	$\delta[cm]$	$e\delta[cm]$
E1-01	1.000	0	0.0010	0	0.010	0	0.109-0.118	0.0002-0.0002
E1-02	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.177-0.185	0.002-0.003	0.436-0.526	0.002-0.003
E1-03	0.743	0.005	0.1136	0.004	1.000-2.000	0.2-1	1.050-1.670	0.02-0.03
E2-01	1.000	0	0.0010	0	0.010	0	0.105-0.143	0.0002-0.0002
E2-02	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.270-0.297	0.003-0.004	0.614-0.768	0.003-0.003
E2-03	0.762	0.001	0.0918	0.0005	0.761-1.034	0.02-0.05	1.101-1.155	0.004-0.004
E3-01	1.000	0	0.0010	0	0.010	0	0.098-0.110	0.0002-0.0003
E3-02	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.124-0.131	0.002-0.002	0.362-0.403	0.002-0.003
E3-03	0.691	0.002	0.171	0.002	0.860-1.080	0.03-0.04	0.995-1.264	0.007-0.008
E4-01	1.000	0	0.0010	0	0.010	0	0.103	0.0002-0.0002
E4-02	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.212-0.226	0.006	0.471-0.515	0.004-0.004
E4-03	0.724	0.002	0.115	0.001	0.680	0.08	0.867-0.867	0.005-0.005

## 5.4. Régimen de flujo

Para estudiar el régimen de flujo, los adimensionales que definen de flujo son los números de Reynolds del flujo y de la partícula mientras que para incluir el efecto oscilatorio en el estudio se utiliza el numero de onda o número de Keulegan-Karpenter el cual describe la importancia relativa de las fuerzas de arrastre junto a las fuerzas de inercia de un cuerpo en un fluido de flujo oscilatorio. Dichos parámetros adimensionales se definen como:

$$Re_w = \frac{U_m A}{\nu_{eff}} \quad (5.1)$$

$$Re_p = \frac{U_m D}{\nu_{eff}} \quad (5.2)$$

$$KC = \frac{A}{D} \quad (5.3)$$

donde  $A$  es la máxima excursión de fondo,  $U_m$  la velocidad orbital,  $\nu_{eff}$  la viscosidad efectiva y  $D$  el diametro de la partícula. A continuación se resume el rango de los valores de dichos parámetros adimensionales para cada uno de los experimentos realizados. Al igual que en las secciones anteriores, estos se dividen en movimiento incipiente y movimiento generalizado cuyos resultados son presentados en las Tablas 5.7 y 5.8 respectivamente.

Los valores de número de Reynolds, en promedio, se encuentran dentro del rango para el cual se tiene un comportamiento laminar en fluidos no newtonianos. Según Kamphuis (1975) el límite para régimen laminar es de  $10^4$ . Los valores máximos encontrados en pruebas con agua alcanzan valores de hasta  $3 \cdot 10^3$  el cual se encuentra fuera del límite del rango laminar. Sin embargo este valor corresponde tan solo a un experimento realizado con agua. Por el contrario, para el resto de experimentos, junto a las pruebas realizadas con fluidos

Tabla 5.7: Rango de adimensionales número de Reynolds y número de Keulegan Carpenter para arrastre incipiente

exp	$Re_w$	$e_{Re_w}$	$Re_p$	$e_{Re_p}$	$KC$	$e_{KC}$
E1-01	597-3570	1-3	21.1-45.7	1-17	28.3-78.2	0.6-1.6
E1-02	13-66	0.1-0.6	0.9-1.8	0.06-0.2	14.9-45.0	0.3-0.9
E1-03	0.2-8	0.05-0.6	0.1-0.3	0.01-0.06	3.5-28.8	0.5-0.8
E2-01	321-5079	0.8-3.0	8.4-25.5	1-3	38.1-199.3	2-12
E2-02	2-23	0.2	0.2-0.6	0.02-0.1	8.9-42.0	0.5-3
E2-03	1-19	0.03-0.2	0.2-0.5	0.02-0.05	8.8-41.0	0.5-3
E3-01	2362-9415	4-8	55.2-107.4	4-10	42.8-88.4	2-3
E3-02	185-654	2-7	6.4-10.0	0.2-1	26.1-65.6	0.9-2
E3-03	15-38	0.1-0.3	0.7-0.9	0.03-0.1	21.9-42.3	0.8-2
E4-01	2879-32952	8-26	87.6-279.5	6-13	32.9-117.9	1-4
E4-02	71-274	0.9-3	3.9-8.2	0.09-0.3	18.05-33.4	0.6-1
E4-03	32-82	2-4	2.0-2.7	0.1-0.2	16.4-30.0	1

tipo pseudoplástico (CMC), incluyendo las 12 reologías diferentes, se tiene régimen laminar pues los valores del número de Reynolds tanto del flujo como de la partícula alcanzan un valor máximo de 654.4 y en promedio son de un orden y hasta dos órdenes de magnitud menor al valor límite entre régimen laminar y transición laminar-turbulento. Por lo tanto es válido suponer que se tiene un régimen laminar en las cercanías del fondo y la utilización de expresiones que, como el número de Goddet  $\psi$  y el espesor característico de la capa límite  $\delta$ , son válidas para este tipo de régimen.

Tabla 5.8: Rango de adimensionales número de Reynolds y número de Keulegan Carpenter para arrastre generalizado

exp	$Re_w$	$e_{Re_w}$	$Re_p$	$e_{Re_p}$	$KC$	$e_{KC}$
E1-01	2112-20100	8-8	39.8-116.1	2.4-7.0	53.1-173.2	1-4
E1-02	40-169	4-16	1.6-2.7	0.2-0.3	24.4-77.3	0.5-2
E1-03	1-22	1-19	0.1-0.3	0.1-0.3	9.1-63.7	0.7-1
E2-01	1697-7687	2-4	19.5-32.6	0.9-3.9	87.0-240.0	5-14
E2-02	16-49	1-4	0.5-0.7	0-0.1	23.1-86.4	1-5
E2-03	21-33	4-5	0.3-0.5	0.1-0.1	63.3-63.3	4-4
E3-01	8474-13597	8-10	113.8-128.8	4-9	74.5-105.6	2-3
E3-02	888-1557	65-109	10.3-12.7	1-1.3	82.1-122.7	2-4
E3-03	51-111	20-51	1.0-1.4	0.4-0.6	51.5-79.4	2-2
E4-01	49925-49925	18-18	217.4-217.4	26.7-26.7	229.6-229.6	7-7
E4-02	452-920	154-301	6.5-10.5	2-4	69.9-87.9	2-3
E4-03	192-192	79-79	3.3-3.3	1.4-1.4	57.2-57.2	2-2

Como es de esperar, en la Tabla 5.8 se tienen números de Reynolds mayores que los de la Tabla 5.7 pues, al tratarse de arrastre generalizado, se tiene un mayor movimiento de partículas y las velocidades en el fondo deben ser mayores. De igual manera, se observan números de Keulegan-Carpenter mayores que los vistos en movimiento incipiente lo que se

traduce en una mayor predominancia de las fuerzas de arrastre en el flujo oscilatorio. Si bien en algunos casos se observó deformación del lecho, la magnitud de movimiento producido para los valores anteriores (Tabla 5.8) no alcanzaron a formar ondulaciones sedimentarias en el tiempo de ejecución de los experimentos. Para efectos de esta memoria se definió arrastre generalizado cuando se observa que en algún punto del canal existe movimiento de la mayoría de las partículas de superficie a lo ancho del canal. Este criterio se comprueba de manera visual por lo que el rango de movimiento perteneciente a arrastre generalizado es amplio ya que, al igual que para arrastre incipiente, existen muchas definiciones (Chan 1972) [4] y se registró como arrastre generalizado cuando, como criterio de esta memoria, supere el arrastre de aproximadamente un tercio de las partículas en la superficie.

A partir de los parámetros del flujo  $Re_w$  y  $\delta$  junto al parámetro  $A$ , es posible obtener una relación entre la el número de Reynolds y la razón entre el grosor característico de la capa límite  $\delta$  sobre la excursión de fondo  $A$  obteniendo la relación  $Re_w = 3,5 \left(\frac{\delta}{A}\right)^{-0,56}$  como se muestra en la Figura 5.9.

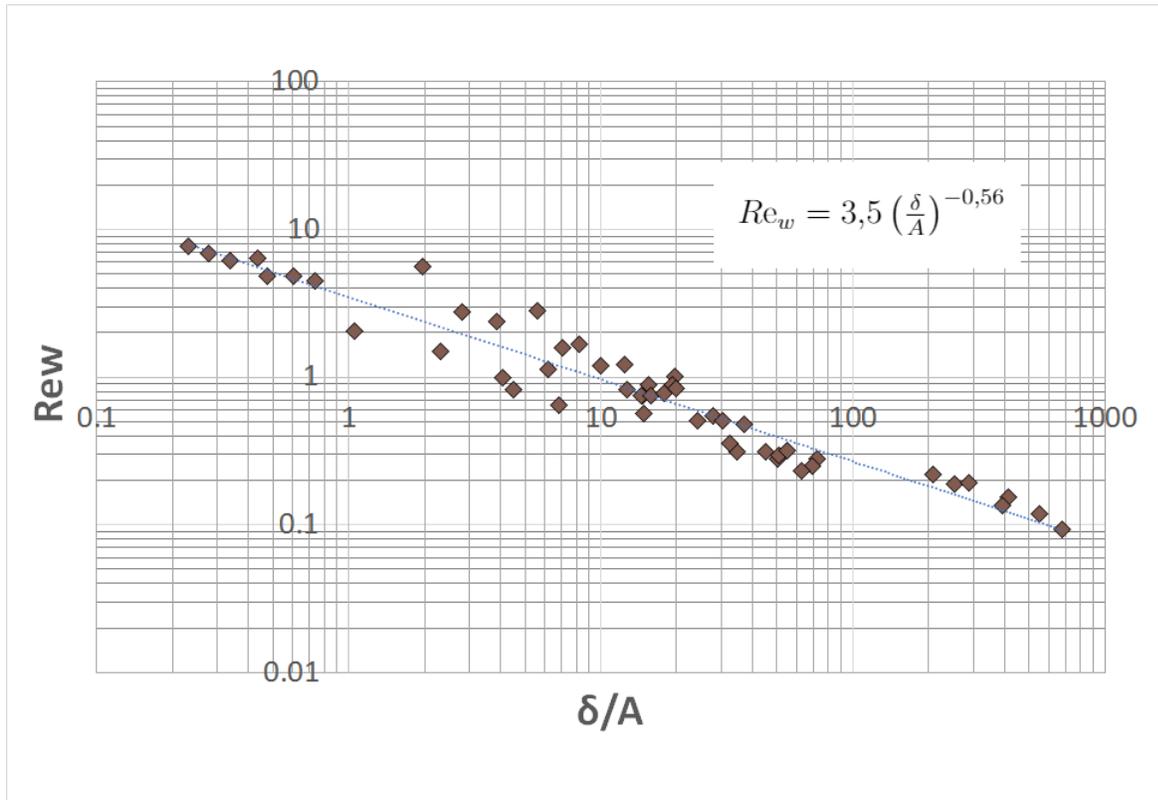


Figura 5.9: Correlación entre la viscosidad efectiva de un fluido pseudoplastico y la razón entre la el grosor característico de la capa límite  $\delta$  y la excursión de fondo  $A$ .

A continuación se presentarán los parámetros del oleaje correspondientes a las dimensiones principales del oleaje en la superficie libre.

## 5.5. Parámetros del oleaje

Las dimensiones características del oleaje son su longitud de onda  $L$  y la altura  $H$  o amplitud de onda. En la Tabla 5.9 se encuentran los valores de dichos parámetros en las pruebas realizadas de arrastre incipiente mientras que en la Tabla 5.10 los correspondientes a arrastre generalizado.

