



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

CARACTERÍSTICAS DE FORMAS DE FONDO GENERADAS EN UN DUCTO A
PRESIÓN DEBIDO AL FLUJO EN RÉGIMEN LAMINAR DE UN FLUIDO
PSEUDOPLÁSTICO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

ALEX EDUARDO GARCÉS CATALÁN

PROFESOR GUÍA:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CHRISTIAN IHLE BASCUÑAN
YARKO NIÑO CAMPOS

Este trabajo ha sido financiado por FONDECYT a través del proyecto de investigación N°1130910 y la beca de Magister en Chile, CONICYT- PCHA/MagísterNacional/2014 - 22141496.

SANTIAGO DE CHILE
2017

**Resumen de la tesis para optar al
Título de Ingeniero Civil y Grado de Magíster
en Ciencias de la Ingeniería, Mención Recursos
y Medio Ambiente Hídrico
Por: Alex Garcés Catalán
Fecha: 20/01/2017
Prof. Guía: Sr. Aldo Tamburrino Tavantzis**

**CARACTERÍSTICAS DE FORMAS DE FONDO GENERADAS EN UN DUCTO A PRESIÓN
DEBIDO AL FLUJO EN RÉGIMEN LAMINAR DE UN FLUIDO PSEUDOPLÁSTICO**

Las formas de fondo son ondas sedimentarias con una cierta periodicidad espacial y geometría definida. Su presencia condiciona la resistencia hidráulica y el transporte de sedimentos, por lo que resulta importante ser capaces de conocer bajo qué condiciones se forman y cuantificar sus características.

En el presente trabajo se exponen resultados de un estudio experimental, donde se estudian las características de las ondas sedimentarias que se generan debido al flujo en presión y régimen laminar, de un fluido pseudoplástico en una tubería de sección cuadrada. La característica pseudoplástica del fluido busca reproducir el comportamiento no Newtoniano que adquieren algunas mezclas de agua con sedimento fino. Además del caudal, la instalación experimental permite controlar la pendiente de la tubería.

Para la caracterización de las formas de fondo, se utiliza un sistema óptico de medición no intrusivo basado en un algoritmo conocido como perfilometría por transformada de Fourier, el cual fue corregido dada la refracción del haz de luz al entrar en la tubería. El método es capaz de medir características geométricas de la onda y su celeridad, a partir de lo cual es posible estimar el gasto sólido de fondo.

Los principales resultados obtenidos de la investigación son: (1) La caracterización geométrica y temporal de las formas de fondo. Se encontró que las formas de fondo disminuyen su longitud para contrapendiente y aumentan su longitud para los casos en pendiente a favor, respecto de la condición horizontal. Además, para el rango de adimensionales estudiado, se obtuvo un crecimiento sostenido de la amplitud de las formas de fondo con el aumento de un número de Reynolds modificado. (2) La curva ajustada por Mantz en el diagrama de Shields sigue siendo válida si se utiliza un número de Reynolds de la partícula modificado que considera la viscosidad efectiva del fluido pseudoplástico y que extrae el efecto de pared. (3) Del estudio del factor de fricción asociado al lecho se demuestra y cuantifica el efecto de la forma de fondo, la cual influye en las pérdidas de energía aún en régimen laminar. Es decir, a pesar de que en régimen laminar no existe rugosidad hidrodinámica asociada al lecho de partículas, el factor de fricción asociado al lecho aumenta en presencia de formas de fondo, efecto que además depende de la pendiente de la tubería.

A mis hermosos padres...

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi profesor Guía Aldo Tamburrino a quien considero el principal responsable de haber elegido esta excelente carrera. Como alumno, ayudante, auxiliar y tesista fue siempre un agrado trabajar con él, gracias por todo el conocimiento entregado. También a los profes de mi comisión, Yarko Niño y Christian Ihle por sus cursos y los comentarios entregados en esta tesis. Agradezco, además, el financiamiento entregado por FONDECYT a través del proyecto de investigación N°1130910 y la beca de Magíster en Chile, CONICYT-PCHA/MagísterNacional/2014 - 22141496, por permitirme llevar a cabo esta investigación.

A mi querida Jacqui, la mami del tercer piso, quien siempre preocupada, alentaba a seguir dando cara y nos tiraba las orejas cuando el carrete se apoderaba de la semana y de los cabros. A Moni, Pati, Vivi, Isabel, don Juan, Manuel, Geovanni, Alvaro, Roberto, Pato y Segundo, que siempre amables, le dan vida a Civil y de quienes me encariñé mucho en estos años.

Al gran e histórico CEIC “Creando comunidad”: Mancini, Dani, Cami, Cubo y GZ quienes siempre fieles a nuestro lema: “Pan y Circo”, revivimos el alma de los tradicionales carretes de civil y las tardes de terremotos. Al resto de los cabros de la U: los Donoso, Montse, Peter, Peter Rock, Williño y muchos otros, por todas esas tardes de terraceo. A Carlitos Calvo por su incansable amor por la ciencia. Mención especial a Juan Carlos que cada semestre me entregaba el archivador con todo lo que necesitaba saber para el próximo semestre, cuánto me simplificaste la vida compadre!

A la B!A, por ser mi familia santiaguina, la casa donde viví todo el pregrado y me entregó amistades que estoy seguro, perdurarán por siempre. A mis amigos Consu, Kitty, Christian, Fabian, Klaus, Membri, Juan Carlos, Alex, Largo, Tuto, Schlatter y Chifle.

Quiero agradecer especialmente a quienes me acompañaron en los últimos años con ese color especial que los caracteriza: Gerardo, Pinolio, Edi, Rolo, Fepo, Sotelius y OSS. No es fácil encontrar personas conectadas a tan loca frecuencia. Que manera de dar la vida cabros.. Son simplemente lo más grande.

Finalmente quiero agradecer a mi familia, a mis padres por tantos años de esfuerzo, me siento orgulloso de ser su hijo. Estoy profundamente agradecido de todo el amor que nos han entregado a Andreita y a mí. A mi hermanita por su constante apoyo y cariño, te quiero mucho hermanita :)

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Organización de la tesis	4
2. Marco Teórico	5
2.1. Revisión bibliográfica	5
2.1.1. Formas de fondo	5
2.1.2. Otras instalaciones experimentales	8
2.2. Parámetros adimensionales	10
2.3. Sistema de Medición	13
2.3.1. Corrección por refracción	14
3. Metodología	16
3.1. Diseño experimental	16
3.1.1. Tubería	17
3.1.2. Sensores de presión	17
3.1.3. Sistema de Medición	17
3.2. Análisis de datos experimentales	19
3.2.1. Pendiente de la tubería	19
3.2.2. Conjunto de experimentos	20
3.2.3. Efecto de pared	21
3.2.4. Corrección por pendiente	24
3.2.5. Arrastre de sedimentos	25
4. Resultados	29
4.1. Geometría y tridimensionalidad	30
4.2. Periodicidad de las formas de fondo	32
4.3. Factor de fricción del lecho	35
4.4. Amplitud de las dunas	39
4.5. Arrastre incipiente	40
4.6. Celeridad de la onda	42
4.7. Transporte de sedimentos	43
5. Conclusiones	47
Bibliografía	50
Anexos	53
Anexo A.	54
A.1. Estructura tramo de estudio	55

Anexo B.	56
B.1. Mecanismo de transporte de fondo	57
Anexo C.	59
C.1. Escalamiento inercial	60
Anexo D. Experimentos en agua	63
D.1. Descripción cualitativa	64
D.2. Engelund	65
D.3. Einstein-Barbarossa	65
Anexo E. Metodologías	79
E.1. Detección de amplitudes	80
E.2. Detección de celeridades	81
E.3. Gasto sólido de fondo	83
E.4. Propagación de errores	85
Anexo F. Tablas de resultados experimentales	89
F.1. Experimentos con solución de CMC en agua como fluido	90
F.2. Experimentos con agua como fluido	90
Anexo G. Artículo en XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HI- DRÁULICA	106
Anexo H. Artículo en XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HI- DRÁULICA	121

Índice de figuras

2.1.	Esquema y variables del sistema FTP (Cobelli et al., 2009).	13
2.2.	Corrección por refracción al pasar a otro medio.	15
3.1.	Esquema de la instalación experimental, circuitos 1 y 2.	16
3.2.	Comparación entre la simulación con el software COMSOL y los resultados experimentales con agua de la pérdida unitaria del plano de carga, J , para distintos caudales.	18
3.3.	Convención signo para pendiente de la tubería.	19
3.4.	Sección en movimiento	27
4.1.	Caracterización geométrica de las formas de fondo. Las partículas corresponden a arena entre $600\mu\text{m}$ y $800\mu\text{m}$, sin pendiente y un fluido pseudoplástico caracterizado por un índice de flujo $n=0.69$ y coeficiente de consistencia $K=0.23\text{ Pa s}^n$. Se expone además el perfil longitudinal a lo largo del eje central de la tubería.	31
4.2.	Comparación de la geometría de dunas en pendientes $i=-16\%$ e $i=16.8\%$ para $Re_{lecho}^{MR}=77$	32
4.3.	Diferencia de altura media registrada dependiendo del perfil medido. La imagen corresponde a $Re_{lecho}^{MR}=122$ para la pendiente -7.5% . $b/2$ corresponde al eje central de la tubería, $3b/4$ corresponde un eje a 13mm de la pared de acrílico lateral izquierda en el sentido de flujo y $12b/13$ a un eje a 4mm de la misma pared de la tubería. El sentido de flujo es de izquierda a derecha.	33
4.4.	Registro de la altura del lecho en el centro de la zona de medición FTP para distintos números de Reynolds asociados al lecho, modificados para fluido pseudoplástico, Re_{lecho}^{MR}	34
4.5.	Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho}^{MR} y el factor de fricción asociado al lecho f_{lecho} , para las cinco pendientes ensayadas de la tubería	37
4.6.	Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho}^{MR} y el cociente entre el factor de fricción asociado al lecho f_{lecho} y el factor de fricción asociado a pared lisa para el mismo número de Reynolds modificado $f_{Haldenwang}$	38
4.7.	Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho}^{MR} y el cociente entre el factor de fricción asociado al lecho f_{lecho} y el factor de fricción asociado a pared lisa para el mismo número de Reynolds modificado $f_{Haldenwang}$	39
4.8.	Relación entre la amplitud de onda adimensional y el Reynolds del flujo asociado al lecho.	40

4.9.	Diagrama de Shields. Esfuerzo de corte adimensional modificado por pendiente en función del número de Reynolds de la partícula asociado al lecho. La recta corresponde a un tramo del diagrama de Shields. En esta figura, los símbolos vacíos indican que no existe movimiento de las partículas que conforman el lecho, símbolos azules corresponden a la condición de arrastre incipiente, y símbolos negros son casos donde existe arrastre de fondo generalizado y, en su mayoría, formas de fondo. Los datos asociados a los símbolos negros son resultado de la geometría de fondo caracterizada con la técnica de medición FTP.	41
4.10.	Relación entre la celeridad adimensional C_b y el exceso de esfuerzo de corte adimensional por el esfuerzo de corte adimensional, asociados al lecho y modificados por pendiente. La banda de error de uno de los datos en pendiente horizontal es notablemente extendida sólo por tratarse de un gráfico log-log.	42
4.11.	Relación entre los gastos sólidos de fondo determinados según las distintas metodologías. La recta negra grafica la condición $q_* = q_{*2}$ con el fin de facilitar la comparación. Como en la pendiente $i = -7.5\%$ se tiene un solo dato, la pendiente de la recta correspondiente se calculó como el promedio de las pendientes de las rectas asociadas a las pendientes $i = 0\%$ e $i = -16\%$	44
4.12.	Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y el gasto sólido de fondo adimensional q_*	46
A.1.	Instalación experimental	55
B.1.	Función densidad de probabilidad de erosión, p_e y depositación, p_d de las partículas sobre formas de fondo. Además se muestra la función densidad de probabilidad neta, $p_e - p_d$. (Niño et al., 2002).	57
B.2.	Esquema conceptual del transporte de sedimento observado en los ensayos	58
C.1.	Gasto sólido de fondo adimensionalizado según el término inercial. Los datos en negros representan el gasto sólido calculado en base a la primera metodología (estimando el avance de la duna considerando su geometría) y los datos en gris los resultados de la segunda metodología (calculado en base a la amplitud y celeridad del frente de la duna)	60
C.2.	Gasto sólido de fondo adimensionalizado según el término inercial	62
D.1.	Caracterización geométrica de las formas de fondo. Las partículas corresponden a arena entre 600 y 800 μm , sin pendiente y agua como fluido. Se expone además el perfil longitudinal a lo largo del eje central de la tubería.	65
D.2.	Comparación de la geometría de dunas en pendientes $i = -15.5\%$ y $i = 16.9\%$ para $Re_{lecho} = 15000$	66
D.3.	Diferencia de altura media registrada dependiendo del perfil medido. La imagen corresponde a $Re_{lecho} = 13000$ para la tubería en orientación horizontal. $b/2$ corresponde al eje central de la tubería, $3b/4$ corresponde un eje a 13 mm de la pared de acrílico lateral izquierda en el sentido de flujo y $12b/13$ a un eje a 4 mm de la misma pared de la tubería. El sentido de flujo es de izquierda a derecha.	66

D.4. Registro de la altura del lecho en el centro de la zona de medición FTP. La imagen corresponde a $Re_{lecho}^{MR} = 136$ para la pendiente -7.5%	67
D.5. Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho} y el factor de fricción asociado al lecho f'_{lecho} , para las cinco pendientes ensayadas de la tubería	68
D.6. Esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho total en función del Reynolds de la partícula asociado al lecho	69
D.7. Diagrama de Shields. Esfuerzo de corte adimensional asociado a la rugosidad hidrodinámica generada por los granos en función del número de Reynolds de la partícula asociado al lecho. La curva negra corresponde a un tramo del diagrama de Shields. En esta figura, los símbolos vacíos indican que no existe movimiento de las partículas que conforman el lecho, símbolos grises corresponden a la condición de arrastre incipiente, y símbolos negros son casos donde existe arrastre de fondo generalizado y, en su mayoría, formas de fondo. Los datos asociados a los símbolos negros son resultado de la geometría de fondo caracterizada con la técnica de medición FTP.	70
D.8. Esfuerzo de corte asociado a la forma del lecho en función del número de Reynolds de la partícula asociado al lecho	71
D.9. Engelund	72
D.10. Relación entre la amplitud de onda adimensional y el Reynolds del flujo asociado al lecho	73
D.11. Relación entre la amplitud de onda adimensional y el Reynolds del flujo asociado al lecho	74
D.12. Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y la celeridad adimensional C_b	75
D.13. Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y la celeridad adimensional C_b	76
D.14. Relación entre los gastos sólidos determinados según las distintas metodologías. La recta grafica la condición $q_* = q_{*2}$ con el fin de facilitar la comparación.	77
D.15. Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y el gasto sólido de fondo adimensional q_*	78
E.1. Detección de amplitudes	80
E.2. Seguimiento del frente de la duna	81
E.3. Distribución de celeridades instantáneas	82
E.4. Distribución de celeridades instantáneas	82
E.5. Perfil transversal del gasto sólido de fondo para un tiempo y duna dada	83
E.6. Perfil transversal del gasto sólido de fondo para un tiempo y duna dada	84

1. Introducción

1.1. Motivación

Actualmente Chile figura como una potencia en la industria minera. El transporte hidráulico de sólidos en tuberías es una técnica ampliamente utilizada para impulsar los recursos extraídos como una mezcla del material obtenido (sólidos) con agua. A esta mezcla se le llama comúnmente concentrado o pulpa. De igual forma los desechos, llamados relave, son transportados a zonas de depositación por medio de sistemas de tuberías. A pesar de que el agua tiene un comportamiento reológico Newtoniano, cuando este fluido transporta sólidos, el comportamiento reológico de la mezcla, varía en función de la concentración de partículas finas (Krieger & Dougherty, 1959). Este cambio es consecuencia de la granulometría extendida de las partículas sólidas. Para el caso de suspensiones granulares de sedimento fino en agua, se tiene que interacciones del tipo brownianas, coloidales e hidrodinámicas definen distintos regímenes reológicos. En consecuencia, si se desea trabajar con un fluido equivalente de una fase, se debe seleccionar un volumen representativo, donde la velocidad promedio de la partícula es igual a la velocidad del fluido que la rodea. El fluido equivalente, sin embargo, presenta un comportamiento reológico no Newtoniano (Coussot & Ancey, 1999). Por lo tanto, experimentos con un medio de transporte Newtoniano y partículas de diámetro uniforme, para caracterizar el sedimento grueso, no es representativo del problema. Se decide trabajar entonces con un fluido pseudoplástico para imitar esta variación en la reología. La ventaja de usar este fluido radica en que Haldenwang et al. (2010) determinó una expresión para el cálculo del factor de fricción en un canal sin transporte de partículas como una expresión que sólo depende del número de Reynolds, modificado para fluidos pseudoplásticos. Esto facilita la extracción del efecto de pared como se verá más adelante.

Las condiciones de transporte en minería evitan un lecho de partículas, es decir, evitan tener partículas inmóviles en el flujo donde se produce, a lo más, el movimiento del gasto sólido de fondo. A pesar de esto, accidentes o cortes programados del transporte a través de este tipo de conductos permite la sedimentación de partículas generando un lecho. La necesidad de reiniciar el movimiento en estos casos implica resuspender las partículas, finas y gruesas, por lo que lograrlo sólo con el flujo del fluido es altamente deseable Tamburrino et al. (2016). Por otra parte, el transporte de material grueso es atractivo para la industria. Sus principales ventajas son la reducción en costos de molienda y secado del material (Takahashi et al., 1989); en consecuencia también se reduce el consumo de agua, un recurso escaso en el norte del país, donde se da la mayor parte de la minería en Chile. El principal problema del transporte de material grueso es que no se puede trabajar como un fluido equivalente y es necesario un modelo de dos fases (Ouriemi et al., 2010). Esto se debe a que en régimen turbulento, la fuerza gravitacional supera a los esfuerzos turbulentos y obliga a los sedimentos gruesos a transportarse en la parte baja de la tubería (Takahashi et al., 1989). Por otra parte, en régimen laminar, la sedimentación de partículas en la tubería depende de la resus-

pensión viscosa que a su vez depende del balance entre la difusión inducida por corte y la sedimentación por gravedad de las partículas (Leighton & Acrivos, 1986). Existe evidencia experimental y empírica que demuestra también que el supuesto de viscosidad constante en la interfaz fluido-lecho es incorrecta. Esto se debe a que la concentración y las propiedades de los sedimentos varía gradualmente en esta interfaz (Aussillous et al., 2013; Abedi et al., 2014).

Las formas de fondo también han sido observadas en desagües de fondo de embalses (Admiraal, 2003). Si se presentan las características adecuadas de pendiente y energía disponible, estos desagües se pueden utilizar para extraer los sedimentos que con el tiempo disminuyen el volumen útil embalsado. Como se quiere arrastrar sedimentos, es necesaria una carga hidráulica considerable y las formas de fondo aumentan aún más los requisitos de energía. En consecuencia, sólo es posible en embalses de muro alto y con desagües de pequeña longitud. Algunas veces, este conducto no se puede instalar a través de la base del embalse y la derivación se hace funcionar como sifón sobre la cresta de la presa (Admiraal, 2003). En este caso la tubería presenta un tramo en contrapendiente aguas arriba de la presa y otra tubería con pendiente a favor aguas abajo de la cresta de la presa. Dependiendo del flujo bifásico alcanzado, las pérdidas en estas condiciones de pendientes distintas pueden diferir significativamente. Por esta razón, es necesario ser capaces de caracterizar las formas de fondo y las condiciones en las cuales se generan para poder predecir su formación en el diseño de estos desagües. Para casos límite, por ejemplo cuando los requerimientos de energía son cercanos a la carga hidráulica disponible, su predicción es crucial.

Otro caso donde las formas de fondo influyen en la condición de escurrimiento es en las alcantarillas combinadas (sanitarias y aguas lluvia). El depósito de sedimentos disminuye la capacidad de transporte y en consecuencia promueve las inundaciones y problemas sanitarios (Skipworth et al., 1999). Además, las alcantarillas cuadradas son ampliamente utilizadas dada su capacidad de aumentar la sección de escurrimiento sin aumentar su altura. En este fenómeno la concentración de la mezcla, agua partículas finas, determinará si la interacción entre las partículas y el agua es suficiente o no para hablar de un cambio de la reología Newtoniana del agua a una reología no Newtoniana de la mezcla.

Entre los primeros estudios de ondas sedimentarias se encuentran los realizados por Bagnold en dunas eólicas, y en cauces naturales por Einstein & Barbarossa (1952), Engelund (1966). Sin embargo, en tiempos más recientes, se ha vuelto interesante su estudio en tuberías (Admiraal, 2003). Industrias como la farmacéutica, alimentaria y construcción, entre otras, han desarrollado técnicas de transporte granular de este tipo (Coussot & Ancey, 1999; Ouriemi et al., 2010). Si bien muchos autores han estudiado la generación de formas de fondo cuando el fluido es agua, todavía falta para entender cómo estas ondas inciden en las pérdidas de energía (Einstein & Barbarossa, 1952; Engelund, 1966; van Rijn, 1984; Takahashi et al., 1989). La literatura existente se reduce aún más cuando el estudio se hace en tuberías o con un fluido no Newtoniano (Graf & Acaroglu, 1968; Kuru et al., 1995; Baas, 1999; Admiraal, 2003; Aussillous et al., 2013; Abedi et al., 2014).

Por esto, cuantificar y caracterizar la respuesta del lecho frente a distintas condiciones del flujo, del fluido y de las partículas que constituyen el lecho es una opción interesante de

estudio. Se decide entonces construir una instalación experimental capaz de generar formas de fondo en presión debido al flujo de un fluido pseudoplástico y un sistema de medición no intrusivo capaz de registrar espacio-temporalmente la geometría y el avance de las formas de fondo en un lecho de arena.

1.2. Objetivos

La investigación tiene como objetivo principal estudiar experimentalmente la generación y caracterización de las formas de fondo que se generan en una tubería de sección cuadrada con distintas inclinaciones para flujos de fluidos pseudoplásticos en presión. El lecho está formado por arena, donde la granulometría es lo más uniforme posible. El fluido pseudoplástico se genera a partir de soluciones de carboximetilcelulosa (CMC) en agua.

La investigación propuesta posee cuatro objetivos específicos, los cuales son desarrollados en el orden que se presenta a continuación:

- i) Diseño, construcción y puesta en marcha de una instalación experimental para flujos en circuito cerrado, cuyo tramo de estudio es en presión. Este tramo es de sección cuadrada y puede variar su pendiente. La instalación fue construida y emplazada en el laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez de la Universidad de Chile.
- ii) Generación de una metodología de trabajo experimental para la visualización y medición de la geometría de las formas de fondo y las características relevantes que describen al flujo, incluyendo:
 - La geometría de las formas de fondo, a través del sistema de medición “perfilometría por transformada de Fourier” (FTP, por sus siglas en inglés).
 - Pérdidas de carga a través de cuatro transductores diferenciales Omega.
 - Caudal a través de un flujómetro magnético Siemens.
 - Reología del fluido utilizado a través de un Reómetro Anton Paar.
- iii) Desarrollo y registro del estudio experimental y análisis de resultados obtenidos con el objeto de caracterizar y cuantificar la respuesta del lecho frente a distintas condiciones del flujo, del fluido y de las partículas que constituyen el lecho.
- iv) Obtener relaciones adimensionales que, a través de los parámetros del flujo y del fluido, predigan la formación de formas de fondo en un lecho granular no cohesivo.

1.3. Organización de la tesis

El informe de tesis consta de un resumen y 5 capítulos, los cuales se definen a continuación:

- i) **Resumen:** Se expone el tema de tesis y sus principales resultados
- ii) **Introducción:** Se expone la motivación para estudiar el tema de tesis, su aplicabilidad en problemas reales y se presentan los objetivos, generales y específicos de este estudio.
- iii) **Marco teórico:** Se resume la revisión de antecedentes, donde se analizan fenómenos similares estudiados y las instalaciones experimentales construidas para estudiar dichos fenómenos. Esto con el fin de rescatar las fortalezas de cada instalación estudiada. Se presentan los parámetros adimensionales a estudiar en esta tesis y se deja una sección especial al sistema de medición implementado para la caracterización espacio-temporal de las formas de fondo.
- iv) **Metodología:** Se describe la instalación experimental diseñada y construida, los instrumentos que se usaron para registrar los parámetros de interés y el procedimiento para generar los parámetros adimensionales que se desea estudiar.
- v) **Resultados:** Este capítulo parte con una descripción cualitativa de las formas de fondo, donde se aprovecha el potencial del sistema de medición. Luego, se hace un análisis cuantitativo relacionando distintos parámetros adimensionales.
- vi) **Conclusiones:** Se dan a conocer los principales aportes que esta tesis logró en el estudio de las formas de fondo generadas por el flujo de un fluido pseudoplástico en ductos a presión.

2. Marco Teórico

2.1. Revisión bibliográfica

2.1.1. Formas de fondo

Actualmente no se ha logrado describir a cabalidad los fenómenos que influyen en las formas de fondo. Hasta ahora se piensa que las principales variables responsables de la generación y desarrollo de formas de fondo son: (a) las fuerzas hidrodinámicas del flujo donde el tipo de régimen, laminar o turbulento, influye tanto en la geometría de las formas de fondo como en el gasto sólido de fondo (Ouriemi et al., 2009, 2010), (b) el efecto desestabilizante de la inercia del fluido, (c) el efecto estabilizante de la pendiente del lecho asociado a la gravedad, (d) el efecto estabilizante de la inercia de los granos (Valance & Langlois, 2005) (e) la distribución vertical de partículas que conforman el lecho, por ejemplo el acorazamiento (Charru et al., 2004) y (f), sólo en régimen laminar, el efecto estabilizante de la difusión de partículas inducida por el esfuerzo de corte (Abedi et al., 2014). Este fenómeno también es conocido como resuspensión viscosa (Leighton & Acrivos, 1987).

Ouriemi et al. (2010) proponen un modelo de dos fases para una reología Newtoniana, régimen laminar y transporte de partículas en el fondo de la tubería a partir de un lecho plano. Estos autores separan las formas de fondo en tres grupos, reportando que el régimen de flujo es relevante en la geometría de las ondas sedimentarias: (1) Dunas pequeñas, encontradas sólo en régimen laminar. (2) Dunas con vórtice encontradas tanto en régimen laminar como turbulento, las cuales se caracterizan por la presencia de vórtices aguas abajo de la duna. (3) Dunas sinuosas encontradas en régimen turbulento. Su modelo es válido sólo para predecir la formación de dunas pequeñas y usaron un análisis de estabilidad lineal, igual que Nakagawa & Tsujimoto (1984). Su limitación radica en que el flujo no puede ser perturbado significativamente por el lecho y se encuentra en régimen laminar. Ouriemi et al. (2009) compara diferentes estudios identificando que las fuerzas hidrodinámicas relevantes para el transporte de sedimentos varían dependiendo del tipo de régimen de flujo que se trate. Para flujos laminares de fluidos viscosos por ejemplo, la resuspensión viscosa o fuerzas de lubricación determinan si las partículas estarán en contacto con otras o no. Por otra parte en régimen turbulento la fricción entre partículas condiciona el transporte de sedimentos.

La inercia del fluido es relevante, en presencia de formas de fondo, dado que genera un desfase entre el esfuerzo de corte sobre el lecho, generado por el flujo del fluido, y la morfología de la duna (Ouriemi et al., 2010). En consecuencia, el esfuerzo de corte máximo no coincide con la cresta de la duna. Cuando el esfuerzo de corte máximo ocurre aguas arriba de la cresta de la duna, entonces la duna tiende a aumentar su tamaño, mientras que cuando el esfuerzo de corte máximo es aguas abajo de la cresta de la duna, ésta es degradada. Este proceso ocurre mientras la duna se encuentra en evolución hasta alcanzar una condición cuasipermanente.

Debido a la inercia de la partícula por otra parte, Valance & Langlois (2005) indican que existe un tiempo de equilibrio característico necesario para que la partícula se adapte a variaciones del flujo. La inestabilidad del lecho es entonces resultado de la competencia entre el mecanismo desestabilizante de la inercia del fluido y un mecanismo estabilizante que depende del número de Reynolds de la partícula, definido en la sección 2.2, Parámetros adimensionales. Valance & Langlois (2005) demuestran que el efecto estabilizante de la pendiente del lecho (debido a la gravedad) prevalece para números de Reynolds de la partícula bajos. Por su parte, el efecto estabilizante de la inercia de las partículas domina para números de Reynolds de la partícula altos. Naturalmente existe además una condición crítica donde ambos efectos, gravedad e inercia de los granos, son igualmente importantes.

Respecto de la distribución vertical de los granos, Charru et al. (2004) mencionan que el acorazamiento y la densidad superficial de partículas son relevantes para el transporte de sedimentos y las formas de fondo. El acorazamiento es un proceso de erosión selectiva donde los granos más grandes permanecen estáticos, mientras que los granos de menor diámetro son transportados. En consecuencia, la rugosidad del lecho aumenta y se traduce en una evolución de largo plazo para el flujo de partículas y la geometría de las formas de fondo. Estos autores indican que la densidad superficial de partículas es proporcional al exceso de esfuerzo de corte $\tau_* - \tau_{*c}$, donde τ_* es el número de Shields y τ_{*c} es número de Shields asociado al arrastre incipiente. La densidad de partículas se ve afectada además por la resuspensión viscosa y cumple un rol importante en el gasto sólido de fondo. Ouriemi et al. (2009) compara tres estudios, Charru & Mouilleron-Arnould (2002); Charru et al. (2004); Charru & Hinch (2006), y concluye cómo la resuspensión viscosa afecta en el transporte de partículas. Para el caso donde la resuspensión viscosa es relevante, se tiene que el gasto sólido de fondo varía con el exceso de esfuerzo ($\tau_* - \tau_{*c}$) de corte al cubo. Mientras que los estudios de Charru et al. (2004); Charru & Hinch (2006) analizaron una situación distinta. En ellos se desarrolló un modelo de erosión-depositación en el cual las partículas ruedan y resbalan sobre un lecho fijo considerando sólo una capa de partículas móviles.

Aussillous et al. (2013) modelan el flujo de partículas sobre un lecho granular y se ven obligados a ajustar los parámetros de reología (factor de fricción y viscosidad efectiva constante) a valores inconsistentes para lograr valores coherentes para el arrastre de sedimentos. Sin embargo, estos autores reportan que, usando una reología dependiente de la deformación angular, esta inconsistencia es superada. Lo anterior demuestra la necesidad de modelar la mezcla agua - sedimento fino como un fluido de características reológicas distintas a la Newtoniana. Abedi et al. (2014) determinan la viscosidad relativa de la suspensión usando la teoría del flujo difusivo de Cook (2008), el cual toma en cuenta la migración de partículas en la vertical inducida por el esfuerzo de corte. Esto se debe a que las partículas tienden a migrar de lugares con mayor esfuerzo de corte a lugares con menor esfuerzo de corte.

Coussot & Ancey (1999) proponen un digrama conceptual (fracción sólida versus deformación angular) de las interacciones dominantes entre el fluido y las partículas finas (efectos brownianos, coloidales e hidrodinámicos), que determinan el comportamiento del fluido a una escala donde hablar de un fluido equivalente con propiedades medias es válido. Estos autores utilizan distintos números adimensionales con el objetivo de estimar los esfuerzos relevantes en cada régimen reológico de una suspensión. Con esto se tienen los primeros lineamientos

para la predicción del comportamiento reológico de las suspensiones granulares. Caracterizar la reología de la mezcla es crucial para el estudio del factor de fricción de la tubería. El perímetro mojado, de la tubería de sección cuadrada usada en este estudio, está formado por tres paredes de acrílico y el lecho de partículas. A pesar de que en régimen laminar no existe rugosidad hidrodinámica asociada al lecho, en presencia de formas de fondo, el factor de fricción asociado al lecho puede ser distinto al factor de fricción asociado a las paredes de acrílico. De los parámetros medidos durante los ensayos se obtiene el esfuerzo de corte total, por lo que para conocer el efecto que tienen las formas de fondo es necesario separar entre la fricción asociada a las paredes de acrílico y la fricción asociada al lecho. En el presente estudio se decide trabajar con una solución de agua y carboximetilcelulosa (CMC) porque Haldenwang et al. (2010) reportan que el factor de fricción en un canal rectangular es $16/Re_{MR}$ en régimen laminar, expresión análoga al factor de fricción en régimen laminar de flujos de fluidos newtonianos $16/Re$. Re_{MR} es el número de Reynolds modificado para fluidos pseudoplásticos según la expresión Metzner & Reed (1955) (Chhabra & Richardson, 2011). Ambos adimensionales se encuentran definidos en la sección 2.2, Parámetros adimensionales. Esto simplifica el análisis de los resultados experimentales ya que el factor de fricción asociado a las paredes de acrílico es directamente calculable con dicha expresión. Por medio de los parámetros medidos en los ensayos, se puede calcular el esfuerzo de corte total en la tubería y sólo se tiene como incógnita el factor de fricción asociado al lecho.

Si bien todos los ensayos con fluido pseudoplástico se realizaron en régimen laminar, también se hicieron ensayos con agua como fluido transportador. Todos los ensayos realizados con agua fueron en régimen turbulento. Niño & García (1998) plantean un modelo para el gasto sólido de fondo en equilibrio en un flujo permanente en régimen turbulento. Suponiendo que el transporte de fondo ocurre en el modo de saltación, se define una región adyacente al lecho denominada capa de arrastre de fondo, que tiene un espesor aproximado de dos diámetros de partícula. Este modelo se basa en una hipótesis de Bagnold. Sean τ_t y τ_b el esfuerzo de corte en la cara superior e inferior de la capa de arrastre de fondo respectivamente. La hipótesis de Bagnold indica que el esfuerzo de corte residual (τ_b) en condiciones de transporte de fondo en equilibrio es aproximadamente igual al esfuerzo de corte crítico τ_c . Esto se debe a que si τ_b fuese mayor a τ_c , entonces las partículas se incorporarían al lecho. Mientras que si τ_b fuese menor que τ_c , las partículas serían parte de la capa de partículas estáticas. Por otra parte, si el sedimento es de diámetro pequeño, en el rango de arenas como es el caso de estudio, el espesor de esta capa será pequeño y puede considerarse que τ_t es aproximadamente $\tau_0 = \rho u_*^2$. Es por esta razón que resulta interesante estudiar el parámetro exceso de esfuerzo de corte $\tau_0 - \tau_c$. Niño & García (1998) indican que la hipótesis de Bagnold falla porque tiende a sobreestimar la caída del esfuerzo de corte en esta capa debido a interacciones fluido partícula, especialmente para condiciones de gasto sólido de fondo de baja intensidad. Sin embargo, muchos autores siguen la escuela de Bagnold (Meyer-Peter & Müller, 1948; Ashida & Michiue, 1972; Fernandez Luque & Van Beek, 1976) y utilizan el exceso de esfuerzo de corte para estimar el gasto sólido de fondo porque, a pesar del error que se comete, la incertidumbre en las estimaciones de gasto sólido de fondo es enorme.

El tiempo de equilibrio, definido como el tiempo característico necesario para que el lecho se adapte a variaciones del flujo, es una variable relevante a considerar en la metodología experimental. Baas (1999) caracteriza el tiempo de equilibrio para un canal abierto y escurri-

miento de agua en régimen turbulento. Él demuestra que el tiempo de equilibrio aumenta a medida que los granos presentes son de mayor tamaño, mientras que este tiempo disminuye con el aumento de la velocidad del flujo. Las formas de fondo generadas por Baas (1999), transcurrido el tiempo de equilibrio, presentan una distribución de longitudes de onda regular a diferencia de lo registrado por Kuru et al. (1995). Estos últimos autores registran formas de fondo para régimen turbulento en tuberías con un fluido newtoniano, pero sin esperar el tiempo de equilibrio. En consecuencia, registraron una alta varianza en la geometría de las formas de fondo.

El fenómeno se ha intentado estudiar a través de modelos numéricos y teóricos para fluidos Newtonianos en régimen laminar y turbulento, sin embargo existen todavía varias dificultades importantes para este enfoque que no han sido superadas. Por ejemplo, no se ha logrado todavía un acople apropiado entre el medio granular y el flujo del fluido (Ouriemi et al., 2009). Análisis teóricos tampoco han logrado ajustarse correctamente a resultados experimentales (Aussillous et al., 2013). Las predicciones de gasto sólido tampoco han sido resueltas satisfactoriamente (Charru et al., 2004). Además, en esta búsqueda de antecedentes no se encontraron modelaciones numéricas que estudiaran fenómenos asociados a las ondas sedimentarias generadas por flujos de fluidos pseudoplásticos. Es por esto que la necesidad de más datos experimentales para el análisis de ondas sedimentarias sigue siendo relevante en la actualidad.

2.1.2. Otras instalaciones experimentales

En la literatura se encuentran estudios de formas de fondo en tuberías de sección transversal circular y cuadrada, teniendo cada una de ellas ventajas y desventajas. Graf & Acaroglu (1968) estudiaron el transporte de sedimentos en una tubería circular de diámetro 7.6 cm, cuya sección de observación mide 1.85 m de largo. Se usó una gravilla prácticamente uniforme con gravedad específica $s = 2.67$ y diámetros característicos de 2 y 2.78 mm. Las variables medidas son J , la pendiente de la línea de energía y, R_h , el radio hidráulico de la sección transversal. Si bien estos autores reportan ondas sedimentarias, centran su investigación en los modos de transporte y no caracterizan geoméricamente las dunas. Para la descripción geométrica de dunas, Nakagawa & Tsujimoto (1984) usaron una tubería rectangular de 9 m de largo y sección transversal de $0.33 \times 0.07 \text{ m}^2$. Una de las principales desventajas de este estudio es que debían parar el flujo para poder medir. Su metodología de medición consistía en detener el escurrimiento y sacar la cara superior de la tubería para medir el perfil longitudinal usando un sensor ultrasónico. Las longitudes de onda se describen mediante análisis espectral de los perfiles batimétricos medidos. Tanto los experimentos reportados por Graf & Acaroglu (1968) como por Nakagawa & Tsujimoto (1984) fueron realizados con agua. Kuru et al. (1995) en cambio, trabajaron con una solución de agua y glicerina, cuya viscosidad dinámica μ varió entre 10^{-3} y $4.3 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y el rango de Reynolds entre 1000 y 12 000. Para esto usaron una tubería circular de diámetro 0.031 m y 7 m de largo, el lecho inicial era de 5 mm de alto aproximadamente y 4 a 5 m de largo. Ellos usaron como material granular esferas de vidrio de gravedad específica 2.4 y diámetros característicos 0.1 y 0.3 mm. En este caso el experimento también debía detenerse para realizar la medición y las amplitudes me-

didadas de las dunas fueron 2 a 3 mm. Coleman et al. (2003) utilizaron un sistema de medición no intrusivo. Ellos midieron los perfiles del lecho con un láser controlando su desplazamiento con un computador a lo largo de un metro de la sección de estudio. El problema de este sistema de medición es que el láser tarda 15 a 20 segundos en recorrer el tramo de interés. Su experimento consistía en una tubería rectangular con sección de estudio $6 \times 0.3 \times 0.1 \text{ m}^3$, donde la última medida es el alto de la sección transversal. La parte superior de la instalación experimental era removible, lo cual permitía manualmente restaurar el lecho plano inicial antes de cada experimento. Este lecho está compuesto por partículas de $d_{50} = 0.11 \text{ mm}$ y en un segundo conjunto de experimentos por $d_{50} = 0.87 \text{ mm}$; en ambos casos se trata de arena de cuarzo. El rango de Re alcanzado va de los 4×10^4 a 1.1×10^5 y $Re = 4UR_h/\nu$, donde U es la velocidad media de escurrimiento, R_h su radio hidráulico y ν la viscosidad cinemática del fluido. Admiraal (2003) utilizó una tubería circular de 10.2 cm de diámetro y 9.5 m de largo, cuya principal fortaleza es un pivote central que le permite inclinaciones de -20° a 20° . El diámetro de partículas usado es $d_p = 0.53 \text{ mm}$ y el conjunto de datos estudia cinco pendientes, cinco gastos sólidos de fondo y un rango de caudales que logra números de Reynolds entre 5.8×10^4 y 16×10^5 .

Junto a sus resultados experimentales, Graf & Acaroglu (1968) generan un conjunto de datos de varios estudios publicados a esa fecha. Para su análisis utilizaron el parámetro adimensional de intensidad de corte $\Psi = Rd_p/(JR_h)$, donde $R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ es la gravedad específica boyante del sedimento, d_p el diámetro característico de las partículas, J la pendiente de la línea de energía y R_h el radio hidráulico neto de la sección transversal del flujo. Este adimensional es una forma alterativa de escribir el inverso del número de Shields. Graficando resultados experimentales de conductos cerrados y canales abiertos, los autores concluyen que los roles respectivos del transporte de sedimento y pérdidas de carga en presencia de formas de fondo están estrechamente relacionadas para flujos en presión y escurrimientos a superficie libre en régimen subcrítico.

Kuru et al. (1995) presentan datos experimentales sobre la formación de ondas de arena en una tubería horizontal y un análisis de estabilidad lineal, para un flujo de dos fases, que consiste en partículas resuspendidas y la fase líquida en un flujo Hagen-Poiseuille bidimensional. Un problema que abordan estos autores es que las predicciones de longitudes de onda, tasas de crecimiento y celeridad de las ondas no coincide con las predicciones del análisis de inestabilidad lineal. En su trabajo muestran la distribución de las longitudes de onda registradas, donde la dispersión de datos es del orden de la longitud de onda promedio. Ellos concluyen que la longitud de onda, en flujos turbulentos, está fuertemente dominada por el fenómeno de saltación de las partículas. En consecuencia, la variabilidad observada en la longitud de onda está fuertemente relacionada con la naturaleza estocástica de los flujos turbulentos. Esta longitud depende también del ángulo de eyección, que los autores definen como el ángulo al cual la partícula sale expulsada de la cresta de la duna.

En los experimentos de Coleman et al. (2003) un resultado interesante encontrado por los autores es que el largo de las dunas y rizos está fuertemente dominado por el tamaño del sedimento. Una característica importante descrita por Admiraal (2003) es que a, diferencia de los flujos sin sedimentos, para líquidos que transportan una fase sólida, las pérdidas de carga aumentan con la acentuación de la pendiente. Este aumento es resultado de una mayor

fricción debido a un cambio en las fuerzas sobre las partículas individuales y al cambio en la geometría de las formas de fondo. Para pendientes adversas se observa un aumento del esfuerzo de corte debido a la forma, con dunas cuyas pendientes son más pronunciadas que para inclinaciones de la tubería a favor del escurrimiento. Además, encontraron que las pérdidas de carga encuentran un mínimo en la transición entre transporte heterogéneo y transporte de partículas por el fondo.

2.2. Parámetros adimensionales

Para el análisis de las formas de fondo, se relacionarán los siguientes números adimensionales:

- Número de Reynolds (Re): el número adimensional que relaciona el término inercial y el término viscoso que gobiernan el movimiento de los fluidos. Al ser la tubería un ducto de sección cuadrada, el término de longitud se caracteriza con el radio hidráulico, R_h .

$$Re = \frac{UR_h}{\nu} \quad (2.1)$$

donde U es la velocidad media del flujo y ν la viscosidad cinemática. Esta definición es válida sólo para fluidos newtonianos. Para extraer el efecto de pared del análisis, el radio hidráulico se asocia al área de influencia del lecho. Esto último se presenta en mayor detalle en el capítulo 3, Metodología.

- Número de Reynolds de la partícula para fluidos newtonianos (Re_{*p}):

$$Re_{*p} = \frac{u_{*lecho}d_p}{\nu} \quad (2.2)$$

donde u_{*lecho} la velocidad friccional asociada al lecho, d_p el diámetro característico de las partículas sólidas y ν la viscosidad cinemática.

- Número de Reynolds según Metzner & Reed (1955) (Re_{MR}) (Chhabra & Richardson, 2011) generalizado para fluidos no newtonianos independientes del tiempo. Para el caso de fluido pseudoplástico:

$$Re_{MR} = \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \frac{8\rho U^2}{K(2U/R_h)^n} \quad (2.3)$$

donde K y n son el coeficiente de consistencia e índice de flujo que describen al fluido pseudoplástico, respectivamente. U es la velocidad media del flujo, R_h el radio hidráulico y ρ es la densidad de dicho fluido. Este número adimensional considera una viscosidad efectiva definida por $\mu_{eff} = K((3n+1)/4n)^n(8U/D)^{n-1}$ y $D = 4R_h$ (Chhabra & Richardson, 2011).

- Número de Reynolds de la partícula para fluido pseudoplástico (Re_{*p}^K):

$$Re_{*p}^K = \frac{\rho u_{*lecho}^{2-n} d_p^n}{K} \quad (2.4)$$

donde K y n son el coeficiente de consistencia e índice de flujo que describen al fluido pseudoplástico, respectivamente. u_{*lecho} la velocidad friccional asociada al lecho y d_p el diámetro característico de las partículas sólidas.

- Número de Shields (τ_*), que es un balance entre el esfuerzo hidrodinámico generado por el flujo del fluido sobre las partículas τ y el peso sumergido de éstas:

$$\tau_* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho)gd_p} \quad (2.5)$$

donde ρ_s es la densidad de las partículas sólidas, ρ la densidad del fluido, g es la aceleración de gravedad y d_p el diámetro característico de las partículas sólidas.

- Amplitud adimensional de la onda (A/h), donde A es la amplitud de la onda y h la altura media del escurrimiento.
- Gasto sólido de fondo adimensional (q_*^{agua}) para el caso de flujo en régimen turbulento de agua como fluido:

$$q_*^{agua} = \frac{q_s}{\sqrt{Rgd_p^3}} \quad (2.6)$$

donde q_s es el gasto sólido por unidad de ancho, $R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ el peso específico sumergido del grano y d_p el diámetro característico de las partículas sólidas. El arrastre de sedimentos para flujos de agua ocurre, por lo general, en régimen turbulento. Por esto, la ecuación 2.6 es caracterizada en base al término inercial $\sqrt{Rgd^3}$, lo cual supone régimen turbulento.

- Gasto sólido de fondo adimensional (q_*) para el caso de flujo en régimen laminar de un fluido pseudoplástico:

$$q_* = \frac{q_s \mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \quad (2.7)$$

donde q_s es el gasto sólido de fondo por unidad de ancho y μ_{eff} la viscosidad efectiva del fluido pseudoplástico. Este no es un parámetro adimensional común, sin embargo, Aussillous et al. (2013) indica que, en régimen laminar, un escalamiento basado en el término viscoso $((\rho_s - \rho)gd_p^3)/\mu_{eff}$ colapsa correctamente los datos en una sola tendencia. En la sección C.1, del capítulo Anexos, se presenta el gráfico obtenido para el escalamiento inercial de los ensayos con fluido pseudoplástico y régimen laminar. La dispersión de los datos demuestra que el análisis dimensional correcto es en base al término viscoso para este conjunto de ensayos.

- Celeridad adimensional de la onda (C_b^{agua}) para el caso de flujo en régimen turbulento de agua como fluido:

$$C_b^{agua} = \frac{Rgd_p c}{u_{*lecho}^3} \quad (2.8)$$

Este parámetro adimensional basa su razonamiento en la estimación de Meyer-Peter & Müller (1948) para el gasto sólido de fondo, el cual escala con el parámetro exceso de

esfuerzo de corte, mencionado anteriormente en este capítulo. Por lo tanto:

$$\frac{q_s}{\sqrt{Rgd_p^3}} \sim (\tau_* - \tau_*c)^{3/2} \sim \tau_*^{3/2} \sim \left(\frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gd_p} \right)^{3/2} \quad (2.9)$$

$$\frac{q_s}{\sqrt{Rgd_p^3}} \sim \frac{u_*^3}{(Rgd_p)^{3/2}} \quad (2.10)$$

Simplificando términos:

$$q_s \sim \frac{u_*^3}{Rg} \quad (2.11)$$

Por otra parte, el gasto sólido de una onda bidimensional se puede estimar como $q_s \sim ch$, donde c es la celeridad de la onda y h una altura característica de la duna.

$$ch \sim \frac{u_*^3}{Rg} \quad (2.12)$$

Dado el resultado de Coleman et al. (2003), el cual dice que el tamaño de la duna esta fuertemente relacionado con el diámetro característico del lecho granular, se obtiene finalmente que la celeridad de la onda escala con el término:

$$c \sim \frac{u_*^3}{Rgd_p} \quad (2.13)$$

- Celeridad adimensional de la onda (C_b) para el caso de flujo en régimen laminar de un fluido pseudoplástico:

$$C_b = \frac{cA\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \quad (2.14)$$

donde c es la celeridad de la onda y A su amplitud. Siguiendo el mismo razonamiento usado en el análisis dimensional del gasto sólido, se usa el término viscoso $((\rho_s - \rho)gd_p^3)/\mu_{eff}$ y la amplitud de la duna A para adimensionalizar C_b tal como se expone en la ecuación 2.14. Notar que $cA/2$ es una forma alternativa simplificada para la estimación de gasto sólido de una duna triangular. La deducción de esto último se presenta en la sección "Transporte de sedimentos" del capítulo 3, Metodología.

2.3. Sistema de Medición

Las características geométricas del lecho y su evolución temporal se registran mediante el sistema óptico de medición, no invasivo, conocido como perfilometría por transformada de Fourier (FTP, por su nombre en inglés, *Fourier transform profilometry*). El método fue introducido por primera vez por Takeda et al. (1982) y Takeda & Mutoh (1983), mejorado por Cobelli et al. (2009) y adaptado para el uso en ductos a presión (Garcés & Tamburrino, 2015). Para su implementación se utilizan un proyector y una cámara digital.

En la Figura 2.1 se muestra la distribución geométrica de los equipos utilizados. Ambos deben estar a la misma altura y sus ejes de colimación deben ser paralelos y verticales (Takeda & Mutoh, 1983). Las variables importantes para caracterizar la posición de ambos aparatos son la altura L por sobre la superficie a medir y D , la distancia entre el lente del proyector y la pupila de la cámara fotográfica.

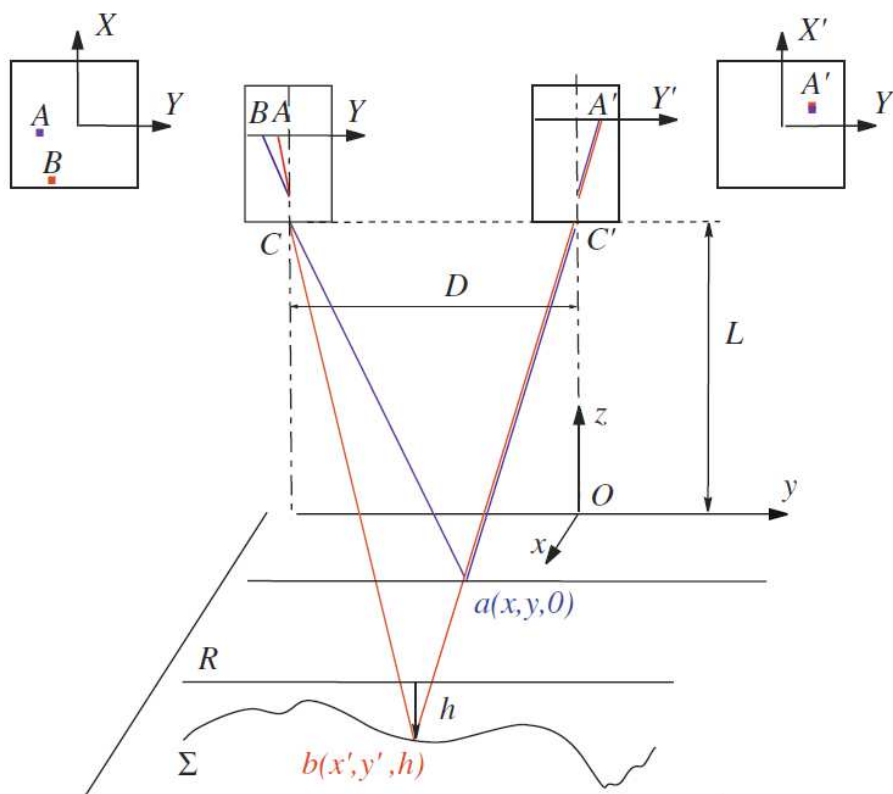


Figura 2.1: Esquema y variables del sistema FTP (Cobelli et al., 2009).

El plano de referencia $a(x, y, 0)$ es la superficie previa a la situación deformada, $b(x', y', h)$, que se quiere medir. Esta, la superficie a , debe ser perpendicular a los ejes de colimación de los aparatos. El cuadro superior izquierdo representa los píxeles proyectados por el patrón de franjas, mientras que el cuadro superior derecho es el sensor de la cámara digital. La pupila del proyector C proyecta un patrón de franjas arbitrario. Un patrón de franjas sinusoidal incrementa considerablemente el desempeño de esta técnica y la calidad de la reconstrucción

comparado al patrón Ronchi (Cobelli et al., 2009). El patrón Ronchi es una onda cuadrada que alterna entre dos valores sin pasar por valores intermedios. De manera simplificada, el fenómeno óptico es que el pixel proyectado B , es capturado en el pixel de la cámara A' . Una vez realizada la perturbación de la zona a medir, A' registra ahora el pixel proyectado por A . Gracias a la escala de grises, se define una fase a cada matiz de gris proyectado ϕ . Con esto, se obtiene un mapa de desfase entre los pixeles A y B registrados en la cámara por A' , tal que:

$$\Delta\phi(A') = \phi(A) - \phi(B) \quad (2.15)$$

Se entiende por desfase, la diferencia entre el tono de gris registrado en una posición para el caso deformado y el tono de gris en esa misma posición para el caso de referencia. Como se trabaja con fotos monocromáticas y el patrón varía del blanco al negro sinusoidalmente, este desfase de color es identificable directamente. Finalmente para obtener la relación entre el desfase y la altura correspondiente se utiliza la conversión fase-altura de Cobelli et al. (2009):

$$h = \frac{\Delta\phi L}{\Delta\phi - 2\frac{\pi}{p}D} \quad (2.16)$$

donde p es el período del patrón sinusoidal. Para la eliminación del ruido en las mediciones se usó un filtro de Gauss que suaviza los datos resultantes.

Para la implementación de este sistema de medición se debió modificar el algoritmo con el fin de considerar la refracción del haz de luz del proyector y la línea de visión de la cámara al entrar en la tubería. (Garcés & Tamburrino, 2015)

2.3.1. Corrección por refracción

La teoría anteriormente explicada ha mostrado un error pequeño cuando se miden deformaciones de superficies libres. Por ejemplo, Cobelli et al. (2009) registra una precisión de 0.2 mm. Sin embargo, en el caso de este estudio y antes de llegar al fondo móvil, el haz de luz proveniente del proyector y la línea de visión de la cámara deben atravesar la pared superior del acrílico y el fluido, siendo refractados en su trayectoria. Una de las principales razones para usar paredes de acrílico en el ducto es que su índice de refracción es igual al del agua. Para la corrección de esta desviación, se usa el razonamiento expuesto en la Figura 2.2, donde h es la ubicación aparente del punto medido por el algoritmo de Cobelli et al. (2009) y H la altura real del plano a medir.

Denominando L la distancia entre los puntos de incidencia, se tiene que:

$$L = h\tan(i_p) + h\tan(i_c) \quad (2.17)$$

donde i_p e i_c son los ángulos de incidencia del proyector y la cámara respectivamente. Del mismo modo:

$$L = h\tan(r_p) + h\tan(r_c) + \Delta h\tan(r_p) + \Delta h\tan(r_c) \quad (2.18)$$

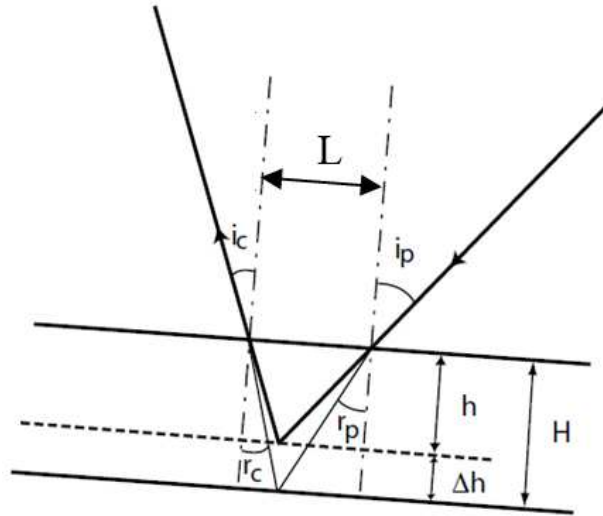


Figura 2.2: Corrección por refracción al pasar a otro medio.

donde r_p y r_c son los ángulos de refracción. Igualando ambas expresiones se obtiene que:

$$H = \frac{\tan(i_p) + \tan(i_c)}{\tan(r_p) + \tan(r_c)} h \quad (2.19)$$

Este cociente es el factor de corrección usado para corregir las imágenes. Notar que el valor de estos ángulos depende de la posición a medir por lo que cada pixel registrado tiene su propio factor de corrección. En consecuencia, más que un factor de corrección es una matriz de corrección del mismo tamaño que el registro 3D, la cual contiene el factor de corrección en función de la ubicación de cada pixel.

3. Metodología

3.1. Diseño experimental

La instalación experimental intenta agrupar las principales fortalezas de los montajes revisados en el capítulo anterior. Esta está constituida por dos sistemas cerrados de recirculación en presión. La única sección común es un tramo de 10 m de largo formado por una tubería cuadrada de $52 \times 52 \text{ mm}^2$, de sección transversal, y cuya pendiente puede variar entre -17.5° y 17.5° . Las paredes de esta tubería están construidas de acrílico transparente, lo que permite la visualización del flujo y de las formas de fondo. En la pared superior de la tubería se encuentran cuatro sensores de presión para determinar las pérdidas de carga. La instalación experimental se muestra esquemáticamente en la Figura 3.1.

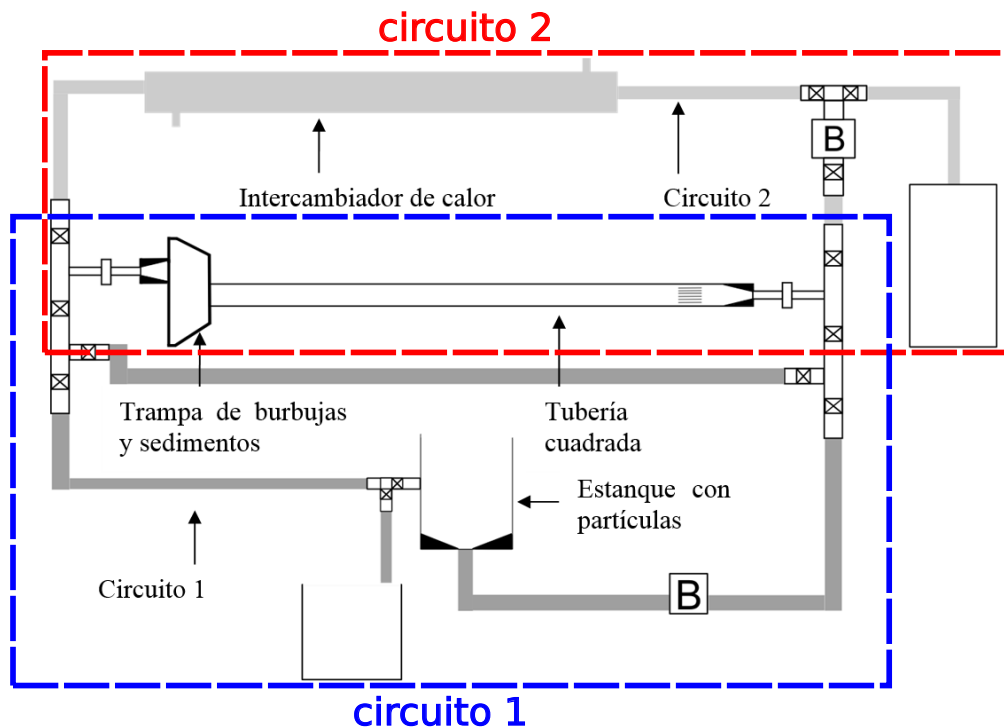


Figura 3.1: Esquema de la instalación experimental, circuitos 1 y 2.

El material del lecho que forma el fondo corresponde a partículas no cohesivas de arena. El fluido pseudoplástico se genera mediante una mezcla de agua y carboximetilcelulosa (CMC), cuya reología se ajusta a una ley de potencia del tipo $\tau = K\dot{\gamma}^n$, donde τ es el esfuerzo de corte, $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación angular, K es el coeficiente de consistencia del fluido y n el índice de flujo. Estos parámetros se controlan con la concentración de CMC en agua a usar. Ensayos reológicos, utilizando un reómetro Anton Paar modelo Rheolab QC, caracterizaron al fluido. Es importante verificar el pH neutro-básico (7 a 8) de la mezcla ya que si la solución se

vuelve ácida, la viscosidad decae. Debido a la dependencia de la reología con la temperatura, ésta se controla a través de un intercambiador de calor y se intentó mantener constante. Sin embargo, los experimentos presentan cierta variabilidad de la temperatura debido a razones climáticas, donde la época del año determina la temperatura del agua refrigerante que circula por el intercambiador de calor. La temperatura promedio de los experimentos es de 22 °C con una desviación estándar de 1.2 °C.

3.1.1. Tubería

El circuito 1, encargado de generar el lecho plano en la sección de interés, transporta la solución con una alta concentración de partículas. El caudal al que se opera este circuito es tal, que las partículas se mueven a través de la sección de estudio como un lecho deslizante, mientras que en el resto del sistema las partículas se transportan en suspensión. Durante este procedimiento la tubería está horizontal. Una vez que las partículas transportadas por el flujo abarcan toda la tubería de acrílico, el sistema se detiene y se permite que sedimenten, generando así un lecho horizontal. En caso de ser necesario, existe un bypass para reanudar el movimiento y extraer las partículas del circuito excepto aquellas que se encuentran en la tubería cuadrada. Una vez sedimentadas las partículas, por el circuito 2 transita la misma solución pero sin partículas para generar las formas de fondo.

3.1.2. Sensores de presión

La presión se mide en cuatro puntos a lo largo del ducto con transductores de presión diferencial Omega Modelo PX409-015DWUV. Estos sensores requieren calibración ya que entregan una señal en mV. Para su calibración se midieron distintas alturas de columnas de agua y se obtuvo un coeficiente de conversión. Su comprobación se llevó a cabo registrando las pérdidas de energía en la tubería haciendo fluir agua sin partículas y comparando los resultados experimentales, con los resultados de una modelación numérica, realizada en el software COMSOL. Los detalles de esta simulación se pueden revisar en Garcés & Tamburrino (2015) y en la sección G, del capítulo Anexos. En la Figura 3.2 se exponen pendientes de la línea de energía J , del registro en la tubería (cuadrados sin relleno), para distintos caudales. La línea segmentada corresponde a los resultados de la modelación en COMSOL.

3.1.3. Sistema de Medición

La estructura que soporta el sistema de medición FTP, proyector y cámara digital, se mueve solidario con la tubería. Gracias a esto, la sección estudiada es siempre el mismo tramo de la tubería de sección cuadrada. Un esquema del tramo de estudio y la estructura que soporta el sistema de medición se presenta en la sección A, del capítulo Anexos. La resolución digital lograda de las imágenes tomadas por el sistema de medición FTP en esta investigación es de 0.2 mm/píxel. Se logró estudiar, dado el alcance del proyector, una sección

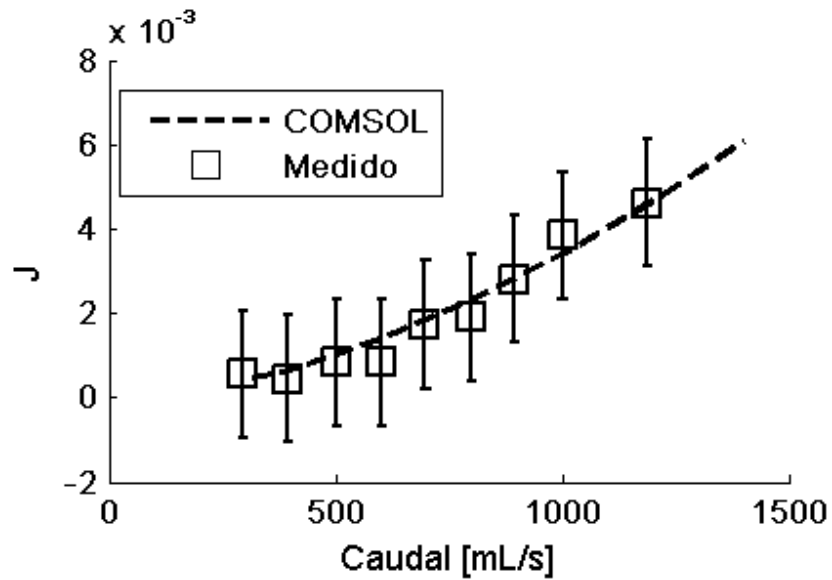


Figura 3.2: Comparación entre la simulación con el software COMSOL y los resultados experimentales con agua de la pérdida unitaria del plano de carga, J , para distintos caudales.

de $52 \times 460 \text{ mm}^2$. El ruido en las mediciones se debe principalmente a dos factores. El primero es intrínseco del sensor de la cámara al nivel de luminosidad, pero, además, el transporte de sedimentos genera una distorsión adicional a la batimetría. Para eliminar el ruido de las imágenes se utiliza un filtro pasa bajo. En otra sección de la tubería se encuentra también una cámara, instalada lateralmente, con la que se registra el perfil longitudinal de las formas de fondo. El tamaño de los píxeles en este sistema de medición es de $0.65 \times 0.65 \text{ mm}^2$, siendo la sección registrada de $52 \times 1500 \text{ mm}^2$.

3.2. Análisis de datos experimentales

3.2.1. Pendiente de la tubería

La correcta convención de signo para la pendiente de la tubería debe ser consistente con la ecuación 3.1:

$$\frac{d\left(\frac{p}{\gamma}\right)}{dx} = i - J \quad (3.1)$$

donde γ es el peso específico de la columna de agua, i la pendiente de la tubería y J la pendiente del plano de carga. La pendiente se define en función de la dirección de x (positivo en la dirección del flujo). En la Figura 3.3, la flecha dentro de la tubería indica la dirección del flujo y la línea discontinua, la cota piezométrica a lo largo de la tubería. Las magnitudes a_1 y a_2 representan las presiones medidas por los transductores ($\frac{dp}{\gamma} = a_2 - a_1$). J se define positivo hacia abajo ($J = -(b_2 - b_1) > 0$).

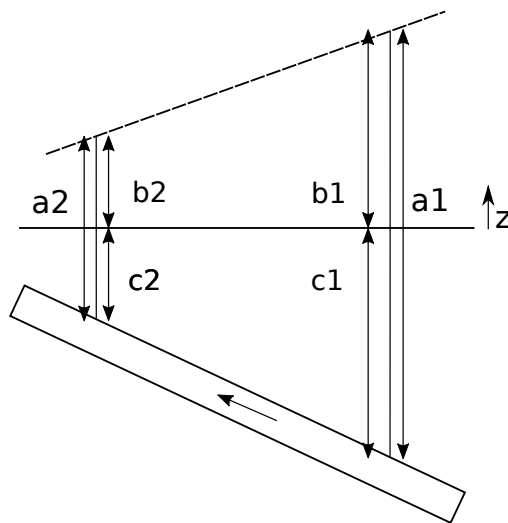


Figura 3.3: Convención signo para pendiente de la tubería.

Reemplazando estas dos definiciones en la ecuación 3.1, se obtiene:

$$a_2 - a_1 = i + b_2 - b_1 \quad (3.2)$$

$$i = a_2 - b_2 - (a_1 - b_1) = c_2 - c_1 < 0 \quad (3.3)$$

Es decir, para el caso expuesto en la Figura 3.3, $i < 0$. Por lo tanto, siendo x positivo en la dirección del flujo y z positivo hacia arriba, se define pendiente adversa cuando $dz/dx > 0$ y pendiente a favor cuando $dz/dx < 0$.

3.2.2. Conjunto de experimentos

Para estudiar las capacidades de la instalación experimental se hicieron experimentos con agua y con una solución de CMC en agua. En el caso de agua sin aditivos, se tiene que el arrastre incipiente de las partículas de arena se genera en régimen turbulento ($Re \sim 7000-8000$), por lo que para su análisis se usan los métodos de Einstein & Barbarossa (1952) y Engelund (1966). Este análisis consiste encontrar una ley de resistencia que caracterice el flujo en presencia de lechos móviles. Para esto se debe separar el efecto que tiene la rugosidad del lecho granular del efecto debido a la geometría de las formas de fondo. En contraste con lo anterior, todos los experimentos con un fluido pseudoplástico se encuentran en régimen laminar. Los resultados de experimentos cuando el fluido es agua o una solución pseudoplástica no son comparables, porque los regímenes de flujo son distintos y la metodología de análisis varía. Adicionalmente, los mecanismos de transporte también presentan diferencias. En agua, el fenómeno de saltación es relevante. En el caso del fluido pseudoplástico analizado, en cambio, su avance se genera a velocidades menores debido a dos razones. La primera es que el aumento de la viscosidad genera un aumento en la fuerza de arrastre, para una velocidad en torno a la partícula dada. La segunda es la presencia de resuspensión viscosa en la iniciación del movimiento de las partículas. Esta migración de partículas en la vertical reduce el contacto entre las mismas, reduciendo la fricción con el lecho (Abedi et al., 2014).

Las condiciones experimentales cuando el fluido en el sistema es agua se presentan en la Tabla 3.1. En dicha tabla se incluye el rango de los principales parámetros adimensionales representativos del fenómeno estudiado, definidos en la sección 2.2, Parámetros adimensionales: Número de Reynolds, número de Reynolds de la partícula y número de Shields. Las partículas de arena fueron tamizadas para lograr la mayor uniformidad posible. Para esto se usaron los tamices de 600 μm y 800 μm . Dado que no había tamices de tamaños intermedios, no fue posible determinar la granulometría dentro de este rango.

Tabla 3.1: Condiciones experimentales para agua como fluido.

Partículas de arena	$d_{50} = 0.7 \text{ mm}$
Pendientes	$-15.5 \%, -7.7 \%, 0 \%, 9.2 \%, 16.9 \%$
Caudal	$0.2 \text{ a } 0.75 \text{ l s}^{-1}$
Re_{lecho}	$3500-17\ 000$
Re_{*p}	$6-20$
τ_*^{lecho}	$0.009-0.23$

Por otra parte, los experimentos realizados con fluidos pseudoplásticos se resumen en la Tabla 3.2. Los caudales estuvieron en el rango entre 34 y 516 ml/s los que significaron números de Reynolds del flujo entre 7 y 260, definidos según Metzner & Reed (1955) como $\rho U D / \mu_{eff}$ con $\mu_{eff} = K((3n + 1)/4n)^n (8U/D)^{n-1}$ y $D = 4R_h$. La relación de Mishra y Tripathi (1975), $Re_c = 2100(4n + 2)(5n + 3)/(3(3n + 1)^2)$ (Chhabra & Richardson, 2011), es una relación para tuberías circulares, donde la definición del número de Reynolds es en función del diámetro de la tubería. Recordando que, por definición, el número de Reynolds en función del diámetro de la tubería es cuatro veces el número de Reynolds en función del radio hidráulico ($Re(D) = 4 Re(R_h)$), se modificó la relación de Mishra y Tripathi (1975) tal que

$Re_c(R_h) = 550(4n+2)(5n+3)/(3(3n+1)^2)$ y se determinó que el número de Reynolds crítico más desfavorable es $Re_c = 572$. En consecuencia, todos los flujos ensayados se encuentran dentro del régimen laminar.

Tabla 3.2: Condiciones experimentales para solución de CMC en agua como fluido.

Partículas de arena	$d_{50} = 0.7 \text{ mm}$
Pendientes	$-16 \%, -7.5 \%, 0 \%, 9 \%, 16.8 \%$
Caudal	$0.034 \text{ a } 0.51 \text{ s}^{-1}$
Re_{lecho}^{MR}	7–260
Re_{*p}^K	0.2–2.1
τ_*^{lecho}	0.07–1.5

Otro fenómeno importante a considerar en la realización de los experimentos, es el tiempo que demora el lecho y las formas de fondo en adaptarse a variaciones del caudal. Esto se conoce como tiempo de equilibrio (t_{eq}) (Baas, 1999). En las simulaciones numéricas de Niño et al. (2002) se muestra que rizos de arena formados por viento tienden asintóticamente a una amplitud constante. El objetivo del presente estudio sin embargo, no incorpora la evolución de las dunas, sino sólo condiciones estables, donde no se observan mayores variaciones de la amplitud o el largo de las dunas a lo largo del tiempo. Por esta razón, en experimentos preliminares se determinó que el sistema debe funcionar, al menos, 30 minutos entre cada caudal ensayado antes de comenzar el registro de los parámetros a medir para lograr esta condición estable para la geometría de las dunas.

3.2.3. Efecto de pared

Para conocer el esfuerzo de corte asociado exclusivamente al lecho granular es necesario idear una metodología que elimine el efecto de pared. Es decir, se deben separar los esfuerzos de corte actuando sobre las paredes de acrílico y sobre el fondo de arena. Su análisis depende además de si el régimen de flujo es laminar o turbulento. Como se dijo anteriormente, en este estudio existen dos casos: (1) Régimen turbulento con agua como fluido, y (2) régimen laminar con solución de CMC en agua.

A continuación se presenta el análisis realizado para el primer caso, régimen turbulento con agua como fluido. A partir de las mediciones de presión, caudal y cota del lecho, es posible estimar la pendiente de la línea de energía J , con lo cual se calcula el esfuerzo de corte total sobre la tubería como:

$$\tau = \gamma R_h J \quad (3.4)$$

Luego, es necesario definir las áreas de influencia asociadas a las paredes de acrílico y al lecho granular. Se entiende por área de influencia asociada a un perímetro mojado, la porción de la sección transversal donde el perfil de velocidades es principalmente consecuencia de la condición de no resbalamiento y rugosidad hidrodinámica de dicho perímetro. Usando la misma simulación numérica 3D hecha en COMSOL, mencionada en la sección 3.1.2, se estudió cómo el perfil de velocidades se deforma debido a la presencia de un lecho plano pero

rugoso en la parte inferior de la tubería. Dado que se está trabajando con un flujo de agua en régimen turbulento, el lecho plano de partículas resulta ser hidrodinámicamente rugoso y su influencia sobre el perfil de velocidades es claramente identificable. COMSOL permite imponer directamente el diámetro de partículas que conforma el lecho, por lo que para esto se usó el diámetro máximo de la granulometría utilizada, $d_p = 0.8 \text{ mm}$. En las modelaciones se encontró que la velocidad máxima del perfil de velocidades se encuentra a $0.55h$, siendo h la altura del escurrimiento. Los detalles de esta simulación se pueden revisar en Garcés & Tamburrino (2015) y en la sección G, del capítulo Anexos. A partir de las bisectrices formadas por las paredes laterales y el fondo del canal, se define el área de influencia del lecho como un trapecio de altura $0.55h$. Esta área de influencia y su perímetro mojado se presentan en las ecuaciones 3.5 a 3.19 con el subíndice “*lecho*”. Por otra parte, el área de influencia asociada al perímetro mojado que conforman las tres paredes de acrílico (cara superior y ambas caras laterales de la tubería) se definen en estas ecuaciones con el subíndice “*acrílico*”. A continuación se definen las áreas de influencia y los radios hidráulicos asociados:

$$A_{lecho} = 0.55hb - (0.55h)^2 \quad (3.5)$$

$$R_{h_{lecho}} = A_{lecho}/b \quad (3.6)$$

$$A_{acrílico} = A_{total} - A_{lecho} \quad (3.7)$$

$$R_{h_{acrílico}} = \frac{A_{acrílico}}{b + 2h} \quad (3.8)$$

Similar a lo discutido en Chow (1959) para el efecto de una capa de hielo que cubre la superficie libre en un cauce natural, se consideran velocidades iguales en ambas áreas de influencia. Este procedimiento difiere del procedimiento de Vanoni & Brooks (1957), el cual es otra metodología interesante de análisis.

Se calcula el factor de fricción turbulento asociado a las paredes de acrílico según la relación de Blasius:

$$f_{acrílico} = \frac{0.3164}{Re_{acrílico}^{0.25}} \quad (3.9)$$

donde $Re_{acrílico}$ es el número de Reynolds en función de $R_{h_{acrílico}}$.

Luego se calcula el esfuerzo de corte asociado a las tres paredes de acrílico $\tau_{acrílico}$ y del balance de fuerzas se despeja el esfuerzo de corte sobre el lecho τ_{lecho} :

$$\tau_{acrílico} = \frac{1}{8} \rho f_{acrílico} U^2 \quad (3.10)$$

$$\tau_{lecho} = \frac{\tau P_h - \tau_{acrílico} P_{h_{acrílico}}}{b} \quad (3.11)$$

Einstein & Barbarossa (1952) y Engelund (1966) descomponen el esfuerzo de corte sobre el lecho en presencia de formas de fondo en dos componentes, el diámetro de las partículas y la geometría del fondo:

$$\tau_{lecho} = \tau' + \tau'' = \rho(u'_*)^2 + \rho(u''_*)^2 \quad (3.12)$$

donde la resistencia asociada a los granos puede ser estimada con una relación tipo Keulegan (1938):

$$\frac{U}{u'_*} = 2.5 \ln \left(12.3x \frac{R'_h}{d_s} \right) \quad (3.13)$$

donde x es una función de Re_{*p} y permite calcular U/u'_* en todo el rango de paredes (hidrodinámicamente lisa, rugosa o en transición).