Tabla 5.9: Rango de valores de las características del oleaje correspondiente a su altura y longitud de ondas para los experimentos de arrastre incipiente.

heightexp	$T[s]$	$H[cm]$	$e_H[cm]$	$L[cm]$	$e_L[cm]$
E1-01	1.2-1.5	6.3-11.4	0.1	203-298	2
E1-02	1.0-2.0	2.5-9.1	0.1	169-293	2
E1-03	1.0-2.3	4.2-9.7	0.1	96-235	2
E2-01	1.2-2.1	2.7-9.4	0.1	164-424	2
E2-02	1.2-2.2	1.7-7.2	0.1	255-479	2
E2-03	1.3-1.9	2.7-8.1	0.1	262-370	2
E3-01	1.1-1.5	7.8-13.9	0.1	269-416	2
E3-02	1.2-1.5	10.4-17.5	0.1	269-315	2
E3-03	1.3-2.0	3.8-17.1	0.1	276-411	2
E4-01	1.0-1.5	6.9-17.7	0.1	174-281	2
E4-02	1.0-1.3	6.9-15.2	0.1	208-305	2
E4-03	1.2-1.3	7.2-10.6	0.1	246-334	2

Tabla 5.10: Rango de valores de las características del oleaje correspondiente a su altura y longitud de onda para experimentos de arrastre generalizado.

heightexp	$T[s]$	$H[cm]$	$e_H[cm]$	$L[cm]$	$e_L[cm]$
E1-01	1.2-1.4	6.0-12.7	0.1	216-259	2
E1-02	1.1-1.6	6.2-11.8	0.1	175-259	2
E1-03	1.1-1.8	5.2-9.4	0.1	157-212	2
E2-01	1.1-2.1	5.2-13.8	0.1	132-388	2
E2-02	1.4-2.0	1.7-7.5	0.1	283-479	2
E2-03	1.3-1.6	3.6-6.9	0.1	246-374	2
E3-01	1-1.2	8.4-18.7	0.1	275-427	2
E3-02	1.1-1.2	15.2-20.4	0.1	208-335	2
E3-03	1.2-1.5	8.1-10.4	0.1	315-488	2
E4-01	1.1	6.4-7.0	0.1	187-187	2
E4-02	1-1.2	6.9-12.1	0.1	208-302	2
E4-03	1.2-1.2	10.4-10.4	0.1	309	2

# Capítulo 6

## Análisis de resultados

### 6.1. Criterios de arrastre incipiente de Goddet (1960)

Goddet estableció relaciones experimentales que relacionan las propiedades del sedimento junto a las características del oleaje en un flujo oscilatorio de agua. Dicho autor considera el desarrollo de una capa límite de espesor característico  $\delta = \sqrt{\nu T}$  lo cual es considerando dentro de su análisis para flujos laminares. Si expresamos el término de la capa límite en función de la viscosidad efectiva de Ostwald - De Waele o ley de potencia,  $\nu_{eff} = \rho k (\dot{\gamma})^{n-1}$  el espesor característico de la capa límite  $\delta$ , como se vió en el capítulo 2, es igual a  $\left(\frac{kT}{\rho}\right)^{\frac{1}{1+n}} (u_{rms})^{\frac{n-1}{n+1}}$ . De esta manera, dicha expresión permite incorporar los términos reológicos obtenidos empíricamente correspondiente al índice de flujo  $n$  y el índice consistencia  $k$ . El análisis de Goddet se realiza a partir de dos números adimensionales:  $\psi$  y  $\chi$ . El primer término ( $\psi$ ) es equivalente al inverso del cuadrado del número de Froude densimétrico  $Fr_D^2 = \frac{U_m^2}{gRD}$  multiplicado por el número de Reynolds de la partícula  $\frac{U_m D}{\nu_{eff}}$ . Es decir:

$$\psi = (Fr_D^2)^{-1} Re_p = \frac{RgD}{U_m^2} \frac{DU_m}{\nu_{eff}} \quad (6.1)$$

$$\psi = Rg \frac{D^2}{U_m \nu_{eff}} \quad (6.2)$$

Mientras que el número  $\chi$  es el adimensional que considera el efecto del desarrollo de una capa límite laminar oscilatoria en el fondo la cual es adimensionalizada por una longitud característica, en este caso, el diámetro de la partícula  $D$ .

$$\chi = \frac{D}{\delta} \quad (6.3)$$

cuya expresión en función de la definición de  $\delta$  de Goddet junto a la viscosidad efectiva de Ostwald-de Waele en función de  $n$ ,  $k$ ,  $\rho$ ,  $T$  y una velocidad característica  $u_{rms}$  es la siguiente:

$$\chi = \frac{D}{\sqrt{\nu_{eff} T}} \quad (6.4)$$

$$\chi = \frac{D}{\left(\frac{kT}{\rho}\right)^{\frac{1}{1+n}} (u_{rms})^{\frac{n-1}{n+1}}} \quad (6.5)$$

En donde  $R$  corresponde al peso específico sumergido del grano definido como  $R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ ,  $D$  el diámetro del grano,  $U_m$  la máxima velocidad orbital,  $\nu_{eff}$  la viscosidad efectiva y  $\delta$  al valor de la capa límite. Como se puede observar, estos parámetros contienen tanto las características del flujo como las del fluido y del sedimento por lo que corresponden a una buena manera de describir el movimiento de sedimento en fluidos no newtonianos.

Considerando las variables de las ecuaciones 6.2 y 6.4, se presenta el adimensional  $\psi$  en función de  $\chi$  en el gráfico de la Figura 6.1. Por otra parte, en la Figura 6.2 muestra el gráfico de bandas de error para el criterio de Goddet cuyos valores para cada experimentos están en la Tabla 6.1. En dicha tabla se resumen el rango de valores de cada adimensional, su error asociado y el error porcentual de cada valor obtenido a partir de la expresión  $e_{\% \chi} = \frac{e_{\chi}}{\chi} \times 100 \%$

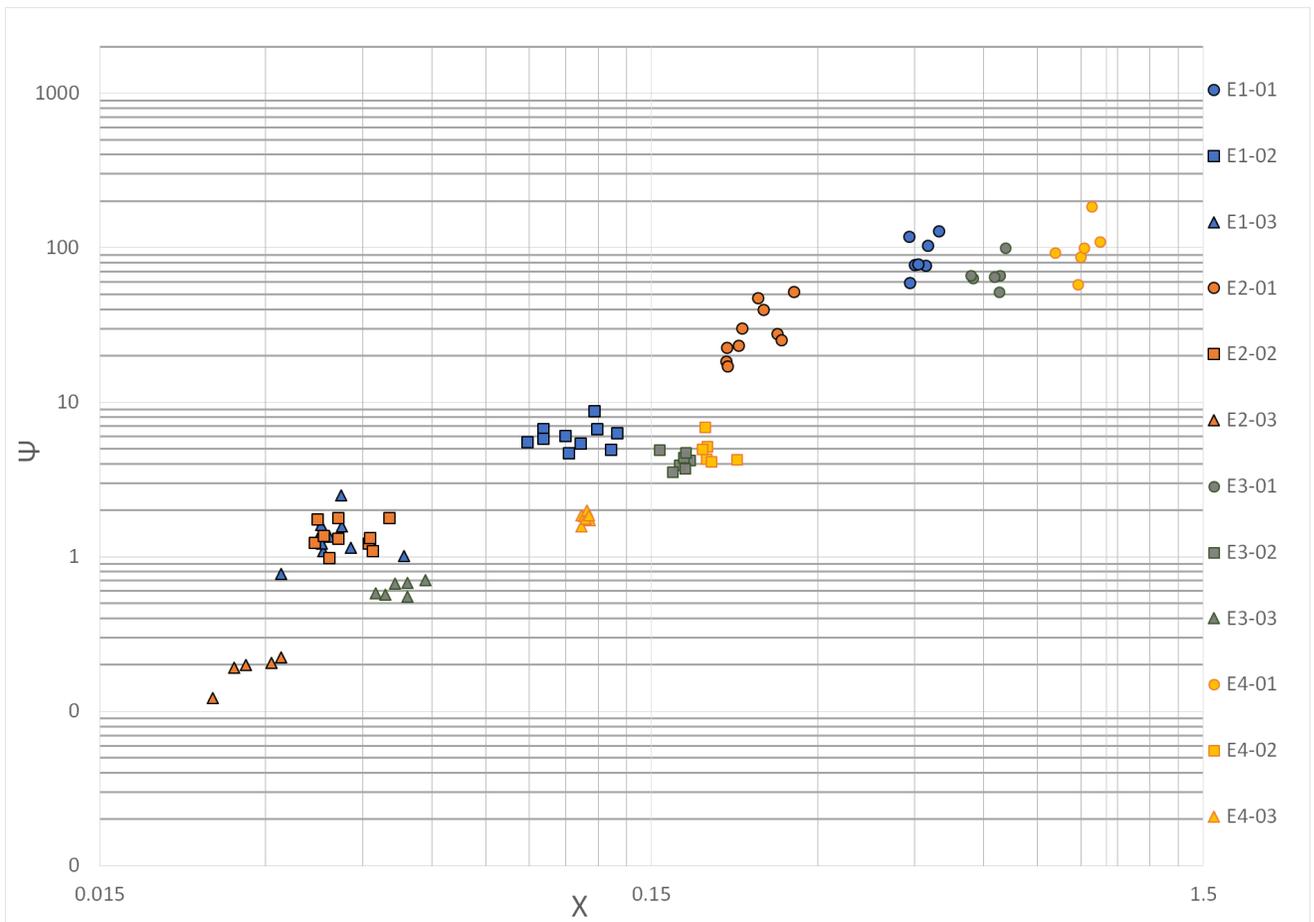


Figura 6.1: Presentación de resultados de arrastre incipiente en función de los números de Goddet  $\psi$  y  $\chi$ . Cada color representa un diámetro diferente mientras que cada forma corresponde a la reología característica.

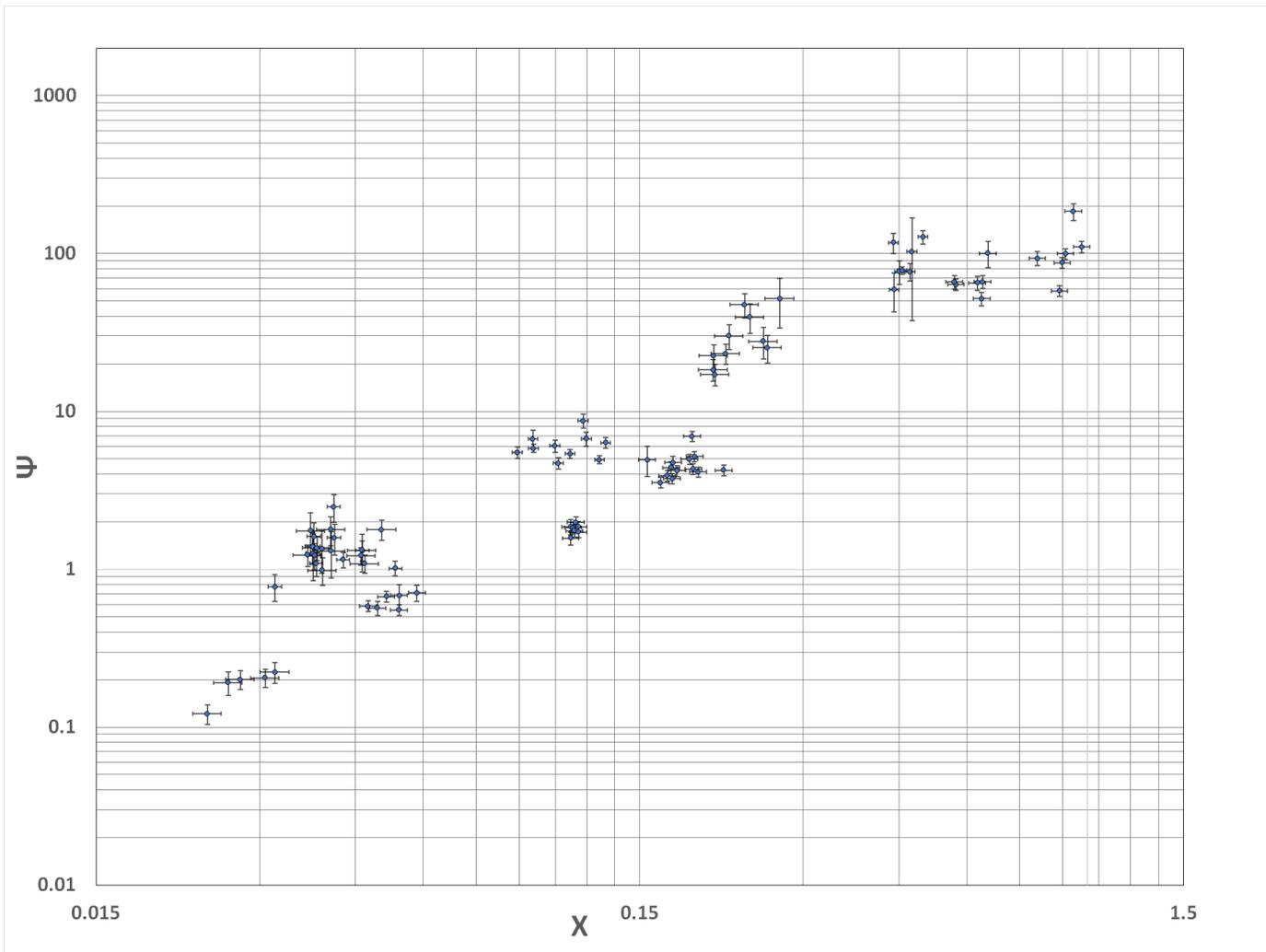


Figura 6.2: Gráfico bandas de error números de Goddet.

Tabla 6.1: Rango de valores de los números de Goddet  $\psi$  y  $\chi$  y errores.

exp	$\psi$	$e_\psi$	$e_{\% \psi}$ [%]	$\chi$	$e_{\chi}$	$e_{\% \chi}$ [%]
E1-01	58.9-127.5	4-65	5-65	0.44-0.50	0.009-0.01	2-19
E1-02	4.7-8.7	0.3-0.9	6-14	0.09-0.13	0.002-0.003	2-2
E1-03	0.8-2.5	0.1-0.5	11-33	0.03-0.05	0.001-0.001	3-3
E2-01	17.1-51.8	3-18	14-35	0.20-0.27	0.01-0.02	6-6
E2-02	1.0-1.8	0.1-0.5	13-33	0.04-0.05	0.002-0.003	6-6
E2-03	0.1-0.2	0.02-0.04	13-25	0.01-0.03	0.001-0.002	6-22
E3-01	51.6-100.4	5-19	9-19	0.57-0.66	0.02-0.023	4-4
E3-02	3.5-4.9	0.3-1	7-22	0.15-0.18	0.006-0.006	4-4
E3-03	0.6-0.7	0.04-0.1	8-18	0.05-0.06	0.002-0.002	4-4
E4-01	57.9-184.6	5-23	8-12	0.81-0.98	0.03-0.03	3-3
E4-02	4.1-6.9	0.3-0.5	7-8	0.19-0.21	0.007-0.008	4-4
E4-03	1.6-2.0	0.1-0.2	8-11	0.11-0.12	0.004-0.004	4-4

## 6.2. Criterios de arrastre incipiente Goddet de Modificado

Si bien los parámetros adimensionales de Goddet muestran una buena relación, los datos aún presentan una considerable dispersión. Junto a esto, los datos tienden formar conjuntos separados entre sí y agrupados según diámetro y viscosidad. Con el objetivo de corregir dicha dispersión junto a la segregación por diámetro de partículas y reología del fluido, se utiliza el parámetro de Goddet modificado,  $X_N$ , propuesto por Tamburrino & Vidal (2017) .

$$X_N = e^{\beta n} Re_p^\alpha \chi \quad (6.6)$$

donde donde  $Re_p$  es el número de Reynolds de la partícula,  $n$  es el índice de flujo y  $\alpha$  y  $\beta$  son constantes que se calibran experimentalmente. De esta manera, al evaluar gráficamente los datos obtenidos, se observa una tendencia lineal, y aunque la dispersión no cambia demasiado, disminuyendo notoriamente la tendencia a formar grupos de datos segregados por diámetro y reología. Se obtiene un mejor resultado para los coeficientes  $\alpha = -0,35$  y  $\beta = 4$ . De este modo, la condición de arrastre incipiente está dada por:

$$\psi = a\chi_N^b \quad (6.7)$$

En la Tabla 6.2 se tiene el rango de valores para cada grupo de experimentos de los números de Goddet  $\psi$  y Goddet modificado  $\chi_N$  a partir de la ecuación 6.6 junto al rango de errores correspondiente de cada adimensional. La correlación de estos datos se muestra en la Figura 6.3.