Dada la relación $u''_* = gR'_h J$, el cálculo de u'_* es recursivo y se debe iterar hasta lograr la precisión deseada. Como primera estimación se impone:

$$u'_* = \sqrt{\tau_{lecho}/\rho} \quad (3.14)$$

Luego se calcula Re_{*p} , x y un nuevo valor para u'_* con la ecuación 3.13. Una vez conocido u'_* , se despeja u''_* , el efecto de forma de fondo según:

$$u''_* = \frac{\tau_{lecho} - \rho u'^2_*}{\rho} \quad (3.15)$$

Y el esfuerzo de corte adimensional asociado a la forma de fondo:

$$\tau''_* = \frac{u''_*{}^2}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_p} \quad (3.16)$$

Por otra parte, para el caso de régimen laminar y un fluido pseudoplástico, la altura del trapecio que define el área de influencia del lecho es $0.5h$ dado que en régimen laminar, no existe una rugosidad hidrodinámica asociada al lecho. Se utiliza el número de Reynolds según Metzner & Reed (1955), en función del radio hidráulico para cada área de influencia:

$$Re_{acrilico}^{MR} = \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \frac{8\rho U^2}{K (2U/R_{h_{acrilico}})^n} \quad (3.17)$$

$$Re_{lecho}^{MR} = \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \frac{8\rho U^2}{K (2U/R_{h_{lecho}})^n} \quad (3.18)$$

El factor de fricción de Darcy asociado a las paredes de acrílico para régimen laminar:

$$f_{acrilico} = 64/Re_{acrilico}^{MR} \quad (3.19)$$

Finalmente, la extracción del efecto de pared para régimen laminar se realiza de manera análoga al balance de fuerzas explicado en las ecuaciones 3.10 y 3.11.

3.2.4. Corrección por pendiente

Usando el mismo análisis que el realizado por Tamburrino et al. (2016), las fuerzas que actúan sobre un grano característico son la fuerza de arrastre F_D , fuerza de sustentación F_L , el empuje E , el roce coulombico F_R y el peso W . La pendiente de la tubería afecta de manera importante a estos dos últimos parámetros. Esta inclinación determina la fuerza normal sobre la superficie, que a su vez está relacionada con la fuerza de roce. Además define si la componente del peso paralela a la orientación de la tubería es a favor o en contra de la dirección del flujo, dependiendo del signo de la pendiente. Denominando θ al ángulo que forma la tubería respecto a la horizontal, el roce coulombico está dado por:

$$F_R = \mu N = \mu[(W - E) \cos \theta - F_L] \quad (3.20)$$

donde $\mu = \tan(\phi)$ y ϕ es el ángulo de reposo, el cual para arena es $\phi \sim 30^\circ$. Del balance de fuerzas sobre el grano para la condición crítica de movimiento se tiene la ecuación:

$$F_R = F_D + F_L + (W - E) \sin \theta \quad (3.21)$$

Notar del balance de fuerzas de la ecuación 3.21 que para $\sin \theta > 0$, la componente del peso es a favor del movimiento, mientras que para $\sin \theta < 0$, la componente se opone al movimiento. Lo anterior es coherente con la definición utilizada anteriormente para la pendiente, en la sección 3.2.1. Considerando un grano esférico de diámetro d_s y densidad ρ_s , se obtiene que la expresión para el esfuerzo de corte crítico adimensional está dada por:

$$\tau_*^{lecho}(\theta) = \frac{u_*^2}{gRd_s} = \frac{4}{3} \frac{\mu \cos(\theta) - \sin(\theta)}{C_D + \mu C_L} \quad (3.22)$$

donde u_* es la velocidad friccional, $R = (\rho_s - \rho)/\rho$, el peso específico boyante, C_D y C_L los coeficientes de arrastre y sustentación respectivamente.

Considerando como situación de referencia la tubería horizontal:

$$\frac{\tau_*^{lecho}(\theta)}{\tau_*^{lecho}(\theta = 0)} = \frac{\mu \cos(\theta) - \sin(\theta)}{\mu} \quad (3.23)$$

En la ecuación 3.24, se define el esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho y modificado por pendiente τ_{**}^{lecho} . El término que acompaña a $\tau_*(\theta)$ es el factor de corrección por pendiente, el cual considera el efecto de la pendiente de la tubería, e intenta hacer los experimentos de todas las pendientes comparables entre sí (Tamburrino et al., 2016):

$$\tau_{**}^{lecho} = \frac{\mu}{\mu \cos(\theta) - \sin(\theta)} \tau_*(\theta) \quad (3.24)$$

3.2.5. Arrastre de sedimentos

Dado que el principal uso industrial de este tipo de instalaciones es el transporte de partículas, caracterizar el transporte de fondo de sedimentos es relevante. El procedimiento de este análisis se basa en la determinación de la porción del lecho que está en movimiento. Para poder explicar tal metodología, es necesario analizar primero la ecuación de Exner:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (3.25)$$

donde η es la altura desde un plano de referencia hasta la superficie del lecho, q_s el gasto sólido de fondo por unidad de ancho y p la porosidad.

Usando el método de las características $\tilde{x} = x - ct$, donde c es la celeridad de la onda, se tiene que:

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial x} = 1 \quad \frac{\partial \tilde{x}}{\partial t} = -c$$

Reemplazando en la ecuación 3.25:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tilde{x}} \frac{\partial \tilde{x}}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_s}{\partial \tilde{x}} \frac{\partial \tilde{x}}{\partial x} = 0 \quad (3.26)$$

$$c \frac{\partial \eta}{\partial \tilde{x}} = \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_s}{\partial \tilde{x}} \quad (3.27)$$

Integrando:

$$c \eta(\tilde{x}) = \frac{1}{1-p} q_s(\tilde{x}) \quad (3.28)$$

notar que en $\tilde{x} = 0$, $q_s(0) = 0$, por lo que la constante de integración es nula.

Lo anterior es función de \tilde{x} , sin embargo, lo que se desea obtener es un gasto sólido promedio a lo largo del eje longitudinal. Para esto se integra la ecuación 3.28 en el largo de la duna, λ :

$$c \frac{\int_0^\lambda \eta(\tilde{x}) d\tilde{x}}{\lambda} = \frac{1}{1-p} \frac{\int_0^\lambda q_s(\tilde{x}) d\tilde{x}}{\lambda} \quad (3.29)$$

$$\bar{q}_s = (1-p)c \bar{\eta} \quad (3.30)$$

donde $\bar{(\)}$ indica promedio longitudinal.

El análisis anterior es válido debido a que las zonas de erosión y depositación son claramente identificables. En consecuencia, todas las partículas poseen un tiempo de residencia en el frente de la duna, es decir, las partículas se arrastran sobre esta duna hasta detenerse en su frente y no saltan desde su cresta a la siguiente duna. Más detalles de este fenómeno se presentan la sección B del capítulo Anexos. Notar además que la ecuación 3.30 es válida para todo tipo de forma de fondo, independiente de su geometría, sólo basta que cumpla la condición sobre el mecanismo de transporte de las partículas.

Gaeuman & Jacobson (2007) analizan la migración de formas de fondo en la parte baja del río Missouri. Estos autores usan, como primera aproximación, la relación para estimar el gasto sólido de fondo volumétrico de Simons et al. (1965):

$$q_s = 0.5(1 - p)a \frac{dx}{dt} + C_1 \quad (3.31)$$

donde p es la porosidad, a , la amplitud definida como la distancia entre la zona más alta y más baja de una forma de fondo, y dx , la distancia que la forma de fondo recorrió en un intervalo de tiempo dt , es decir la celeridad de la onda.

C_1 es un factor que representa la porción de gasto sólido que no participa en la traslación de la onda. Por ejemplo, este es el caso de partículas que salten de una cresta de duna a la siguiente, sin tiempo de residencia en el frente de la duna. Como se explicó anteriormente y detalló en la sección B del capítulo Anexos, en la presente investigación, este tipo de transporte no se observó en las dunas generadas en la tubería cuadrada debido al flujo de un fluido pseudoplástico. En consecuencia, para la aplicación de la ecuación 3.31, $C_1 = 0$.

El factor 0.5 es un coeficiente que supone una duna triangular por lo que Villard & Church (2003) reemplazan este factor por un coeficiente β que toma en cuenta la desviación de la forma de fondo respecto del triángulo idealizado. Dada la metodología utilizada en la presente investigación, donde se utiliza el registro 3D logrado, este coeficiente se encuentra intrínseco en el cálculo de $\bar{\eta}$ en la ecuación 3.32.

A continuación se explica la primera metodología para la estimación del gasto sólido de fondo, la cual considera la geometría de cada onda registrada. La Figura 3.4 muestra, a modo de ejemplo, el perfil a lo largo de un eje longitudinal del registro 3D. En esta figura se observa claramente que las formas de fondo registradas, para el caso de un fluido pseudoplástico fluyendo sobre el lecho, difiere del triángulo idealizado. Antes de detallar el procedimiento, se exponen los pasos a seguir para facilitar la comprensión:

- i) Para cada fila del registro 3D.
 - Identificar perfil de la duna.
 - Ubicar mínimos locales para individualizar cada duna.
 - Identificar porción de arena que se encuentra en movimiento (zona bajo el perfil longitudinal y superior a la línea segmentada en la Figura 3.4).
 - Estimar el avance del centro de masa de la duna individualizada.
- ii) Repetir procedimiento anterior para cada fila del registro 3D
- iii) Establecer un perfil de gasto sólido (Figura E.5 en sección E.3 del capítulo Anexos)
- iv) Calcular el gasto sólido de fondo por unidad de ancho promedio.

Siguiendo los pasos recién presentados, en la Figura 3.4, se identifica, para cada fila del registro 3D, la(s) duna(s) en la ventana de medición FTP. Ésta es representada por la curva

negra, donde el gasto sólido es el principal responsable del ruido en la determinación de la superficie del lecho. Para eliminar este ruido, se utilizó un filtro pasa bajo, el cual suaviza dicha superficie y genera la curva roja de la figura. Esto facilita la identificación de los mínimos locales, los cuales son representados con puntos azules en la Figura 3.4. Estos puntos identifican el comienzo y término de cada duna. Se traza una recta (línea segmentada en la figura) entre estos puntos azules para identificar la porción de arena que se encuentra en movimiento. Finalmente, de la Figura 3.4, se extrae la duna individualizada, se identifica el centro de masa y se rastrea su avance por medio de la secuencia de imágenes registradas. Con el avance del centro de masa en el tiempo se obtiene la celeridad de la onda. Respecto de la ecuación 3.30, lo que se logra al extraer la duna individualizada es obtener $h(\tilde{x})$, lo que permite calcular $\bar{\eta}$ tal que:

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^\lambda h(\tilde{x})d\tilde{x}}{\lambda} = \bar{h} \quad (3.32)$$

donde $h(\tilde{x})$ es la geometría de la porción en movimiento de arena.

De esta manera, se obtiene que el gasto sólido por unidad de ancho, para la fila del registro 3D caracterizada, es:

$$\bar{q}_s = (1 - p)\bar{h}c \quad (3.33)$$

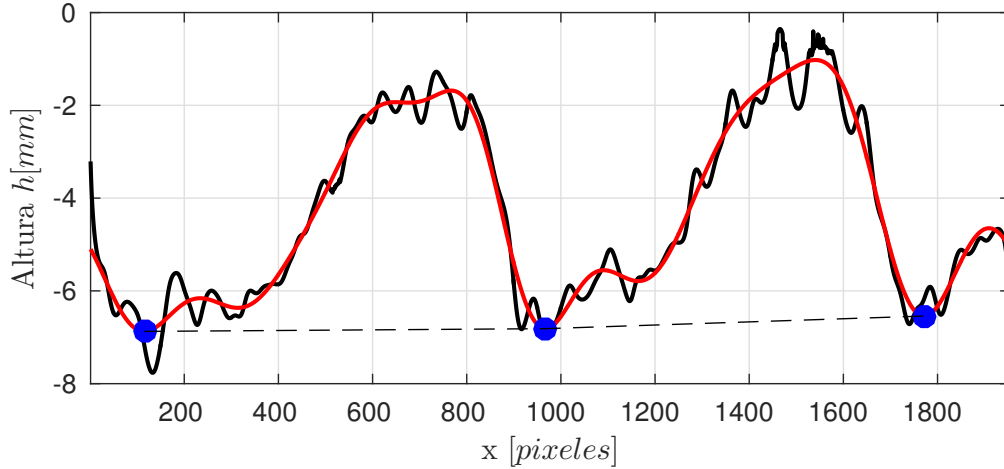


Figura 3.4: Sección en movimiento

El procedimiento anterior se repite para todas las filas del registro 3D y se obtiene un perfil transversal para el gasto sólido de fondo. Sin embargo, debido al transporte de fondo y la ubicación de la duna (si está completamente dentro de la ventana de medición FTP, o no), no es posible calcular q_s para todos estos ejes. Por esta razón, es necesario ajustar una función al perfil transversal de q_s para rellenar las filas que no poseen datos. Se establecieron criterios para asegurar que la función sea ajustada sólo si se consigue estimar un mínimo de datos. Además se establece un criterio de desviación máxima de los valores obtenidos respecto de la función a ajustar, por lo que si los datos no muestran una tendencia concluyente, el dato se elimina. Se encontró que un perfil parabólico describe correctamente el perfil trasversal de q_s , para el caso de un flujo en régimen laminar de un fluido pseudoplástico. Probablemente este perfil muestra un buen ajuste debido a que, en régimen laminar, la influencia de las paredes

sobre el esfuerzo de corte en el fondo es importante a lo largo de todo el perfil transversal. Más detalles de esta metodología en la sección E.3, del capítulo Anexos.

Finalmente, se calcula el gasto sólido de fondo por unidad de ancho promedio de toda la sección analizada. Con el fin de tener pixeles de igual tamaño en toda la imagen, las imágenes fueron preprocesadas para corregir por aberración del lente. Gracias a esto, para obtener el gasto sólido promedio de toda la sección, no es necesario ponderar el gasto sólido en función del ancho de las filas, ya que su ancho es igual para todas las filas del registro 3D. El resultado de la primera metodología es el gasto sólido de fondo promedio por unidad de ancho q_1 , tal que:

$$q_1 = (1 - p) \frac{\sum_{i=1}^N q_s(i)}{N} \quad (3.34)$$

donde N el número de filas del registro 3D, y $p = 0.3$, es la porosidad del lecho granular.

En el capítulo 4, Resultados, el número adimensional estudiado es:

$$q_{*1} = \frac{q_1 \mu_{eff}}{(\rho_s - \rho) g d_p^3} \quad (3.35)$$

donde ρ es la densidad del fluido, ρ_s la densidad de los granos y d_p su diámetro característico. μ_{eff} es la viscosidad efectiva del fluido pseudoplástico definida en la sección 2.2, del capítulo Marco Teórico.

Como segunda metodología, para la estimación del arrastre de sedimentos, se supone una duna triangular 2D. Con esta geometría, la ecuación 3.32 queda

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^\lambda h(\tilde{x}) d\tilde{x}}{\lambda} = \frac{A}{2} \quad (3.36)$$

donde A es la amplitud media de las dunas registradas para tal condición experimental. Notar que este resultado es exactamente el mismo que al usar la ecuación 3.31.

En consecuencia la ecuación 3.30 queda:

$$q_2 = (1 - p) c \frac{A}{2} \quad (3.37)$$

De esta manera, las únicas variables necesarias para estimar el gasto sólido de fondo, en la segunda metodología, son la amplitud y la celeridad de la onda. Su versión adimensionalizada es la siguiente:

$$q_{*2} = \frac{q_2 \mu_{eff}}{(\rho_s - \rho) g d_p^3} \quad (3.38)$$

4. Resultados

En este capítulo se aprovecha la principal ventaja del sistema de medición FTP que es el registro tridimensional de las formas de fondo. Primero se hace un análisis cualitativo de las características geométricas encontradas y luego un análisis cuantitativo, a través de los adimensionales ya definidos. Dado que el sistema de medición se mueve solidario con la tubería, la ventana de medición FTP (zona registrada) es siempre la misma y la pendiente no es directamente identificable en cada registro. Los resultados mostrados aquí son obtenidos a partir de las formas de fondo generadas por el flujo de un fluido pseudoplástico. El análisis de los experimentos con agua pueden verse en la sección D y en Garcés & Tamburrino (2015), ambos en el capítulo Anexos. En ese capítulo se pueden ver también, en la sección F, tablas con las condiciones experimentales, los valores de los parámetros medidos durante los ensayos y los números adimensionales obtenidos para cada experiencia.

En la Figura 4.1 se muestra, a modo de ejemplo, dunas para dos caudales distintos y un tiempo dado del experimento. Las imágenes en colores corresponden a la batimetría 3D del lecho deformado, registradas por el sistema de medición FTP, donde el flujo escurre de izquierda a derecha. Bajo cada una de estas imágenes se muestra además el perfil longitudinal del eje central de la tubería para exponer las principales dimensiones de estas dunas, amplitud de onda y su longitud. Dado que la duna es tridimensional, la caracterización cuantitativa de las variables amplitud, longitud de onda y celeridad se llevó a cabo en función del perfil longitudinal central de la tubería.

En la Figura 4.1.a se muestra el caso de tubería horizontal para un número de Reynolds según Metzner & Reed (1955), asociado al lecho, $Re_{lecho}^{MR}=60$, y en la Figura 4.1.b, el caso $Re_{lecho}^{MR}=130$. Cabe mencionar que la metodología experimental usada, consiste en iniciar el registro de la geometría del lecho móvil para un Re_{lecho}^{MR} dado, transcurrido un tiempo suficiente para alcanzar condiciones cuasi permanentes de las formas de fondo. Una vez logrado el registro, se aumenta el caudal que escurre sobre este mismo lecho ya deformado. Cuando se alcanza una nueva condición de equilibrio, con Re_{lecho}^{MR} mayor que el anterior, se inicia la siguiente medición. El registro de las formas de fondo es exitoso si las ondas sedimentarias no presentan variaciones de tamaño considerables durante el período en que se midieron. En caso de lograr tal condición se dice que el tiempo de equilibrio de las formas de fondo fue alcanzado. Es decir, el sistema alcanzó un equilibrio dinámico para la morfología del lecho y el flujo sobre él (Baas, 1999).

El registro temporal de las imágenes 3D permite estudiar la evolución y migración de las dunas a través de la secuencia de imágenes registrada. Sin embargo, la evolución a partir de lecho plano no se estudió por la memoria limitada de la cámara fotográfica y se optó por registrar condiciones cuasi permanentes. Por una parte, un intervalo de tiempo entre cuadros pequeño, genera un registro temporal que necesita una gran capacidad de almacenamiento digital. Por otra parte, un intervalo de tiempo entre cuadros demasiado largo, complica la caracterización de las formas de fondo, en particular, el seguimiento e identificación de una

duna cuadro a cuadro. Por esta razón, se usó un intervalo de tiempo $\Delta t = 10$ s, tal que se lograra el registro más largo posible sin que las formas de fondo avanzaran demasiado entre cuadros. Durante los ensayos se observó que a medida que aumenta el caudal, las formas de fondo muestran un crecimiento sostenido tanto en la amplitud de la onda como en la longitud de la misma para el rango de adimensionales ensayados. Debido a que el alcance longitudinal de la técnica de medición FTP es de aproximadamente 48 cm, formas de fondo cuya longitud de onda excede este largo, se registraron con una huincha metálica durante los ensayos.

4.1. Geometría y tridimensionalidad

Todas las dunas registradas en el presente estudio pueden ser categorizadas como dunas pequeñas (Ouriemi et al., 2010). Las formas de fondo registradas en el caso horizontal y contrapendientes siguen la forma típica de duna 2D en el eje central de la tubería. Esto es, una sección de aguas arriba de la cresta de la duna suave y un frente cercano al ángulo de reposo de las partículas. Dada la forma redondeada de su frente y su tridimensionalidad en la profundidad del lecho, es imposible establecer un valor exacto para la pendiente del frente de la duna. Cualitativamente, la duna presenta un frente de pendiente abrupta en el centro que se suaviza hacia los costados. Cerca de las paredes, el lecho es horizontal y el gasto sólido prácticamente nulo. Esto se debe a que el esfuerzo de corte sobre las paredes es mínimo en las esquinas de la sección de escurrimiento. Los casos en pendiente positiva se describen como una superficie ondulada, donde el frente de la duna posee una inclinación notablemente menor comparada a los casos en pendiente adversa.

En la Figura 4.2 se comparan los perfiles centrales de las formas de fondo registradas para las dos pendientes extremas, $i = -16\%$ e $i = 16.8\%$, para números de Reynolds según Metzner & Reed (1955) asociados al lecho $Re_{lecho}^{MR} = 77$. Las formas de fondo en pendiente a favor, es decir pendiente positiva, son más onduladas y presentan un frente menos definido que las formas de fondo generadas en pendiente adversa. En esta figura se muestra además que la longitud de onda es mucho menor para pendiente adversa. En la zona de medición se alcanzan a registrar dos dunas para esta última pendiente, mientras que para pendiente positiva la longitud de onda es superior a la longitud de la ventana de medición del sistema FTP. Esto es coherente con lo registrado por Admiraal (2003), quien registra un cambio de geometría similar para arena de un diámetro característico de $530\ \mu\text{m}$ para dos pendientes, -15° y 15° , con igual caudal y gasto sólido para ambos casos. En el estudio de Admiraal (2003), se dice que el ángulo del frente de onda, respecto de la orientación horizontal de la tubería, es cercano al ángulo de reposo de las partículas para todas las pendientes. Sin embargo, el ángulo del frente relativo a la base de la tubería, para el caso de pendiente a favor, es mucho más suave, dado que el ángulo que esta cara de la duna forma con la base de la tubería es mucho menor que para el caso de contrapendiente.

A pesar de que el registro del sistema de medición FTP se realizó para los casos de pendiente a favor, fue imposible caracterizar el frente de la duna, ni su amplitud. Otra de las razones es el gasto sólido de fondo que transita sobre el lecho, el cual afecta en la determinación del fondo mediante FTP. Por esta razón, para los números adimensionales que consideran la

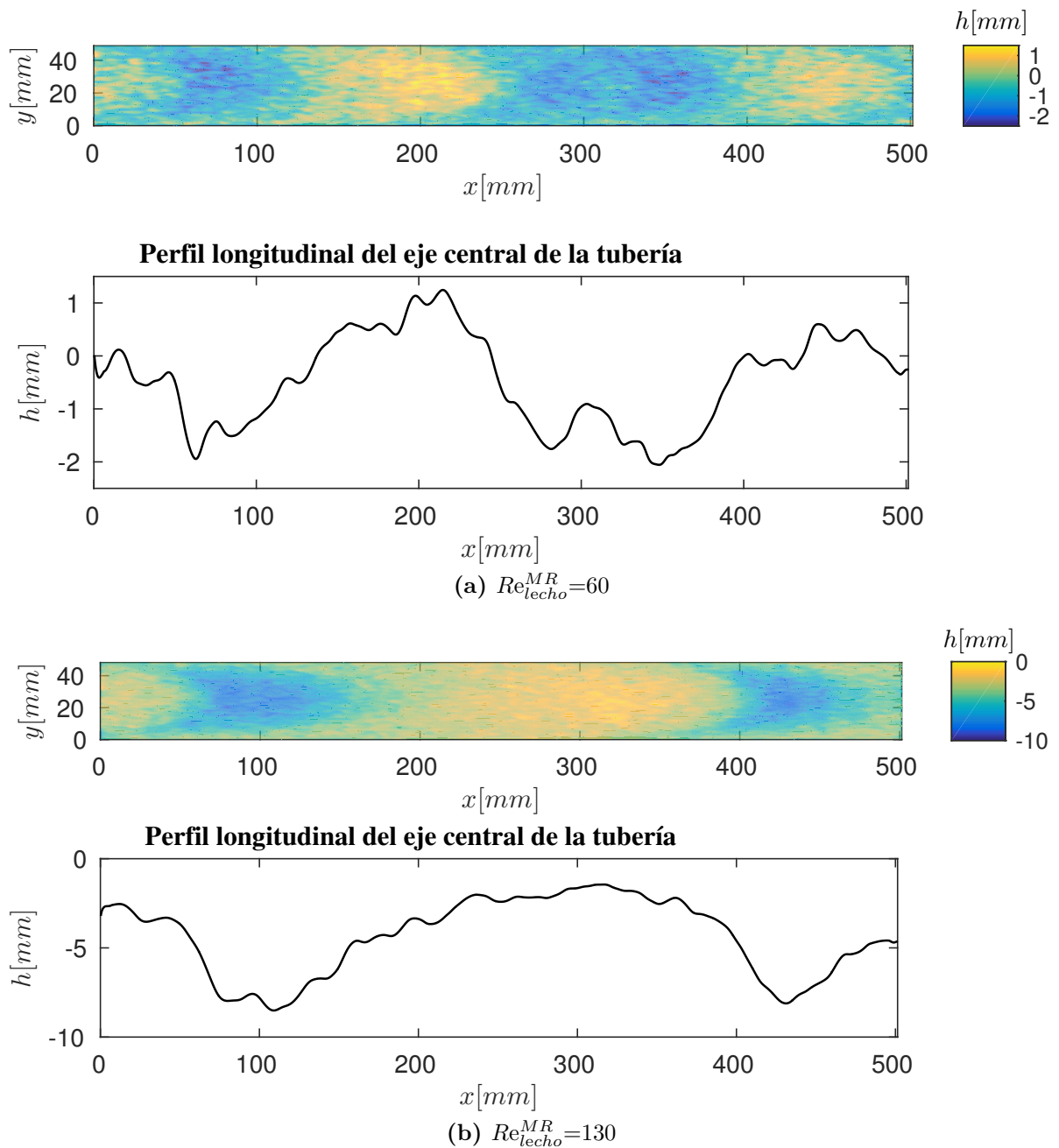


Figura 4.1: Caracterización geométrica de las formas de fondo. Las partículas corresponden a arena entre $600\ \mu\text{m}$ y $800\ \mu\text{m}$, sin pendiente y un fluido pseudoplástico caracterizado por un índice de flujo $n=0.69$ y coeficiente de consistencia $K=0.23\ \text{Pa s}^n$. Se expone además el perfil longitudinal a lo largo del eje central de la tubería.

amplitud de la onda dentro de sus parámetros, sólo se estudian cuantitativamente los casos de tubería horizontal y las dos pendientes adversas.

En la Figura 4.3 se analiza el efecto de la tridimensionalidad de la duna en el registro lateral de las formas de fondo. En la imagen a colores se observa cómo la arena se encuentra más alta en los bordes, lo que provoca que la medición lateral del lecho subestime la sección media

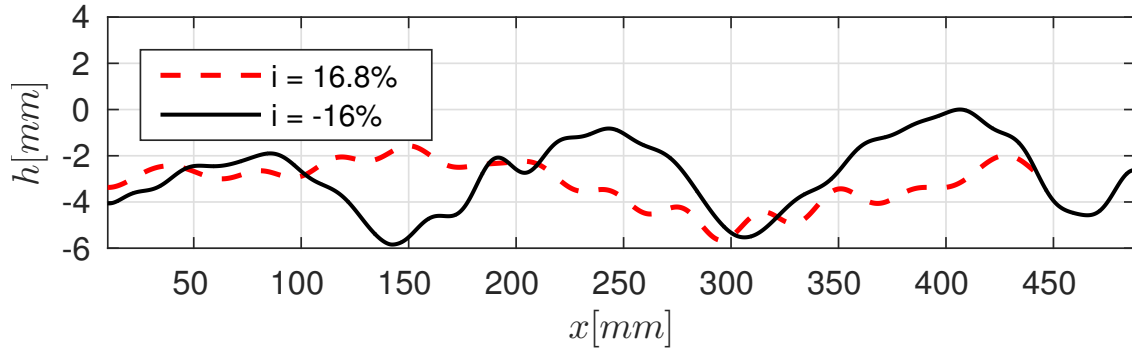


Figura 4.2: Comparación de la geometría de dunas en pendientes $i = -16\%$ e $i = 16.8\%$ para $Re_{lecho}^{MR} = 77$

de escurrimiento. La subestimación del radio hidráulico se traduce en una subestimación del esfuerzo de corte total τ y, dada la metodología de análisis, en una subestimación del factor de fricción asociado al lecho, f_{lecho} . En el cuadro inferior de la Figura 4.3 se presenta la geometría de tres perfiles longitudinales. El primer perfil es el eje central de la tubería, el segundo en $y = 3b/4$, siendo b el ancho de la tubería e $y = 0$ una de las paredes de acrílico. El último de los perfiles se encuentra a $y = 12b/13 = 4$ mm de la pared donde se observa claramente que una vista lateral no representa correctamente la forma de fondo. En consecuencia, para las condiciones experimentales ensayadas, los datos generados de la vista lateral son en su mayoría incorrectos y se debe preferir los resultados de la técnica de medición FTP. Esta es la razón de por qué fue fundamental desarrollar el sistema de medición FTP con la corrección por refracción correspondiente.

4.2. Periodicidad de las formas de fondo

En la Figura 4.4 se muestra, para seis experimentos, el registro temporal de la altura del lecho granular en el centro de la zona de medición FTP. En general, la frecuencia de adquisición de imágenes es de 0.1 Hz durante 20 minutos y 30 minutos para las dunas más grandes. Con esta figura no sólo se intenta demostrar la periodicidad de las formas de fondo sino también cómo aumentan su tamaño con el aumento de Re_{lecho}^{MR} . De la comparación de las pendientes graficadas, $i = -7.5\%$ e $i = -16\%$, se observa además cómo la longitud de onda se ve reducida para el caso de pendiente adversa más negativa respecto del caso $i = -7.5\%$. Si bien es el tiempo la variable en el eje de las abscisas, la celeridad de la onda no muestra variaciones importantes en función de la pendiente. Por otra parte las celeridades no mostraron una tendencia clara para aumentos de caudal, siendo la celeridad promedio $c = 1$ mm/s, con una desviación estándar de 0.13 mm/s. Esto se muestra en la Figura E.4 de la sección E.2, en el capítulo Anexos. Así, los espacios temporales entre mínimos locales del gráfico son representativos, cualitativamente, de las longitudes de onda.

Respecto de la periodicidad de las formas de fondo en la Figura 4.4, se considera que se logró una condición cuasi-periodica. Kuru et al. (1995) presentan una distribución de

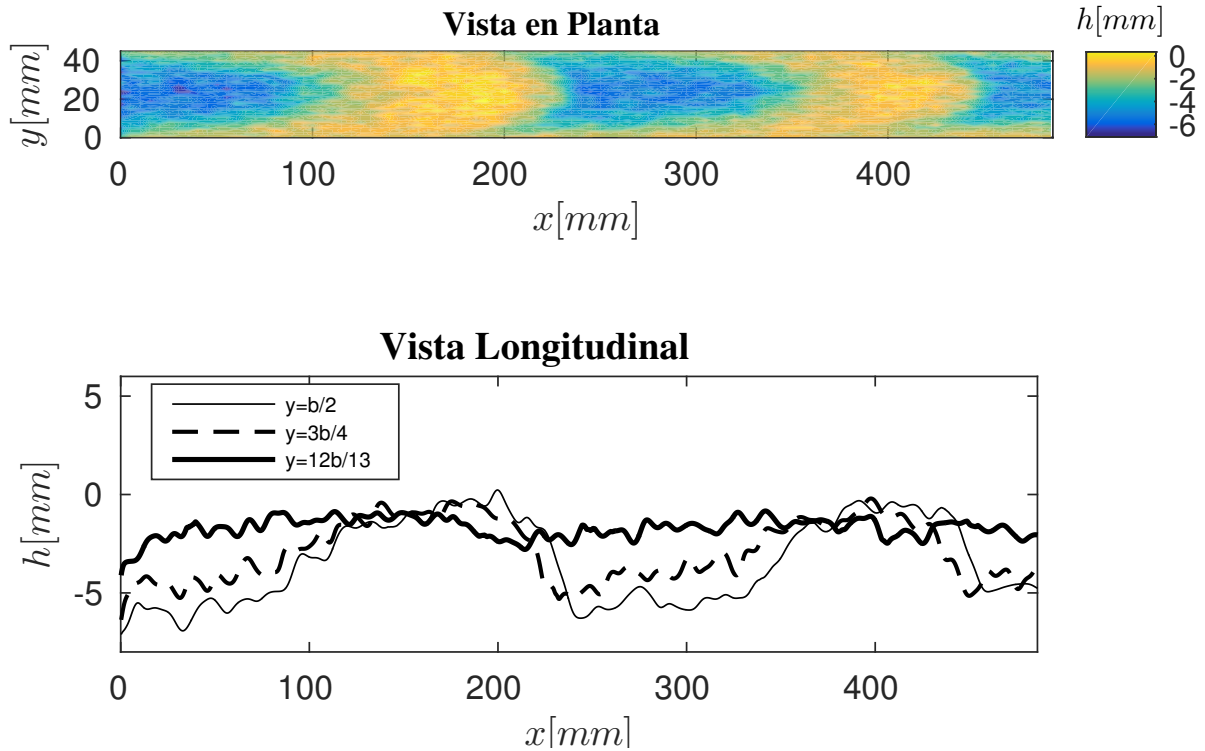


Figura 4.3: Diferencia de altura media registrada dependiendo del perfil medido. La imagen corresponde a $Re_{lecho}^{MR}=122$ para la pendiente -7.5% . $b/2$ corresponde al eje central de la tubería, $3b/4$ corresponde un eje a 13 mm de la pared de acrílico lateral izquierda en el sentido de flujo y $12b/13$ a un eje a 4 mm de la misma pared de la tubería. El sentido de flujo es de izquierda a derecha.

longitudes de formas de fondo mucho más extendida, en sus ensayos realizados para una solución de agua y glicerina y régimen turbulento. Esto se debe sin embargo, a la metodología utilizada por estos autores. Su metodología experimental consistía en la generación ondas sedimentarias en una tubería circular a partir de un lecho plano con caudal constante en régimen turbulento. Una vez que las primeras formas de fondo eran observadas, el experimento se detenía y se medían las formas de fondo. En los experimentos de Kuru et al. (1995) no se espera el tiempo de equilibrio. Baas (1999) en cambio, estudia el tiempo de equilibrio para un canal abierto, flujo en régimen turbulento y partículas de 0.238 mm. Las formas de fondo generadas transcurrido el tiempo de equilibrio en los experimentos de Baas (1999) poseen una distribución de longitudes de onda con una dispersión considerablemente menor que Kuru et al. (1995).

En el presente estudio, los registros temporales de la Figura 4.4 comienzan una vez que el experimento funcionó 30 minutos a caudal fijo. El tiempo de equilibrio de cada caudal no fue determinado, pero la periodicidad de las formas de fondo registradas demuestra que este tiempo es menor a media hora. La metodología experimental consiste en el registro de un caudal con formas de fondo, luego se aumenta el caudal y se contabilizan nuevamente los 30 minutos a caudal fijo. Las velocidades medias del flujo del presente estudio, en presencia de formas de fondo, van de 0.19 m/s a 0.47 m/s. En los experimentos de Baas (1999), los tiempos

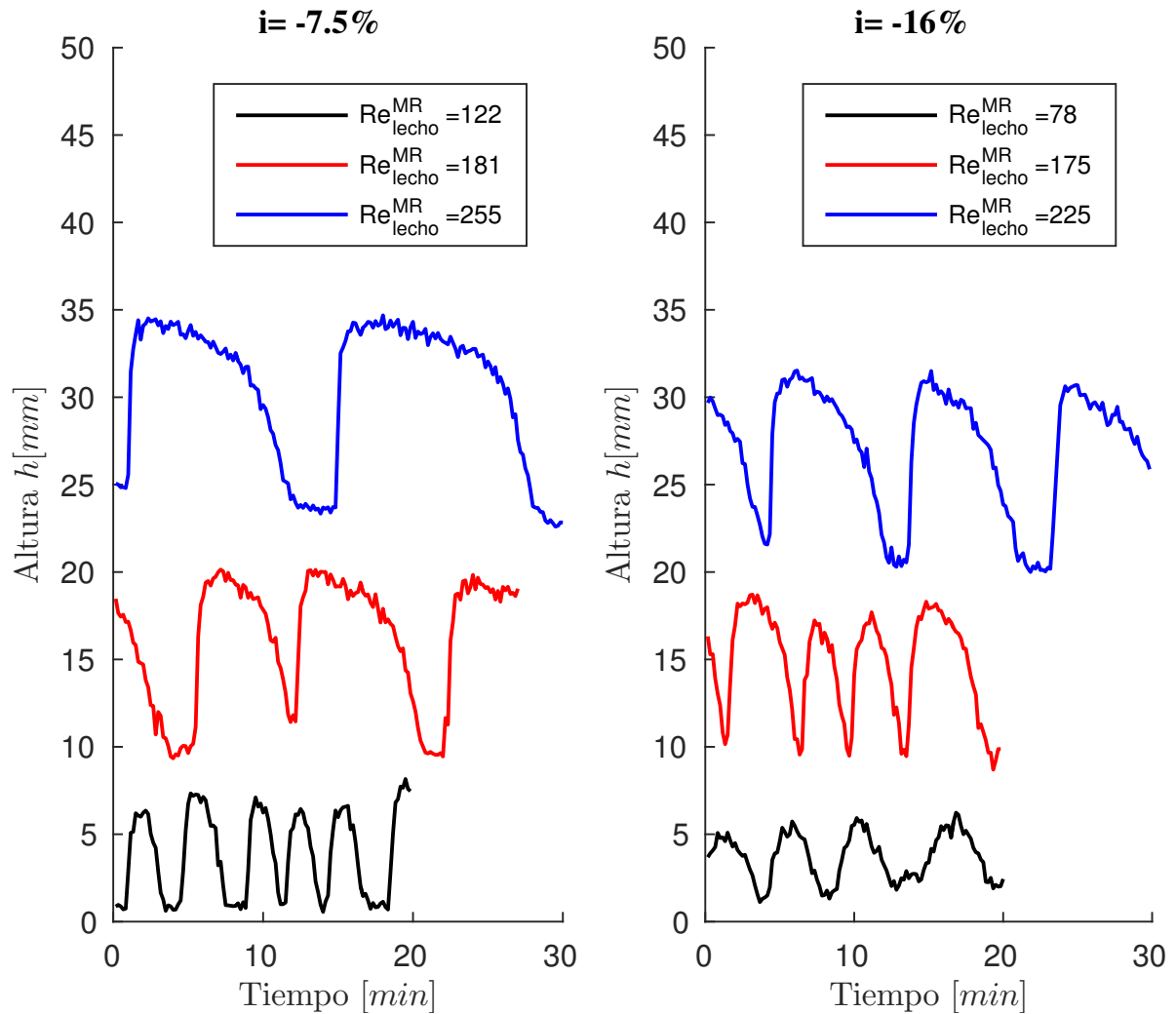


Figura 4.4: Registro de la altura del lecho en el centro de la zona de medición FTP para distintos números de Reynolds asociados al lecho, modificados para fluido pseudoplástico, Re_{lecho}^{MR} .

de equilibrio son considerablemente mayores (5 a 27 horas) para tamaños de partículas y velocidades medias similares. Sin embargo, este autor realizó sus ensayos en agua como fluido y canal abierto. Los tiempos de equilibrio de Baas (1999), para alcanzar una geometría constante de formas de fondo, son contabilizados a partir de lecho plano. Esto no es el caso de la metodología recién explicada, usada en esta investigación. Además, el cambio de conducto cerrado a abierto influye considerablemente ya que, en el primero, el flujo debe modificarse instantáneamente a cambios en la geometría del fondo debido a que se encuentra en presión. En cambio, para el caso de canal abierto, se tiene que un aumento en la rugosidad del lecho modifica la altura de escurrimiento, modificando así el esfuerzo de corte que se genera sobre el lecho granular. Esta interacción, entre el flujo y el lecho, requiere tiempo para lograr un equilibrio. Otra posible explicación para esta reducción en los tiempos de equilibrio es que la transferencia de momentum del fluido hacia la partícula es más eficiente debido al aumento en la viscosidad del fluido utilizado en esta tesis y, en consecuencia, un aumento en la fuerza de arrastre. Así el tiempo necesario para que el sistema logre una condición estable para un

caudal dado disminuye. Baas (1999) muestra además que los tiempos de equilibrio aumentan con el aumento del tamaño de las partículas, debido probablemente al aumento en la inercia de las partículas. A pesar de que los efectos recién descritos no fueron plenamente estudiados, dada la periodicidad alcanzada de las dunas, se confía en que el tiempo transcurrido antes de cada ensayo fue suficiente para alcanzar un equilibrio dinámico entre las formas de fondo y el flujo.

Otro fenómeno importante para lograr tal periodicidad de las dunas, es el tipo de transporte que mueve las partículas. En el caso de régimen turbulento, pueden existir partículas en suspensión que salen del lecho y luego vuelven a él, recorriendo distancias superiores a la longitud de la onda. Gaeuman & Jacobson (2007) aclara que este es el caso cuando, en la ecuación 3.31 del capítulo Metodología, $C_1 \neq 0$. Es decir, el caso donde partículas son parte del gasto sólido de fondo pero no permanecen en una duna a lo largo del tiempo. La naturaleza estocástica de los esfuerzos turbulentos que actúa sobre estas partículas puede influir en el tamaño de las formas de fondo, reduciendo su periodicidad. Esta incertidumbre se debe que las zonas con mayor probabilidad de erosión y depositación en el lecho son ambiguas, impidiendo que exista un volumen constante de arena en cada duna. En consecuencia, las dunas pueden variar constantemente su tamaño. Por el contrario, el tipo de transporte de fondo descrito en Niño et al. (2002) es caracterizado por una delgada capa de transporte de fondo debido a que los esfuerzos turbulentos presentes no son capaces de transportar partículas en suspensión. De esta manera la zona de erosión y depositación neta ocurren en lugares característicos de las dunas. La erosión neta ocurre inmediatamente después de la zona de aguas muertas donde el flujo se vuelve a unir al fondo, mientras que la zona con mayor probabilidad de depositación neta es el frente de la duna. Este mecanismo permite tener dunas de tamaño constante en el tiempo mientras se transportan a lo largo del lecho granular. A pesar de que las modelaciones de Niño et al. (2002) son para régimen turbulento y viento, en el presente estudio, el mecanismo de transporte es similar y por lo tanto es una razón importante de porqué las dunas observadas son regulares. El análisis de la ecuación de Exner visto en el capítulo 3, Metodología, es válido justamente gracias al tipo de transporte de fondo observado en los ensayos de esta investigación. En la sección B del capítulo Anexos se pueden ver las zonas con mayor probabilidad de erosión y mayor probabilidad de depositación junto a una explicación más detallada de este mecanismo de transporte.

4.3. Factor de fricción del lecho

A continuación se presenta el análisis cuantitativo de los adimensionales descritos en el capítulo 2, Marco Teórico. Para esto se registraron, además de la geometría de las formas de fondo, el caudal, la altura inicial del lecho, la temperatura, la presión en cuatro puntos de la tubería y la reología de la solución. A partir de la medición de la presión a largo de la tubería y sustrayendo el efecto de pared como se indica en el capítulo 3, Metodología, se obtiene el esfuerzo actuando sobre el lecho granular. El factor de fricción asociado a las paredes de acrílico se calculó con la relación de Haldenwang et al. (2010), $64/Re_{MR}$ para el factor de fricción de Darcy. Con esto, se obtuvieron las leyes de resistencia para cada pendiente ensayada. La Figura 4.5 presenta la relación entre el número de Reynolds modificado según

Metzner & Reed (1955) asociado al lecho (Re_{lecho}^{MR}) y el factor de fricción de Darcy asociado al lecho (f_{lecho}), para cinco pendientes de la tubería.

En la Figura 4.5 los círculos vacíos indican que no existe movimiento de las partículas que conforman el lecho y los asteriscos corresponden a la condición de arrastre incipiente. Los cuadrados negros son casos donde existe arrastre de fondo generalizado y, en su mayoría, formas de fondo. Los datos asociados a los cuadrados negros son resultado de la geometría de fondo caracterizada con la técnica de medición FTP. Los rombos vacíos representan los mismos ensayos de los cuadrados negros pero cuyos datos fueron calculados en base a la geometría de fondo registrada lateralmente. La recta negra representa la relación de Haldenwang et al. (2010), $64/Re_{lecho}^{MR}$.

El primer resultado relevante de estos gráficos es que los círculos blancos recuperan la relación $64/Re_{MR}$, (Haldenwang et al., 2010). Si bien esto es obvio debido a que en régimen laminar la rugosidad de los granos no afecta en la fricción que siente el flujo, esto valida los resultados obtenidos. El hecho de que los círculos no estén exactamente sobre la tendencia $64/Re_{MR}$ puede deberse a que la altura inicial del lecho plano no es perfectamente constante. De los círculos grises se observa también que el arrastre incipiente de las pendientes a favor ($i=9\%$ e $i=16.8\%$) ocurre a Re_{lecho}^{MR} menores que para pendientes adversas ($i=-7.5\%$ e $i=-16\%$).

La diferencia entre los resultados del registro lateral (diamantes blancos) versus la caracterización FTP (cuadrados negros) se hace relevante en los casos de pendiente adversa ($i=-7.5\%$ e $i=-16\%$). Es justamente en estos casos donde los efectos de la geometría de las formas de fondo tienen mayor influencia sobre el flujo. Dado que el registro lateral no es capaz de registrar correctamente la geometría del fondo, la falta de información genera una subestimación en el esfuerzo de corte sobre el fondo, y en consecuencia se obtiene un factor de fricción f_{lecho} menor. Lo anterior es consecuencia del análisis hecho en la Figura 4.3.

La influencia de las ondas sedimentarias se observa claramente para los tres gráficos superiores de la Figura 4.5. Dado que todos los ensayos realizados para el fluido pseudoplástico se encuentran en régimen laminar, no existe rugosidad hidrodinámica asociada al lecho. En consecuencia, la desviación del factor de fricción asociado al lecho f_{lecho} respecto de la tendencia $64/Re_{lecho}^{MR}$ de Haldenwang et al. (2010) es el resultado de la presencia de formas de fondo. En la figura 4.6 se deja en evidencia tal desviación graficando el siguiente parámetro:

$$\frac{f_{lecho}}{f_{Haldenwang}} = \frac{f_{lecho}}{64/Re_{lecho}^{MR}} \quad (4.1)$$

En la Figura 4.6 todos los símbolos en blanco representan la condición “sin movimiento de partículas” mientras que los símbolos negros, la condición “con arrastre generalizado”. Los cuadrados, blancos y negros, representan la tubería en posición horizontal, los triángulos, la tubería en pendiente $i = -7.5\%$ y los diamantes la tubería en pendiente $i = -16\%$. En esta figura no sólo se deja en evidencia la clara desviación respecto de la tendencia $64/Re_{lecho}^{MR}$, sino también un orden sistemático a medida que la tubería se peralta en contrapendiente. Mientras la pendiente se hace más adversa, el cociente $f_{lecho}/f_{Haldenwang}$ aumenta sistemáticamente para el rango del número de Reynolds, Re_{lecho}^{MR} , estudiado.

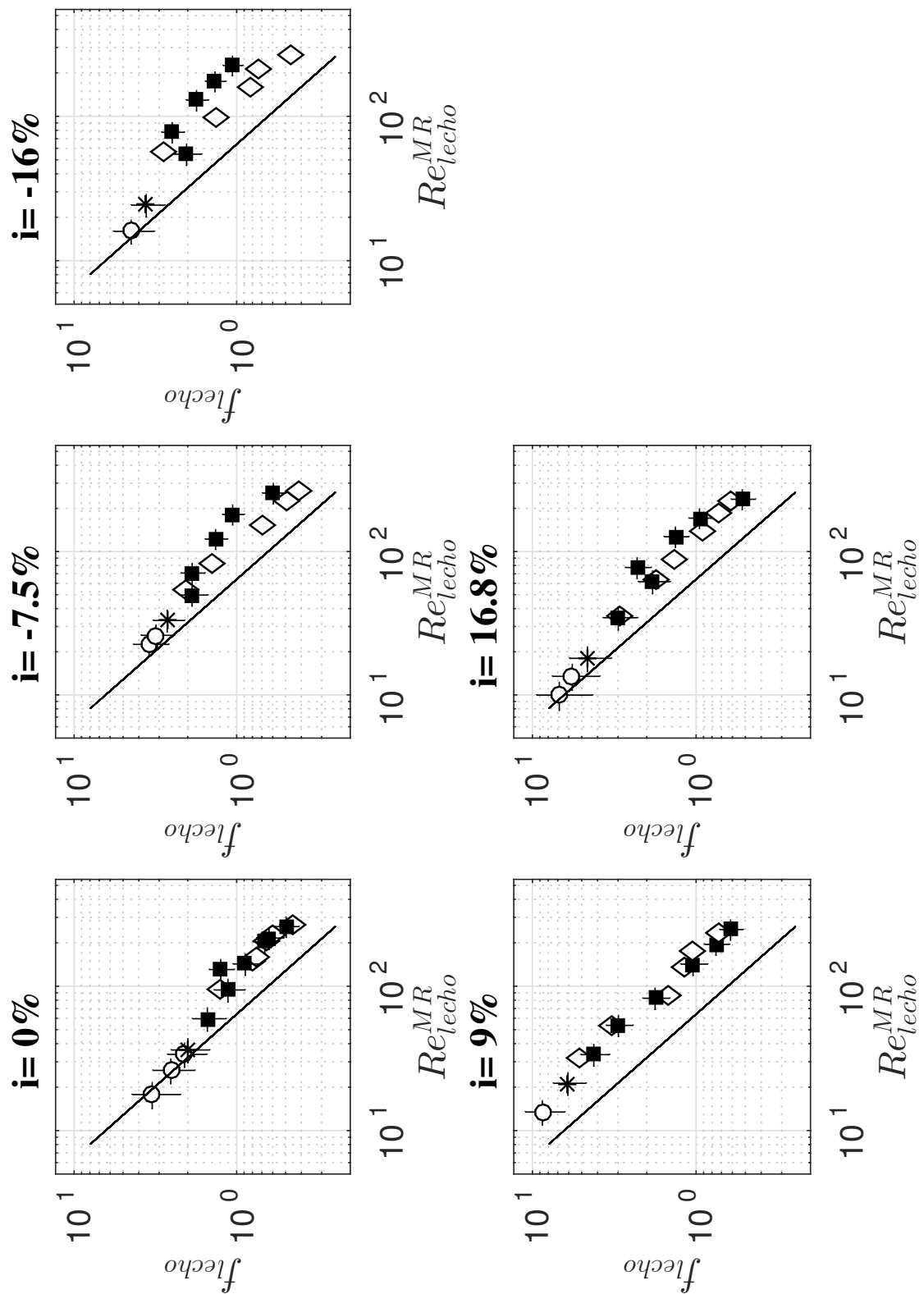


Figura 4.5: Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho}^{MR} y el factor de fricción asociado al lecho f_{lecho} , para las cinco pendientes ensayadas de la tubería

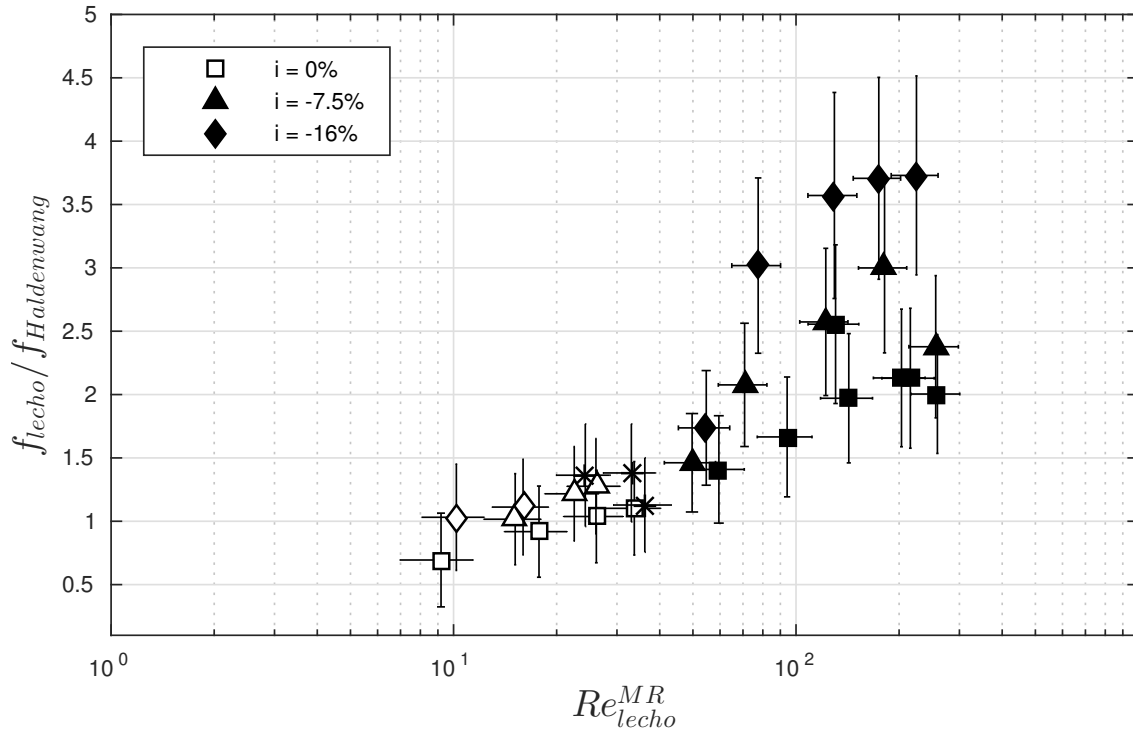


Figura 4.6: Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho}^{MR} y el cociente entre el factor de fricción asociado al lecho f_{lecho} y factor de fricción asociado a pared lisa para el mismo número de Reynolds modificado $f_{Haldenwang}$.

Con el fin de facilitar la comprensión, las pendientes a favor se grafican separadas de las pendientes adversas en la Figura 4.7. En esta figura, al igual que en la Figura 4.6, los símbolos en blanco representan la condición “sin movimiento de partículas” mientras que los símbolos negros, la condición “con arrastre generalizado”. Los triángulos invertidos representan la tubería en pendiente $i = 9\%$, mientras que las estrellas, la tubería en pendiente $i = 16.8\%$. Para pendientes positivas, el efecto de la pendiente y las formas de fondo se observa en menor medida debido a que las formas de fondo cambian abruptamente su geometría. Lo anterior es coherente con la geometría registrada por Admiraal (2003), quien registra amplitudes menores en pendientes positivas, respecto de pendiente adversa, para números de Reynolds similares. Admiraal (2003) registra además frentes de onda más suaves para pendiente adversa como lo discutido en la Figura 4.2. Para el caso de pendiente $i = 9\%$ sin movimiento de partículas y arrastre incipiente, triángulos invertidos blancos y asterisco superior, se obtuvieron valores particularmente altos para el cociente $f_{lecho}/f_{Haldenwang}$ esto es consecuencia probablemente de un lecho inicial que no fue lo suficientemente plano.

En resumen, siendo el régimen de flujo laminar, el efecto por forma del lecho sí es relevante en ensayos registrados, no así la rugosidad del lecho debido a que en éste régimen no existe rugosidad hidrodinámica asociada a los granos. A su vez, la pendiente de la tubería es un factor relevante en la geometría de la forma de fondo y en consecuencia en el factor de fricción.

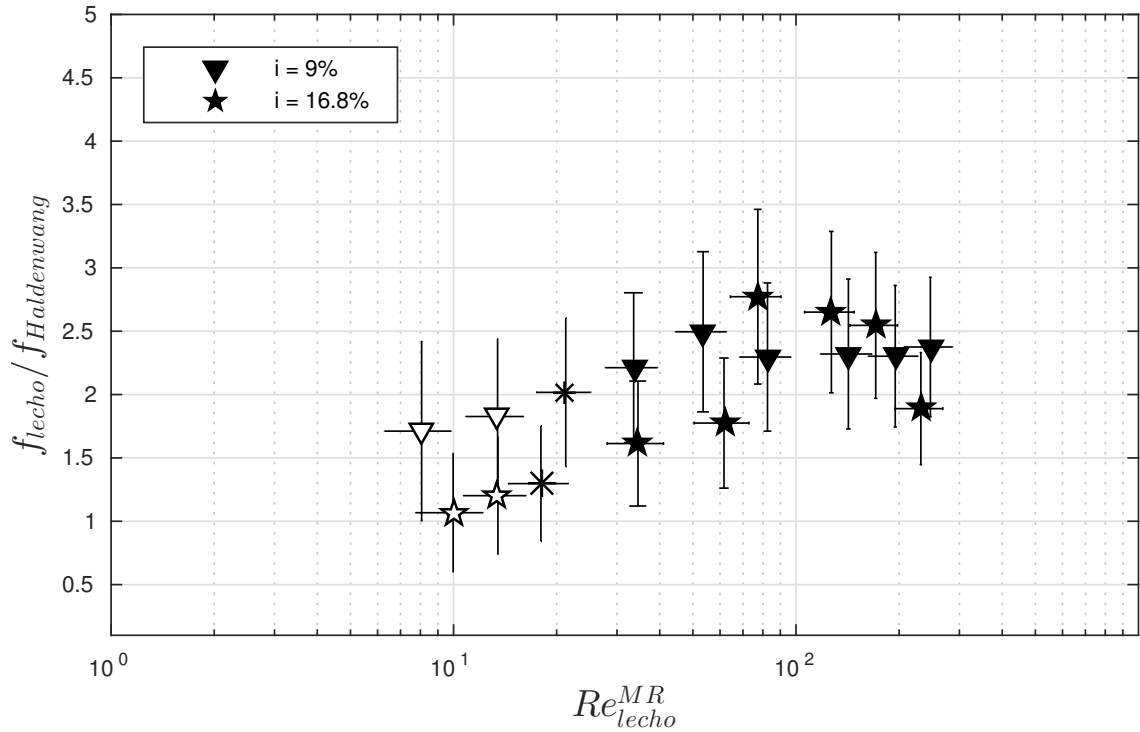


Figura 4.7: Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho}^{MR} y el cociente entre el factor de fricción asociado al lecho f_{lecho} y factor de fricción asociado a pared lisa para el mismo número de Reynolds modificado $f_{Haldenwang}$.

4.4. Amplitud de las dunas

En la Figura 4.8 se presenta la relación entre el número de Reynolds modificado del flujo asociado al lecho, Re_{lecho}^{MR} , y la amplitud de las dunas, adimensionalizada con la altura media del flujo (A/h). En esta figura sólo se analizan el caso horizontal y los casos con pendiente adversa, dada la ambigüedad en la determinación de la amplitud de las formas de fondo con pendiente a favor. Aquí se observa cómo, para un mismo número de Reynolds asociado al lecho, el adimensional A/h decrece sistemáticamente a medida que la pendiente se hace más adversa. Esto se puede notar también, cualitativamente, en la Figura 4.4. Se deja en evidencia, por lo tanto, cómo la velocidad media del flujo debe aumentar para vencer la componente de los esfuerzos gravitatorios que se oponen al movimiento. Por otra parte, se observa una relación estrictamente creciente de A/h en función de Re_{lecho}^{MR} , para el rango analizado. Esto es consecuente con Ouriemi et al. (2010), quienes dicen que el número de Reynolds es el adimensional correcto para predecir la morfología de las formas de fondo, siendo el régimen de flujo la característica más relevante para dicha predicción.

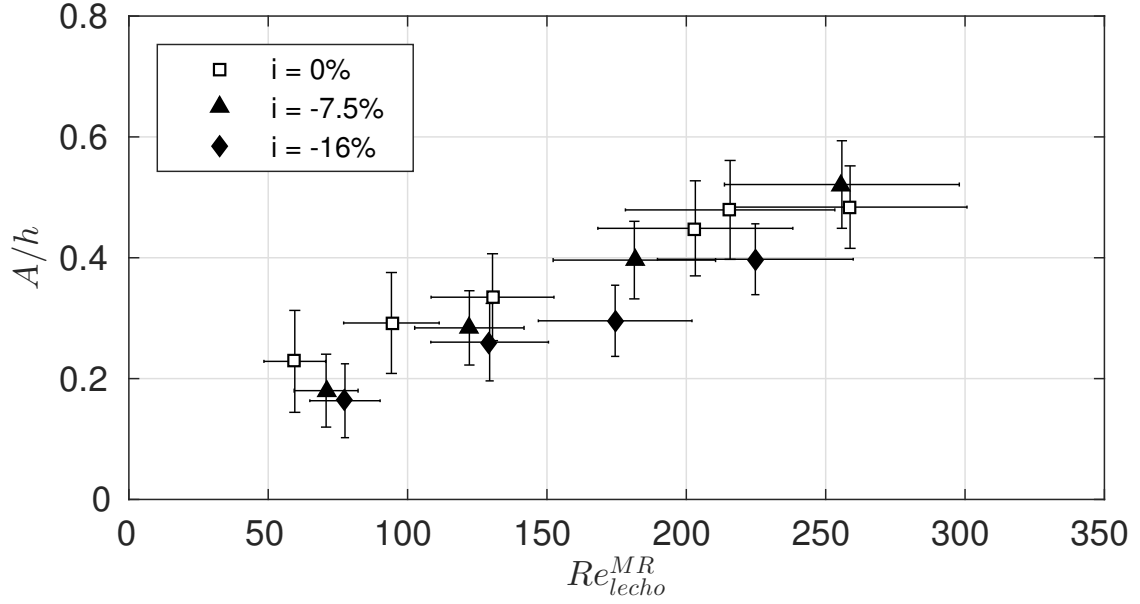


Figura 4.8: Relación entre la amplitud de onda adimensional y el Reynolds del flujo asociado al lecho.

4.5. Arrastre incipiente

La Figura 4.9 presenta un tramo del diagrama de Shields. En ella se estudia el arrastre incipiente, graficando el esfuerzo de corte adimensional (τ_*^{lecho}) en función del número de Reynolds de la partícula, modificado para fluidos pseudoplásticos (Tamburrino et al., 2016):

$$\tau_*^{lecho} = \frac{u_{*lecho}^2}{Rgd_p} \quad (4.2)$$

$$Re_{*p}^K = \rho u_{*lecho}^{2-n} d_p^n / K \quad (4.3)$$

Observando con atención los adimensionales graficados, el único parámetro que varía en ambos adimensionales es la velocidad friccional asociada al lecho u_{*lecho} . Es por esta razón que los datos de este gráfico se ajustan perfectamente a una recta en escala logarítmica. Dado que el gráfico de la Figura 4.9 está en escala logarítmica se tiene el siguiente ajuste de potencia:

$$\tau_*^{lecho} = \alpha \left(Re_{*p}^K \right)^\beta \quad (4.4)$$

$$\frac{u_{*lecho}^2}{Rgd_p} = \alpha \left(\rho u_{*lecho}^{2-n} d_p^n / K \right)^\beta \quad (4.5)$$

Simplificando y considerando que todos los parámetros son constantes excepto u_{*lecho} :

$$u_{*lecho}^2 \sim u_{*lecho}^{\beta(2-n)} \quad (4.6)$$

Por lo tanto se obtiene que β , la pendiente de la tendencia sobre la que colapsan los datos es:

$$\beta = \frac{2}{2 - n} = 1.515 \quad (4.7)$$

donde $n=0.68$ el índice de flujo del fluido pseudoplástico.

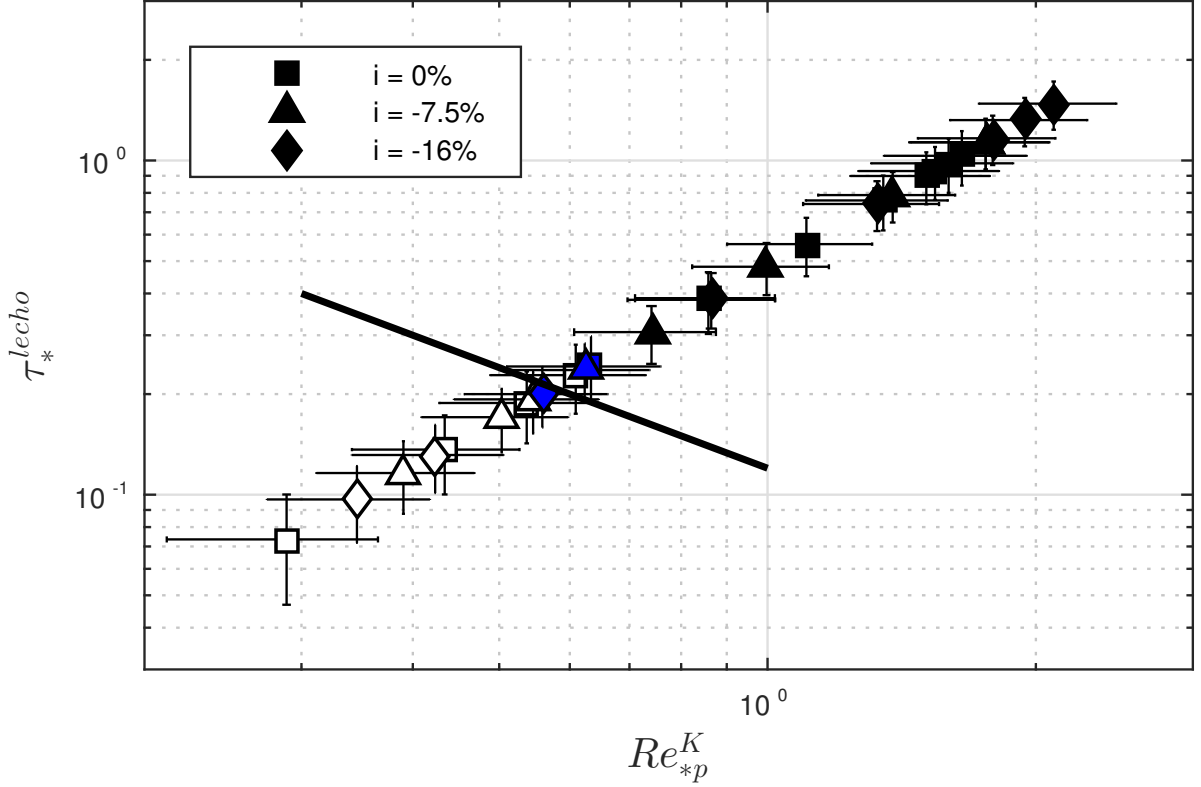


Figura 4.9: Diagrama de Shields. Esfuerzo de corte adimensional modificado por pendiente en función del número de Reynolds de la partícula asociado al lecho. La recta corresponde a un tramo del diagrama de Shields. En esta figura, los símbolos vacíos indican que no existe movimiento de las partículas que conforman el lecho, símbolos azules corresponden a la condición de arrastre incipiente, y símbolos negros son casos donde existe arrastre de fondo generalizado y, en su mayoría, formas de fondo. Los datos asociados a los símbolos negros son resultado de la geometría de fondo caracterizada con la técnica de medición FTP.

Si bien este gráfico no muestra una tendencia, dado que un adimensional es función del otro, no sólo se verifica la correcta determinación del arrastre incipiente, sino también que el esfuerzo de corte sobre el lecho es proporcional a $\rho f u_*^2$. La recta negra de la Figura 4.9 corresponde a la relación definida por Mantz (1977), válida para $Re_{*p} \leq 1$, en el diagrama de Shields, y predice correctamente la ocurrencia del arrastre incipiente. Si bien en esta figura se observa que el inicio del movimiento de las partículas en la pendiente -16% se produce para un Re_{*p} menor que para el caso horizontal, tal comportamiento se debe exclusivamente a la ambigüedad en la determinación del arrastre incipiente, y no representa una tendencia producto de la variación de la pendiente.

4.6. Celeridad de la onda

En la Figura 4.10 se grafica la celeridad adimensional (C_b) en función del parámetro $\tau_{**}^{lecho}(\tau_{**}^{lecho} - \tau_{c**}^{lecho})$, donde τ_{**}^{lecho} es el esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho y corregido por pendiente. Este adimensional fue elegido dada la relación encontrada por Charru et al. (2004), para el gasto sólido de fondo adimensionalizado con el mismo término viscoso utilizado en las ecuaciones 3.35 y 3.38.

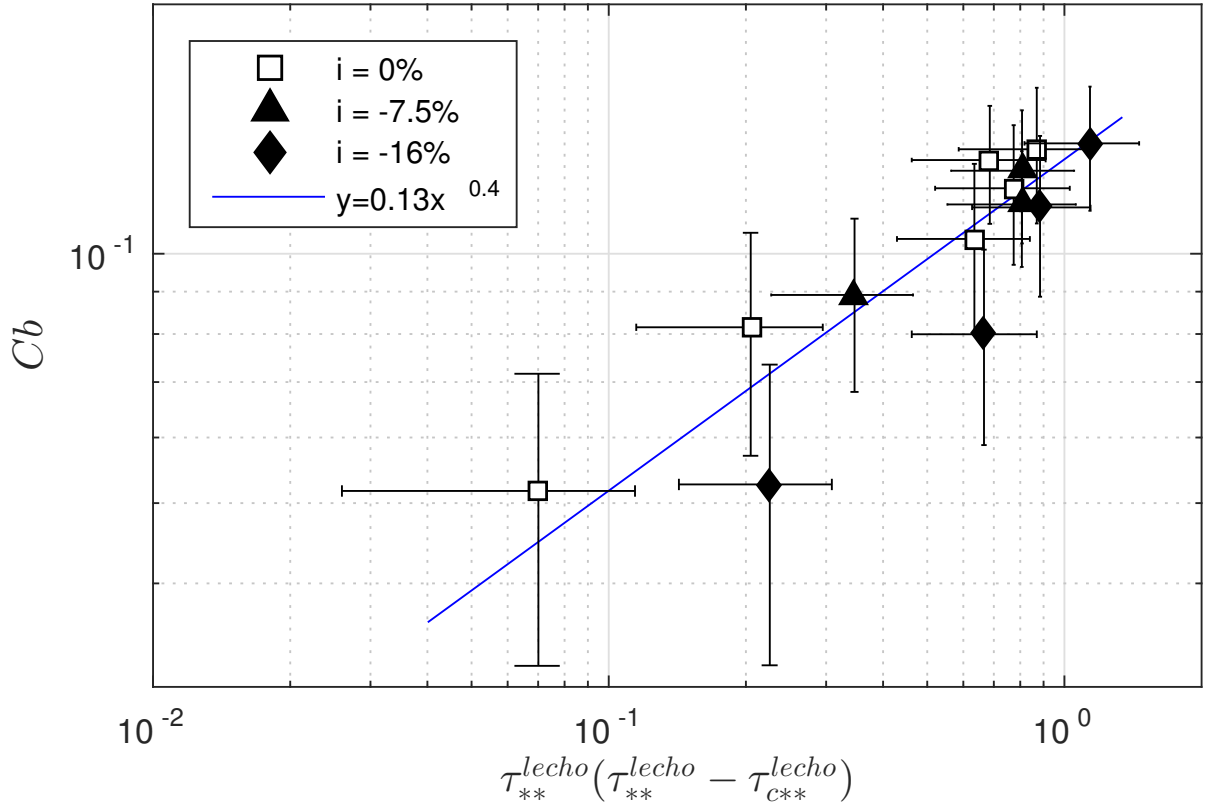


Figura 4.10: Relación entre la celeridad adimensional C_b y el exceso de esfuerzo de corte adimensional por el esfuerzo de corte adimensional, asociados al lecho y modificados por pendiente. La banda de error de uno de los datos en pendiente horizontal es notablemente extendida sólo por tratarse de un gráfico log-log.

Comparando las expresiones de C_b y el gasto sólido de fondo que considera la geometría simplificada de una duna al suponerla de forma triangular, se observa que las expresiones difieren sólo en una constante, lo que corresponde a un factor de forma.

$$C_b = \frac{cA\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \quad (4.8)$$

$$q_{*2} = \frac{q_2\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} = \frac{cA\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)gd_p^3} \quad (4.9)$$

$$q_{*2} = \frac{1}{2}C_b \quad (4.10)$$

Es decir, la tendencia creciente de la celeridad adimensional C_b en función de $\tau_{**}^{lecho}(\tau_{**}^{lecho} - \tau_{c**}^{lecho})$ es completamente esperable. Sin embargo, la corrección por pendiente no logra colapsar todos los experimentos en una sola tendencia, dado que se observa una desviación sistemática de los datos en función de la pendiente.

Es importante notar que de las Figuras 4.8 y 4.10 se pueden estimar las principales características de las formas de fondo, amplitud y celeridad de la onda, si se conocen las características del flujo y el fluido. Dado que la geometría de las formas de fondo afecta en los parámetros adimensionales Re_{lecho}^{MR} y τ_*^{lecho} , el cálculo es iterativo.

4.7. Transporte de sedimentos

A continuación se presentan y comparan las dos metodologías mencionadas en el capítulo 3, Metodología, para la estimación del gasto sólido de fondo. La primera metodología, q_{*1} , aprovecha la caracterización 3D del sistema de medición FTP para extraer la porción de arena en movimiento sobre la parte de lecho inmóvil. Por otra parte, la segunda metodología, q_{*2} , supone una geometría triangular de la forma de fondo para estimar su valor a partir de la amplitud de onda y su celeridad. La fortaleza de q_{*2} es su capacidad de caracterizar dunas cuya longitud de onda es superior a la ventana de medición FTP. En la Figura 4.11 se observa que la segunda metodología, q_{*2} , tiende a sobreestimar el gasto sólido de fondo respecto de q_{*1} . Esto se debe a la tridimensionalidad de las dunas. La segunda metodología sobrestima el gasto sólido de fondo, porque supone que el eje central de la tubería es representativo para calcular un gasto por unidad de ancho. Tal como se explicó anteriormente, el gasto sólido de fondo es máximo al centro y tiende a cero al acercarse a las paredes laterales, debido a que el esfuerzo de corte sobre las paredes es mínimo en las esquinas. En consecuencia, el gasto sólido de fondo promedio de la sección transversal es en realidad menor.

Como se mencionó anteriormente, el procedimiento del análisis computacional para la primera metodología, q_{*1} , requiere que la duna sea completamente caracterizada dentro de la zona de medición del sistema FTP. De no ser así, es imposible calcular la posición del centro de masa y, en consecuencia, el avance de la arena. Los resultados por lo tanto se ven reducidos en número, ya que las formas de fondo caracterizables tienen una restricción de longitud máxima. La longitud máxima caracterizable es menor a la longitud de la ventana de observación del sistema FTP. Por tal razón, se estudió la segunda metodología, q_{*2} , la cual sólo necesita la caracterización del frente de la duna. Esto consigue analizar el transporte de sedimento asociado a dunas más grandes. Con el fin de extender los resultados y hacer ambas metodologías comparables, se corrigieron los gastos sólidos de la segunda metodología a través de una transformación lineal encontrada a partir de la Figura 4.11. Para cada pendiente ensayada de la tubería se ajustó una ecuación de la recta a los datos (rectas segmentadas de colores). Las ecuaciones que caracterizan cada recta son:

- Azul ($i=0\%$): $y = 1.85x - 0.04$
- Roja ($i=-7.5\%$): $y = 1.65x - 0.036$

- Verde ($i=-16\%$): $y = 1.46x - 0.014$

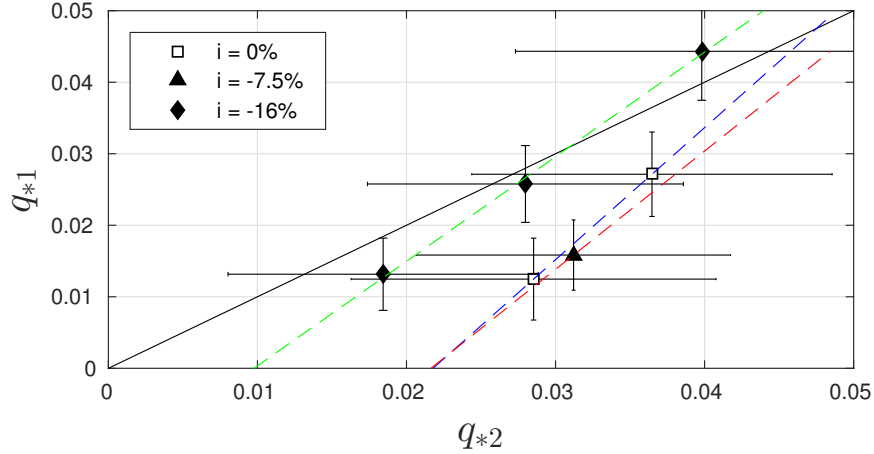


Figura 4.11: Relación entre los gastos sólidos de fondo determinados según las distintas metodologías. La recta negra grafica la condición $q_* = q_{*2}$ con el fin de facilitar la comparación. Como en la pendiente $i=-7.5\%$ se tiene un solo dato, la pendiente de la recta correspondiente se calculó como el promedio de las pendientes de las rectas asociadas a las pendientes $i=0\%$ e $i=-16\%$.