Tabla 6.2: Rango de valores de los números de Goddet modificado  $\psi$  y  $\chi_N$  y errores.

exp	$\psi$	$e_\psi$	$e_{\% \psi}$ [%]	$\chi_N$	$e_{\chi_N}$	$e_{\% \chi_N}$ [%]
E1-01	58.9-127.5	4-65	5-65	6.32-9.36	0.1-1.8	2-22
E1-02	4.7-8.7	0.3-0.9	6-14	2.76-4.32	0.1-0.2	2-5
E1-03	0.8-2.5	0.1-0.5	11-33	1.18-2.14	0.1-0.2	4-12
E2-01	17.1-51.8	3-18	14-35	3.63-7.03	0.2-0.9	5-12
E2-02	1.0-1.8	0.1-0.5	13-33	1.59-2.46	0.1-0.2	4-11
E2-03	0.1-0.2	0.02-0.04	13-25	0.75-0.89	0.03-0.05	4-6
E3-01	51.6-100.4	5-19	9-19	6.55-8.80	0.2-0.6	3-6
E3-02	3.5-4.9	0.3-1	7-22	3.05-3.62	0.1-0.3	3-8
E3-03	0.6-0.7	0.04-0.1	8-18	0.82-1.06	0.02-0.1	3-6
E4-01	57.9-184.6	5-23	8-12	6.76-10.76	0.2-0.5	3-4
E4-02	4.1-6.9	0.3-0.5	7-8	2.30-2.90	0.1-0.1	2-3
E4-03	1.6-2.0	0.1-0.2	8-11	1.43-1.61	0.04-0.1	3-4

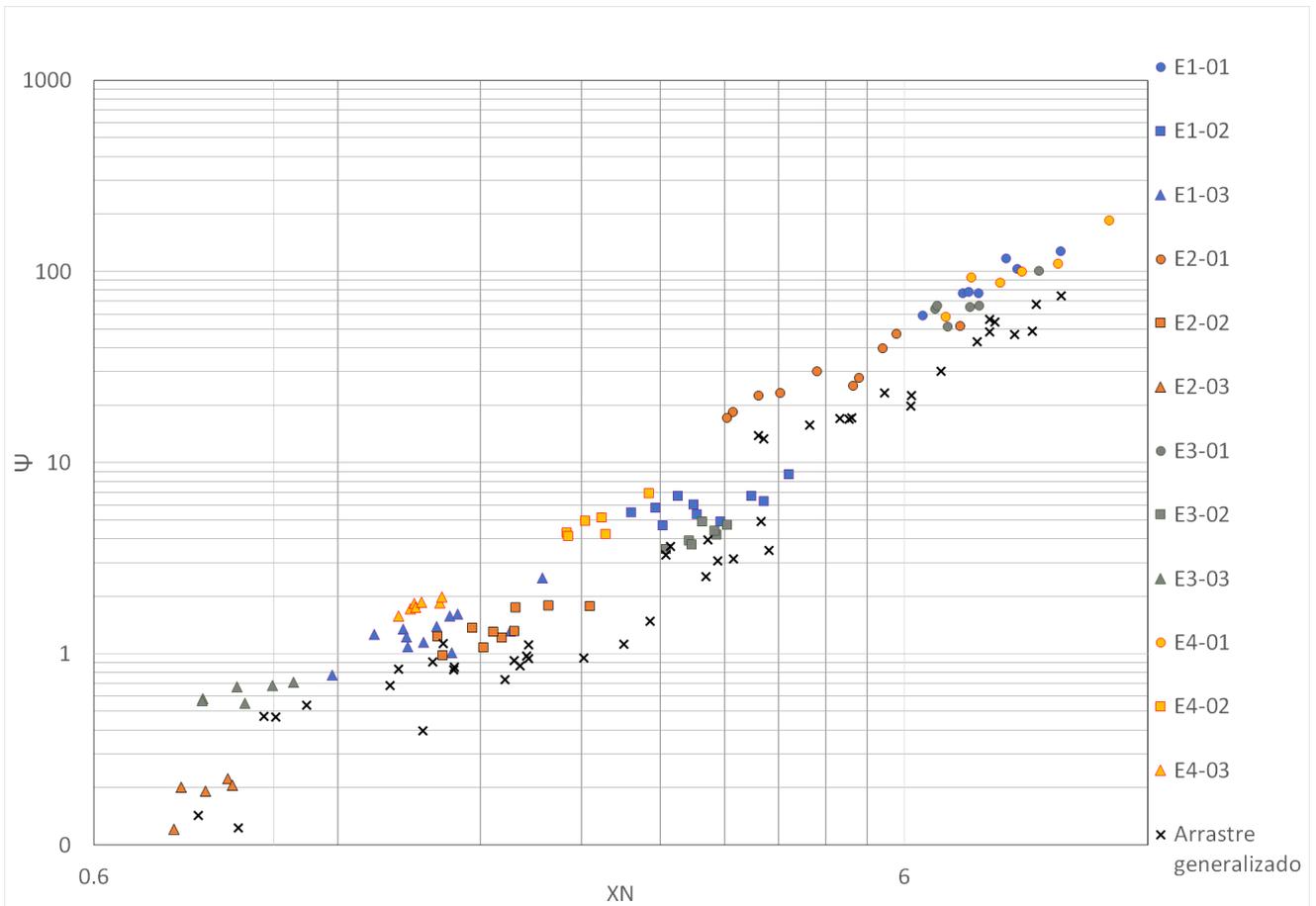


Figura 6.3: Presentación de resultados de arrastre incipiente y generalizado en función de los números de Goddet  $\psi$  y  $\chi_N$ . Cada color representa un diámetro diferente mientras que cada forma corresponde a la reología característica. Se incluyen datos obtenidos de arrastre generalizado representados mediante cruces.

Se observa de la figura anterior una tendencia lineal en la que las constantes de la ecuación 6.7 son:  $a = 0.415$  y  $b = 2.5$ .

En la figura 6.3 se incluyen también los valores de arrastre generalizado representados mediante cruces de color negro. Estos datos se pueden distinguir como una recta que se encuentra por debajo de los datos de arrastre incipiente y con una tendencia y pendiente muy similar. Lo anterior se debe a que el adimensional  $\psi$  contiene el inverso del número de Froude densimétrico  $Fr_D^2$ , es decir,  $\psi = (Fr_D^2)^{-1} \frac{D_s U_m}{\nu_{eff}} = Rg \frac{D_s^2}{U_m \nu_{eff}}$ , lo cual se traduce en que el adimensional  $\psi$  es inversamente proporcional a la velocidad orbital  $U_m$ . Considerando esto, y que en las pruebas registradas de arrastre generalizadas si tienen velocidades más altas, el número adimensional  $\psi$  para un diámetro y reología dado es menor y los datos en la curva se presentan por debajo de los datos de arrastre incipiente en el gráfico de la figura 6.3.

Los errores asociados al parámetro  $\psi$  y  $\chi_N$  se resumen en la Tabla 6.2

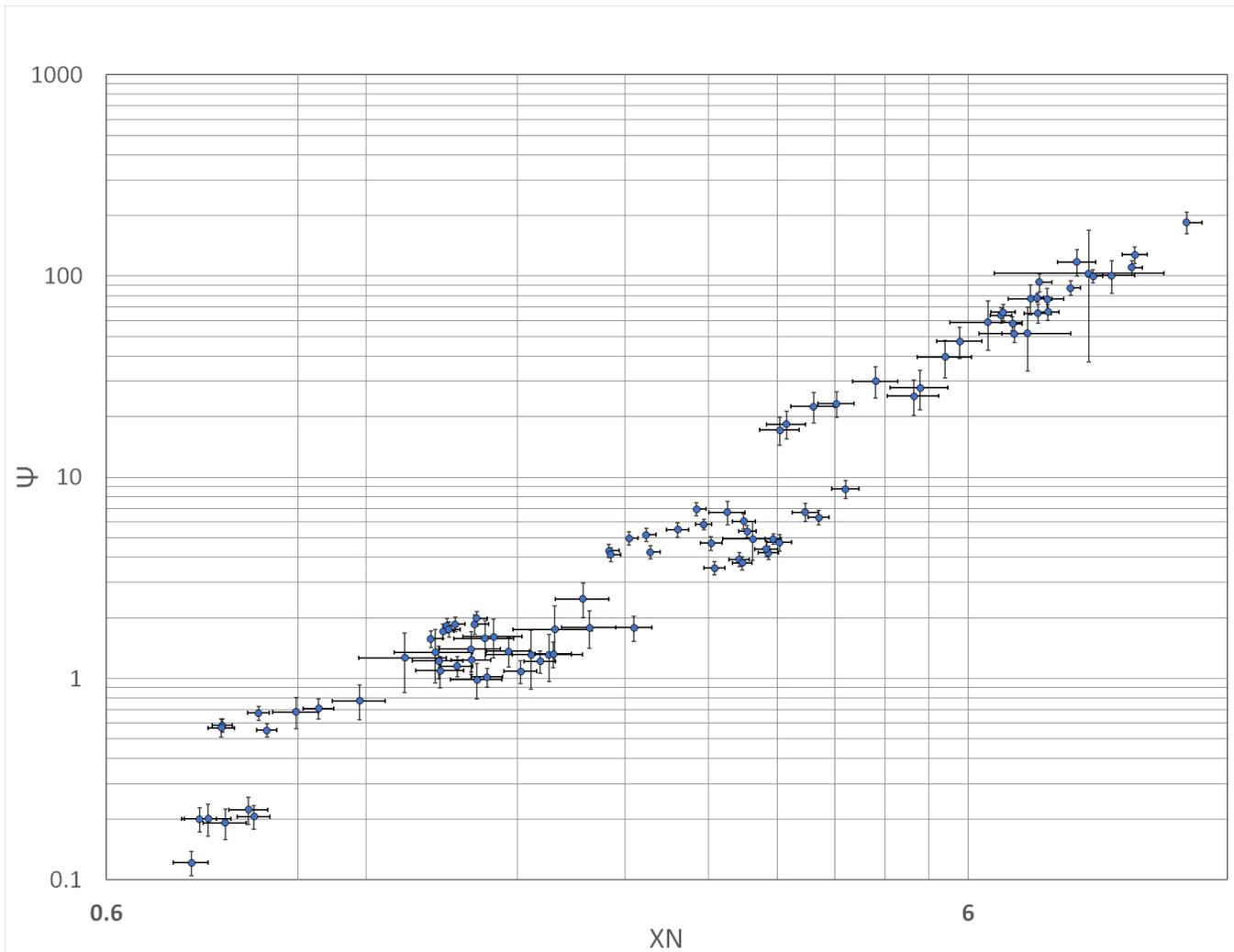


Figura 6.4: Gráfico bandas de error criterio de arrastre incipiente Goddet modificado.

### 6.3. Criterios de arrastre incipiente tipo Shields. Criterio de Lenof, 1982

Se propone en esta memoria incluir un criterio el cual incluya el esfuerzo de corte crítico que actúa sobre el sedimento. Komar y Miller realizaron una demostración de la validez del criterio de Shields en 1975 para la descripción cuantitativa del inicio de movimiento de partículas bajo las olas en donde la velocidad orbital  $U_m$  es un sustituto razonable de la velocidad de corte  $u_*$ . Lenof (1982) propone como criterio un análisis dimensional y relaciones derivadas empíricamente entre los parámetros  $R_*$  (número de Reynolds de corte) y  $D_*$  (Parámetro adimensional del grano) en donde:

$$R_* = \frac{U_* D}{\nu_{eff}} \quad (6.8)$$

con  $U_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$  y  $\tau = \frac{1}{4}\rho f_w U_m^2$  cuya expresión para el esfuerzo de corte en flujos oscilatorios en régimen laminar fue establecida por Jonsson (1966) en función del factor de fricción de onda  $f_w$  definido como:

$$f_w = \frac{2}{\sqrt{Re_w}} \quad (6.9)$$

obteniendo así el número de Reynolds de corte:

$$R_* = \sqrt{\frac{f_w U_m^2}{4} \frac{D}{\nu_{eff}}} \quad (6.10)$$

mientras que

$$D_* = \left( \frac{Rg}{\nu_{eff}^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} D \quad (6.11)$$

Gráficamente, para el agua, el comportamiento es similar a lo predicho por Lenoff, es decir, a viscosidad constante los datos se agrupan según diámetro en líneas verticales en donde las variables corresponden a los parámetros del flujo, en este caso, velocidad orbital y máxima excursión de fondo. Se observa que, en general, los valores correspondientes a experimentos de arrastre generalizado se encuentran sobre los de arrastre incipiente. Para el caso de flujos pseudoplásticos se tiene que la viscosidad no es constante y debido a esto los datos tienden a dispersarse a medida que la viscosidad aumenta como se puede observar en la figura 5.6.