Esta metodología es similar al cálculo de β en Villard & Church (2003) ya que la transformación lineal encontrada para los datos experimentales, también busca corregir la desviación de la forma de fondo, respecto del triángulo idealizado. La diferencia entre ambos radica en las deformaciones que considera. β por su parte, es usado para perfiles donde las dunas son, por lo general, 2D. En cambio el factor utilizado en esta tesis considera, además de la desviación en la vertical, la variación en la trasversal producto de la tridimensionalidad de las dunas. A modo de comparación, se calcularon los valores de β_{pc} y β_{tot} encontrados en esta tesis. β_{pc} representa la desviación del perfil central de la tubería respecto del triángulo idealizado y β_{tot} es un factor que reemplazaría la metodología usada a partir de la Figura 4.11 para corregir los valores de q_2 , es decir, β_{tot} tal que:

$$q'_{*2} = \beta_{tot} Ac (1 - p) \quad (4.11)$$

los cuales se presentan en la Tabla 4.1. Se observa que ambos coeficientes presentan una tendencia creciente con el número de Reynolds asociado al lecho, modificado por pendiente, para el rango estudiado de este adimensional. Es decir, a medida que las formas de fondo crecen, la geometría redondeada del frente de la duna disminuye su influencia sobre la desviación respecto del triángulo idealizado. Por otra parte, se observa que los valores de β_{pc} son considerablemente mayores en comparación a β_{tot} . Esto es consecuencia de suponer que el perfil central es representativo de toda la sección transversal, donde en realidad q_s es máximo. Dado que β_{tot} considera el perfil transversal del gasto sólido, el cual disminuye hacia los costados, es claro que β_{pc} debe ser mayor que β_{tot} .

En la Figura 4.12 se presenta el gasto sólido adimensional en función del parámetro $\tau_{**}(\tau_{**} - \tau_{c**})$, donde el subíndice $(**)$ hace referencia a la corrección por pendiente. Los símbolos en negro corresponden a los resultados de la primera metodología, q_{*1} , y en gris a

Tabla 4.1: Coeficiente β (Villard & Church, 2003).

Pendiente	Re_{lecho}^{MR}	q_{*1}	q_{*2}	β_{pc}	β_{tot}
i= 0 %	94	0.012	0.03	0.28	0.22
i= 0 %	130	0.027	0.04	0.64	0.37
i= -7.5 %	122	0.016	0.03	0.56	0.26
i= -16 %	78	0.013	0.02	0.41	0.36
i= -16 %	129	0.026	0.03	0.9	0.46
i= -16 %	174	0.044	0.04	0.98	0.56

los valores corregidos de la segunda, q'_{*2} . Aquí se observa que los valores corregidos coinciden con los gastos sólidos más altos, dado que son justamente las ocasiones donde se observan formas de fondo de mayor longitud.

Charru et al. (2004) desarrollaron un método empírico para la estimación de gasto sólido de fondo generado por un flujo de Couette. Estos autores definen el parámetro adimensional q_* en base al término viscoso $(\rho_s - \rho)gd_p^3/\eta$, donde η es la viscosidad del fluido Newtoniano utilizado. Sus experimentos fueron realizados en régimen laminar y la orientación del flujo es horizontal. La expresión lograda por los autores es:

$$q_* = 0.025\tau_*(\tau_* - \tau_{c*}) \quad (4.12)$$

Para hacer los resultados del presente estudio comparables con Charru et al. (2004), se debió modificar la viscosidad y hacer una corrección por pendiente, caracterizada con el subíndice (**), la cual colapsa todos los datos del transporte de fondo en una sola tendencia. La viscosidad efectiva utilizada para el fluido pseudoplástico es:

$$\mu_{eff} = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{2U}{R_h} \right)^{n-1} \quad (4.13)$$

Respecto de la corrección por pendiente para el esfuerzo de corte adimensional τ_{**} , se observa que el análisis de la componente gravitatoria sobre un grano representativo comprende correctamente el efecto de la gravedad debido a variaciones en la pendiente de la tubería. La recta (línea azul) de la Figura 4.12 es un ajuste potencial tal que:

$$q_* = 0.05\tau_{**}(\tau_{**} - \tau_{c**}) \quad (4.14)$$

El principal resultado de la Figura 4.12 es que la tendencia encontrada por Charru et al. (2004) se recupera para los datos del presente estudio, salvo el coeficiente que acompaña la expresión $\tau_{**}(\tau_{**} - \tau_{c**})$. La diferencia entre coeficientes (0.025 y 0.05) puede deberse a distintos factores. Por ejemplo, Charru et al. (2004) generaron un flujo de Couette gracias a que la pared superior de su ducto es móvil, mientras que en la presente investigación el fluido se mueve por diferencia de presión en la tubería cuadrada. Ambas investigaciones presentan, además, distintas relaciones de aspecto para la sección transversal de los ductos. Por esta

razón, y considerando el efecto de pared, la distribución del esfuerzo de corte sobre el fondo de la tubería varía. En consecuencia, el cambio en dicho coeficiente se debe, simplemente, a un factor de forma. Otra diferencia entre las investigaciones es que el análisis hecho por Charru et al. (2004) es para lechos levemente deformados, mientras que la mayor amplitud adimensional registrada en este estudio es de $\frac{A}{h}=0.52$ donde h es la altura media de escurrimiento.

En la Figura 4.12 se observa, además, que adimensionalizar q_* en función de un término viscoso para régimen laminar, describe correctamente el fenómeno. Inicialmente se había adimensionalizado el gasto sólido de fondo con el término inercial $\sqrt{Rgd_p^3}$, el cual no representaba correctamente la tendencia buscada. Esto último se puede revisar en la sección C.1, en el capítulo Anexos.

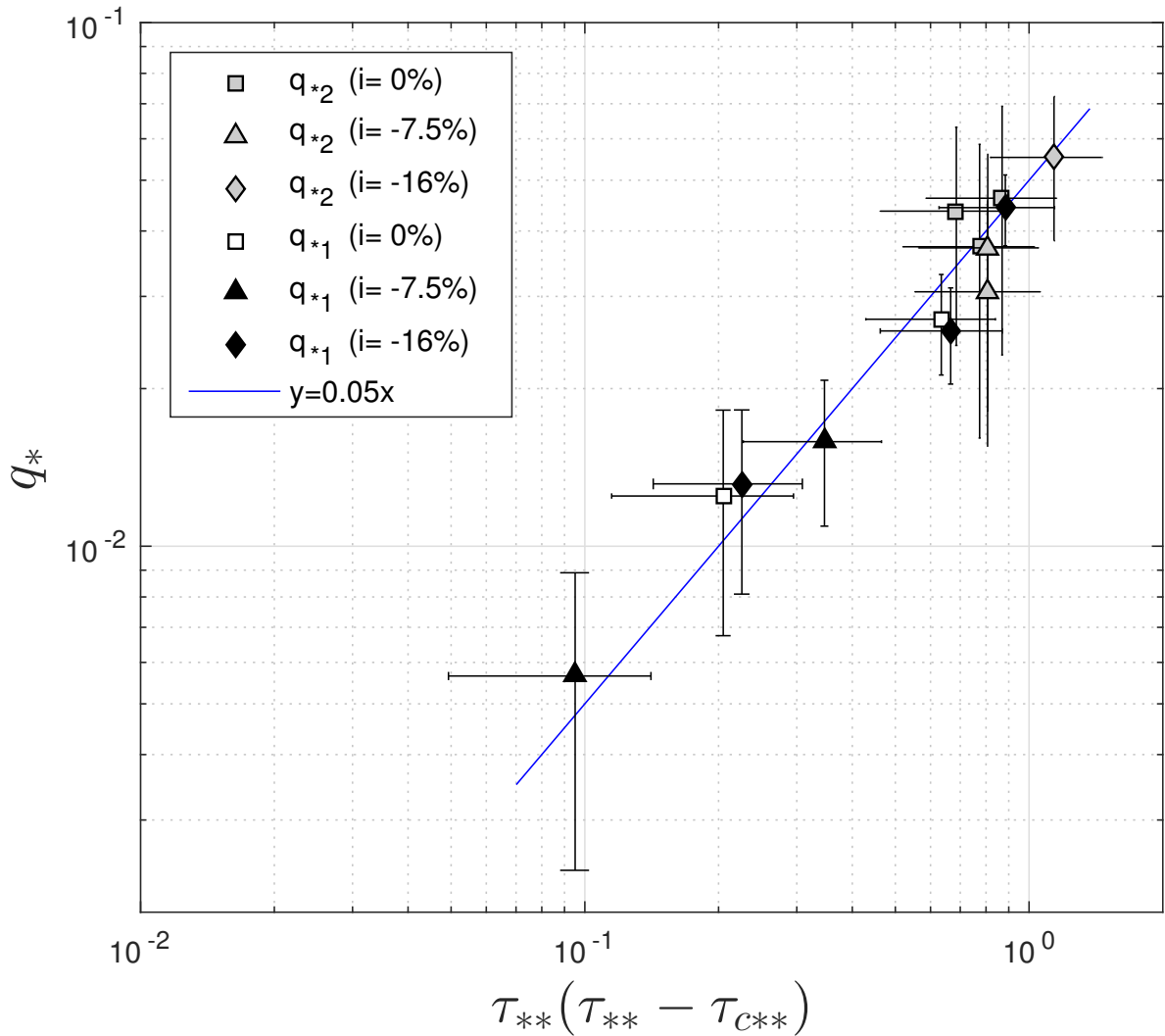


Figura 4.12: Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y el gasto sólido de fondo adimensional q_* .

5. Conclusiones

Durante el desarrollo de esta investigación se diseñó, construyó y utilizó una instalación experimental para el estudio de formas de fondo en ductos a presión, para distintas pendientes y flujos de fluidos pseudoplásticos. Las principales fortalezas de la investigación son: (1) El sistema de medición, capaz de generar un registro espacio-temporal de alta resolución para las formas de fondo, y (2) la capacidad de la tubería para variar su pendiente entre $i=-17.5\%$ e $i=17.5\%$.

El sistema de medición demostró ser una herramienta crucial para la caracterización de las dunas analizadas. Debido a su tridimensionalidad, el registro lateral del perfil del lecho de arena es incapaz de describir correctamente la geometría del fondo. Para el tipo de dunas generadas, el registro lateral tiene como consecuencia una subestimación del esfuerzo de corte. Es decir, el registro lateral estima incorrectamente las leyes de resistencia asociadas al lecho móvil en función de la pendiente en los presentes ensayos. La técnica de perfilometría por transformada de Fourier fue modificada con éxito para caracterizar el lecho dentro de la tubería. Para esto, se consideró el índice de refracción del medio que debe atravesar el haz de luz para llegar al lecho. Esta técnica permitió determinar las dimensiones más importantes de las formas de fondo generadas por el flujo de un fluido pseudoplástico (A, λ, c). Por otra parte, su limitación radica en el área de estudio que este sistema es capaz de registrar. Si bien la herramienta resultó ser muy precisa, el área fotografiada de la tubería es de 48 cm de largo. Las formas de fondo registradas con mayor claridad se observaron en la situación horizontal y pendiente adversa. Esto se debe a que poseen longitudes de onda menor, por lo que se pueden registrar completamente en la ventana de observación del sistema FTP, y un frente más definido. Las dunas observadas presentaron la misma forma en todos los experimentos. Este perfil se caracteriza por un frente redondeado y extremos laterales con poca socavación, debido principalmente al efecto de pared y al régimen laminar de los experimentos. Dado que el esfuerzo de corte es mínimo en las esquinas de la tubería, los granos cercanos a las paredes de acrílico sienten un arrastre insuficiente para moverse. Por esta razón, el registro lateral no generó datos útiles para el tipo de formas de fondo registradas. Las capacidades del sistema de medición FTP se muestran promisorias en el estudio de formas de fondo para ductos cerrados. En particular, sería interesante registrar la evolución de las formas de fondo a partir de un lecho plano para un caudal constante.

El conjunto de datos experimentales presentados deja en evidencia la importancia de la pendiente en la geometría de las formas de fondo y, en consecuencia, en las pérdidas de energía. Esto constituye una gran diferencia con las pérdidas de energía de flujos de fluidos en ausencia de lechos móviles, los cuales son independientes de la inclinación del ducto. Para pendiente adversa, las formas de fondo presentan mayores amplitudes y menores longitudes de onda que para pendiente a favor. Lo anterior genera una mayor cantidad de zonas por unidad de largo donde el flujo se expande, lo cual genera mayores pérdidas de energía. Esto fue analizado y cuantificado en los gráficos de las leyes de resistencia para cada pendiente, donde se observa que, cuando existen formas de fondo, el factor de fricción asociado al lecho

móvil f_{lecho} se aleja de la tendencia $64/Re_{lecho}^{MR}$ descrita por Haldenwang et al. (2010).

En esta investigación se logró obtener condiciones cuasi periódicas y temporalmente estables para el lecho. Si bien los registros temporales mostrados en esta investigación son acotados debido a la memoria disponible de la cámara, 32Gb, en ellos se observa que las formas de fondo no presentan una evolución temporal importante. Un concepto relevante para conseguir tal regularidad en las formas de fondo registradas es considerar el tiempo de equilibrio, es decir, el espacio de tiempo necesario para que la arena y las formas de fondo se adapten a la variación de caudal. En los experimentos realizados con el fluido pseudoplásticos y ducto cerrado, se constató que t_{eq} se reduce considerablemente respecto del caso estudiado por Baas (1999) en canal abierto y para agua como fluido. Se concluye que la disminución de t_{eq} es consecuencia de: (1) Para ductos en presión, el flujo debe modificarse inmediatamente a cambios en la geometría del lecho móvil dado que, a diferencia de canales abiertos, el escurrimiento no puede ajustar su altura debido al aumento en la rugosidad. Y (2) debido al balance entre la viscosidad del fluido y la inercia de las partículas. Un aumento de la viscosidad del fluido transportador optimiza la capacidad de arrastre del fluido y se traduce en un mejor traspaso de momentum desde el fluido hacia la partícula, alcanzando una condición de equilibrio más rápido. Por otra parte un aumento en el tamaño de las partículas significa un aumento del tiempo de equilibrio (Baas, 1999). Dado que el objetivo de la presente investigación es la caracterización de las formas de fondo para condiciones estables del flujo, y no su evolución, el registro del sistema de medición parte una vez transcurrido el tiempo de equilibrio. Por otra parte, el tipo de transporte también es crucial para la periodicidad lograda de las formas de fondo. Los ensayos realizados, con un fluido pseudoplástico, se encuentran todos en régimen laminar y, para el tamaño de partículas ensayado, la difusión de partículas en la vertical no logra suspender las partículas del lecho. Esto genera una capa de arrastre de sedimentos, donde la zona con mayor probabilidad de erosión neta y mayor probabilidad de depositación neta de partículas, se produce de manera similar al modelo estudiado en Niño et al. (2002) para un flujo de aire en régimen turbulento. La principal zona de erosión es el comienzo de aguas arriba de la duna, zona donde las líneas de corriente bajan abruptamente por el ensanche de la sección de escurrimiento, inmediatamente después de la zona de aguas muertas. Por otra parte, la principal zona de depositación es la cara aguas abajo de la cresta de la duna. Con esto, todas las partículas transportadas poseen un tiempo de residencia en el frente de la duna. Este proceso permite que, por continuidad de masa, las dunas posean una cantidad de arena constante, su forma se mantenga y la tasa de incorporación de partículas a la capa de arrastre de sedimentos esté en equilibrio con la tasa de depositación.

En la presente investigación se encontró que la curva de Mantz en el diagrama de Shields (1936), considerando un número de Reynolds modificado, asociado al lecho, Re_{lecho}^{MR} , es válida para la predicción del arrastre incipiente aún en flujos de fluidos pseudoplásticos. En Tamburrino et al. (2016) se logró la misma conclusión para flujos de fluidos pseudoplásticos en canales abiertos.

Respecto del gasto sólido de fondo, se encontró el mismo comportamiento de Charru et al. (2004), para flujos en régimen laminar de fluidos Newtonianos. Dado este tipo de régimen, el gasto sólido de fondo se adimensionalizó en función de un término viscoso $((\rho_s - \rho)gd_p^3)/\mu_{eff}$ y no del término inercial $\sqrt{Rgd^3}$, como se acostumbra para transporte de fondo cuando el flujo

del fluido, que genera el movimiento de partículas, es turbulento. Inicialmente se intentó estudiar el comportamiento de los datos experimentales considerando el término inercial y comparándolo con la expresión de Meyer-Peter & Müller (1948). Sin embargo los datos presentaron un ajuste considerablemente mejor con el adimensional en función del término viscoso y la expresión de Charru et al. (2004). Debido a que todos los ensayos de estos autores se hicieron para un flujo horizontal, se aplicó una corrección por pendiente al esfuerzo de corte τ_{**} que colapsa los resultados del gasto sólido en función de $\tau_{**}(\tau_{**} - \tau_{c**})$, para distintas pendientes, en una sola tendencia. Por esta razón se considera que la corrección por pendiente fue lograda con éxito para el análisis del gasto sólido de fondo.

Respecto de las diferencias entre ambas metodologías para la estimación del gasto sólido, fue necesario suponer una duna triangular para la estimación de los casos donde la longitud de las formas de fondo excede la longitud de la ventana de medición FTP. Gracias a esto, la segunda metodología de estimación logra analizar los casos donde la primera metodología es incapaz. Por supuesto, dado que las dunas son tridimensionales, el error en la segunda metodología es alto. La primera metodología en cambio, identifica claramente la porción de arena que se encuentra en movimiento ya que aprovecha la capacidad del sistema de medición FTP. Para poder corregir los valores obtenidos por la segunda metodología, se establecieron factores de conversión para cada pendiente. Esto es análogo al uso de un factor β empleado por Villard & Church (2003). Se compararon dos factores de desviación, β_{pc} y β_{tot} . El primero considera sólo la desviación del perfil central de la duna respecto del triángulo idealizado. El segundo en cambio, β_{tot} , considera lo anterior, pero además, la tridimensionalidad de las dunas y que el gasto sólido no es constante en el perfil transversal de la tubería.

Finalmente, este estudio representa importantes avances en el estudio de formas de fondo de lechos granulares no cohesivos para flujos de fluidos no Newtonianos, donde se registran muy pocos experimentos en la literatura. Particularmente, el registro tridimensional logrado con la técnica de medición, perfilometría por transformada de Fourier, caracteriza completamente la geometría de las dunas, no sólo los parámetros relevantes (A, λ, c). En el futuro sería interesante exportar este registro para analizar el flujo numéricamente sobre dicha geometría. Incluso se podría imprimir en 3D para tener un lecho fijo y contrastar los resultados con registros de PIV o PTV.

Bibliografía

- Abedi, M., Jalali, M. A., & Maleki, M. (2014). Interfacial instabilities in sediment suspension flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 758:312–326.
- Admiraal, D. (2003). Influence of pipe angle on bedload transport in an inclined pipe. *International Journal of Sediment Research*, 18(2):122–129.
- Ashida, K. & Michiue, M. (1972). Studies on bed load transportation for nonuniform sediment and river bed variation. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, 14.
- Aussillous, P., Chauchat, J., Pailha, M., Médale, M., & Guazzelli, É. (2013). Investigation of the mobile granular layer in bedload transport by laminar shearing flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 736:594–615.
- Baas, J. H. (1999). An empirical model for the development and equilibrium morphology of current ripples in fine sand. *Sedimentology*, 46(1):123–138.
- Charru, F. & Hinch, E. (2006). Ripple formation on a particle bed sheared by a viscous liquid. part 1. steady flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 550:111–121.
- Charru, F., Mouilleron, H., & Eiff, O. (2004). Erosion and deposition of particles on a bed sheared by a viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 519:55–80.
- Charru, F. & Mouilleron-Arnould, H. (2002). Instability of a bed of particles sheared by a viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 452:303–323.
- Chhabra, R. P. & Richardson, J. F. (2011). *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York.
- Cobelli, P. J., Maurel, A., Pagneux, V., & Petitjeans, P. (2009). Global measurement of water waves by fourier transform profilometry. *Experiments in fluids*, 46(6):1037–1047.
- Coleman, S. E., Fedele, J. J., & Garcia, M. H. (2003). Closed-conduit bed-form initiation and development. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(12):956–965.
- Cook, B. P. (2008). Theory for particle settling and shear-induced migration in thin-film liquid flow. *Physical Review E*, 78(4):045303.
- Coussot, P. & Ancey, C. (1999). Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes. *Physical Review E*, 59(4):4445.
- Einstein, H. A. & Barbarossa, N. L. (1952). River channel roughness. *Transactions of the*

- American Society of civil Engineers*, 117(1):1121–1132.
- Engelund, F. (1966). Hydraulic resistance of alluvial streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 92(2):315–326.
- Fernandez Luque, R. & Van Beek, R. (1976). Erosion and transport of bed-load sediment. *Journal of hydraulic research*, 14(2):127–144.
- Gaeuman, D. & Jacobson, R. (2007). Field assessment of alternative bed-load transport estimators. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12):1319–1328.
- Garcés, A. & Tamburrino, A. (2015). Instalación experimental e implementación de un sistema de medición óptico no intrusivo para el estudio de formas de fondo en ductos a presión. Santiago. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID. Oct., 21-23.
- Graf, W. H. & Acaroglu, E. R. (1968). A physical model for sediment transport in conveyance systems. *Hydrological Sciences Journal*, 13(2):20–39.
- Haldenwang, R., Slatter, P., & Chhabra, R. (2010). An experimental study of non-newtonian fluid flow in rectangular flumes in laminar, transition and turbulent flow regimes. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 52(1):11–19.
- Keulegan, G. H. (1938). *Laws of turbulent flow in open channels*, volume 21. National Bureau of Standards US.
- Krieger, I. M. & Dougherty, T. J. (1959). A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of The Society of Rheology (1957-1977)*, 3(1):137–152.
- Kuru, W., Leighton, D., & McCready, M. (1995). Formation of waves on a horizontal erodible bed of particles. *International journal of multiphase flow*, 21(6):1123–1140.
- Leighton, D. & Acrivos, A. (1986). Viscous resuspension. *Chemical engineering science*, 41(6):1377–1384.
- Leighton, D. & Acrivos, A. (1987). The shear-induced migration of particles in concentrated suspensions. *Journal of Fluid Mechanics*, 181:415–439.
- Mantz, P. A. (1977). Incipient transport of fine grains and flakes by fluids-extended shield diagram. *Journal of the Hydraulic division*, 103(ASCE 12992).
- Metzner, A. & Reed, J. (1955). Flow of non-newtonian fluids—correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions. *Aiche journal*, 1(4):434–440.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1948). Formulas for bed-load transport. Proc. 2nd Congress IAHR, Stockolm.
- Nakagawa, H. & Tsujimoto, T. (1984). Spectral analysis of sand bed instability. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(4):467–483.

- Niño, Y., Atala, A., Barahona, M., & Aracena, D. (2002). Discrete particle model for analyzing bedform development. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(4):381–389.
- Niño, Y. & García, M. (1998). Using lagrangian particle saltation observations for bedload sediment transport modelling. *Hydrological Processes*, 12(8):1197–1218.
- Ouriemi, M., Aussillous, P., & Guazzelli, E. (2009). Sediment dynamics. part 1. bed-load transport by laminar shearing flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 636:295–319.
- Ouriemi, M., Chauchat, J., Aussillous, P., Médale, M., & Guazzelli, E. (2010). Sediment transport and dunes in pipe flow. En *7th International Conference on Multiphase Flow*, págs.: 1–6, Tampa, FL. ICMF 2010. May, 30- June 4.
- Shields, A. (1936). Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung. Technical report, Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau.
- Skipworth, P. J., Tait, S. J., & Saul, A. J. (1999). Erosion of sediment beds in sewers: Model development. *Journal of environmental engineering*, 125(6):566–573.
- Takahashi, H., Masuyama, T., & Noda, K. (1989). Unstable flow of a solid-liquid mixture in a horizontal pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 15(5):831–841.
- Takeda, M., Ina, H., & Kobayashi, S. (1982). Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal Optical Society of America*, 72(1):156–160.
- Takeda, M. & Mutoh, K. (1983). Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-d object shapes. *Applied optics*, 22(24):3977–3982.
- Tamburrino, A., Carrillo, D., Negrete, F., & Ihle, C. F. (2016). Critical shear stress for incipient motion of non-cohesive particles in open-channel flows of pseudoplastic fluids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(6):1084–1091.
- Valance, A. & Langlois, V. (2005). Ripple formation over a sand bed submitted to a laminar shear flow. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 43(2):283–294.
- van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part iii: bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12):1733–1754.
- Vanoni, V. A. & Brooks, N. H. (1957). Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams.
- Villard, P. & Church, M. (2003). Dunes and associated sand transport in a tidally influenced sand-bed channel: Fraser river, british columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40(1):115–130.

Anexos

Anexo A

A.1. Estructura tramo de estudio

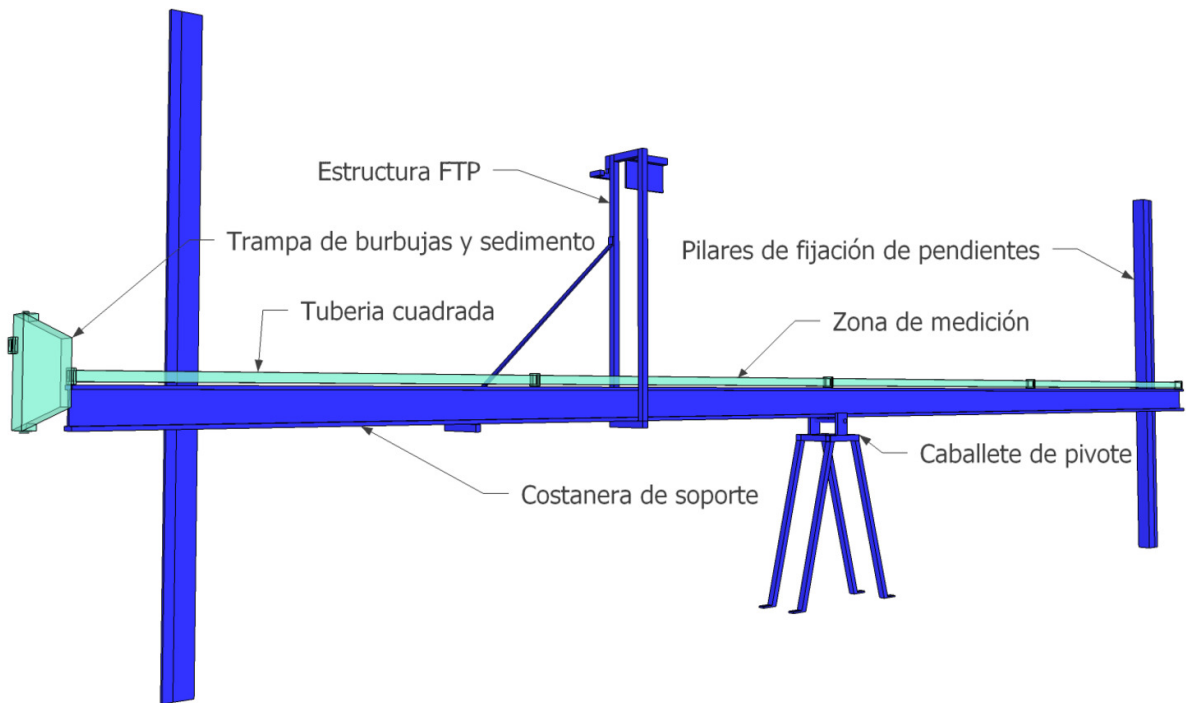


Figura A.1: Instalación experimental

Anexo B

B.1. Mecanismo de transporte de fondo

Las dunas generadas numéricamente por Niño et al. (2002), a partir de un lecho plano, fueron logradas a través de la aplicación sucesiva de un modelo discreto para el movimiento de partículas. En el modelo de estos autores se logra, de manera implícita, caracterizar la presencia de zonas con mayor probabilidad de erosión neta y zonas con mayor probabilidad de depositación neta.

La zona de depositación neta se encuentra ubicada inmediatamente aguas abajo de la cresta de la duna. La existencia de esta zona tiene dos consecuencias, el crecimiento efectivo de la duna y su celeridad. Esto último se debe a que la pendiente del frente de la duna es un estado de estabilidad crítica, donde toda partícula que se deposita pasado la cresta resbala hasta lograr su estabilidad. La zona de erosión se encuentra inmediatamente aguas abajo de la zona de aguas muertas. La existencia de esta zona provee un mecanismo de crecimiento de la duna. Obviamente, erosión y depositación deben ocurrir, en condiciones permanentes, a la misma tasa para cumplir continuidad de los sólidos. Esto genera que, alcanzado el equilibrio de tamaño para la forma de fondo, ambos fenómenos contribuyen principalmente a la celeridad de la onda sedimentaria y mantienen su tamaño constante en el tiempo.

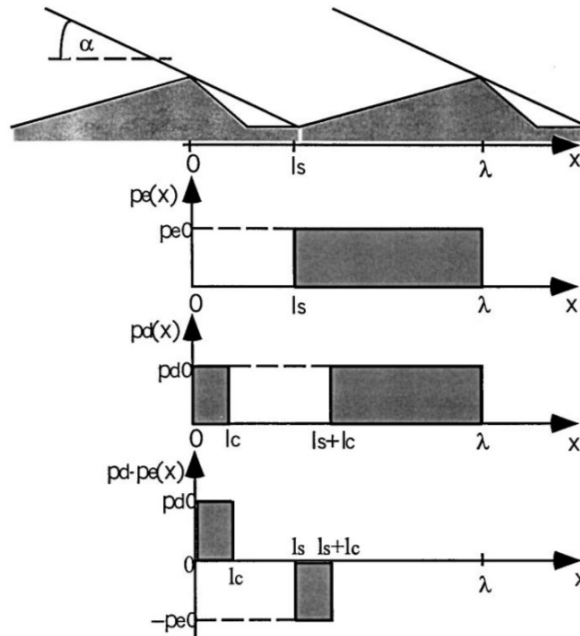


Figura B.1: Función densidad de probabilidad de erosión, p_e y depositación, p_d de las partículas sobre formas de fondo. Además se muestra la función densidad de probabilidad neta, $p_e - p_d$. (Niño et al., 2002).

El modelo discreto de partículas para analizar la evolución de formas de fondo de Niño et al. (2002) fue diseñado para transporte de partículas debido a un flujo de viento en régimen turbulento. Si bien las condiciones experimentales de la presente investigación son muy distintas, régimen laminar del flujo de un fluido pseudoplástico en ducto cerrado, se observó

durante los ensayos una capa de arrastre de sedimentos con zonas de erosión y depositación neta tal como se explica en el párrafo anterior. Es por esto que a pesar que el mecanismo de transporte o el flujo que genera el movimiento puedan diferir del modelo de Niño et al. (2002), lo importante es la continuidad de sólidos lograda en una duna característica. Gracias a esto el análisis de la ecuación de Exner es válido. La ecuación de Exner es:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \frac{\partial q_s}{\partial x} = C_{ref} w_s - E_s \quad (\text{B.1})$$

Donde C_{ref} es la concentración de referencia sobre el lecho, w_s la velocidad de sedimentación característica de las partículas y E_s la tasa con la que las partículas entran en movimiento. Considerando entonces que para una duna característica del problema se cumple continuidad de sólidos gracias a las zonas de depositación y erosión claramente definidas se tiene:

$$C_{ref} w_s - E_s = 0 \quad (\text{B.2})$$

Con lo anterior se tiene obtiene la ecuación 3.25 del capítulo de metodología. En la Figura B.2 se muestra esquemáticamente el avance de partículas, la zona de erosión neta (amarillo), depositación neta (verde) y transporte (celeste).

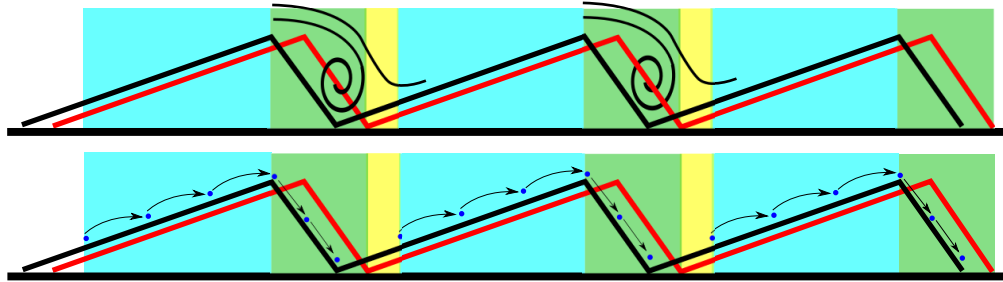


Figura B.2: Esquema conceptual del transporte de sedimento observado en los ensayos

Anexo C

C.1. Escalamiento inercial

El transporte de sedimentos para flujos de agua en cauces naturales ocurre por lo general en régimen turbulento. Por esta razón se acostumbra adimensionalizar el gasto sólido de fondo en función del término inercial $\sqrt{Rgd_p^3}$. Como se mostró en los resultados de la presente investigación, los datos colapsan apropiadamente en una tendencia cuando el gasto sólido de fondo se divide por un término viscoso. Lo anterior es reportado por Charru et al. (2004), Ouriemi et al. (2010) y ? y fue corroborado en esta tesis. En la figura C.1 se presenta el resultado de estudiar el gasto sólido, considerando el término inercial, en función del exceso de esfuerzo de corte corregido por pendiente. Aquí, se observa que no sólo hay mayor dispersión entre los adimensionales estudiados, sino que también la corrección por pendiente no logra colapsar los datos en una sola tendencia. Con esto se deja en evidencia la importancia de entender qué fenómeno domina en el transporte de sedimentos. Dado que todos los ensayos realizados con el fluido pseudoplástico fueron en régimen laminar, son los esfuerzos viscosos, los que dominan en el transporte de sedimentos.

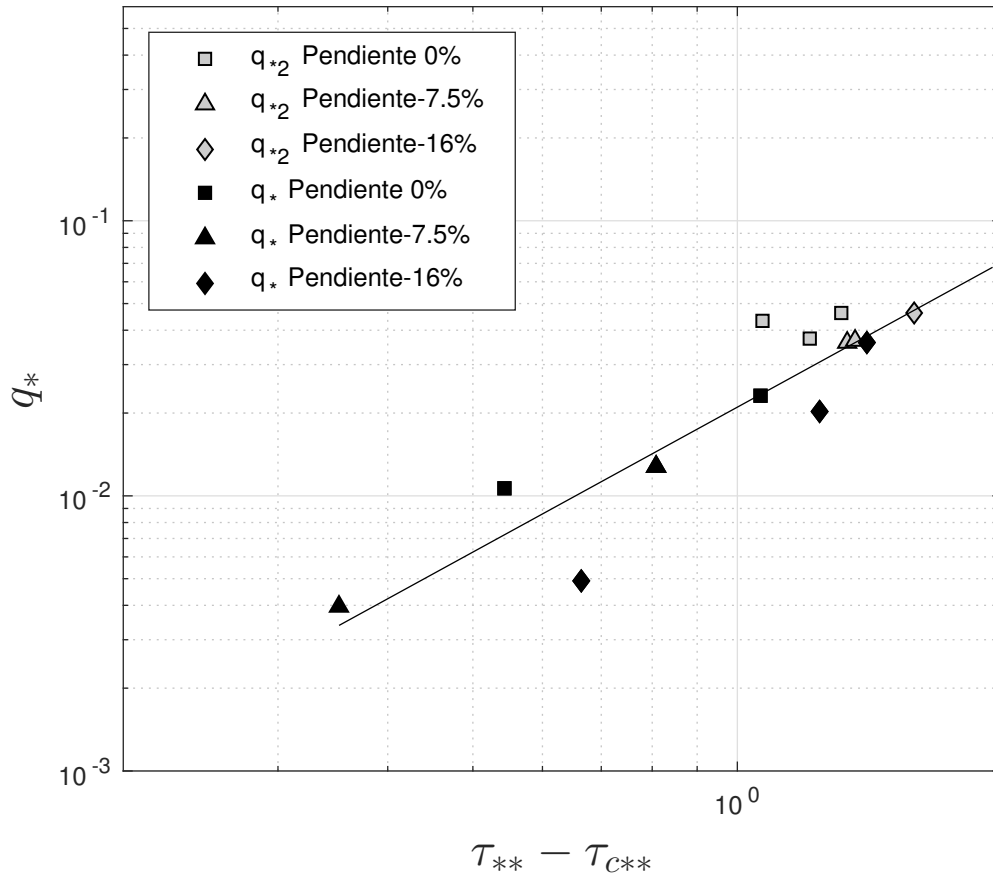


Figura C.1: Gasto sólido de fondo adimensionalizado según el término inercial. Los datos en negros representan el gasto sólido calculado en base a la primera metodología (estimando el avance de la duna considerando su geometría) y los datos en gris los resultados de la segunda metodología (calculado en base a la amplitud y celeridad del frente de la duna)

Para ser coherente con el razonamiento del término inercial, C_b fue formado a partir del siguiente análisis. Basado en la estimación de Meyer-Peter & Müller (1948) para el gasto sólido de fondo, el cual escala con el parámetro exceso de esfuerzo de corte, se tiene que:

$$\frac{q_s}{\sqrt{Rgd_p^3}} \sim (\tau_* - \tau_*c)^{3/2} \sim \tau_*^{3/2} \sim \left(\frac{\rho u_*^2}{(\rho_s - \rho)gd_p} \right)^{3/2} \quad (\text{C.1})$$

$$\frac{q_s}{\sqrt{Rgd_p^3}} \sim \frac{u_*^3}{(Rgd_p)^{3/2}} \quad (\text{C.2})$$

Simplificando términos:

$$q_s \sim \frac{u_*^3}{Rg} \quad (\text{C.3})$$

Por otra parte, el gasto sólido de una onda bidimensional se puede estimar como $q_s \sim ch$, donde c es la celeridad de la onda y h una altura característica de la duna.

$$ch \sim \frac{u_*^3}{Rg} \quad (\text{C.4})$$

Dado el resultado de Coleman et al. (2003), el cual dice que el tamaño de la duna esta fuertemente relacionado con el diámetro característico del lecho granular, se obtiene finalmente que la celeridad de la onda escala con el término:

$$c \sim \frac{u_*^3}{Rgd_p} \quad (\text{C.5})$$

Con esto se obtiene finalmente que la celeridad adimensional C_b es caracterizada por:

$$C_b = \frac{cRgd_p}{u_*^3} \quad (\text{C.6})$$

En la figura C.2 se expone la celeridad adimensional C_b en función del exceso de esfuerzo de corte asociado al lecho. El mecanismo de avance de la duna puede entenderse de manera simplificada como el avance de las partículas que son erosionadas aguas arriba de la duna y depositadas en el frente de ésta. Por esta razón, resulta natural pensar que el esfuerzo de corte sobre el lecho es el esfuerzo que domina el avance de las ondas sedimentarias. La tendencia decreciente de este gráfico se debe a que C_b posee en su denominador el parámetro velocidad friccional al cubo, u_*^3 . Sin embargo, las celeridades no presentaron una tendencia definida para aumentos de caudal o variaciones de pendiente, como se comenta en la Figura E.4.

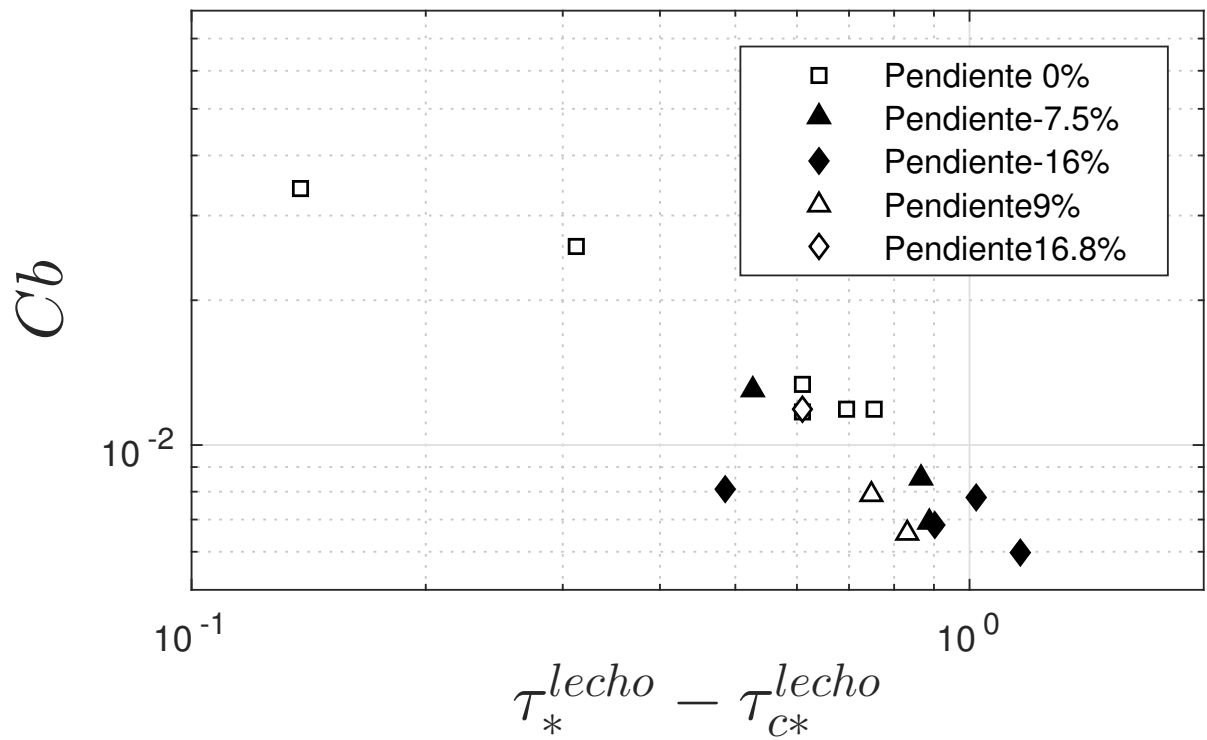


Figura C.2: Gasto sólido de fondo adimensionalizado según el término inercial

Anexo D

EXPERIMENTOS EN AGUA

En este anexo se presentan resultados de experimentos donde el fluido encargado de generar las formas de fondo es agua. Para ésto, se analizan las mismas características que para el fluido pseudoplástico (geometría 3D, periodicidad, amplitud, celeridad y gasto sólido de fondo). Sin embargo, considerando que el régimen de flujo de estos experimentos es turbulento, su metodología de análisis varía y, en consecuencia, el análisis dimensional de los parámetros aquí estudiados. Los números adimensionales de las siguientes figuras fueron presentados en la sección 2.2, del capítulo 2, Marco Teórico. El análisis de las mediciones experimentales fue discutido en el capítulo 3, Metodología.

D.1. Descripción cualitativa

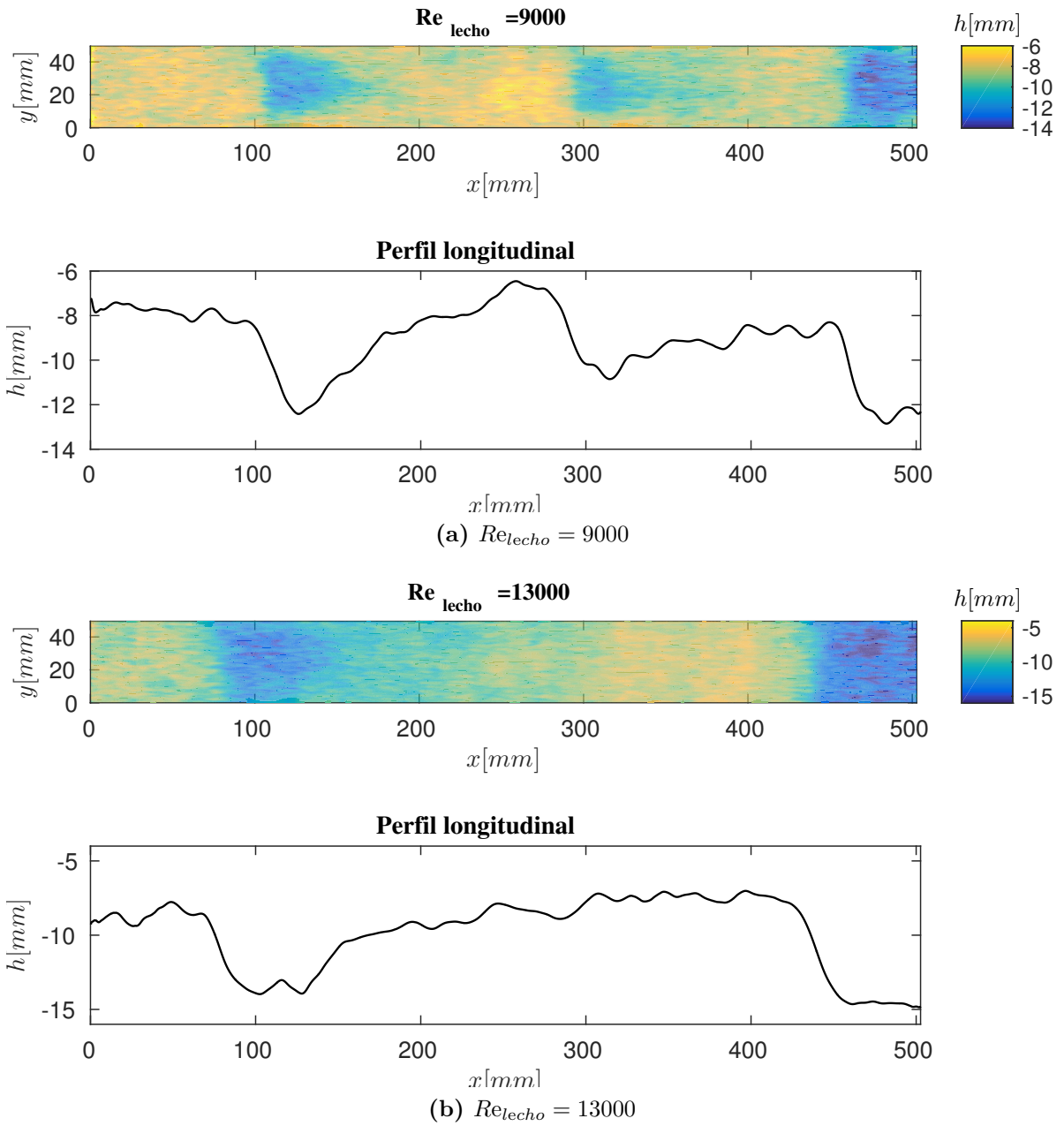


Figura D.1: Caracterización geométrica de las formas de fondo. Las partículas corresponden a arena entre 600 y 800 μm , sin pendiente y agua como fluido. Se expone además el perfil longitudinal a lo largo del eje central de la tubería.

D.2. Engelund

D.3. Einstein-Barbarossa

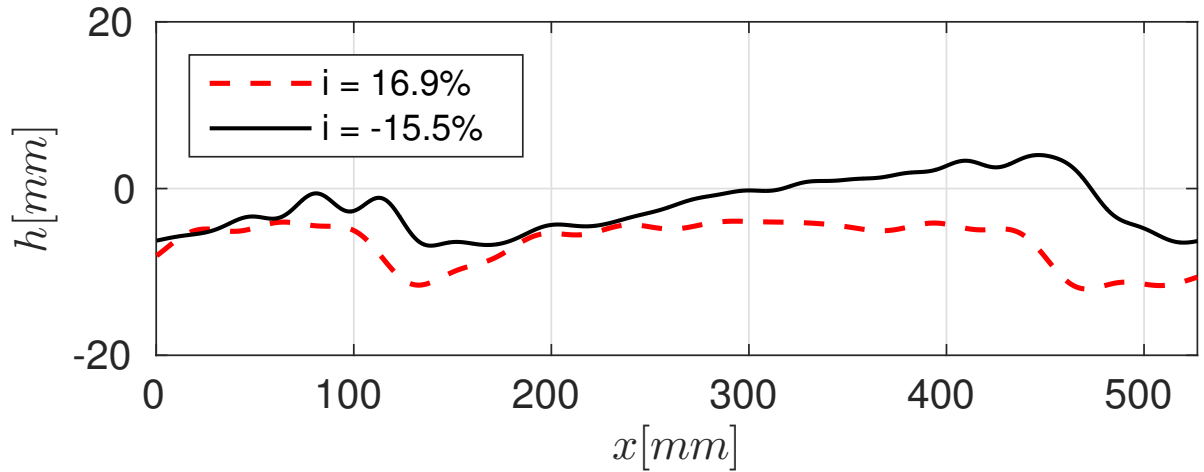


Figura D.2: Comparación de la geometría de dunas en pendientes $i = -15.5\%$ y $i = 16.9\%$ para $Re_{lecho} = 15000$

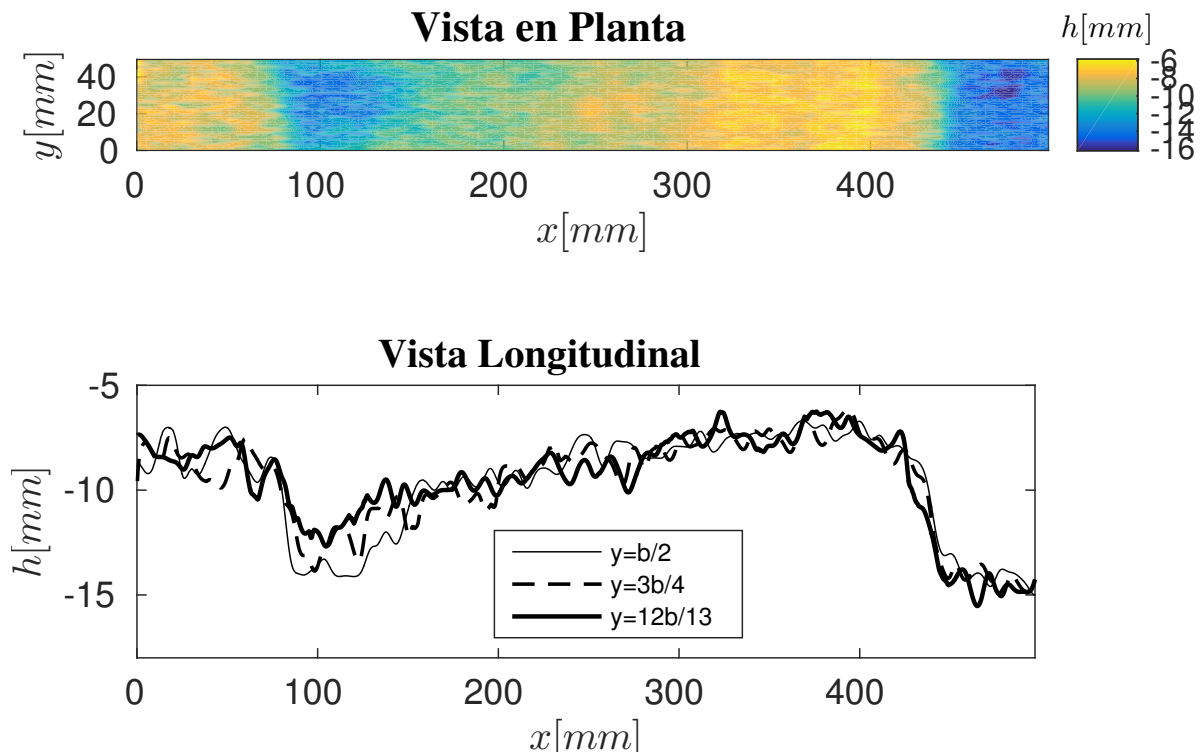


Figura D.3: Diferencia de altura media registrada dependiendo del perfil medido. La imagen corresponde a $Re_{lecho} = 13000$ para la tubería en orientación horizontal. $b/2$ corresponde al eje central de la tubería, $3b/4$ corresponde un eje a 13 mm de la pared de acrílico lateral izquierda en el sentido de flujo y $12b/13$ a un eje a 4 mm de la misma pared de la tubería. El sentido de flujo es de izquierda a derecha.

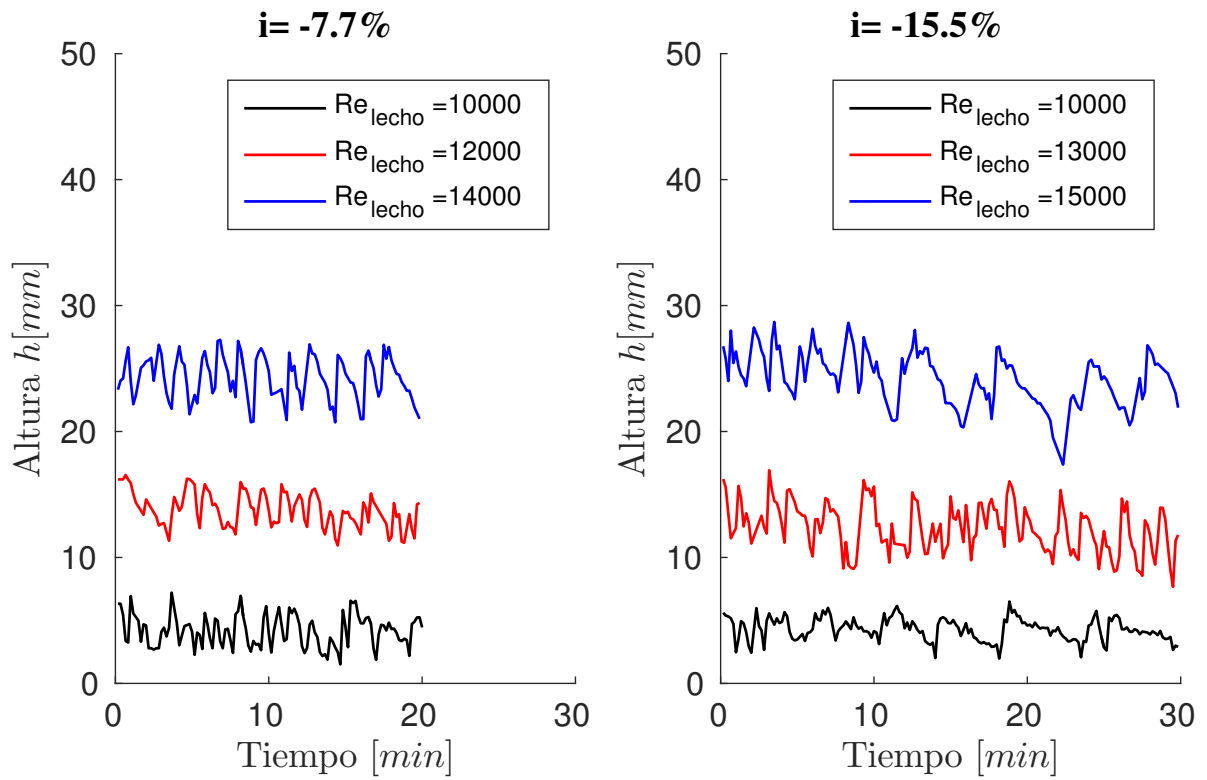


Figura D.4: Registro de la altura del lecho en el centro de la zona de medición FTP. La imagen corresponde a $Re_{lecho}^{MR} = 136$ para la pendiente -7.5%

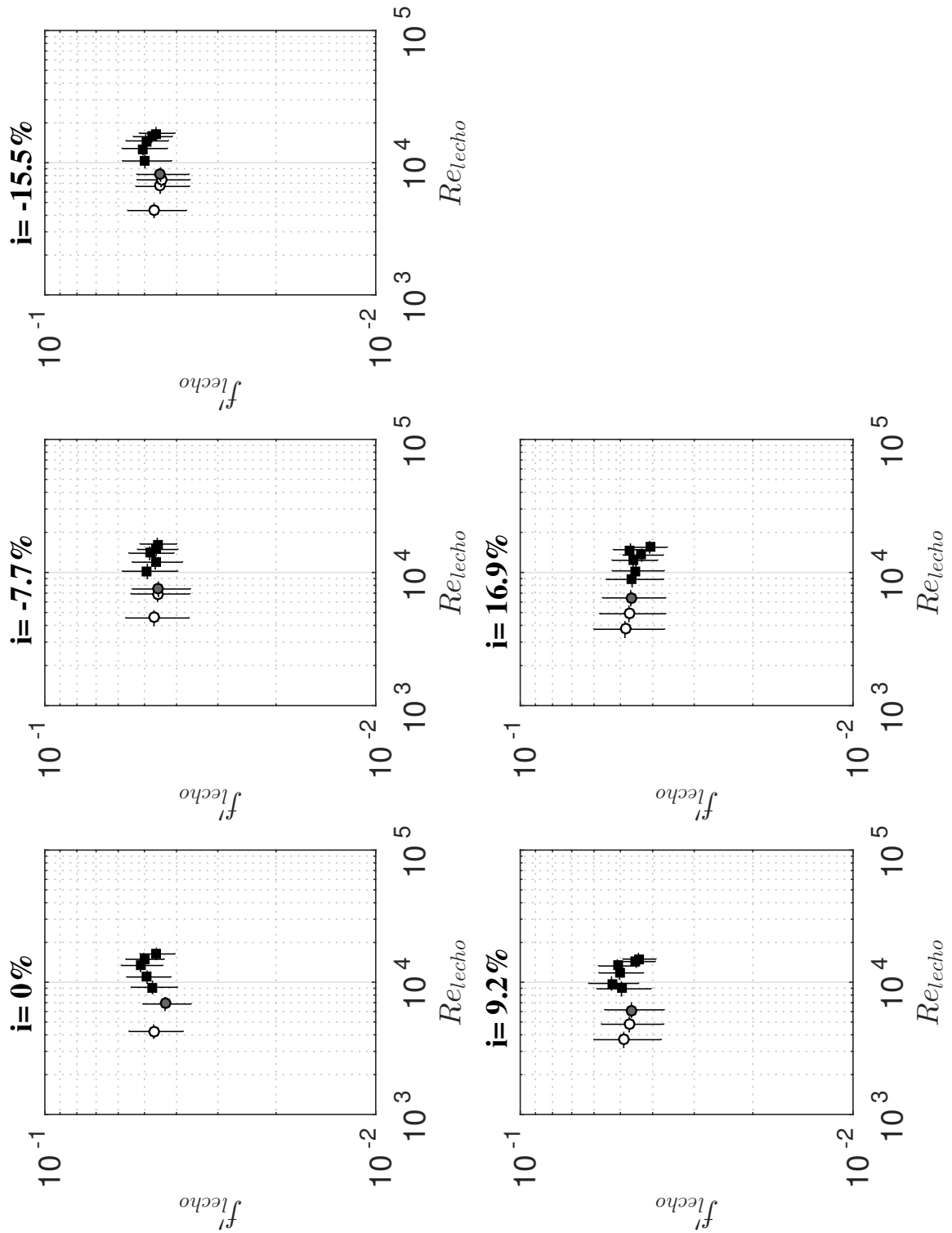


Figura D.5: Relación entre número de Reynolds del flujo modificado asociado al lecho Re_{lecho} y el factor de fricción asociado al lecho f'_{lecho} , para las cinco pendientes ensayadas de la tubería

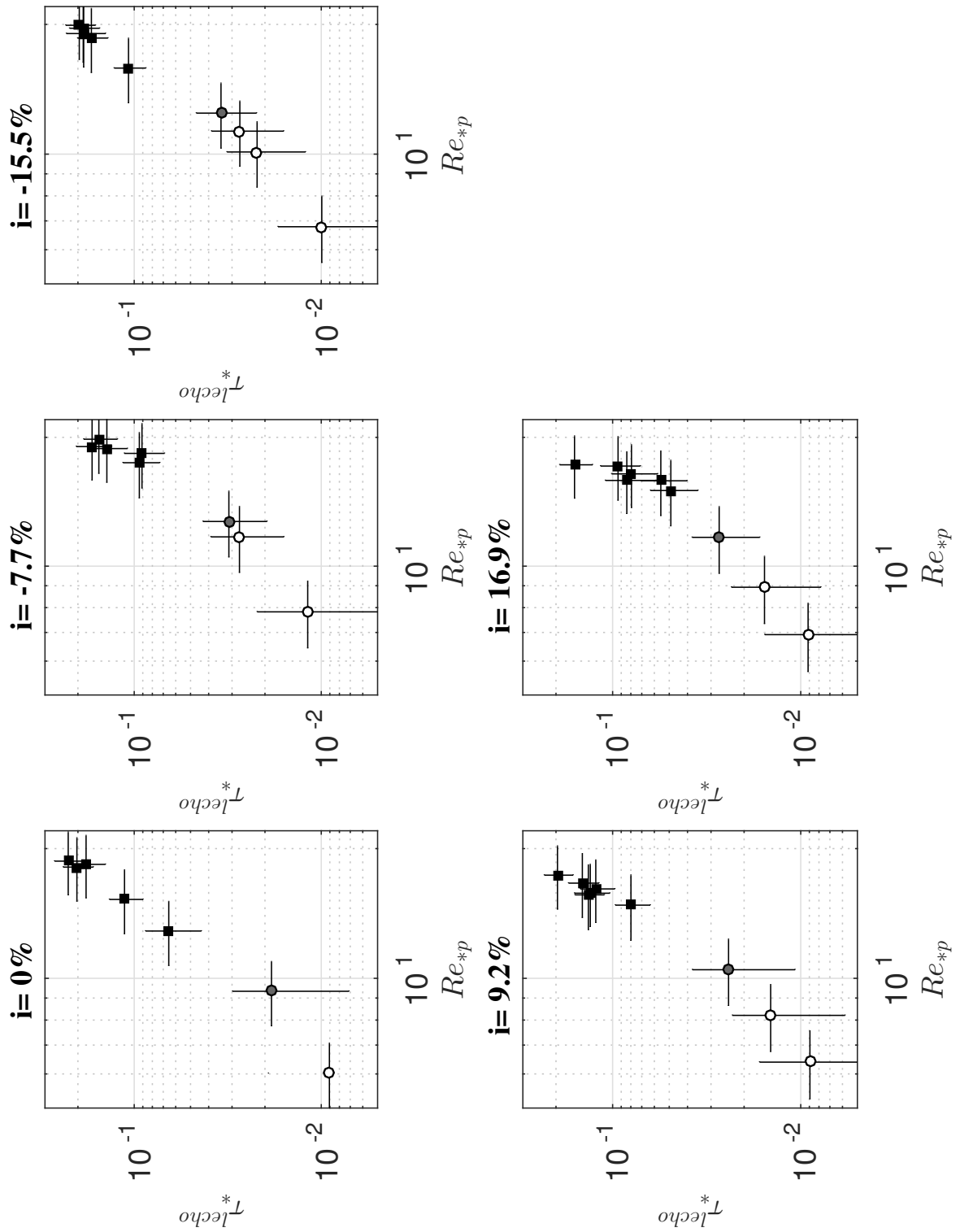


Figura D.6: Esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho total en función del Reynolds de la partícula asociado al lecho

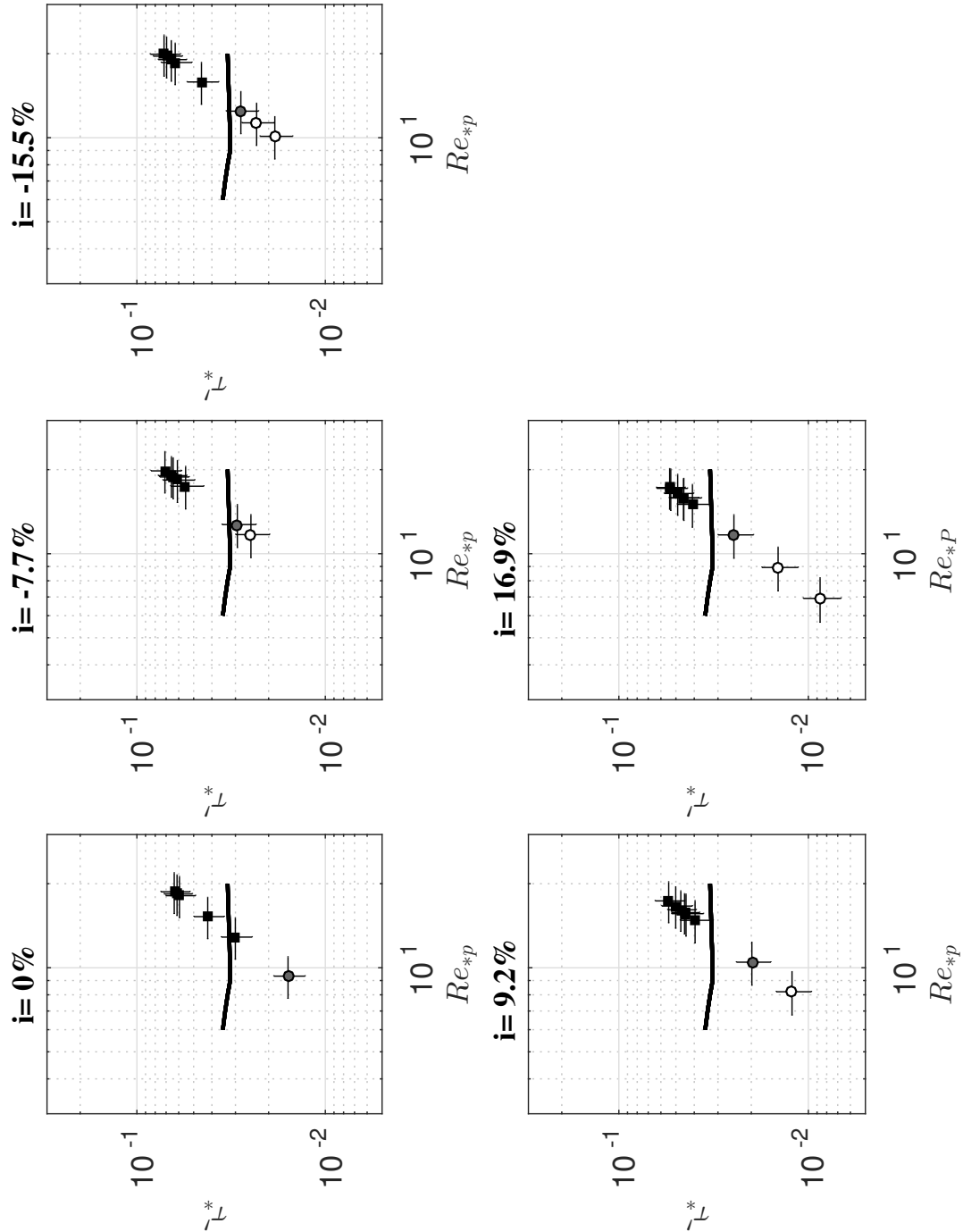


Figura D.7: Diagrama de Shields. Esfuerzo de corte adimensional asociado a la rugosidad hidrodinámica generada por los granos en función del número de Reynolds de la partícula asociado al lecho. La curva negra corresponde a un tramo del diagrama de Shields. En esta figura, los símbolos vacíos indican que no existe movimiento de las partículas que conforman el lecho, símbolos grises corresponden a la condición de arrastre incipiente, y símbolos negros son casos donde existe arrastre de fondo generalizado y, en su mayoría, formas de fondo. Los datos asociados a los símbolos negros son resultado de la geometría de fondo caracterizada con la técnica de medición FTP.

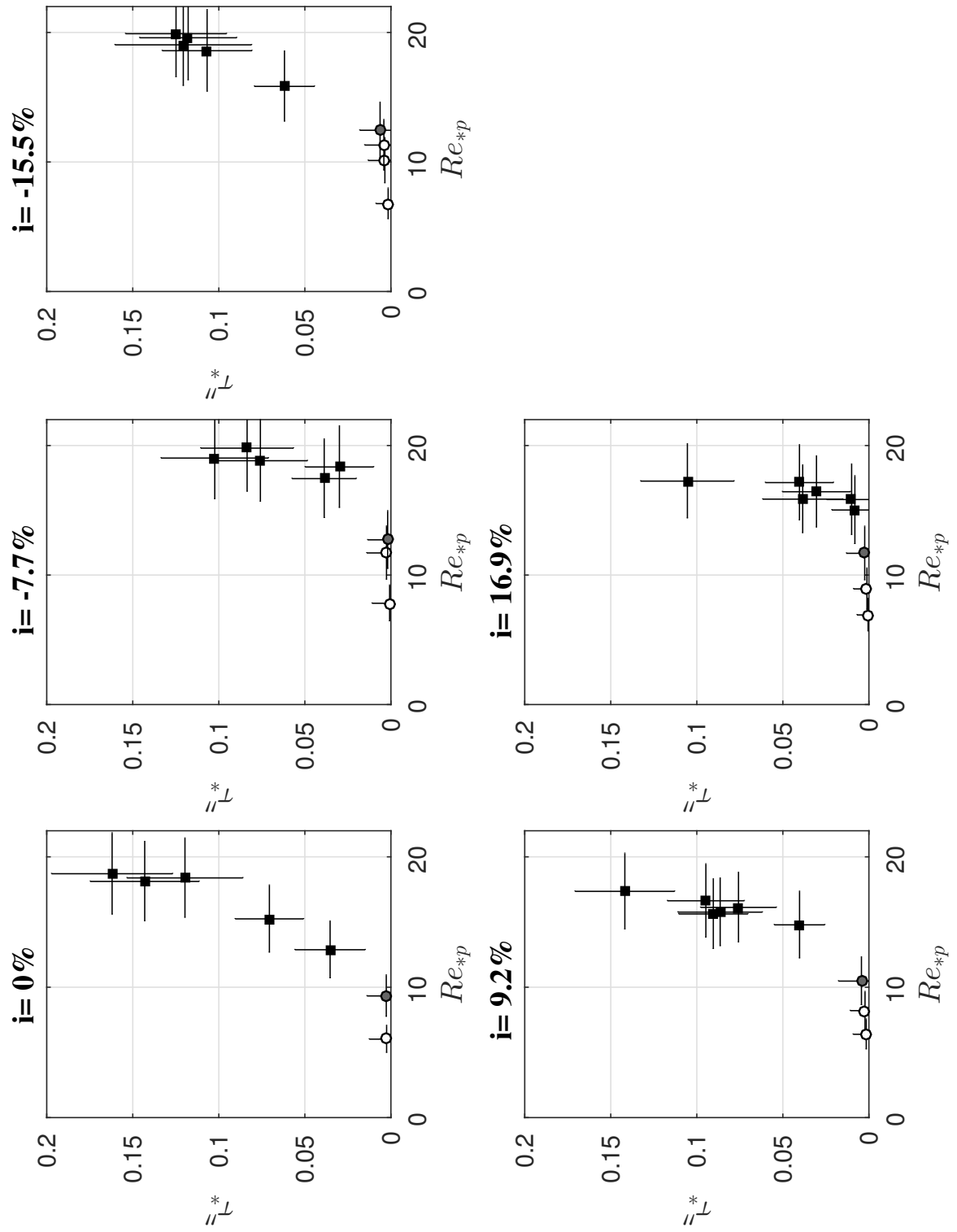


Figura D.8: Esfuerzo de corte asociado a la forma del lecho en función del número de Reynolds de la partícula asociado al lecho

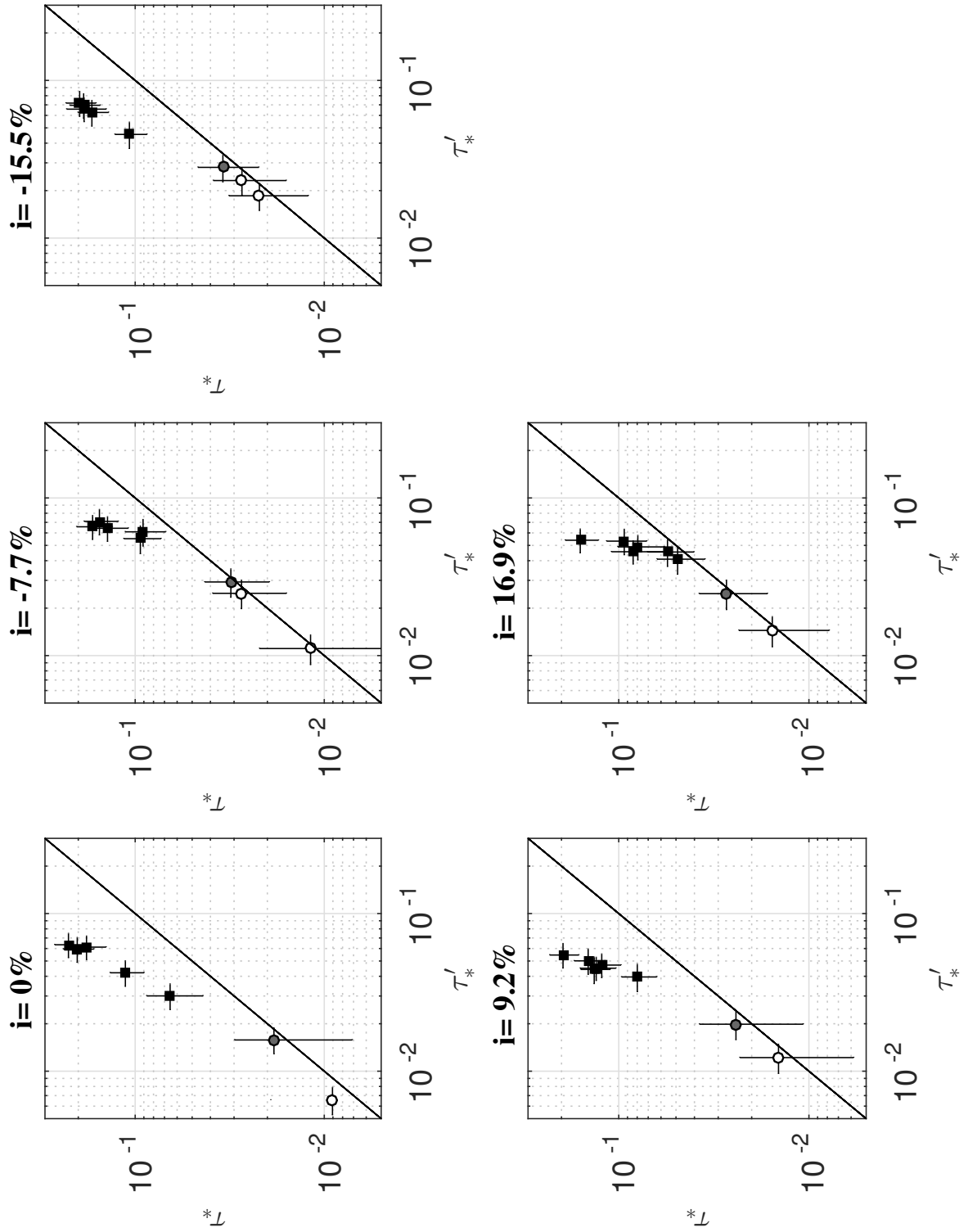


Figura D.9: Englund

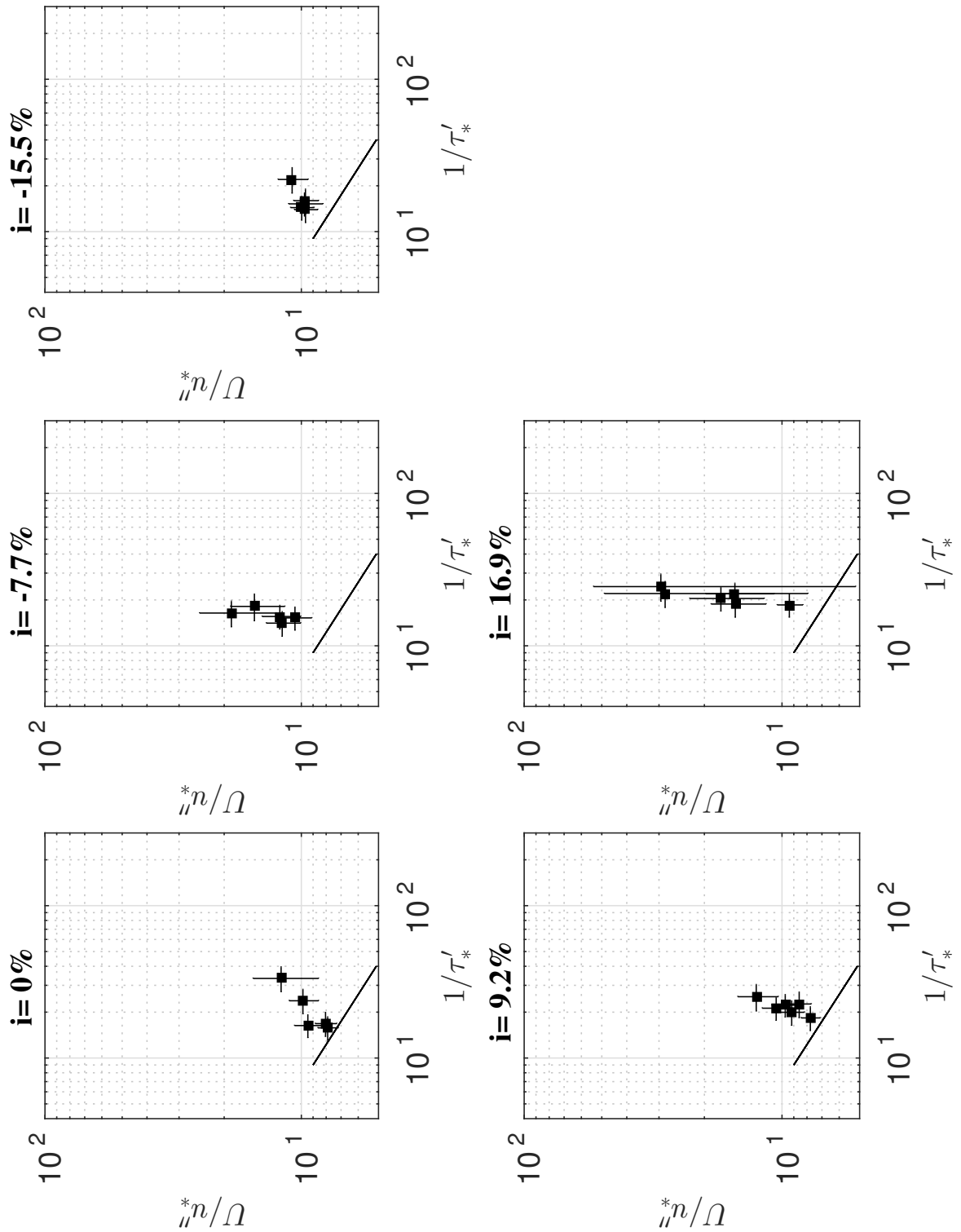


Figura D.10: Relación entre la amplitud de onda adimensional y el Reynolds del flujo asociado al lecho