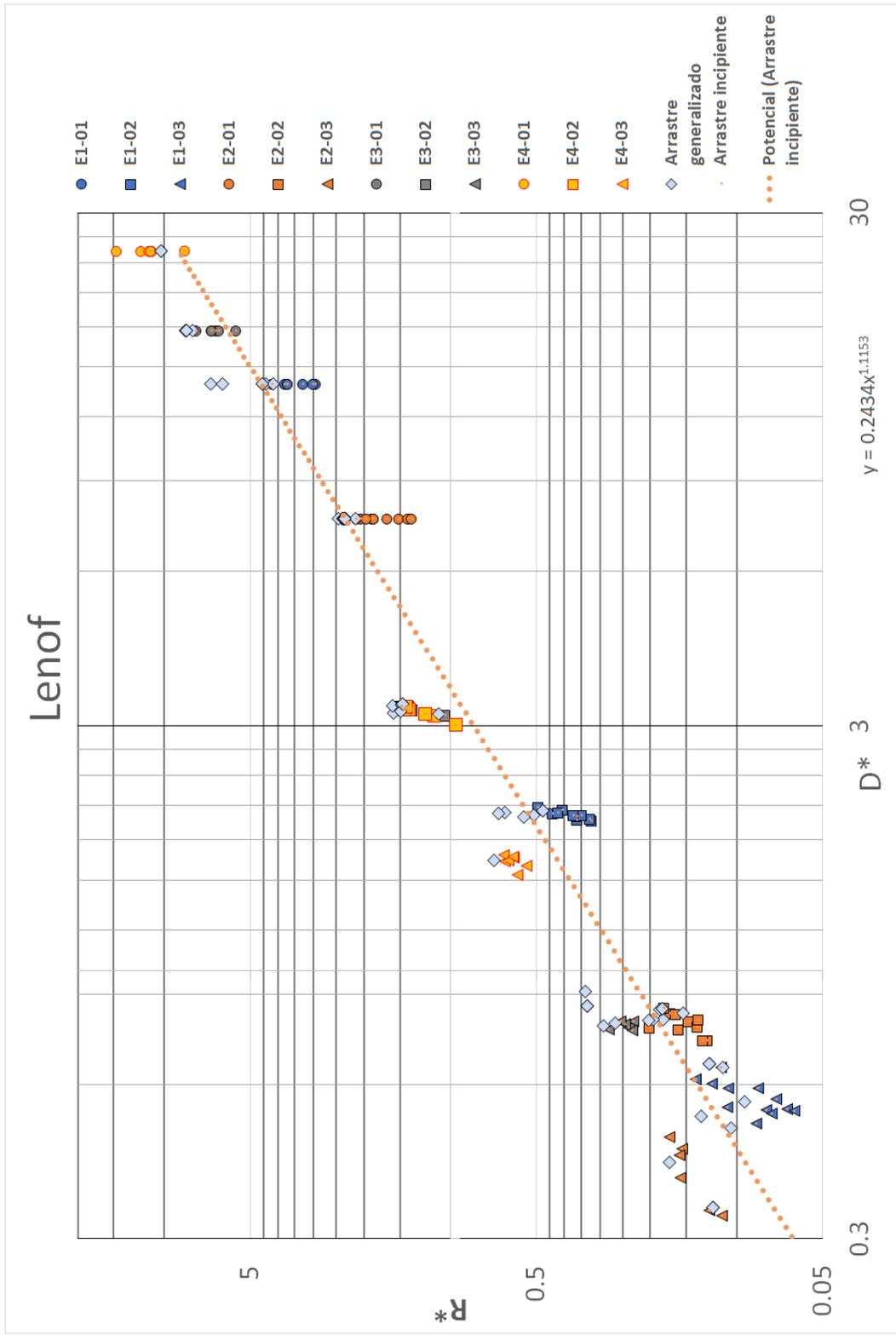


Figura 6.5: Criterio de arrastre incipiente considerando los parámetros de Lenoff, 1982. Se incluyen los datos de arrastre generalizado mediante rombos de color plateado.

# Capítulo 7

## Conclusion

Modificando la instalación experimental construida por Vidal (2017) fue posible realizar un conjunto de experimentos sobre flujos oscilatorios tanto para fluidos newtonianos como para fluidos no-newtonianos del tipo pseudoplástico. Estos últimos corresponden a soluciones acuosas obtenidas a partir de mezclas de agua con carboximetilcelulosa (CMC). En los experimentos de arrastre de sedimentos fue posible apreciar dos fases de movimiento de partículas para los cuales se realizaron mediciones. Estas son; fase de no movimiento a arrastre incipiente y fase de arrastre incipiente a movimiento generalizado. Para los experimentos sin lecho de arena, se logró observar el comportamiento del campo de velocidades horizontales a lo largo del eje longitudinal junto al decaimiento del oleaje imponiendo como variable la reología del fluido y la frecuencia de oscilación. Las mediciones fueron realizadas efectivamente por medio de la implementación de la técnica de procesamiento por velocimetría de imágenes de partículas (PIV) en agua y soluciones acuosas con CMC. Gracias a las modificaciones de la instalación experimental se logró extender las condiciones experimentales limitantes de Vidal (2017), con nuevas condiciones como mayores alturas del flujo, mayor amplitud de movimiento del generador de olas y periodos de oscilación. Las amplitudes superiores se generan para alturas de flujo mayores a 27 cm y adoptan un valor entre 16.3 cm y 27.8 cm mientras que el periodo máximo que se generó en el oleaje es igual a 2.5 segundos. Dichas condiciones generan flujos mayores los cuales permitieron obtener mayor velocidad en el fondo y así un mayor acarreo de material de manera que fue posible extender el estudio de movimiento de partículas en fluidos no newtonianos.

Los experimentos realizados en este estudio se dividieron en dos grupos principales. El primero consistió en mediciones sin lecho de arena para estudiar el comportamiento del campo de velocidades y el decaimiento del oleaje en la superficie libre se realizaron pruebas con diferentes condiciones experimentales mientras que el segundo grupo consistió en experimentos de arrastre de sedimentos. Con respecto a el primer grupo, para las características del oleaje se observa que si se tienen flujos bajos y frecuencias altas, la amplitud de la ola decae en la dirección longitudinal del canal. Lo mismo sucede con los perfiles de velocidades pues se observó que, en ciertos casos, el campo de velocidades horizontal disminuye en la dirección del flujo. Sin embargo, este comportamiento en la mayoría de los casos es despreciable pues el canal no es lo suficientemente largo como para observar cambios importantes en los cam-

pos de velocidad y se produce en mayor grado para un cierto rango de reología. Los valores de  $n$  de los experimentos realizados se encuentran entre 0.674 y 0.813, observándose disminuciones de los campos de velocidades, mientras que para valores de  $n$  mayores que 0.813 estos se mantienen relativamente constantes, similar a lo que ocurre cuando el fluido es agua. Estos perfiles se midieron para flujos pequeños por dos razones. En primer lugar porque la región de registro del dispositivo utilizado (cámara Photrom) es pequeña y porque existe un factor limitante en la medición de las dimensiones del oleaje. Esto ocurre para cierto número de experimentos pues cuando tiene se un flujo de cierta magnitud con periodos y altura de flujo muy altos, se observaron dimensiones de oleaje muy elevados con respecto a la escala del canal y olas mas irregulares lo cual dificulta su medición y evita la visualización de su comportamiento en la dirección longitudinal. Un caso extremo de lo anterior es la generación de ondas cuya longitud iguala o supera el largo del canal por lo que no se pueden apreciar más de dos crestas o valles consecutivos en el canal.

Al observar los valores de las dimensiones de oleaje presentes en las tablas 5.9 y 5.10, se tiene que existen longitudes de ondas que alcanzan valores máximos de hasta 487 centímetros de largo mientras que el largo del canal es de tan solo 4 metros. Esto significa que para generar arrastre generalizado se producirán olas más grandes que no se alcanzan a desarrollar completamente dentro de las dimensiones del canal. Para estos casos se utilizó como valor de longitud el doble de media ola, es decir, el doble de la distancia horizontal entre una cresta y un valle consecutivo.

Con respecto al segundo grupo de experimentos, se registraron un total de 94 experimentos de arrastre incipiente y 47 experimentos de arrastre generalizado. Para cada uno de los diámetros utilizados se observaron diferentes comportamientos con respecto al movimiento de partículas al variar la reología del fluido. Para el menor diámetro  $D = 0.3$  mm el número de experimentos en los que observó movimiento de material fue el mismo para pruebas realizadas con agua y con CMC al 0.2%. Sin embargo, en las pruebas realizadas con CMC al 0.3%, para el mismo diámetro, el número de pruebas exitosas (con movimiento de material) se reduce significativamente. Por otra parte, para  $D = 0.55$  mm se observó un mejor comportamiento del material al aumentar la viscosidad del fluido para las mismas amplitudes de movimiento y alturas de flujo, es decir, el número de experimentos en los que hubo movimiento de material fue mayor a medida que la viscosidad aumentaba. Algo similar ocurre con el siguiente tamaño de partícula  $D = 0.7$  mm. Si bien, la altura de flujo y amplitud aumentaron debido a la mayor dificultad de mover dicho diámetro, se observa que la cantidad de experimentos exitosos disminuye al pasar de una reología de 0.2% a una de 0.3% al igual que para el mayor diámetro  $D = 1$  mm. Si bien, lo anterior puede deberse por una gran cantidad de factores como el tiempo en el que el fluido está en contacto con el sedimento, es posible que, para ciertos diámetros, la viscosidad que adquiere una solución con CMC facilite el movimiento de material hasta cierto punto a partir del cual, al seguir aumentando la viscosidad, la capacidad de movimiento de sedimento comienza a disminuir. No obstante, no se observa lo mismo con arrastre generalizado pues para todos los diámetros se tiene que el aumento de viscosidad dificulta el movimiento generalizado. Sin embargo, el tiempo es un factor importante pues las mezclas de soluciones acuosas con CMC cambian sus propiedades en un tiempo relativamente corto. Con respecto a la amplitud de movimiento, en los grupos de experimentos  $E2 - 01$  Y  $E2 - 02$  ( $D = 0.3$  mm), se observa movimiento para una amplitud de 11.9 cm a una misma

frecuencia mientras que para  $E2 - 03$  a partir de los 14.3 cm. Para el diámetro  $D = 0.55$  mm, la amplitud a partir de la cual comienza el movimiento de partículas disminuye con la viscosidad, es decir, para los grupos  $E1 - 01$ ,  $E1 - 02$ ,  $E1 - 03$  se tienen amplitudes de movimiento 16, 13.1 y 11.9 respectivamente mientras. Para el siguiente diámetro se tienen amplitudes de movimiento de 15.5, 16 y 19 cm respectivamente.

El criterio que mejor representa el movimiento incipiente de partículas cuando se desea incorporar la viscosidad es el criterio impuesto por Goddet (1960) a partir de los adimensionales  $\psi$  y  $\chi$  para los cuales se observa una buena correlación entre los datos ya que estos tienden a formar una línea recta con cierta dispersión. Dicha dispersión se ve notoriamente disminuida al utilizar el número de Goddet modificado propuesto por Tamburrino y Vidal (2017). Como se puede observar, estos parámetros contienen tanto las características del flujo como las del fluido y del sedimento por lo que corresponden a una buena manera de describir el movimiento de sedimento en flujos oscilatorios con fluidos no newtonianos. A partir de estos adimensionales, los datos obtenidos en el laboratorio presentan una buena correlación entre ellos y esta difiere al variar la reología del fluido pues se observa una tendencia a formar línea recta y aumentando la dispersión de datos al aumentar la viscosidad. Si bien la tendencia de datos a formar grupos separados para diferentes diámetros no fue completamente corregida, al observar los grupos de datos agrupados de acuerdo a su un rango de reología, estos tienden a formar, para cada una de los tres rangos de reologías estudiados, líneas rectas continuas las cuales. Estas rectas se unen en una sola y es representada mediante la siguiente correlación para arrastre incipiente.

$$\psi = 0,415X_N^{2,5} \quad (7.1)$$

la cual corresponde a la expresión umbral para el movimiento incipiente de partículas en fluidos pseudoplásticos en flujos oscilatorios. Se presentaron errores de hasta 32 % para  $\psi$ , 6 % para  $\chi$  y 22 % para  $X_N$ . Del mismo modo, los datos de arrastre generalizado se correlacionan de la siguiente manera.

$$\psi = 0,2146X_N^{2,5389} \quad (7.2)$$

Finalmente, para el caso de Lennof, los datos se agrupan según diámetro en líneas verticales para cuando el fluido es agua y al aumentar la viscosidad los datos tienden a dispersarse ubicándose los datos de arrastre generalizado por sobre los de incipiente. Estos últimos presentan una correlación de datos la cual corresponde a una tendencia potencial de la forma:

$$R_* = 0,234D_*^{1,114} \quad (7.3)$$

El hecho de que los datos tiendan a agruparse en una vertical, es decir, que para un mismo  $D_*$  se tienen distintos valores de  $Re_*$ , es indicativo que el análisis de Lennoff (1982) está incompleto, siendo necesario agregar un parámetro en el análisis que de más importancia a las características del oleaje, particularmente, su frecuencia.