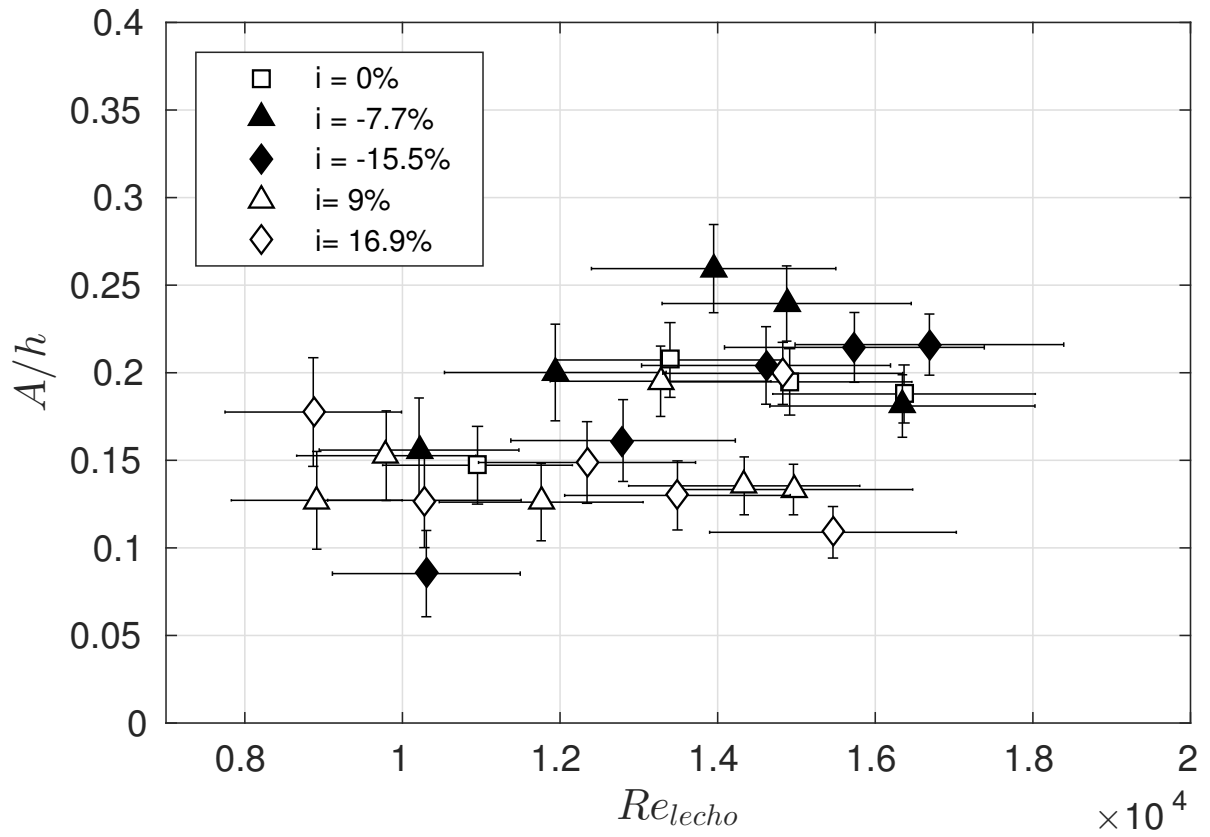


Figura D.11: Relación entre la amplitud de onda adimensional y el Reynolds del flujo asociado al lecho

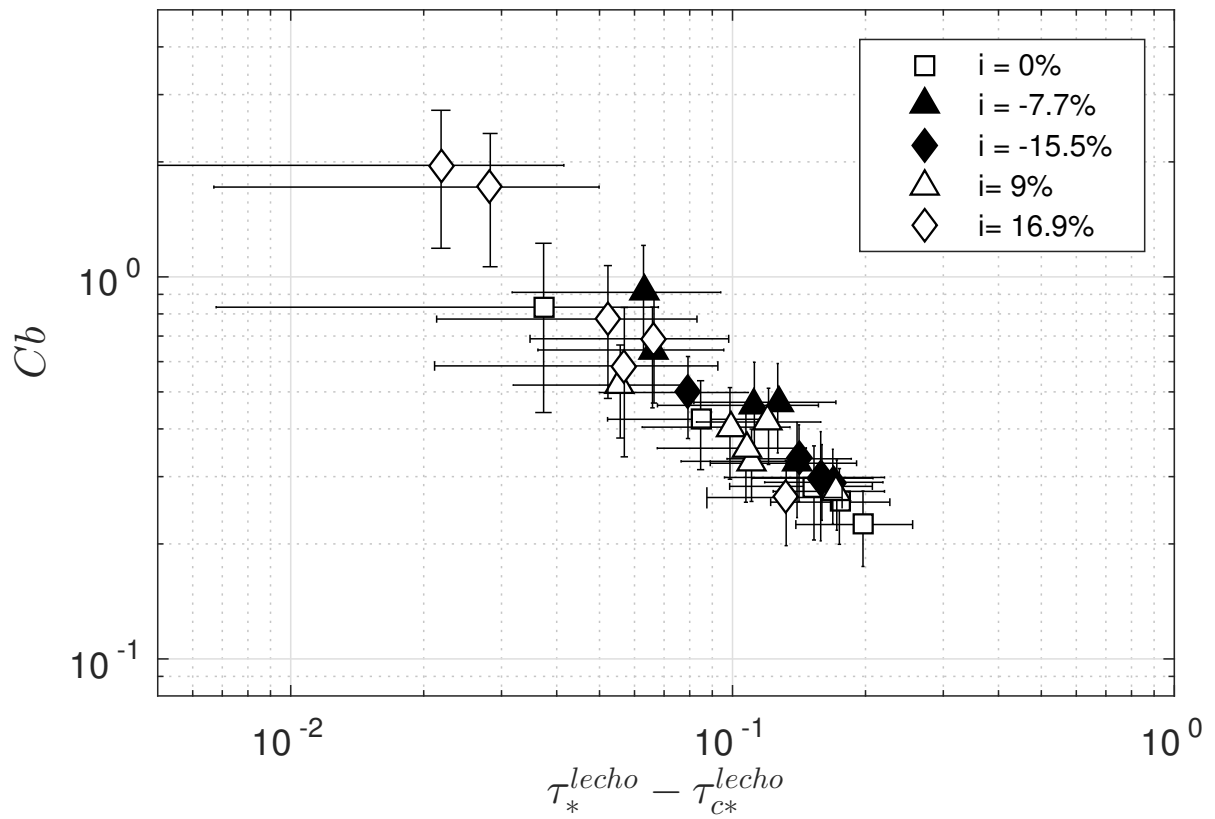


Figura D.12: Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y la celeridad adimensional C_b

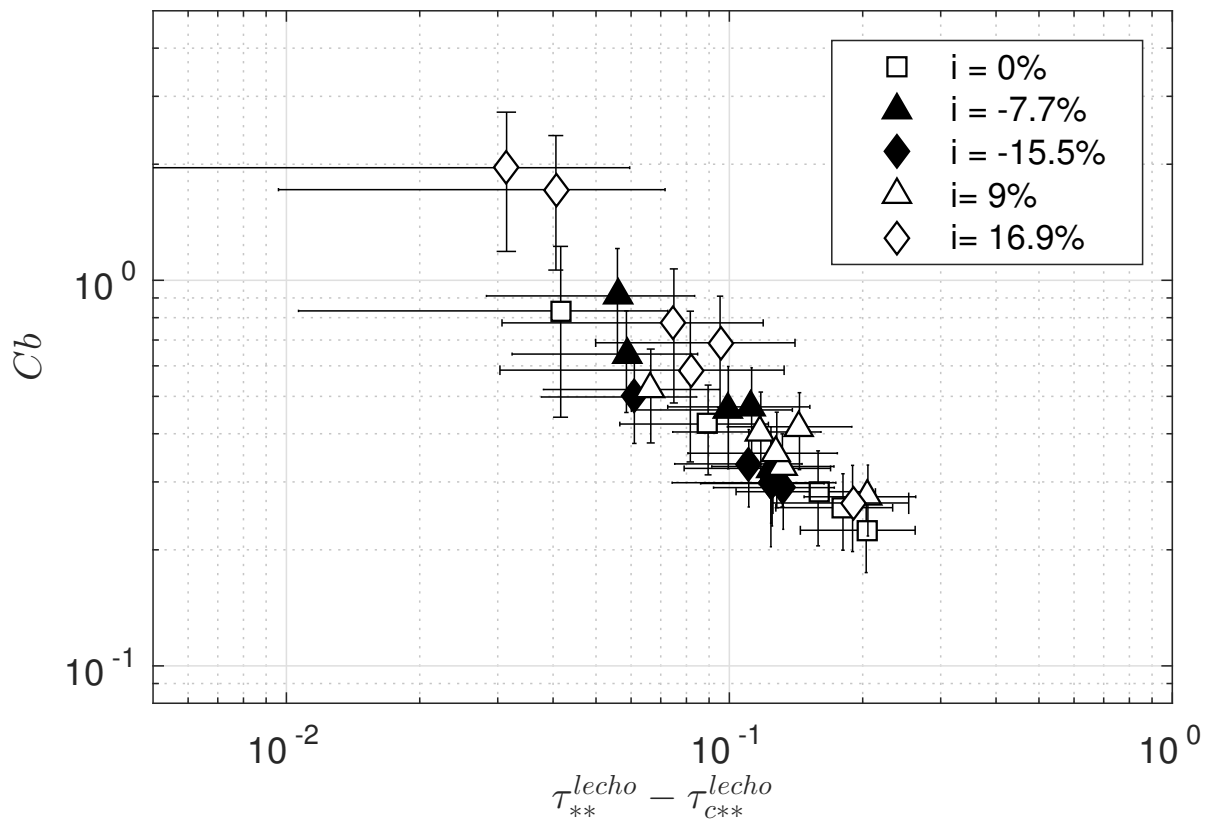


Figura D.13: Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y la celeridad adimensional C_b

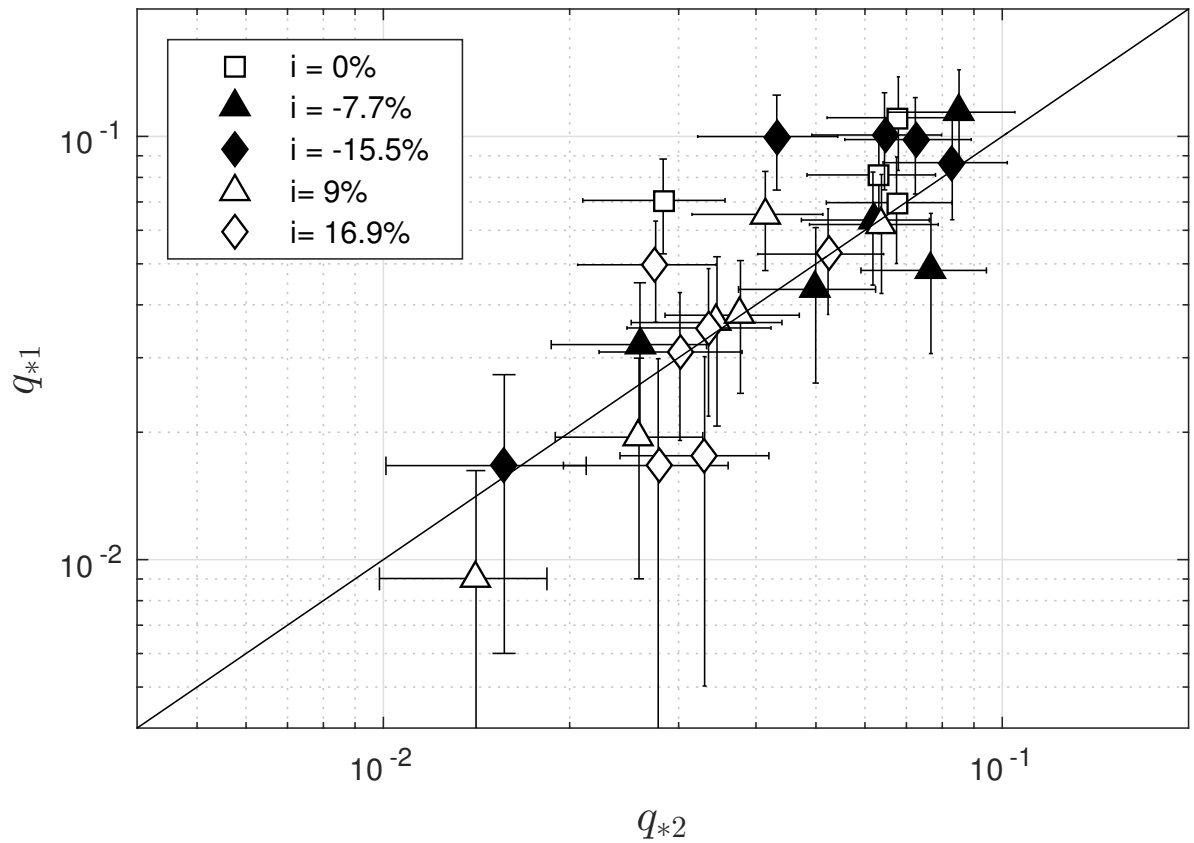


Figura D.14: Relación entre los gastos sólidos determinados según las distintas metodologías. La recta grafica la condición $q_* = q_{*2}$ con el fin de facilitar la comparación.

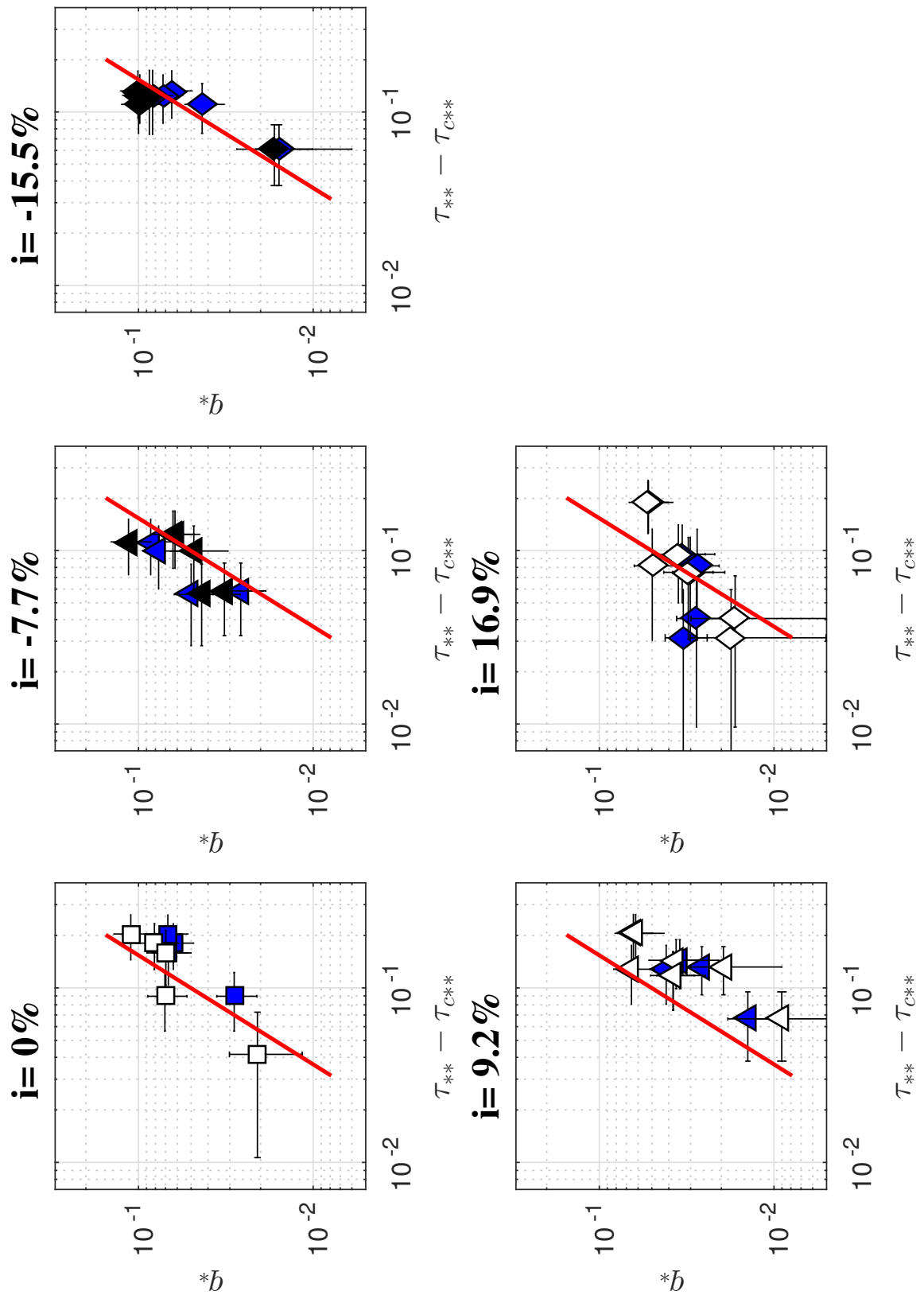


Figura D.15: Relación entre el exceso de esfuerzo de corte adimensional asociado al lecho modificado por pendiente y el gasto sólido de fondo adimensional q_*

Anexo E

METODOLOGÍAS

E.1. Detección de amplitudes

Identificar el frente de la duna y su amplitud no es tarea sencilla dentro de la ventana de medición FTP. Esto se debe a distintos factores como por ejemplo, los casos donde el frente de la duna no se encuentra completamente dentro de la ventana de medición o existen pequeños máximos/mínimos locales que pueden complicar el código de identificación de amplitudes. Por esta razón, se optó por una metodología alternativa que analiza el registro temporal del la zona central de la ventana de medición FTP. En la Figura E.1 se expone el paso de 5 dunas, cuyo registro temporal es caracterizado por la curva negra. A esta curva se le aplicó un filtro pasa bajo para eliminar el ruido en la medición y su resultado es representado por la línea roja. Se identifican los máximos y mínimos locales de la curva roja, los puntos azules, y se calcula la diferencia de altura entre estos puntos siguiendo su orden de izquierda a derecha. Debido a que la amplitud es caracterizada por el frente de la duna, en este caso sólo se consideran las diferencias de altura cuyo resultado es negativo.

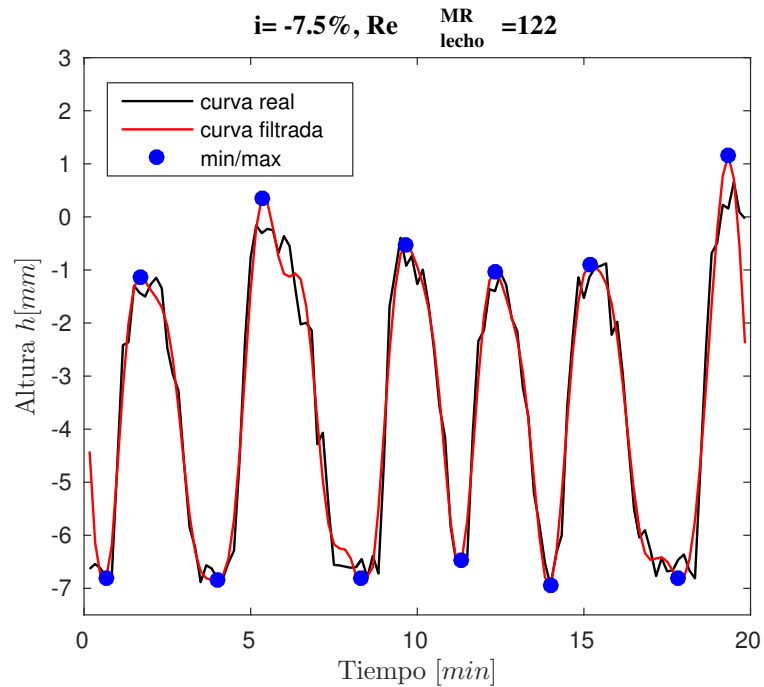


Figura E.1: Detección de amplitudes

E.2. Detección de celeridades

Para estimar la celeridad de la onda, se hizo un seguimiento del frente de la duna. En la Figura E.2, se muestra el perfil longitudinal central, para un tiempo dado, caracterizado por el sistema de medición FTP. La curva negra muestra dicho perfil, curva real, mientras que la curva roja es la curva filtrada a través de un filtro pasa bajo y centrando su altura media en cero. Luego se ubican las intersecciones que pasan por cero y tienen pendiente negativa. Esto último, es para identificar el frente de la duna y no la cara aguas arriba de la cresta de la duna. Los puntos azules son el resultado de estas intersecciones, mientras que los puntos verdes son los datos registrados en el cuadro anterior del registro temporal. El espaciamiento entre ambos datos, multiplicado por la frecuencia de adquisición de datos del sistema FTP, entrega la celeridad instantánea del frente. Una de las fallas observadas del algoritmo se produce cuando una nueva duna ingresa a la ventana del sistema de medición FTP. En este caso, puede pasar que el dato del cuadro anterior (punto verde) esté delante de la nueva ubicación del frente (punto azul). Por esta razón celeridades negativas son descartadas inmediatamente en el algoritmo de detección.

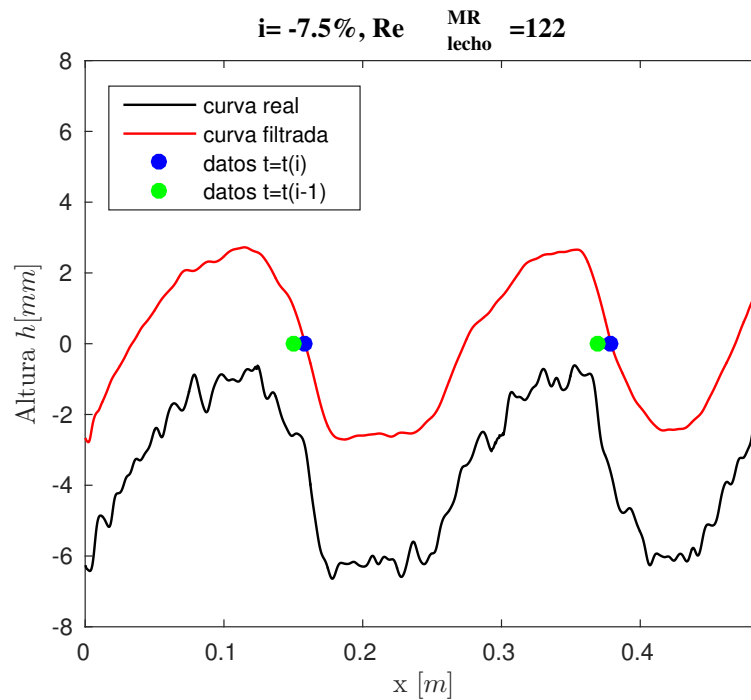


Figura E.2: Seguimiento del frente de la duna

En la Figura E.3 se expone la distribución de celeridades instantáneas detectadas. Aquí se muestran los resultados en azul mientras que los círculos rojos son datos descartados. La condición para un dato inválido es exceder dos veces la desviación estándar del conjunto de datos. La razón de para hacer esto es que cuando una nueva duna entra en la ventana de medición FTP, el algoritmo puede fallar dado que enumera incorrectamente las dunas, presentes en el tramo de observación.

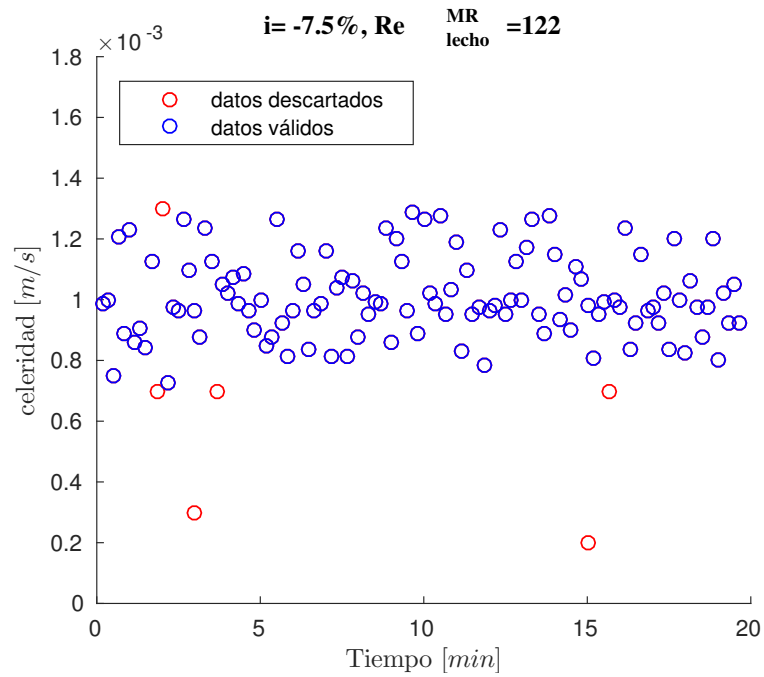


Figura E.3: Distribución de celeridades instantáneas

En la Figura E.4 se deja en evidencia que las celeridades caracterizadas no presentan una tendencia clara para aumentos del número de Reynolds, modificado para fluido pseudoplástico y asociado al lecho, Re_{lecho}^{MR} , presentado en la sección 2.2 del capítulo 2, Marco Teórico. Aquí los cuadrados blancos representan la tubería en posición horizontal, los triángulos negros, la tubería en pendiente $i = -7.5\%$ y los diamantes negros, la tubería en pendiente $i = -16\%$, donde tampoco se observa un orden sistemático para variaciones de la pendiente.

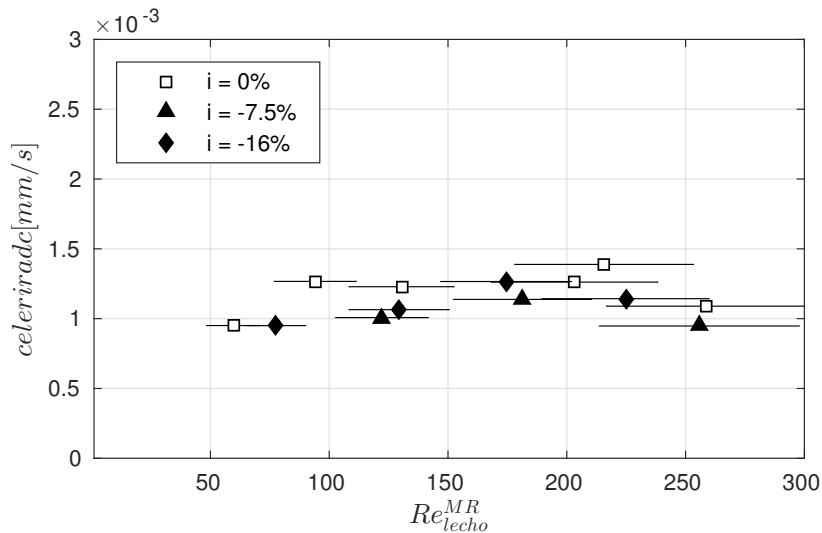


Figura E.4: Distribución de celeridades instantáneas

E.3. Gasto sólido de fondo

En la Figura E.5 se muestran los resultados de la caracterización del perfil transversal de gasto sólido de fondo promediado longitudinalmente. Cada punto presentado en esta figura corresponde al gasto sólido de fondo calculado como el avance de una duna cuyo perfil longitudinal es una fila del registro 3D y su ancho, el ancho de un pixel. Es decir, el gasto sólido de fondo, promediado longitudinalmente, de una fila del registro 3D es el volumen de la duna por la celeridad del centro de masa y dividido por el largo de la duna. Al igual que en el caso de celeridad de la onda, se establecen criterios con los que se descartan algunos valores (puntos azules), dado que son ocasiones donde el algoritmo falla. Un ejemplo de esto, es cuando una duna sale de la ventana de medición FTP y el algoritmo enumera incorrectamente las dunas presentes. En consecuencia, el algoritmo puede asociar incorrectamente dunas distintas al pasar de un cuadro a otro.

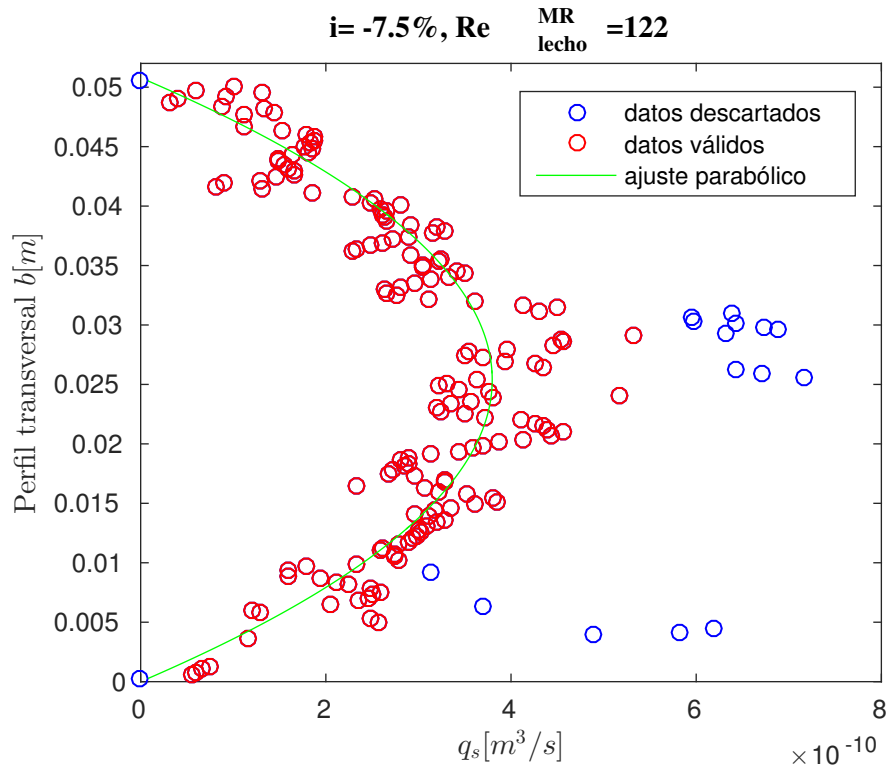


Figura E.5: Perfil transversal del gasto sólido de fondo para un tiempo y duna dada

En la Figura E.6 se muestra el resultado del registro temporal donde cada punto es la suma de las filas en el perfil expuesto en E.5, dividido por el ancho de la tubería para obtener el gasto sólido por unidad de ancho $q_s [m^3/s/m]$. En el caso que dos dunas queden completamente caracterizadas, por un mínimo de dos cuadros, es posible tener dos valores para el gasto sólido en un mismo instante. Los puntos azules corresponden a la primera duna caracterizada de izquierda a derecha en la ventana de medición FTP y los puntos rojos a la duna más adelante en el sentido de flujo. Los resultados de la caracterización de ambas dunas es una evidencia más de la periodicidad de las formas de fondo donde el tren de ondas no

difiere considerablemente en tamaño ni celeridad.

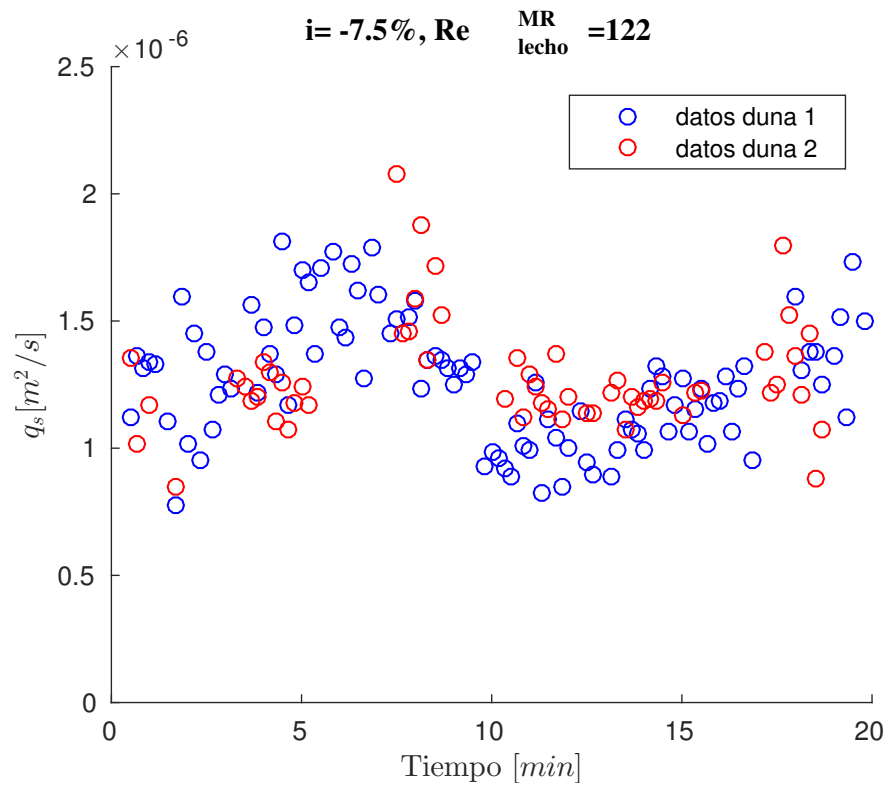


Figura E.6: Perfil transversal del gasto sólido de fondo para un tiempo y duna dada

E.4. Propagación de errores

La propagación de errores para cualquier función $f(x_i)$, donde x_i con $i = 1, \dots, N$, las N variables que presentan errores aleatorios en su medición, esta dada por:

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \sigma_{x_i} \right)^2 \quad (\text{E.1})$$

donde σ_{x_i} es el error asociado a la variable x_i y σ_f es el resultado de la propagación de errores. A continuación se presenta la propagación de errores de los adimensionales usados en el capítulo 4, Resultados.

Para el error de del sistema de medición FTP, se hizo un análisis estadístico del plano de referencia usando las mismas imágenes del lecho plano como situación deformada. En condiciones ideales, este procedimiento debería reconstruir el lecho plano centrado en cero. Sin embargo, el plano reconstruido presenta variaciones en entorno a cero pixel a pixel. Se calculó la varianza de la altura registrada para todos los pixeles de la ventana de medición, y con esto su desviación estándar. El valor obtenido, que caracteriza el error cometido por el sistema de medición FTP para las condiciones experimentales, es $\sigma_{FTP} = 0.27 \text{ mm}$. Sin embargo, existe otra fuente de error que afecta al sistema de medición FTP, la cual es el gasto sólido de fondo. Se estimó que la capa de arrastre de sedimentos genera una incertidumbre en la determinación del lecho de 1.5 veces el diámetro característico de la partícula, por lo que se eligió este último valor como el error del sistema de medición FTP.

Viscosidad efectiva μ_{eff}

$$\begin{aligned} \sigma_{\mu_{eff}}^2 = & \left(\left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{2U}{R_h} \right)^{n-1} \sigma_K \right)^2 + \left(K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{2}{R_h} \right)^{n-1} (n-1)U^{n-2} \sigma_U \right)^2 + \quad (\text{E.2}) \\ & \left(K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n (2U)^{n-1} (n-1)R_h^n \sigma_{R_h} \right)^2 + \\ & \left(K \left[n \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{n-1} \left(\frac{12n-4(3n+1)}{16n^2} \right) \left(\frac{2U}{R_h} \right)^{n-1} + (n-1) \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{2U}{R_h} \right)^{n-2} \right] \sigma_n \right)^2 \end{aligned}$$

Número de Reynolds asociado al área de influencia de acrílico $Re_{acrílico}^{MR}$

$$\sigma_{Re_{acrílico}^{MR}}^2 = \left(\frac{4UR_h}{\mu_{eff}} \sigma_\rho \right)^2 + \left(\frac{4\rho R_h}{\mu_{eff}} \sigma_U \right)^2 + \left(\frac{4\rho U}{\mu_{eff}} \sigma_{R_h} \right)^2 + \left(\frac{4\rho U R_h}{\mu_{eff}^2} \sigma_\rho \right)^2 \quad (\text{E.3})$$

Esfuerzo de corte promedio $\tau = \gamma R_h J$

$$\sigma_\tau = (R_h J \sigma_\gamma)^2 + (\gamma J \sigma_{R_h})^2 + (\gamma R_h \sigma_J)^2 \quad (\text{E.4})$$

Factor de fricción asociado a las paredes de acrílico

$$\sigma_{f_1}^2 = \left(\frac{64}{(Re_{acrílico}^{MR})^2} \sigma_{Re_{acrílico}^{MR}} \right)^2 \quad (\text{E.5})$$

Esfuerzo de corte asociado a las paredes de acrílico

$$\tau_{acrílico} = \frac{1}{8} \rho f_1 U^2 \quad (\text{E.6})$$

donde f_1 es el factor de fricción asociado a las paredes de acrílico, estimado en base a la relación de Haldenwang et al. (2010) para una solución de agua y CMC.

$$\sigma_{\tau_{acrílico}}^2 = \left(\frac{f_1 U^2}{8} \sigma_\rho \right)^2 + \left(\frac{\rho U^2}{8} \sigma_{f_1} \right)^2 + \left(\frac{\rho f_1 U}{4} \sigma_U \right)^2 \quad (\text{E.7})$$

Esfuerzo de corte asociado al lecho τ_{lecho}

$$\tau_{lecho} = \frac{1}{b} (\tau P_h - \tau_{acrílico} P_{h_{acrílico}}) \quad (\text{E.8})$$

Donde b es el ancho interno de la tubería y también el perímetro mojado asociado al lecho. τ es el esfuerzo de corte promedio sobre la tubería y P_h el perímetro mojado total, $\tau_{acrílico}$ el esfuerzo de corte asociado a las tres paredes de acrílico y $P_{h_{acrílico}}$ el perímetro mojado sobre el que actúa $\tau_{acrílico}$.

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau_{lecho}}^2 = & \left(\frac{P_h}{b} \sigma_\tau \right)^2 + \left(\frac{\tau}{b} \sigma_{P_h} \right)^2 + \left(\frac{\tau P_h}{b^2} \sigma_b \right)^2 + \left(\frac{P_{h_{acrílico}}}{b} \sigma_{\tau_{acrílico}} \right)^2 + \\ & \left(\frac{\tau_{acrílico}}{b} \sigma_{P_{h_{acrílico}}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{acrílico} P_{h_{acrílico}}}{b^2} \sigma_b \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{E.9})$$

Factor de fricción asociado al lecho f_{lecho}

$$f_{lecho} = \frac{8\tau_{lecho}}{\rho U^2} \quad (\text{E.10})$$

$$\sigma_{f_{lecho}}^2 = \left(\frac{8}{\rho U^2} \sigma_{\tau_{lecho}} \right)^2 + \left(\frac{8\tau_{lecho}}{\rho^2 U^2} \sigma_\rho \right)^2 + \left(\frac{16\tau_{lecho}}{\rho U^3} \sigma_U \right)^2 \quad (\text{E.11})$$

Donde σ_U es el error asociado a la velocidad media del flujo.