# Bibliografía

AYRTON, H., AND AYRTON, W. E. The origin and growth of ripple-mark. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* 84, 571 (1910), 285–310.

BAGNOLD, R. A. Motion of waves in shallow water. interaction between waves and sand bottoms. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 187, 1008 (1946), 1–18.

CARSTENS, M. R., AND NEILSON, F. M. Evolution of a duned bed under oscillatory flow. *Journal of Geophysical Research* 72, 12 (1967), 3053–3059.

CHAN, K., BAIRD, M., AND ROUND, G. Behaviour of beds of dense particles in a horizontally oscillating liquid. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* 330, 1583 (1972), 537–559.

CHHABRA, R. P., AND RICHARDSON, J. F. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann, 2011.

DARWIN, G. H. I. on the formation of ripple-mark in sand. *Proceedings of the Royal Society of London* 36, 228-231 (1883), 18–43.

DEAN, R. G., AND DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*, vol. 2. World Scientific Publishing Company, 1991.

FREDSØE, J., AND DEIGAARD, R. Mechanics of coastal sediment transport, adv. ser. *Ocean Eng* 3 (1992), 369.

FUENTES BARRERA, J. A. Estudio experimental del transporte de sedimento mediante tomógrafo en el marco de la evaluación de la contaminación de ríos por sedimento fino. memoria para optar al título de ingeniero civil en la universidad de chile.

GALVIN, C. J., AND EAGLESON, P. S. Experimental study of longshore currents on a plane beach. *MIT report R64-13 for CERC* (1964).

GENTILE, R., LANDÒ, L. R., AND SCARSI, G. Initial motion of sediment under waves: A general criterion. In *Ocean Wave Measurement and Analysis (2001)*. 2002, pp. 1436–1446.

GODDET, J. Étude du début d'entraînement des matériaux mobiles sous l'action de la

houle-application à l'étude de la couche limite oscillatoire. critère de similitude. *La Houille Blanche*, 2 (1960), 122–135.

GRANT, W. D., AND MADSEN, O. S. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 84, C4 (1979), 1797–1808.

HUNT, A. R. I. on the formation of ripplemark. *Proceedings of the Royal Society of London* 34, 220-223 (1883), 1–18.

JONSSON, I. G. Wave boundary layers and friction factors. *Coastal Engineering Proceedings* 1, 10 (1966), 9.

KANTARDGI, I. Incipency of sediment motion under combined waves and currents. *Journal of coastal research* (1992), 332–339.

KOMAR, P. D., AND MILLER, M. C. The threshold of sediment movement under oscillatory water waves. *Journal of Sedimentary Research* 43, 4 (1973).

KOMAR, P. D., AND MILLER, M. C. On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold: Reply. *Journal of Sedimentary Research* 45, 1 (1975).

LE ROUX, J. Grains in motion: A review. *Sedimentary Geology* 178, 3-4 (2005), 285–313.

LENHOFF, L. Incipient motion of particles under oscillatory flow. *Coastal Engineering Proceedings* 1, 18 (1982).

LOSADA, M. A., AND DESIRÉ, J. Incipient motion on a horizontal granular bed in non-breaking water waves. *Coastal engineering* 9, 4 (1985), 357–370.

MADSEN, O. S., AND GRANT, W. D. Quantitative description of sediment transport by waves. *Coastal Engineering Proceedings* 1, 15 (1976).

PAPHITIS, D. Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves. *Coastal Engineering* 43, 3-4 (2001), 227–245.

PEDOCCHI, F., AND GARCÍA, M. H. Ripple morphology under oscillatory flow: 1. prediction. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 114, C12 (2009).

RANCE, P., AND WARREN, N. The threshold of movement of coarse material in oscillatory flow. In *Proc., 11th Conf. on Coastal Engineering* (1968), pp. 487–491.

SEKIGUCHI, T., AND SUNAMURA, T. Effects of bed perturbation and velocity asymmetry on ripple initiation: wave-flume experiments. *Coastal Engineering* 50, 4 (2004), 231–239.

SHE, K., TRIM, L., AND POPE, D. Threshold of motion of natural sediment particles in oscillatory flows. *Journal of coastal research* (2006), 701–709.

SHIELDS, A. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. berlin, 20 p. (1936).

TAMBURRINO, A., AND VIDAL, K. Incipient motion of sediments in oscillatory flows of pseudoplastic fluids: Preliminary results. 4<sup>th</sup> international conference on heat transfer and fluid flow (htff'17),roma, italia. junio 8-10.

TANAKA, H., AND DANG, V. T. Geometry of sand ripples due to combined wave-current flows. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 122, 6 (1996), 298–3000.

TERRILE, E., RENIERS, A. J., STIVE, M. J., TROMP, M., AND VERHAGEN, H. J. Incipient motion of coarse particles under regular shoaling waves. *Coastal engineering* 53, 1 (2006), 81–92.

VIDAL, K. Estudio experimental de la condiciÓn de arrastre incipiente generada por un flujo oscilatorio con superficie libre de un fluido pseudoplÁstico. memoria para optar al título de ingeniero civil en la universidad de chile.

VINCENT, G. Contribution to the study of sediment transport on a horizontal bed due to wave action. *Coastal Engineering Proceedings* 1, 6 (1957), 20.

VOROPAYEV, S., MCEACHERN, G., BOYER, D., AND FERNANDO, H. Dynamics of sand ripples and burial/scouring of cobbles in oscillatory flow. *Applied Ocean Research* 21, 5 (1999), 249–261.

WANG, S.-Y., AND SHEN, H. W. Incipient sediment motion and riprap design. *Journal of Hydraulic Engineering* 111, 3 (1985), 520–538.

# Apéndice A

## Anexo I: Características del oleaje

### A.1. Características del oleaje

Tabla A.1: Número de experimentos inicial, final y total realizados. AI corresponde a arrastre incipiente y AG arrastre generalizado

exp	AI <sub>i</sub>	AI <sub>f</sub>	Nexp	AG <sub>i</sub>	AG <sub>f</sub>	Nexp
E1-01	1	7	6	1	5	4
E1-02	8	17	9	6	10	4
E1-03	18	29	11	11	15	4
E2-01	30	39	9	16	23	7
E2-02	40	50	10	24	30	6
E2-03	51	57	6	31	32	1
E3-01	58	63	5	33	36	3
E3-02	64	70	6	37	39	2
E3-03	71	76	5	40	42	2
E4-01	77	82	5	43	43	0
E4-02	83	88	5	44	46	2
E4-03	89	93	4	47	47	0

Tabla A.2: Características del oleaje arrastre incipiente

exp	h	R giro	S paleta	H	L	h/L	f [rpm]	w [1/s]	T [s]
1	41	6	24.1	11.39	285.60	0.14	38.6	0.64	1.55
2	41	5	19	9.15	260.40	0.16	44.8	0.75	1.34
3	38	6	22.3	8.24	298.29	0.13	38.4	0.64	1.56
4	38	5	17.5	7.47	203.28	0.19	44.1	0.74	1.36
5	35	6	20.5	11.39	271.97	0.13	40.3	0.67	1.49
6	35	5	16	6.35	212.99	0.16	49.3	0.82	1.22
7	31	6	18.1	7.84	277.39	0.11	41.3	0.69	1.45
8	41	6	24.1	6.80	285.39	0.14	29.7	0.50	2.02
9	41	5	19	8.93	262.48	0.16	39.9	0.67	1.50

10	41	4	14.3	7.96	207.73	0.20	52.5	0.88	1.14
11	38	6	22.3	4.08	293.35	0.13	33.8	0.56	1.78
12	38	5	17.5	7.20	262.29	0.14	40.3	0.67	1.49
13	38	4	13.1	9.12	168.71	0.23	58.8	0.98	1.02
14	35	6	20.5	2.52	289.28	0.12	33.1	0.55	1.81
15	35	5	16	6.41	208.12	0.17	51.7	0.86	1.16
16	31	6	18.1	4.85	253.75	0.12	44.5	0.74	1.35
17	28	6	16.3	5.24	171.24	0.16	55	0.92	1.09
18	41	6	24.1	6.6	235	0.17	25.9	0.43	2.32
19	41	5	19	6.6	185.6	0.22	30.2	0.50	1.99
20	41	4	14.3	5.42	169	0.24	37.5	0.63	1.60
21	38	6	22.3	6.83	194.57	0.20	29.7	0.50	2.02
22	38	5	17.5	5.18	201.18	0.19	37.6	0.63	1.60
23	38	4	13.1	5.42	144.123	0.26	44.7	0.75	1.34
24	35	6	20.5	6.6	170.63	0.21	33.6	0.56	1.79
25	35	5	16	4.95	177.57	0.20	38.6	0.64	1.55
26	35	4	11.9	6.83	95.63	0.37	57.9	0.97	1.04
27	31	6	18.1	5.19	169.83	0.18	35.1	0.59	1.71
28	31	5	14	9.66	208.42	0.15	56.3	0.94	1.07
29	28	6	16.3	4.24	168.84	0.17	41.6	0.69	1.44
30	41	6	24.1	9.43	164.49	0.25	28	0.47	2.14
31	41	5	19	4.72	259.37	0.16	28.1	0.47	2.14
32	41	4	14.3	3.14	293.48	0.14	31.1	0.52	1.93
33	38	6	22.3	5.55	370.93	0.10	28.4	0.47	2.11
34	38	5	17.5	6.03	383.84	0.10	38.2	0.64	1.57
35	38	4	13.1	7.24	324.89	0.12	42.8	0.71	1.40
36	35	6	20.5	2.65	424.46	0.08	32	0.53	1.88
37	35	5	16	5.55	325.37	0.11	44.3	0.74	1.35
38	35	4	11.9	3.86	259.17	0.14	49.2	0.82	1.22
39	31	6	18.1	5.55	356.00	0.09	36.5	0.61	1.64
40	41	6	24.1	7.00	417.02	0.10	26.6	0.44	2.26
41	41	5	19	1.69	479.34	0.09	29.8	0.50	2.01
42	41	4	14.3	6.51	405.04	0.10	40.9	0.68	1.47
43	38	6	22.3	5.07	369.49	0.10	31.5	0.53	1.90
44	38	5	17.5	7.24	292.36	0.13	39.6	0.66	1.52
45	35	6	20.5	6.27	356.49	0.10	34.3	0.57	1.75
46	35	5	16	5.55	396.10	0.09	36.7	0.61	1.63
47	35	4	11.9	5.07	254.63	0.14	49.2	0.82	1.22
48	31	6	18.1	7.00	363.34	0.09	39.3	0.66	1.53
49	31	5	14	2.17	361.30	0.09	40.1	0.67	1.50
50	28	6	16.3	3.62	337.21	0.08	39	0.65	1.54
51	41	6	24.1	3.92	310.88	10.46	30.6	0.51	1.96
52	41	5	19	3.62	351.48	11.33	38.7	0.65	1.55
53	41	4	14.3	2.71	370.04	15.11	43.9	0.73	1.37
54	38	6	22.3	8.12	352.64	4.68	35.3	0.59	1.70
55	38	5	17.5	2.71	262.16	14.01	45.6	0.76	1.32
56	35	6	20.5	3.01	274.92	11.61	40.6	0.68	1.48

57	41	6	24.1	7.84	383.98	5.23	40.2	0.67	1.49
58	41	5	19	13.87	416.20	0.10	52.7	0.88	1.14
59	38	6	22.3	12.06	268.52	0.14	39.6	0.66	1.52
60	38	5	17.5	9.04	292.69	0.13	50.3	0.84	1.19
61	35	6	22.3	10.25	335.65	0.10	48.2	0.80	1.24
62	31	6	18.1	9.65	310.52	0.10	50	0.83	1.20
63	47	6	27.8	14.69	314.64	0.15	39.1	0.65	1.53
64	47	5	26.3	14.69	303.27	0.15	43.8	0.73	1.37
65	44	6	26	17.53	312.75	0.14	41.2	0.69	1.46
66	44	5	20.5	12.79	269.15	0.16	48.3	0.81	1.24
67	41	6	24.1	13.27	292.84	0.14	45.8	0.76	1.31
68	38	6	22.3	12.79	274.84	0.14	46.2	0.77	1.30
69	38	5	18.5	10.42	271.99	0.14	47	0.78	1.28
70	35	5	16	15.64	297.58	0.12	53.8	0.90	1.12
71	47	6	27.8	7.11	349.74	0.13	30.3	0.51	1.98
72	44	6	26	8.53	395.36	0.11	33.9	0.57	1.77
73	44	5	20.5	7.58	326.93	0.13	40.1	0.67	1.50
74	41	6	24.1	8.15	364.94	0.11	44.7	0.75	1.34
75	41	5	19	17.06	275.88	0.15	39.8	0.66	1.51
76	38	6	22.3	3.80	410.56	0.09	31.3	0.52	1.92
77	41	6	24.1	9.96	281.20	0.15	39.2	0.65	1.53
78	41	5	19	10.64	202.92	0.20	53.3	0.89	1.13
79	38	6	22.3	17.68	173.73	0.22	48.8	0.81	1.23
80	38	5	18.5	7.55	195.36	0.19	49.8	0.83	1.20
81	35	6	20.5	12.88	181.97	0.19	47.4	0.79	1.27
82	35	5	16	6.87	177.51	0.20	57.1	0.95	1.05
83	45	6	26.6	10.71	304.93	0.15	46.7	0.78	1.28
84	45	5	25.1	8.87	273.62	0.16	49.3	0.82	1.22
85	41	6	24.1	9.71	272.66	0.15	48.6	0.81	1.23
86	41	5	19	12.22	260.61	0.16	51.3	0.86	1.17
87	38	6	22.3	6.86	290.00	0.13	46.5	0.78	1.29
88	35	6	17.4	11.72	207.62	0.17	59.3	0.99	1.01
89	47	6	27.8	9.34	333.86	0.14	46.1	0.77	1.30
90	46	6	27.2	10.27	268.29	0.17	50.2	0.84	1.20
91	43	6	25.3	9.18	302.08	0.14	47.1	0.79	1.27
92	41	6	24.1	8.72	280.83	0.15	45.7	0.76	1.31
93	38	6	22.3	10.58	293.13	0.13	47.2	0.79	1.27

Tabla A.3: Características del oleaje arrastre generalizado

exp	h	R giro	S paleta	H	L	h/L	f [rpm]	w [1/s]	T [s]
1	41	6	24.10	11.76	259.28	0.02	44.30	0.74	1.35
2	41	5	19.00	12.69	222.69	0.02	50.90	0.85	1.18
3	38	6	22.30	8.21	215.79	0.03	43.40	0.72	1.38
4	38	5	17.50	5.97	237.07	0.02	49.60	0.83	1.21

5	35	6	20.50	8.40	226.43	0.03	45.50	0.76	1.32
6	35	5	16.00	9.51	258.99	0.02	38.70	0.65	1.55
7	31	6	18.10	11.84	213.56	0.03	52.10	0.87	1.15
8	41	5	19.00	7.77	258.99	0.02	40.10	0.67	1.50
9	41	4	14.30	11.84	174.73	0.02	56.80	0.95	1.06
10	38	5	17.50	6.21	250.06	0.02	45.20	0.75	1.33
11	41	6	24.10	8.02	193.50	0.03	32.50	0.54	1.85
12	41	5	19.00	7.78	157.20	0.03	36.20	0.60	1.66
13	41	4	14.30	5.18	177.46	0.02	44.30	0.74	1.35
14	38	6	22.30	8.25	161.22	0.04	36.80	0.61	1.63
15	35	6	20.50	5.89	191.11	0.03	45.50	0.76	1.32
16	31	6	18.10	9.40	211.95	0.03	53.10	0.89	1.13
17	41	6	24.10	11.79	131.59	0.05	29.20	0.49	2.05
18	41	5	19.00	5.19	235.79	0.02	30.80	0.51	1.95
19	41	4	14.30	10.86	315.05	0.01	42.40	0.71	1.42
20	38	6	22.30	5.31	387.61	0.02	35.80	0.60	1.68
21	38	5	17.50	8.93	349.89	0.01	42.60	0.71	1.41
22	35	6	20.50	8.93	357.43	0.02	40.10	0.67	1.50
23	35	5	16.00	6.27	273.02	0.02	49.80	0.83	1.20
24	31	6	18.10	13.75	216.78	0.03	54.00	0.90	1.11
25	41	6	24.10	1.69	479.34	0.01	29.50	0.49	2.03
26	41	5	19.00	1.69	424.18	0.01	39.20	0.65	1.53
27	38	6	22.30	7.48	289.04	0.02	37.90	0.63	1.58
28	38	5	17.50	6.51	344.23	0.01	43.50	0.73	1.38
29	35	5	16.00	6.03	282.93	0.02	42.20	0.70	1.42
30	35	4	11.90	5.79	296.71	0.01	43.10	0.72	1.39
31	31	5	14.00	3.62	337.69	0.01	41.60	0.69	1.44
32	28	6	16.30	6.93	373.52	0.02	37.70	0.63	1.59
33	41	4	14.30	3.62	245.92	0.02	46.50	0.78	1.29
34	41	6	24.10	8.44	317.84	0.02	49.80	0.83	1.20
35	41	5	19.00	11.46	427.06	0.01	57.90	0.97	1.04
36	38	6	22.30	18.69	275.23	0.02	49.30	0.82	1.22
37	35	6	22.30	11.46	339.25	0.02	62.40	1.04	0.96
38	47	6	27.80	15.16	335.49	0.02	48.60	0.81	1.23
39	44	6	26.00	18.01	289.05	0.02	49.70	0.83	1.21
40	38	6	22.30	20.38	208.50	0.03	56.90	0.95	1.05
41	47	6	27.80	10.42	325.84	0.02	40.70	0.68	1.47
42	41	5	19.00	8.69	314.98	0.02	51.90	0.87	1.16
43	41	6	24.10	8.15	487.68	0.01	46.20	0.77	1.30
44	41	6	24.10	7.04	186.78	0.03	49.60	0.83	1.21
45	38	5	19.00	6.35	187.47	0.03	56.80	0.95	1.06
46	45	6	26.60	12.05	302.04	0.02	50.20	0.84	1.20
47	41	6	24.10	7.20	242.07	0.02	53.40	0.89	1.12
48	38	6	22.30	15.23	235.08	0.03	57.30	0.96	1.05
49	47	6	27.80	10.43	308.80	0.02	48.50	0.81	1.24

# Apéndice B

## Anexo II: Resultados y errores parámetros del flujo y fluido

### B.1. Características del flujo

Tabla B.1: Características del flujo y errores arrastre incipiente

exp	Um	eUm	urms[m/s]	e urms (m/s)	A[cm]	e A (cm)
1	0.0830	0.02	0.0357	0.0005	4.301	0.004
2	0.0475	0.03	0.035875	0.0005	2.121	0.004
3	0.0417	0.01	0.0197	0.0005	2.172	0.004
4	0.0637	0.01	0.0162625	0.0005	2.890	0.004
5	0.0636	0.01	0.0356	0.0005	3.156	0.004
6	0.0384	0.003	0.0196	0.0005	1.556	0.003
7	0.0627	0.002	0.0354	0.0005	3.037	0.004
8	0.0475	0.004	0.0242	0.0005	2.189	0.005
9	0.0441	0.003	0.0253	0.0005	1.892	0.004
10	0.0296	0.003	0.0166	0.0005	0.822	0.004
11	0.0391	0.005	0.0233	0.0005	1.843	0.005
12	0.0579	0.004	0.0293	0.0005	2.062	0.004
13	0.0441	0.003	0.0299	0.0005	1.350	0.003
14	0.0460	0.002	0.0288	0.0005	2.474	0.005
15	0.0401	0.004	0.0236	0.0005	1.289	0.004
16	0.0506	0.003	0.0283	0.0005	1.673	0.004
17	0.0572	0.002	0.0291	0.0005	1.386	0.004
18	0.0265	0.005	0.0081	0.004	0.923	0.04
19	0.0359	0.005	0.0052	0.004	0.230	0.04
20	0.0344	0.004	0.0085	0.004	0.319	0.03
21	0.0433	0.004	0.0065	0.004	1.142	0.04
22	0.0228	0.004	0.0079	0.004	0.301	0.03
23	0.0147	0.002	0.0071	0.004	0.195	0.03

24	0.0327	0.005	0.0056	0.004	0.268	0.04
25	0.0269	0.003	0.0071	0.004	0.230	0.03
26	0.0274	0.005	0.0059	0.004	0.579	0.03
27	0.0324	0.005	0.0105	0.004	1.472	0.03
28	0.0483	0.003	0.0171	0.004	1.585	0.03
29	0.0370	0.002	0.0123	0.004	1.557	0.03
30	0.0792	0.008	0.0387	0.0004	5.661	0.004
31	0.0648	0.008	0.027	0.0004	4.610	0.004
32	0.0628	0.005	0.0215	0.0004	4.036	0.003
33	0.0849	0.008	0.0207	0.0004	5.980	0.004
34	0.0368	0.006	0.0123	0.0004	1.926	0.003
35	0.0524	0.01	0.0287	0.0004	2.447	0.003
36	0.0485	0.006	0.0195	0.0004	3.030	0.003
37	0.0576	0.009	0.0262	0.0004	2.599	0.003
38	0.0281	0.009	0.0117	0.0004	1.143	0.003
39	0.0308	0.004	0.0166	0.0004	1.687	0.003
40	0.0400	0.004	0.0202	0.0002	1.084	0.002
41	0.0349	0.004	0.0202	0.0002	0.867	0.002
42	0.0248	0.007	0.0097	0.0002	0.331	0.002
43	0.0479	0.008	0.012	0.0002	0.465	0.002
44	0.0427	0.002	0.0239	0.0002	0.870	0.002
45	0.0356	0.01	0.0122	0.0002	0.464	0.002
46	0.0244	0.004	0.0073	0.0002	0.268	0.002
47	0.0280	0.002	0.0161	0.0002	0.530	0.002
48	0.0499	0.003	0.0313	0.0002	1.260	0.002
49	0.0392	0.003	0.0231	0.0002	0.788	0.002
50	0.0647	0.009	0.0064	0.0004	0.265	0.004
51	0.0903	0.01	0.0164	0.0004	0.407	0.003
52	0.1016	0.01	0.0419	0.0004	0.923	0.003
53	0.1048	0.007	0.0353	0.0004	1.230	0.003
54	0.0978	0.005	0.0265	0.0004	0.799	0.003
55	0.1138	0.008	0.007	0.0004	1.053	0.003
56	0.1244	0.006	0.0674	0.0008	6.191	0.006
57	0.0789	0.01	0.0507	0.0008	2.994	0.005
58	0.1199	0.008	0.0608	0.0008	6.058	0.006
59	0.1197	0.006	0.0732	0.0008	4.759	0.005
60	0.1216	0.009	0.0732	0.0008	5.044	0.005
61	0.1534	0.01	0.0746	0.0008	6.137	0.005
62	0.1206	0.025	0.0475	0.001	3.818	0.007
63	0.1612	0.005	0.0992	0.001	2.669	0.007
64	0.1787	0.006	0.1068	0.001	4.591	0.007
65	0.1474	0.004	0.0756	0.001	2.116	0.007
66	0.1678	0.004	0.0932	0.001	2.984	0.007
67	0.1401	0.007	0.0711	0.001	2.111	0.007
68	0.1299	0.008	0.0702	0.001	1.830	0.007
69	0.1236	0.004	0.0616	0.0002	2.691	0.002
70	0.1122	0.005	0.0659	0.0002	2.669	0.002

71	0.1044	0.02	0.0514	0.0002	1.724	0.002
72	0.1044	0.01	0.0545	0.0002	1.530	0.002
73	0.1292	0.004	0.0523	0.0002	1.544	0.002
74	0.1332	0.01	0.069	0.0002	2.959	0.002
75	0.1737	0.01	0.0833	0.001	8.863	0.010
76	0.0876	0.009	0.0448	0.001	3.287	0.009
77	0.1852	0.008	0.0999	0.001	7.653	0.009
78	0.1620	0.006	0.0852	0.001	6.507	0.009
79	0.2795	0.01	0.1581	0.001	11.791	0.009
80	0.1469	0.007	0.0785	0.001	5.146	0.008
81	0.1710	0.006	0.109	0.002	3.131	0.01
82	0.1365	0.004	0.0869	0.002	3.131	0.01
83	0.1787	0.005	0.1079	0.002	3.140	0.01
84	0.0958	0.002	0.0643	0.002	1.805	0.01
85	0.1442	0.002	0.0963	0.002	2.882	0.01
86	0.1767	0.006	0.105	0.002	3.340	0.01
87	0.1680	0.008	0.0873	0.01	3.004	0.09
88	0.1307	0.009	0.0639	0.01	1.642	0.08
89	0.1605	0.004	0.0992	0.01	2.919	0.08
90	0.1484	0.003	0.0958	0.01	2.966	0.09
91	0.1517	0.005	0.0882	0.01	2.552	0.08
92	0.1293	0.003	0.077	0.01	2.517	0.08
93	0.1472	0.002	0.0962	0.01	2.876	0.08

Tabla B.2: Características del flujo y errores arrastre generalizado

exp	Um [m/s]	eUm	Um [m/s]	e urms	A[cm]	e A (cm)
1	0.2110	0.01	0.211	0.0005	9.526	0.004
2	0.1626	0.006	0.163	0.0005	6.3874	0.003
3	0.0874	0.004	0.087	0.0005	4.0276	0.004
4	0.0724	0.006	0.072	0.0005	2.9183	0.003
5	0.0896	0.008	0.090	0.0005	3.9385	0.004
6	0.0753	0.004	0.075	0.0005	1.4722	0.004
7	0.0544	0.005	0.054	0.0005	1.3424	0.004
8	0.0807	0.002	0.081	0.0005	3.0868	0.004
9	0.0882	0.004	0.088	0.0005	1.8729	0.004
10	0.0700	0.003	0.070	0.0005	4.2518	0.004
11	0.0391	0.01	0.039	0.004	0.5011	0.04
12	0.0343	0.01	0.034	0.004	0.9029	0.03
13	0.0517	0.004	0.052	0.004	0.5612	0.03
14	0.0538	0.007	0.054	0.004	3.5033	0.03
15	0.0609	0.004	0.061	0.004	3.5033	0.03
16	0.1051	0.008	0.105	0.0004	7.1986	0.003
17	0.1088	0.01	0.109	0.0004	7.0649	0.003
18	0.0860	0.008	0.086	0.0004	4.0566	0.003

19	0.0927	0.003	0.093	0.0004	5.1788	0.003
20	0.0846	0.01	0.085	0.0004	3.9718	0.003
21	0.0852	0.007	0.085	0.0004	4.2494	0.003
22	0.0650	0.010	0.065	0.0004	2.6104	0.003
23	0.0736	0.007	0.074	0.0004	2.7259	0.003
24	0.0587	0.004	0.059	0.0002	2.3371	0.002
25	0.0541	0.006	0.054	0.0002	1.3424	0.002
26	0.0468	0.002	0.047	0.0002	2.5911	0.002
27	0.0670	0.009	0.067	0.0002	0.6928	0.002
28	0.0572	0.004	0.057	0.0002	1.3138	0.002
29	0.0568	0.004	0.057	0.0002	2.3155	0.002
30	0.0552	0.003	0.055	0.0002	2.3884	0.002
31	0.1335	0.03	0.134	0.0004	1.8983	0.003
32	0.1143	0.02	0.114	0.0004	1.8983	0.003
33	0.1840	0.01	0.184	0.0008	7.3896	0.005
34	0.1687	0.005	0.169	0.0008	5.8273	0.005
35	0.1640	0.005	0.164	0.0008	6.6531	0.005
36	0.1626	0.01	0.163	0.0008	5.2115	0.005
37	0.2380	0.02	0.238	0.001	8.5907	0.007
38	0.2009	0.01	0.201	0.001	5.7456	0.007
39	0.1828	0.02	0.183	0.001	6.0347	0.006
40	0.1549	0.01	0.155	0.0002	3.6032	0.002
41	0.1716	0.01	0.172	0.0002	5.5546	0.002
42	0.1795	0.007	0.180	0.0002	4.9867	0.002
43	0.2174	0.03	0.217	0.001	22.9648	0.008
44	0.2320	0.01	0.232	0.002	8.7872	0.01
45	0.1464	0.004	0.146	0.002	6.9930	0.01
46	0.2065	0.02	0.207	0.002	7.5292	0.01
47	0.2033	0.006	0.203	0.01	5.7191	0.08

## B.2. Características del fluido

Tabla B.3: Características del fluido y errores arrastre incipiente

exp	$n$	$e_n$	$k[Pa s^n]$	$e_k[Pa s^n]$	$\delta[cm]$	$e_\delta[cm]$	$\nu_{eff}[cm^2/s]$	$e_{\nu_{eff}}[cm^2/s]$
1	1	0	0.001	0	0.125	0.00004	0.01	0
2	1	0	0.001	0	0.116	0.00004	0.01	0
3	1	0	0.001	0	0.125	0.00004	0.01	0
4	1	0	0.001	0	0.117	0.00004	0.01	0
5	1	0	0.001	0	0.122	0.00004	0.01	0
6	1	0	0.001	0	0.110	0.00005	0.01	0
7	1	0	0.001	0	0.121	0.00004	0.01	0
8	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.615	0.002	0.188	0.002
9	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.525	0.002	0.183	0.002

10	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.466	0.003	0.190	0.002
11	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.576	0.002	0.187	0.002
12	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.518	0.002	0.180	0.001
13	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.423	0.002	0.175	0.001
14	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.575	0.002	0.182	0.002
15	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.459	0.003	0.182	0.002
16	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.492	0.002	0.180	0.001
17	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.435	0.002	0.173	0.001
18	0.743	0.005	0.114	0.004	1.797	0.01	1.323	0.2
19	0.743	0.005	0.114	0.004	1.463	0.01	1.077	0.3
20	0.743	0.005	0.114	0.004	1.443	0.01	1.301	0.2
21	0.743	0.005	0.114	0.004	1.719	0.01	1.458	0.2
22	0.743	0.005	0.114	0.004	1.456	0.01	1.329	0.2
23	0.743	0.005	0.114	0.004	1.340	0.01	1.337	0.2
24	0.743	0.005	0.114	0.004	1.408	0.01	1.110	0.3
25	0.743	0.005	0.114	0.004	1.336	0.01	1.149	0.2
26	0.743	0.005	0.114	0.004	1.187	0.01	1.359	0.3
27	0.743	0.005	0.114	0.004	1.453	0.01	1.235	0.1
28	0.743	0.005	0.114	0.004	1.031	0.01	0.998	0.1
29	0.743	0.005	0.114	0.004	1.288	0.01	1.149	0.1
30	1.000	0	0.001	0	0.146	0.00003	0.01	0
31	1.000	0	0.001	0	0.146	0.00003	0.01	0
32	1.000	0	0.001	0	6.480	0.00004	0.01	0
33	1.000	0	0.001	0	0.145	0.00003	0.01	0
34	1.000	0	0.001	0	0.125	0.00004	0.01	0
35	1.000	0	0.001	0	0.118	0.00004	0.01	0
36	1.000	0	0.001	0	0.137	0.00004	0.01	0
37	1.000	0	0.001	0	0.116	0.00004	0.01	0
38	1.000	0	0.001	0	0.110	0.00005	0.01	0
39	1.000	0	0.001	0	0.128	0.00004	0.01	0
40	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.816	0.002	0.295	0.002
41	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.784	0.002	0.305	0.002
42	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.806	0.002	0.334	0.002
43	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.766	0.002	0.308	0.002
44	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.651	0.002	0.280	0.002
45	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.739	0.002	0.312	0.002
46	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.740	0.002	0.335	0.003
47	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.596	0.002	0.292	0.002
48	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.641	0.002	0.269	0.002
49	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.648	0.002	0.281	0.002
50	0.762	0.001	0.0918	0.0005	1.485	0.003	1.121	0.02
51	0.762	0.001	0.0918	0.0005	1.143	0.002	0.843	0.007
52	0.762	0.001	0.0918	0.0005	0.938	0.002	0.643	0.004
53	0.762	0.001	0.0918	0.0005	1.086	0.002	0.694	0.004
54	0.762	0.001	0.0918	0.0005	0.976	0.002	0.724	0.005
55	0.762	0.001	0.0918	0.0005	1.248	0.003	1.053	0.02
56	1	0	0.001	0	0.122	0.00004	0.01	0

57	1	0	0.001	0	0.107	0.00005	0.01	0
58	1	0	0.001	0	0.123	0.00004	0.01	0
59	1	0	0.001	0	0.109	0.00005	0.01	0
60	1	0	0.001	0	0.112	0.00004	0.01	0
61	1	0	0.001	0	0.110	0.00005	0.01	0
62	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.452	0.003	0.133	0.001
63	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.415	0.003	0.126	0.001
64	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.427	0.003	0.125	0.001
65	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.398	0.003	0.128	0.001
66	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.406	0.003	0.126	0.001
67	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.408	0.003	0.128	0.001
68	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.405	0.003	0.128	0.001
69	0.691	0.002	0.171	0.002	1.475	0.004	1.098	0.01
70	0.691	0.002	0.171	0.002	1.363	0.004	1.050	0.01
71	0.691	0.002	0.171	0.002	1.292	0.004	1.115	0.01
72	0.691	0.002	0.171	0.002	1.198	0.004	1.070	0.01
73	0.691	0.002	0.171	0.002	1.293	0.004	1.109	0.01
74	0.691	0.002	0.171	0.002	1.417	0.003	1.047	0.01
75	1	0	0.001	0	0.124	0.00004	0.01	0
76	1	0	0.001	0	0.106	0.00005	0.01	0
77	1	0	0.001	0	0.111	0.00004	0.01	0
78	1	0	0.001	0	0.110	0.00005	0.01	0
79	1	0	0.001	0	0.113	0.00004	0.01	0
80	1	0	0.001	0	0.103	0.00005	0.01	0
81	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.531	0.003	0.219	0.002
82	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.528	0.004	0.229	0.003
83	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.520	0.003	0.219	0.002
84	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.534	0.004	0.243	0.003
85	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.539	0.003	0.225	0.003
86	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.467	0.004	0.216	0.002
87	0.724	0.002	0.115	0.001	0.892	0.003	0.612	0.02
88	0.724	0.002	0.115	0.001	0.893	0.004	0.667	0.03
89	0.724	0.002	0.115	0.001	0.863	0.003	0.585	0.02
90	0.724	0.002	0.115	0.001	0.884	0.003	0.595	0.02
91	0.724	0.002	0.115	0.001	0.879	0.003	0.607	0.02
92	0.724	0.002	0.115	0.001	0.874	0.004	0.630	0.03
93	0.724	0.002	0.115	0.001	0.865	0.003	0.590	0.02

Tabla B.4: Características del fluido y errores arrastre generalizado.

exp	$n$	$e_n$	$k[Pa s^n]$	$e_k[Pa s^n]$	$\delta[cm]$	$e_\delta[cm]$	$\nu_{eff}[cm^2/s]$	$e_{\nu_{eff}}[cm^2/s]$
1	1	0	0.001	0	0.116	0.0002	0.01	0
2	1	0	0.001	0	0.109	0.0002	0.01	0
3	1	0	0.001	0	0.118	0.0002	0.01	0
4	1	0	0.001	0	0.110	0.0002	0.01	0

5	1	0	0.001	0	0.115	0.0002	0.01	0
6	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.526	0.003	0.179	0.003
7	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.458	0.002	0.183	0.003
8	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.526	0.003	0.185	0.003
9	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.436	0.002	0.180	0.003
10	0.887	0.002	0.0219	0.0002	0.483	0.002	0.177	0.002
11	0.743	0.005	0.1136	0.004	1.666	0.03	1.503	1
12	0.743	0.005	0.1136	0.004	1.442	0.03	1.254	0.5
13	0.743	0.005	0.1136	0.004	1.504	0.03	1.387	0.7
14	0.743	0.005	0.1136	0.004	1.172	0.02	0.998	0.2
15	0.743	0.005	0.1136	0.004	1.048	0.02	0.971	0.2
16	1	0	0.001	0	0.143	0.0002	0.01	0
17	1	0	0.001	0	0.140	0.0002	0.01	0
18	1	0	0.001	0	0.119	0.0002	0.01	0
19	1	0	0.001	0	0.129	0.0002	0.01	0
20	1	0	0.001	0	0.119	0.0002	0.01	0
21	1	0	0.001	0	0.122	0.0002	0.01	0
22	1	0	0.001	0	0.110	0.0002	0.01	0
23	1	0	0.001	0	0.105	0.0002	0.01	0
24	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.768	0.003	0.290	0.004
25	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.667	0.003	0.291	0.004
26	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.665	0.003	0.279	0.004
27	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.640	0.003	0.297	0.004
28	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.646	0.003	0.294	0.004
29	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.614	0.003	0.271	0.003
30	0.863	0.001	0.0334	0.0002	0.624	0.003	0.270	0.003
31	0.762	0.001	0.0918	0.0005	1.101	0.004	0.761	0.02
32	0.762	0.001	0.0918	0.0005	1.155	0.004	1.034	0.05
33	1	0	0.001	0	0.110	0.0002	0.01	0
34	1	0	0.001	0	0.102	0.0002	0.01	0
35	1	0	0.001	0	0.110	0.0002	0.01	0
36	1	0	0.001	0	0.098	0.0003	0.01	0
37	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.403	0.003	0.131	0.002
38	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.389	0.003	0.125	0.002
39	0.932	0.002	0.0156	0.0002	0.362	0.002	0.124	0.002
40	0.691	0.002	0.171	0.002	1.264	0.008	1.084	0.04
41	0.691	0.002	0.171	0.002	0.995	0.007	0.857	0.03
42	0.691	0.002	0.171	0.002	1.108	0.007	0.945	0.04
43	1	0	0.001	0	0.103	0.000	0.01	0
44	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.515	0.004	0.222	0.006
45	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.504	0.004	0.226	0.006
46	0.805	0.002	0.0396	0.0004	0.471	0.004	0.212	0.006
47	0.724	0.002	0.115	0.001	0.867	0.005	0.607	0.08

# Apéndice C

## Anexo III: Parámetros y errores presentación de resultados

### C.1. Régimen de flujo

Tabla C.1: Parámetros régimen del flujo arrastre incipiente

exp	Re p	e Re	Re w	e Rw	KC	e KC
1	45.65	12	3570.10	3	78.20	2
2	26.13	17	1007.90	2	38.57	0.8
3	22.94	3	906.08	2	39.50	0.8
4	35.05	4	1841.93	2	52.55	1
5	34.97	6	2006.77	2	57.38	1
6	21.09	2	596.72	1	28.29	0.6
7	34.50	1	1905.17	2	55.23	1
8	1.39	0.1	55.47	0.5	39.80	0.8
9	1.32	0.1	45.56	0.4	34.39	0.7
10	0.86	0.1	12.83	0.1	14.94	0.3
11	1.15	0.2	38.55	0.3	33.51	0.7
12	1.77	0.1	66.34	0.6	37.48	0.8
13	1.38	0.1	33.96	0.3	24.54	0.5
14	1.39	0.1	62.33	0.5	44.98	0.9
15	1.21	0.1	28.41	0.3	23.44	0.5
16	1.55	0.1	47.18	0.4	30.42	0.6
17	1.82	0.1	45.79	0.4	25.19	0.5
18	0.11	0.0	1.85	0.2	16.79	0.8
19	0.18	0.1	0.77	0.3	4.17	0.7
20	0.15	0.03	0.84	0.1	5.80	0.6
21	0.16	0.03	3.39	0.6	20.77	0.8
22	0.09	0.02	0.52	0.1	5.46	0.6
23	0.06	0.01	0.21	0.0	3.54	0.6

24	0.16	0.05	0.79	0.2	4.87	0.7
25	0.13	0.03	0.54	0.1	4.17	0.6
26	0.11	0.03	1.17	0.2	10.53	0.5
27	0.14	0.03	3.87	0.4	26.76	0.8
28	0.27	0.03	7.67	0.6	28.81	0.8
29	0.18	0.02	5.02	0.5	28.31	0.8
30	23.77	2	4486.01	3	188.69	11
31	19.43	2	2986.11	2	153.67	9
32	18.83	2	2533.06	2	134.54	8
33	25.48	3	5078.66	3	199.35	12
34	11.03	2	708.28	1	64.19	4
35	15.71	3	1281.06	2	81.56	5
36	14.54	2	1469.08	2	101.00	6
37	17.27	3	1495.73	2	86.62	5
38	8.44	3	321.37	0.8	38.10	2
39	9.24	1	519.35	1	56.23	3
40	0.41	0.04	14.69	0.1	36.15	2
41	0.34	0.04	9.91	0.1	28.89	2
42	0.22	0.1	2.46	0.0	11.02	0.7
43	0.47	0.1	7.23	0.1	15.49	0.9
44	0.46	0.0	13.30	0.1	28.99	2
45	0.34	0.1	5.30	0.0	15.47	0.9
46	0.22	0.04	1.95	0.0	8.95	0.5
47	0.29	0.02	5.09	0.0	17.67	1
48	0.56	0.03	23.39	0.2	41.99	3
49	0.42	0.03	11.03	0.1	26.28	2
50	0.17	0.02	1.53	0.0	8.82	0.5
51	0.32	0.04	4.36	0.0	13.56	0.8
52	0.47	0.05	14.58	0.1	30.77	2
53	0.45	0.03	18.58	0.1	40.99	2
54	0.41	0.02	10.80	0.1	26.64	2
55	0.32	0.02	11.38	0.2	35.10	2
56	87.11	4	7704.23	7	88.44	3
57	55.22	10	2361.79	4	42.77	2
58	83.96	5	7266.60	7	86.54	3
59	83.78	4	5695.48	6	67.98	2
60	85.10	7	6132.18	7	72.06	3
61	107.39	7	9414.54	8	87.67	3
62	6.35	1	346.51	4	54.54	2
63	8.98	0.3	342.21	4	38.12	1
64	9.98	0.3	654.40	7	65.58	2
65	8.08	0.3	244.15	3	30.22	1
66	9.32	0.2	397.28	4	42.63	2
67	7.64	0.4	230.31	2	30.16	1
68	7.08	0.5	185.07	2	26.14	0.9
69	0.79	0.0	30.28	0.3	38.44	1
70	0.75	0.0	28.53	0.3	38.12	1

71	0.66	0.1	16.15	0.2	24.63	0.9
72	0.68	0.1	14.93	0.1	21.85	0.8
73	0.82	0.0	17.98	0.2	22.05	0.8
74	0.89	0.1	37.63	0.3	42.27	1
75	173.72	13	15397.36	18	88.63	3
76	87.59	9	2878.61	8	32.87	1
77	185.20	8	14173.16	17	76.53	3
78	162.02	6	10542.05	15	65.07	2
79	279.46	10	32951.95	26	117.91	4
80	146.93	7	7561.27	12	51.46	2
81	7.79	0.3	243.91	3	31.31	1
82	5.96	0.2	186.51	2	31.31	1
83	8.16	0.3	256.29	3	31.40	1
84	3.94	0.1	71.02	0.9	18.05	0.6
85	6.39	0.1	184.30	2	28.82	1
86	8.19	0.3	273.70	3	33.40	1
87	2.75	0.2	82.47	4	30.04	1
88	1.96	0.2	32.18	2	16.42	1
89	2.74	0.1	80.08	4	29.19	1
90	2.50	0.1	74.00	3	29.66	1
91	2.50	0.1	63.73	3	25.52	1
92	2.05	0.1	51.68	3	25.17	1
93	2.49	0.1	71.69	3	28.76	1

Tabla C.2: Parámetros régimen del flujo arrastre generalizado

exp	Re p	e Re	Re w	eRe w	KC	e KC
1	116.05	7	20099.77	8	173.20	3
2	89.41	3	10383.40	5	116.14	2
3	48.07	2	3520.17	3	73.23	1
4	39.81	3	2112.15	2	53.06	1
5	49.28	4	3528.86	3	71.61	1
6	2.32	0.2	62.07	5	26.77	1
7	1.64	0.2	40.01	4	24.41	0.5
8	2.40	0.2	134.92	12	56.12	1
9	2.69	0.3	91.64	10	34.05	1
10	2.18	0.2	168.63	16	77.31	2
11	0.14	0.1	1.30	1	9.11	1
12	0.15	0.1	2.47	2	16.42	1
13	0.20	0.2	2.09	2	10.20	1
14	0.30	0.2	18.88	14	63.70	1
15	0.34	0.3	21.97	19	63.70	1
16	31.53	2	7565.76	4	239.95	14
17	32.64	4	7686.65	4	235.50	14
18	25.80	2	3488.68	2	135.22	8

19	27.81	1	4800.72	3	172.63	10
20	25.38	3	3360.17	2	132.39	8
21	25.56	2	3620.47	3	141.65	8
22	19.50	3	1696.79	2	87.01	5
23	22.08	2	2006.28	2	90.86	5
24	0.61	0.1	47.29	3	77.90	5
25	0.56	0.1	24.98	2	44.75	3
26	0.50	0.0	43.43	3	86.37	5
27	0.68	0.1	15.61	1	23.09	1
28	0.58	0.1	25.60	2	43.79	3
29	0.63	0.1	48.49	4	77.18	5
30	0.61	0.1	48.83	4	79.61	5
31	0.53	0.1	33.29	5	63.28	4
32	0.33	0.1	20.98	4	63.28	4
33	128.80	8	13596.79	10	105.57	3
34	118.09	4	9830.64	8	83.25	2
35	114.80	4	10911.16	9	95.04	3
36	113.82	9	8473.96	8	74.45	2
37	12.68	1	1556.57	109	122.72	4
38	11.22	1	921.02	65	82.08	2
39	10.30	1	887.96	68	86.21	2
40	1.00	0.4	51.49	20	51.47	1
41	1.40	1	111.20	51	79.35	2
42	1.33	1	94.70	40	71.24	2
43	217.40	27	49925.45	18	229.65	7
44	10.47	3	919.84	301	87.87	3
45	6.47	2	452.31	154	69.93	2
46	9.76	4	734.99	262	75.29	2
47	3.35	1	191.53	79	57.19	2

## C.2. Goddet y Goddet modificado

Tabla C.3: Parámetros de Goddet, Goddet modificado y errores

exp	ds[mm]	e ds [mm]	chi	e Chi	X	e X	XN	eXn
1	0.55	0.01	58.93	16	0.441	0.009	6.32	0.6
2	0.55	0.01	102.94	65	0.475	0.01	8.28	2
3	0.55	0.01	117.27	17	0.440	0.009	8.02	0.4
4	0.55	0.01	76.75	10	0.472	0.009	7.41	0.3
5	0.55	0.01	76.92	13	0.451	0.009	7.09	0.4
6	0.55	0.01	127.54	12	0.499	0.01	9.36	0.3
7	0.55	0.01	77.98	4	0.456	0.009	7.21	0.1
8	0.55	0.01	5.49	0.5	0.089	0.002	2.76	0.08
9	0.55	0.01	6.05	0.5	0.105	0.002	3.29	0.1

10	0.55	0.01	8.72	0.9	0.118	0.002	4.32	0.2
11	0.55	0.01	6.69	0.9	0.095	0.002	3.15	0.2
12	0.55	0.01	4.70	0.4	0.106	0.002	3.02	0.09
13	0.55	0.01	6.32	0.5	0.130	0.003	4.03	0.1
14	0.55	0.01	5.83	0.3	0.096	0.002	2.96	0.06
15	0.55	0.01	6.71	0.7	0.120	0.002	3.88	0.1
16	0.55	0.01	5.38	0.4	0.112	0.002	3.33	0.08
17	0.55	0.01	4.94	0.3	0.127	0.003	3.56	0.07
18	0.55	0.01	1.40	0.3	0.038	0.001	1.59	0.1
19	0.55	0.01	1.26	0.4	0.038	0.001	1.33	0.2
20	0.55	0.01	1.09	0.2	0.038	0.001	1.46	0.09
21	0.55	0.01	0.77	0.2	0.032	0.001	1.18	0.08
22	0.55	0.01	1.61	0.4	0.038	0.001	1.69	0.1
23	0.55	0.01	2.49	0.5	0.041	0.001	2.14	0.2
24	0.55	0.01	1.35	0.4	0.039	0.001	1.44	0.2
25	0.55	0.01	1.58	0.4	0.041	0.001	1.65	0.1
26	0.55	0.01	1.31	0.3	0.046	0.001	1.96	0.2
27	0.55	0.01	1.22	0.2	0.038	0.001	1.46	0.1
28	0.55	0.01	1.02	0.1	0.053	0.001	1.66	0.07
29	0.55	0.01	1.15	0.1	0.043	0.001	1.53	0.07
30	0.3	0.02	18.36	3	0.205	0.01	3.69	0.2
31	0.3	0.02	22.47	4	0.205	0.01	3.97	0.2
32	0.3	0.02	23.19	3	0.216	0.01	4.22	0.2
33	0.3	0.02	17.14	3	0.206	0.01	3.63	0.2
34	0.3	0.02	39.57	8	0.239	0.01	5.64	0.4
35	0.3	0.02	27.79	6	0.253	0.02	5.28	0.4
36	0.3	0.02	30.02	5	0.219	0.01	4.69	0.3
37	0.3	0.02	25.28	5	0.258	0.02	5.19	0.4
38	0.3	0.02	51.76	18	0.272	0.02	7.03	0.9
39	0.3	0.02	47.27	8	0.234	0.01	5.87	0.4
40	0.3	0.02	1.23	0.2	0.037	0.002	1.59	0.08
41	0.3	0.02	1.37	0.2	0.038	0.002	1.76	0.1
42	0.3	0.02	1.75	0.5	0.037	0.002	1.99	0.2
43	0.3	0.02	0.99	0.2	0.039	0.002	1.61	0.1
44	0.3	0.02	1.22	0.2	0.046	0.003	1.91	0.08
45	0.3	0.02	1.31	0.4	0.041	0.002	1.87	0.2
46	0.3	0.02	1.79	0.4	0.041	0.002	2.18	0.2
47	0.3	0.02	1.78	0.3	0.050	0.003	2.46	0.1
48	0.3	0.02	1.08	0.1	0.047	0.003	1.81	0.08
49	0.3	0.02	1.32	0.2	0.046	0.003	1.98	0.1
50	0.3	0.02	0.15	0.04	0.005	0.001	0.79	0.05
51	0.3	0.02	0.19	0.03	0.026	0.002	0.82	0.05
52	0.3	0.02	0.22	0.03	0.032	0.002	0.88	0.05
53	0.3	0.02	0.20	0.03	0.028	0.002	0.77	0.04
54	0.3	0.02	0.21	0.03	0.031	0.002	0.89	0.04
55	0.3	0.02	0.12	0.02	0.024	0.001	0.75	0.03
56	0.7	0.02	63.67	5	0.573	0.02	6.55	0.2

57	0.7	0.02	100.44	19	0.656	0.02	8.80	0.6
58	0.7	0.02	66.06	6	0.569	0.02	6.59	0.2
59	0.7	0.02	66.20	6	0.641	0.02	7.43	0.2
60	0.7	0.02	65.18	7	0.627	0.02	7.23	0.3
61	0.7	0.02	51.65	5	0.639	0.02	6.79	0.2
62	0.7	0.02	4.94	1	0.155	0.006	3.38	0.3
63	0.7	0.02	3.91	0.3	0.169	0.006	3.25	0.09
64	0.7	0.02	3.54	0.3	0.164	0.006	3.05	0.08
65	0.7	0.02	4.21	0.3	0.176	0.006	3.52	0.09
66	0.7	0.02	3.74	0.3	0.172	0.006	3.28	0.09
67	0.7	0.02	4.40	0.4	0.171	0.006	3.50	0.1
68	0.7	0.02	4.75	0.5	0.173	0.006	3.62	0.1
69	0.7	0.02	0.58	0.05	0.047	0.002	0.82	0.02
70	0.7	0.02	0.67	0.06	0.051	0.002	0.90	0.03
71	0.7	0.02	0.68	0.1	0.054	0.002	1.00	0.06
72	0.7	0.02	0.71	0.08	0.058	0.002	1.06	0.04
73	0.7	0.02	0.55	0.04	0.054	0.002	0.92	0.02
74	0.7	0.02	0.57	0.06	0.049	0.002	0.82	0.03
75	1	0.03	93.08	10	0.808	0.03	7.26	0.3
76	1	0.03	184.62	23	0.943	0.03	10.76	0.5
77	1	0.03	87.31	7	0.898	0.03	7.89	0.2
78	1	0.03	99.80	8	0.911	0.03	8.38	0.2
79	1	0.03	57.86	5	0.889	0.03	6.76	0.2
80	1	0.03	110.05	9	0.976	0.03	9.29	0.3
81	1	0.03	4.31	0.3	0.188	0.007	2.30	0.06
82	1	0.03	5.17	0.4	0.189	0.007	2.54	0.07
83	1	0.03	4.13	0.3	0.192	0.007	2.31	0.06
84	1	0.03	6.93	0.5	0.187	0.007	2.90	0.07
85	1	0.03	4.97	0.4	0.185	0.007	2.42	0.06
86	1	0.03	4.25	0.3	0.214	0.008	2.57	0.07
87	1	0.03	1.57	0.1	0.112	0.004	1.43	0.05
88	1	0.03	1.86	0.2	0.112	0.004	1.60	0.06
89	1	0.03	1.72	0.1	0.116	0.004	1.47	0.04
90	1	0.03	1.83	0.1	0.113	0.004	1.49	0.04
91	1	0.03	1.75	0.2	0.114	0.004	1.50	0.04
92	1	0.03	1.99	0.2	0.114	0.004	1.61	0.05
93	1	0.03	1.86	0.1	0.116	0.004	1.52	0.04