Velocidad friccional asociada al lecho u_{*lecho}

$$u_{*lecho} = \sqrt{\frac{\tau_{lecho}}{\rho}} \quad (\text{E.12})$$

$$\sigma_{u_{*lecho}}^2 = \left(\frac{1}{2\sqrt{\tau_{lecho}\rho}} \sigma_{\tau_{lecho}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{lecho}^{0.5}}{2\rho^{1.5}} \sigma_\rho \right)^2 \quad (\text{E.13})$$

Número de Reynolds de la partícula

$$Re_{*p} = \frac{\rho}{K} u_{*lecho}^{2-n} d_p^n \quad (\text{E.14})$$

$$\sigma_{Re_{*p}}^2 = \left(\frac{\rho}{K^2} u_{*lecho}^{2-n} d_p^n \sigma_K \right)^2 + \left(\frac{\rho u_{*lecho}^2}{K} \log \left(\frac{d_p}{u_{*lecho}} \right) \left(\frac{d_p}{u_{*lecho}} \right)^n \sigma_n \right)^2 + \quad (E.15)$$

$$\left((2-n) \frac{\rho}{K} u_{*lecho}^{1-n} d_p^n \sigma_{u_{*lecho}} \right)^2 + \left(n \frac{\rho}{K} u_{*lecho}^{1-n} d_p^{n-1} \sigma_{d_p} \right)^2 + \left(\frac{1}{K} u_{*lecho}^{2-n} d_p^n \sigma_{rho} \right)^2$$

Número de Shileds τ_* , parámetro exceso de esfuerzo de corte $\tau_* - \tau_{c*}$, el parámetro $\tau_*(\tau_* - \tau_{c*})$ y su respectiva corrección por pendiente.

$$\tau_* = \frac{u_{*lecho}^2}{Rg d_p} \quad (E.16)$$

$$\sigma_{\tau_*}^2 = \left(\frac{2u_{*lecho}}{Rg d_p} \sigma_{u_{*lecho}} \right)^2 + \left(\frac{u_{*lecho}^2}{R^2 g d_p} \sigma_R \right)^2 + \quad (E.17)$$

$$\left(\frac{u_{*lecho}^2}{Rg^2 d_p} \sigma_g \right)^2 + \left(\frac{u_{*lecho}^2}{Rg d_p^2} \sigma_{d_p} \right)^2$$

Parámetro exceso de esfuerzo de corte $\tau_* - \tau_{c*}$

$$\sigma_{TmTc*}^2 = \sigma_{\tau_*}^2 + \sigma_{\tau_{c*}}^2 \quad (E.18)$$

Número de Schields corregido por pendiente τ_{**}

$$\mu = \tan(\phi) \quad (E.19)$$

$$\sigma_\mu = \sec^2(\phi) \sigma_\phi \quad (E.20)$$

donde ϕ es el ángulo de reposo de las partículas.

$$\sigma_{\tau_{**}}^2 = \left(\frac{\tau_*(\mu \cos(\theta) - \sin(\theta)) - \mu \tau_{c*} \cos(\theta)}{\mu \cos(\theta) - \sin(\theta)} \sigma_\mu \right)^2 + \left(\frac{\mu}{\mu \cos(\theta) - \sin(\theta)} \sigma_{\tau_*} \right)^2 \quad (E.21)$$

$$\left(\mu \tau_{c*} \frac{-\cos(\theta) - \mu \sin(\theta)}{(\mu \cos(\theta) - \sin(\theta))^2} \sigma_\theta \right)^2 ;$$

Error asociado a la corrección por pendiente para $\tau_{**}(\tau_{**} - \tau_{c**})$:

$$\sigma_{TauTmTc**}^2 = (2\tau_{**}\sigma_{\tau_{**}})^2 + (\tau_{c**}\sigma_{\tau_{**}})^2 + (\tau_{**}\sigma_{\tau_{c**}})^2 \quad (E.22)$$

Amplitud adimensional A/h donde h es la altura de escurrimiento.

$$\sigma_A^2 = 2\sigma_{FTP}^2 \quad (E.23)$$

$$\sigma_{A/h}^2 = \left(\frac{\sigma_A}{h} \right)^2 + \left(\frac{A}{h^2} \sigma_h \right)^2 \quad (E.24)$$

Celeridad adimensional C_b adimensionalizada en base a un término viscoso. Para poder estimar este error, primero se debe estimar el error del algoritmo que calcula la celeridad de la onda.

$$c = \frac{x(t_i) - x(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (\text{E.25})$$

donde x es la posición del frente en función del tiempo y Δt es el espacio de tiempo entre dos cuadros del registro temporal.

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma_L}{\sqrt{N_p}} \quad (\text{E.26})$$

Donde L es el largo de referencia utilizado y N_p el número de pixeles en la imagen tomada por la cámara, comprendidos en ese largo.

$$\sigma_c = 2 * \left(\frac{\sigma_x}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{x(t_i) - x(t_{i-1})}{(\Delta t)^2} \sigma_{\Delta t} \right)^2 \quad (\text{E.27})$$

$$C_b = \frac{cA\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \quad (\text{E.28})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{C_b}^2 = & \left(\frac{A\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_c \right)^2 + \left(\frac{c\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_A \right)^2 + \left(\frac{cA}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_{\mu_{eff}} \right)^2 + \\ & \left(\frac{cA\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)^2gd_p^3} \sigma_{\rho_s} \right)^2 + \left(\frac{cA\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)^2gd_p^3} \sigma_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{cA\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)g^2d_p^3} \sigma_g \right)^2 + \left(\frac{3cA\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^4} \sigma_{d_p} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{E.29})$$

Gasto sólido de fondo estimado a partir de una geometría cualquiera:

$$q_{*1} = \frac{q_s\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \quad (\text{E.30})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{q_{*1}}^2 = & \left(\frac{\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_{q_s} \right)^2 + \left(\frac{q_s}{(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_{\mu_{eff}} \right)^2 + \left(\frac{q_s\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)^2gd_p^3} \sigma_{\rho_s} \right)^2 + \\ & \left(\frac{q_s\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)^2gd_p^3} \sigma_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{q_s\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)g^2d_p^3} \sigma_g \right)^2 + \left(\frac{3q_s\mu_{eff}}{(\rho_s - \rho)gd_p^4} \sigma_{d_p} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{E.31})$$

Gasto sólido de fondo estimado a partir de una geometría simplificada (triangular):

$$q_{*2} = \frac{cA\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)gd_p^3} \quad (\text{E.32})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{q_{*2}}^2 = & \left(\frac{A\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_c \right)^2 + \left(\frac{c\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_A \right)^2 + \left(\frac{cA}{2(\rho_s - \rho)gd_p^3} \sigma_{\mu_{eff}} \right)^2 + \\ & \left(\frac{cA\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)^2gd_p^3} \sigma_{\rho_s} \right)^2 + \left(\frac{cA\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)^2gd_p^3} \sigma_{\rho} \right)^2 + \left(\frac{cA\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)g^2d_p^3} \sigma_g \right)^2 + \left(\frac{3cA\mu_{eff}}{2(\rho_s - \rho)gd_p^4} \sigma_{d_p} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{E.33})$$

Anexo F

TABLAS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

F.1. Experimentos con solución de CMC en agua como fluido

			Q [L/s]	h [mm]	U [m/s]	θ	t [°C]
1	0	no mov	34 ± 5	18 ± 1.4	0.04 ± 0.01	0.004 ± 0.0002	22.3 ± 0.3
2	0	no mov	56 ± 5	18 ± 1.4	0.06 ± 0.01	0.004 ± 0.0001	22.3 ± 0.3
3	0	no mov	75 ± 5	18 ± 1.4	0.08 ± 0.01	0.004 ± 0.0002	$\text{NaN} \pm 0.3$
4	0	no mov	91 ± 5	18 ± 1.4	0.10 ± 0.01	0.004 ± 0.0002	$\text{NaN} \pm 0.3$
5	0	a incipiente	96 ± 5	18 ± 1.4	0.10 ± 0.01	0.004 ± 0.0002	21.4 ± 0.3
6	0	dunas	142 ± 5	18 ± 1.4	0.15 ± 0.01	0.004 ± 0.0002	20.7 ± 0.3
7	0	dunas	204 ± 5	18 ± 1.4	0.21 ± 0.02	0.004 ± 0.0003	20.5 ± 0.3
8	0	dunas	288 ± 5	22 ± 1.4	0.25 ± 0.02	0.004 ± 0.0005	20.5 ± 0.3
9	0	dunas	297 ± 5	20 ± 1.4	0.28 ± 0.02	0.004 ± 0.0004	19.9 ± 0.3
10	0	dunas	390 ± 5	21 ± 1.4	0.36 ± 0.03	0.004 ± 0.0005	19.7 ± 0.3
11	0	dunas	401 ± 5	20 ± 1.4	0.38 ± 0.03	0.004 ± 0.0007	19.8 ± 0.3
12	0	dunas	516 ± 5	24 ± 1.4	0.41 ± 0.03	0.004 ± 0.0009	$\text{NaN} \pm 0.3$
13	m1	no mov	57 ± 5	22 ± 1.4	0.05 ± 0.01	-0.075 ± 0.0003	21.9 ± 0.3
14	m1	no mov	77 ± 5	22 ± 1.4	0.07 ± 0.01	-0.075 ± 0.0002	21.6 ± 0.3
15	m1	no mov	86 ± 5	22 ± 1.4	0.07 ± 0.01	-0.075 ± 0.0001	21.1 ± 0.3
16	m1	a incipiente	103 ± 5	22 ± 1.4	0.09 ± 0.01	-0.075 ± 0.0001	21.1 ± 0.3
17	m1	lecho plano	141 ± 5	22 ± 1.4	0.12 ± 0.01	-0.075 ± 0.0002	21.0 ± 0.3
18	m1	dunas	198 ± 5	25 ± 1.4	0.15 ± 0.01	-0.075 ± 0.0002	20.5 ± 0.3
19	m1	dunas	300 ± 5	25 ± 1.4	0.23 ± 0.01	-0.075 ± 0.0003	20.2 ± 0.3
20	m1	dunas	402 ± 5	25 ± 1.4	0.31 ± 0.02	-0.075 ± 0.0004	20.0 ± 0.3
21	m1	dunas	497 ± 5	23 ± 1.4	0.42 ± 0.03	-0.075 ± 0.0007	19.8 ± 0.3
22	m2	no mov	42 ± 5	22 ± 1.4	0.04 ± 0.01	-0.158 ± 0.0001	24.0 ± 0.3
23	m2	no mov	59 ± 5	22 ± 1.4	0.05 ± 0.01	-0.158 ± 0.0001	25.0 ± 0.3
24	m2	a incipiente	81 ± 5	22 ± 1.4	0.07 ± 0.01	-0.158 ± 0.0001	23.0 ± 0.3
25	m2	lecho plano	150 ± 5	22 ± 1.4	0.13 ± 0.01	-0.158 ± 0.0001	21.4 ± 0.3
26	m2	dunas	210 ± 5	25 ± 1.4	0.16 ± 0.01	-0.158 ± 0.0002	21.2 ± 0.3
27	m2	dunas	304 ± 5	24 ± 1.4	0.24 ± 0.02	-0.158 ± 0.0003	20.8 ± 0.3
28	m2	dunas	405 ± 5	26 ± 1.4	0.30 ± 0.02	-0.158 ± 0.0003	20.6 ± 0.3
29	m2	dunas	502 ± 5	27 ± 1.4	0.36 ± 0.02	-0.158 ± 0.0005	23.0 ± 0.3

F.2. Experimentos con agua como fluido

			Q [L/s]	h [mm]	U [m/s]	θ	t [°C]
30	n1	no mov	36 ± 5	22 ± 1.4	0.03 ± 0.00	0.090 ± 0.0002	24.0 ± 0.3
31	n1	no mov	53 ± 5	22 ± 1.4	0.05 ± 0.01	0.090 ± 0.0005	25.0 ± 0.3
32	n1	a incipiente	75 ± 5	22 ± 1.4	0.07 ± 0.01	0.090 ± 0.0002	24.0 ± 0.3
33	n1	lecho plano	106 ± 5	22 ± 1.4	0.09 ± 0.01	0.090 ± 0.0003	23.0 ± 0.3
34	n1	lecho plano	151 ± 5	22 ± 1.4	0.13 ± 0.01	0.090 ± 0.0003	25.0 ± 0.3
35	n1	dunas	205 ± 5	21 ± 1.4	0.19 ± 0.01	0.090 ± 0.0002	24.5 ± 0.3
36	n1	dunas	305 ± 5	20 ± 1.4	0.29 ± 0.02	0.090 ± 0.0004	22.0 ± 0.3
37	n1	dunas	405 ± 5	22 ± 1.4	0.36 ± 0.02	0.090 ± 0.0003	21.2 ± 0.3
38	n1	dunas	506 ± 5	23 ± 1.4	0.41 ± 0.03	0.090 ± 0.0003	$\text{NaN} \pm 0.3$
39	n2	no mov	39 ± 5	18 ± 1.4	0.04 ± 0.01	0.167 ± 0.0001	24.3 ± 0.3
40	n2	no mov	49 ± 5	18 ± 1.4	0.05 ± 0.01	0.167 ± 0.0003	23.8 ± 0.3
41	n2	a incipiente	61 ± 5	18 ± 1.4	0.07 ± 0.01	0.167 ± 0.0001	23.5 ± 0.3
42	n2	lecho plano	100 ± 5	18 ± 1.4	0.11 ± 0.01	0.167 ± 0.0002	22.7 ± 0.3
43	n2	lecho plano	155 ± 5	18 ± 1.4	0.17 ± 0.01	0.167 ± 0.0003	22.5 ± 0.3
44	n2	dunas	203 ± 5	21 ± 1.4	0.18 ± 0.01	0.167 ± 0.0003	22.3 ± 0.3
45	n2	dunas	302 ± 5	22 ± 1.4	0.26 ± 0.02	0.167 ± 0.0003	22.0 ± 0.3
46	n2	dunas	403 ± 5	24 ± 1.4	0.32 ± 0.02	0.167 ± 0.0004	21.7 ± 0.3
47	n2	dunas	501 ± 5	24 ± 1.4	0.41 ± 0.03	0.167 ± 0.0007	21.6 ± 0.3

Tabla F.1: Condiciones experimentales

			A_{tot} [cm ²]	A_2 [cm ²]	K [Pa s ⁿ]	n	J
1	0	no mov	9.2 ± 0.8	3.8 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0081 ± 0.0002
2	0	no mov	9.2 ± 0.8	3.8 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0136 ± 0.0001
3	0	no mov	9.2 ± 0.8	3.8 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0180 ± 0.0002
4	0	no mov	9.2 ± 0.8	3.8 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0213 ± 0.0002
5	0	a incipiente	9.2 ± 0.8	3.8 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0225 ± 0.0002
6	0	dunas	9.4 ± 0.8	3.9 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0328 ± 0.0002
7	0	dunas	9.6 ± 0.8	4.0 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0453 ± 0.0003
8	0	dunas	11.3 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0575 ± 0.0005
9	0	dunas	10.6 ± 0.8	4.3 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0538 ± 0.0004
10	0	dunas	10.7 ± 0.8	4.3 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0680 ± 0.0005
11	0	dunas	10.4 ± 0.8	4.2 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0736 ± 0.0007
12	0	dunas	12.5 ± 0.8	4.8 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0568 ± 0.0009
13	m1	no mov	11.5 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0092 ± 0.0003
14	m1	no mov	11.5 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0127 ± 0.0002
15	m1	no mov	11.5 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0142 ± 0.0001
16	m1	a incipiente	11.5 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0170 ± 0.0001
17	m1	lecho plano	11.6 ± 0.8	4.6 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0216 ± 0.0002
18	m1	dunas	13.0 ± 0.8	4.9 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0282 ± 0.0002
19	m1	dunas	13.0 ± 0.8	4.9 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0442 ± 0.0003
20	m1	dunas	12.9 ± 0.8	4.9 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0625 ± 0.0004
21	m1	dunas	12.0 ± 0.8	4.7 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0697 ± 0.0007
22	m2	no mov	11.4 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0077 ± 0.0002
23	m2	no mov	11.4 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0102 ± 0.0001
24	m2	a incipiente	11.4 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0146 ± 0.0002
25	m2	lecho plano	11.4 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0265 ± 0.0001
26	m2	dunas	12.8 ± 0.8	4.9 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0412 ± 0.0002
27	m2	dunas	12.4 ± 0.8	4.8 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0649 ± 0.0003
28	m2	dunas	13.6 ± 0.8	5.1 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0670 ± 0.0004
29	m2	dunas	14.1 ± 0.8	5.2 ± 0.6	0.23 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0726 ± 0.0005
30	n1	no mov	11.2 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0107 ± 0.0002
31	n1	no mov	11.2 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0146 ± 0.0005
32	n1	a incipiente	11.2 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0200 ± 0.0002
33	n1	lecho plano	11.2 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0273 ± 0.0003
34	n1	lecho plano	11.2 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0383 ± 0.0003
35	n1	dunas	10.8 ± 0.8	4.3 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0475 ± 0.0002
36	n1	dunas	10.6 ± 0.8	4.3 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0661 ± 0.0004
37	n1	dunas	11.4 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0683 ± 0.0003
38	n1	dunas	12.2 ± 0.8	4.7 ± 0.6	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0706 ± 0.0003

			A_{tot} [cm ²]	A_2 [cm ²]	K [Pa s ⁿ]	n	J
39	n2	no mov	9.4 ± 0.8	3.9 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0122 ± 0.0001
40	n2	no mov	9.4 ± 0.8	3.9 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0155 ± 0.0003
41	n2	a incipiente	9.4 ± 0.8	3.9 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0190 ± 0.0001
42	n2	lecho plano	9.4 ± 0.8	3.9 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0313 ± 0.0002
43	n2	lecho plano	9.4 ± 0.8	3.9 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0455 ± 0.0003
44	n2	dunas	11.0 ± 0.8	4.4 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0559 ± 0.0003
45	n2	dunas	11.4 ± 0.8	4.5 ± 0.5	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0653 ± 0.0003
46	n2	dunas	12.6 ± 0.8	4.8 ± 0.6	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0625 ± 0.0004
47	n2	dunas	12.3 ± 0.8	4.8 ± 0.6	0.25 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.0593 ± 0.0007

Tabla F.2: Condiciones experimentales 2

			Re^{MR}	$Re^{MR}_{acrílico}$	Re^{MR}_{lecho}	Re_{*p}
1	0	no mov	9 ± 2	8 ± 2	9 ± 2	0.3 ± 0.1
2	0	no mov	17 ± 3	16 ± 4	18 ± 4	0.4 ± 0.1
3	0	no mov	24 ± 4	23 ± 5	26 ± 5	0.5 ± 0.1
4	0	no mov	31 ± 5	30 ± 7	34 ± 7	0.6 ± 0.1
5	0	a incipiente	34 ± 5	32 ± 7	36 ± 7	0.6 ± 0.1
6	0	dunas	55 ± 9	53 ± 11	60 ± 11	0.9 ± 0.2
7	0	dunas	88 ± 13	83 ± 17	94 ± 17	1.1 ± 0.2
8	0	dunas	121 ± 16	115 ± 21	130 ± 22	1.5 ± 0.3
9	0	dunas	132 ± 19	126 ± 24	143 ± 25	1.3 ± 0.2
10	0	dunas	188 ± 26	180 ± 34	203 ± 35	1.6 ± 0.3
11	0	dunas	200 ± 28	191 ± 37	216 ± 38	1.7 ± 0.3
12	0	dunas	239 ± 31	228 ± 39	259 ± 42	1.5 ± 0.3
13	m1	no mov	14 ± 2	13 ± 3	15 ± 3	0.4 ± 0.1
14	m1	no mov	21 ± 3	20 ± 4	23 ± 4	0.5 ± 0.1
15	m1	no mov	24 ± 4	23 ± 4	26 ± 5	0.5 ± 0.1
16	m1	a incipiente	31 ± 4	29 ± 5	33 ± 6	0.6 ± 0.1
17	m1	lecho plano	46 ± 6	44 ± 8	50 ± 8	0.7 ± 0.1
18	m1	dunas	65 ± 8	62 ± 10	71 ± 11	1.0 ± 0.2
19	m1	dunas	113 ± 14	108 ± 18	122 ± 20	1.4 ± 0.2
20	m1	dunas	167 ± 21	160 ± 27	181 ± 29	1.8 ± 0.3
21	m1	dunas	236 ± 31	226 ± 39	256 ± 42	1.8 ± 0.3
22	m2	no mov	9 ± 2	9 ± 2	10 ± 2	0.3 ± 0.1
23	m2	no mov	15 ± 2	14 ± 3	16 ± 3	0.4 ± 0.1
24	m2	a incipiente	22 ± 3	21 ± 4	24 ± 4	0.6 ± 0.1
25	m2	lecho plano	51 ± 7	48 ± 9	55 ± 9	0.9 ± 0.2
26	m2	dunas	72 ± 9	68 ± 12	78 ± 13	1.3 ± 0.2
27	m2	dunas	120 ± 15	114 ± 19	129 ± 21	1.8 ± 0.3
28	m2	dunas	161 ± 20	154 ± 25	174 ± 28	1.9 ± 0.3
29	m2	dunas	207 ± 25	199 ± 31	225 ± 35	2.1 ± 0.4
30	n1	no mov	7 ± 1	7 ± 2	8 ± 2	0.4 ± 0.1
31	n1	no mov	12 ± 2	11 ± 2	13 ± 2	0.5 ± 0.1
32	n1	a incipiente	19 ± 3	18 ± 3	20 ± 4	0.7 ± 0.1
33	n1	lecho plano	30 ± 4	28 ± 5	32 ± 6	0.8 ± 0.1
34	n1	lecho plano	48 ± 6	45 ± 8	51 ± 9	1.0 ± 0.2
35	n1	dunas	73 ± 10	70 ± 13	79 ± 13	1.2 ± 0.2
36	n1	dunas	126 ± 17	121 ± 23	137 ± 23	1.4 ± 0.3
37	n1	dunas	173 ± 23	165 ± 29	187 ± 31	1.5 ± 0.3
38	n1	dunas	219 ± 27	209 ± 35	237 ± 38	1.6 ± 0.3

			Re^{MR}	$Re_{acrílico}^{MR}$	Re_{lecho}^{MR}	Re_{*p}
39	n2	no mov	9 ± 2	9 ± 2	10 ± 2	0.4 ± 0.1
40	n2	no mov	13 ± 2	12 ± 3	13 ± 3	0.5 ± 0.1
41	n2	a incipiente	17 ± 3	16 ± 4	18 ± 4	0.5 ± 0.1
42	n2	lecho plano	32 ± 5	31 ± 7	35 ± 6	0.8 ± 0.1
43	n2	lecho plano	57 ± 9	55 ± 12	62 ± 11	1.0 ± 0.2
44	n2	dunas	72 ± 10	68 ± 13	77 ± 13	1.3 ± 0.2
45	n2	dunas	117 ± 15	112 ± 20	127 ± 21	1.5 ± 0.3
46	n2	dunas	158 ± 20	151 ± 25	171 ± 27	1.6 ± 0.3
47	n2	dunas	214 ± 27	204 ± 34	232 ± 37	1.4 ± 0.3

Tabla F.3: Números de Reynolds

			\mathcal{T}_{tot}	$\mathcal{T}_{acrílico}$	\mathcal{T}_{lecho}	\mathcal{T}_*	\mathcal{T}_{**}
1	0	no mov	0.5 ± 0.0	0.3 ± 0.1	0.8 ± 0.3	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.03
2	0	no mov	0.9 ± 0.1	0.5 ± 0.2	1.5 ± 0.3	0.14 ± 0.04	0.14 ± 0.04
3	0	no mov	1.2 ± 0.1	0.6 ± 0.2	2.1 ± 0.4	0.19 ± 0.05	0.19 ± 0.05
4	0	no mov	1.4 ± 0.1	0.7 ± 0.2	2.6 ± 0.5	0.23 ± 0.05	0.23 ± 0.05
5	0	a incipiente	1.5 ± 0.1	0.7 ± 0.2	2.7 ± 0.5	0.24 ± 0.06	0.24 ± 0.06
6	0	dunas	2.2 ± 0.2	0.9 ± 0.2	4.3 ± 0.7	0.38 ± 0.08	0.39 ± 0.08
7	0	dunas	3.0 ± 0.3	1.1 ± 0.3	6.4 ± 0.9	0.56 ± 0.11	0.57 ± 0.11
8	0	dunas	4.3 ± 0.3	1.1 ± 0.3	10.2 ± 1.1	0.90 ± 0.16	0.90 ± 0.16
9	0	dunas	3.9 ± 0.3	1.2 ± 0.3	8.6 ± 1.0	0.76 ± 0.14	0.76 ± 0.14
10	0	dunas	4.9 ± 0.4	1.5 ± 0.4	11.1 ± 1.3	0.98 ± 0.18	0.99 ± 0.18
11	0	dunas	5.2 ± 0.4	1.6 ± 0.4	11.7 ± 1.4	1.03 ± 0.19	1.04 ± 0.19
12	0	dunas	4.6 ± 0.3	1.5 ± 0.3	10.5 ± 1.2	0.93 ± 0.17	0.94 ± 0.17
13	m1	no mov	0.7 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.3 ± 0.3	0.12 ± 0.03	0.10 ± 0.03
14	m1	no mov	1.0 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.9 ± 0.3	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.03
15	m1	no mov	1.1 ± 0.1	0.5 ± 0.1	2.2 ± 0.3	0.19 ± 0.04	0.17 ± 0.04
16	m1	a incipiente	1.3 ± 0.1	0.5 ± 0.1	2.7 ± 0.4	0.24 ± 0.05	0.21 ± 0.04
17	m1	lecho plano	1.7 ± 0.1	0.7 ± 0.2	3.5 ± 0.5	0.31 ± 0.06	0.27 ± 0.05
18	m1	dunas	2.3 ± 0.2	0.7 ± 0.2	5.4 ± 0.6	0.48 ± 0.09	0.43 ± 0.08
19	m1	dunas	3.7 ± 0.2	1.0 ± 0.2	8.9 ± 0.9	0.79 ± 0.14	0.70 ± 0.12
20	m1	dunas	5.2 ± 0.3	1.2 ± 0.3	12.8 ± 1.2	1.13 ± 0.19	1.01 ± 0.17
21	m1	dunas	5.5 ± 0.4	1.5 ± 0.3	12.8 ± 1.3	1.13 ± 0.20	1.01 ± 0.18
22	m2	no mov	0.6 ± 0.0	0.3 ± 0.1	1.1 ± 0.2	0.10 ± 0.02	0.08 ± 0.02
23	m2	no mov	0.8 ± 0.1	0.4 ± 0.1	1.5 ± 0.3	0.13 ± 0.03	0.10 ± 0.02
24	m2	a incipiente	1.1 ± 0.1	0.5 ± 0.1	2.3 ± 0.3	0.20 ± 0.04	0.16 ± 0.03
25	m2	lecho plano	2.0 ± 0.1	0.7 ± 0.2	4.4 ± 0.5	0.39 ± 0.07	0.31 ± 0.06
26	m2	dunas	3.4 ± 0.2	0.8 ± 0.2	8.4 ± 0.8	0.74 ± 0.13	0.59 ± 0.10
27	m2	dunas	5.2 ± 0.3	1.0 ± 0.2	13.2 ± 1.2	1.17 ± 0.20	0.92 ± 0.16
28	m2	dunas	5.7 ± 0.4	1.1 ± 0.2	15.0 ± 1.2	1.32 ± 0.22	1.05 ± 0.17
29	m2	dunas	6.4 ± 0.4	1.3 ± 0.2	16.8 ± 1.4	1.48 ± 0.24	1.17 ± 0.19
30	n1	no mov	0.8 ± 0.1	0.3 ± 0.1	1.7 ± 0.3	0.15 ± 0.03	0.18 ± 0.04
31	n1	no mov	1.1 ± 0.1	0.4 ± 0.1	2.4 ± 0.3	0.21 ± 0.04	0.25 ± 0.05
32	n1	a incipiente	1.5 ± 0.1	0.5 ± 0.1	3.3 ± 0.4	0.30 ± 0.06	0.35 ± 0.07
33	n1	lecho plano	2.0 ± 0.1	0.6 ± 0.2	4.6 ± 0.5	0.41 ± 0.08	0.49 ± 0.09
34	n1	lecho plano	2.9 ± 0.2	0.8 ± 0.2	6.7 ± 0.7	0.59 ± 0.11	0.70 ± 0.13
35	n1	dunas	3.5 ± 0.3	1.0 ± 0.2	7.9 ± 0.9	0.70 ± 0.13	0.83 ± 0.15
36	n1	dunas	4.7 ± 0.4	1.4 ± 0.3	10.7 ± 1.2	0.95 ± 0.17	1.13 ± 0.21
37	n1	dunas	5.2 ± 0.4	1.5 ± 0.3	11.9 ± 1.3	1.05 ± 0.19	1.24 ± 0.22
38	n1	dunas	5.6 ± 0.4	1.6 ± 0.4	13.1 ± 1.4	1.16 ± 0.20	1.38 ± 0.24

			τ_{tot}	$\tau_{acrílico}$	τ_{lecho}	τ_*	τ_{**}
39	n2	no mov	0.8 ± 0.1	0.4 ± 0.2	1.5 ± 0.3	0.13 ± 0.03	0.19 ± 0.05
40	n2	no mov	1.0 ± 0.1	0.5 ± 0.2	2.0 ± 0.4	0.17 ± 0.04	0.25 ± 0.06
41	n2	a incipiente	1.2 ± 0.1	0.5 ± 0.2	2.5 ± 0.4	0.22 ± 0.05	0.31 ± 0.07
42	n2	lecho plano	2.1 ± 0.2	0.7 ± 0.2	4.3 ± 0.6	0.38 ± 0.08	0.54 ± 0.11
43	n2	lecho plano	3.0 ± 0.3	1.0 ± 0.3	6.3 ± 0.9	0.56 ± 0.11	0.80 ± 0.16
44	n2	dunas	4.1 ± 0.3	1.0 ± 0.2	9.8 ± 1.0	0.86 ± 0.15	1.23 ± 0.22
45	n2	dunas	4.9 ± 0.4	1.3 ± 0.3	11.7 ± 1.2	1.04 ± 0.18	1.48 ± 0.26
46	n2	dunas	5.1 ± 0.3	1.4 ± 0.3	12.2 ± 1.2	1.08 ± 0.19	1.54 ± 0.27
47	n2	dunas	4.7 ± 0.3	1.6 ± 0.3	10.7 ± 1.2	0.95 ± 0.17	1.36 ± 0.25

Tabla F.4: Tabla esfuerzos de corte

			$\tau_* - \tau_{*c}$	$\tau_{**} - \tau_{**c}$	$\tau_{**}(\tau_{**} - \tau_{**c})$	A [mm]	A/h
1	0	142	0.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	4.1 ± 1.5	0.23 ± 0.08
2	0	204	0.3 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.2 ± 0.1	5.4 ± 1.5	0.29 ± 0.08
3	0	288	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2	0.6 ± 0.2	7.3 ± 1.5	0.33 ± 0.07
4	0	297	0.5 ± 0.2	0.6 ± 0.2	0.4 ± 0.2	NaN ± 1.5	NaN \pm NaN
5	0	390	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3	9.2 ± 1.5	0.45 ± 0.08
6	0	401	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3	0.9 ± 0.3	9.6 ± 1.5	0.48 ± 0.08
7	m1	516	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2	11.6 ± 1.5	0.48 ± 0.07
8	m1	198	0.3 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.1 ± 0.0	4.5 ± 1.5	0.18 ± 0.06
9	m1	300	0.6 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.3 ± 0.1	7.1 ± 1.5	0.28 ± 0.06
10	m1	402	0.9 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.8 ± 0.2	9.8 ± 1.5	0.40 ± 0.06
11	m1	497	0.9 ± 0.3	0.8 ± 0.3	0.8 ± 0.3	12.0 ± 1.5	0.52 ± 0.07
12	m2	210	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1	4.0 ± 1.5	0.16 ± 0.06
13	m2	304	0.9 ± 0.3	0.7 ± 0.2	0.7 ± 0.2	6.2 ± 1.5	0.26 ± 0.06
14	m2	405	1.1 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.9 ± 0.3	7.8 ± 1.5	0.30 ± 0.06
15	m2	502	1.3 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.1 ± 0.3	10.8 ± 1.5	0.40 ± 0.06
16	n1	205	0.4 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.4 ± 0.2	2.7 ± 1.5	0.13 ± 0.07
17	n1	305	0.7 ± 0.2	0.8 ± 0.3	0.9 ± 0.3	3.2 ± 1.5	0.16 ± 0.07
18	n1	405	0.8 ± 0.3	0.9 ± 0.3	1.1 ± 0.4	5.7 ± 1.5	0.26 ± 0.07
19	n1	506	0.9 ± 0.3	1.0 ± 0.3	1.4 ± 0.5	5.7 ± 1.5	0.24 ± 0.07
20	n2	203	0.6 ± 0.2	0.9 ± 0.3	1.1 ± 0.4	3.0 ± 1.5	0.14 ± 0.07
21	n2	302	0.8 ± 0.3	1.2 ± 0.4	1.7 ± 0.5	NaN ± 1.5	NaN \pm NaN
22	n2	403	0.9 ± 0.3	1.2 ± 0.4	1.9 ± 0.6	3.3 ± 1.5	0.14 ± 0.06
23	n2	501	0.7 ± 0.2	1.0 ± 0.3	1.4 ± 0.5	NaN ± 1.5	NaN \pm NaN

Tabla F.5: Exceso de esfuerzo de corte y amplitud

			c [mm/s]	C_b	q_{*1}	q_{*2}	q'_{*2}
1	0	142	0.95 ± 0.01	0.05 ± 0.02	NaN \pm NaN	0.02 ± 0.01	NaN \pm 0.02
2	0	204	1.27 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.012 ± 0.006	0.03 ± 0.01	0.01 ± 0.02
3	0	288	1.23 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.027 ± 0.006	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.02
4	0	297	NaN \pm NaN	NaN \pm 0.02	NaN \pm NaN	NaN \pm NaN	NaN \pm NaN
5	0	390	1.26 ± 0.02	0.12 ± 0.02	NaN \pm NaN	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.02
6	0	401	1.39 ± 0.02	0.13 ± 0.02	NaN \pm NaN	0.05 ± 0.01	0.05 ± 0.02
7	m1	516	1.09 ± 0.02	0.13 ± 0.02	NaN \pm NaN	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.02
8	m1	198	NaN \pm NaN	NaN \pm 0.02	0.006 ± 0.003	NaN \pm NaN	NaN \pm NaN
9	m1	300	1.01 ± 0.01	0.09 ± 0.02	0.016 ± 0.005	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.02
10	m1	402	1.14 ± 0.02	0.13 ± 0.02	NaN \pm NaN	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.02
11	m1	497	0.95 ± 0.01	0.11 ± 0.02	NaN \pm NaN	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.02
12	m2	210	0.95 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.013 ± 0.005	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.02
13	m2	304	1.06 ± 0.02	0.08 ± 0.02	0.026 ± 0.005	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.02
14	m2	405	1.27 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.044 ± 0.007	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.02
15	m2	502	1.14 ± 0.02	0.14 ± 0.02	NaN \pm NaN	0.05 ± 0.01	0.06 ± 0.02

Tabla F.6: Celeridad de la onda y gasto s3lido

			Q [L/s]	h [mm]	U [m/s]	θ	t [°C]
1	0	no mov	132 ± 5	22.5 ± 1	0.11 ± 0.01	0.007 ± 0.0005	20.4 ± 0.3
2	0	a incipiente	213 ± 5	22.5 ± 1	0.18 ± 0.01	0.007 ± 0.0005	20.4 ± 0.3
3	0	dunas	287 ± 5	23.0 ± 1	0.24 ± 0.01	0.007 ± 0.0009	20.3 ± 0.3
4	0	dunas	348 ± 5	24.0 ± 1	0.28 ± 0.01	0.007 ± 0.0006	20.3 ± 0.3
5	0	dunas	438 ± 5	26.0 ± 1	0.32 ± 0.02	0.007 ± 0.0007	20.3 ± 0.3
6	0	dunas	510 ± 5	29.0 ± 1	0.34 ± 0.01	0.007 ± 0.0008	20.3 ± 0.3
7	0	dunas	596 ± 5	33.0 ± 1	0.35 ± 0.01	0.007 ± 0.0009	20.2 ± 0.3
8	m1	no mov	132 ± 5	17.3 ± 1	0.15 ± 0.01	-0.077 ± 0.0006	20.5 ± 0.3
9	m1	no mov	200 ± 5	17.3 ± 1	0.22 ± 0.02	-0.077 ± 0.0006	20.5 ± 0.3
10	m1	a incipiente	218 ± 5	17.3 ± 1	0.24 ± 0.02	-0.077 ± 0.0005	20.3 ± 0.3
11	m1	dunas	299 ± 5	18.0 ± 1	0.32 ± 0.02	-0.077 ± 0.0005	20.3 ± 0.3
12	m1	dunas	359 ± 5	20.0 ± 1	0.35 ± 0.02	-0.077 ± 0.0006	20.3 ± 0.3
13	m1	dunas	437 ± 5	23.0 ± 1	0.37 ± 0.02	-0.077 ± 0.0008	20.3 ± 0.3
14	m1	dunas	490 ± 5	26.5 ± 1	0.36 ± 0.02	-0.077 ± 0.0008	20.2 ± 0.3
15	m1	dunas	572 ± 5	30.5 ± 1	0.36 ± 0.01	-0.077 ± 0.0008	20.2 ± 0.3
16	m2	no mov	130 ± 5	19.7 ± 1	0.13 ± 0.01	-0.154 ± 0.0004	20.6 ± 0.3
17	m2	no mov	198 ± 5	19.7 ± 1	0.19 ± 0.01	-0.154 ± 0.0005	20.6 ± 0.3
18	m2	no mov	222 ± 5	19.7 ± 1	0.22 ± 0.01	-0.154 ± 0.0005	20.4 ± 0.3
19	m2	a incipiente	244 ± 5	19.7 ± 1	0.24 ± 0.01	-0.154 ± 0.0005	20.4 ± 0.3
20	m2	dunas	314 ± 5	21.0 ± 1	0.29 ± 0.02	-0.154 ± 0.0004	20.3 ± 0.3
21	m2	dunas	401 ± 5	23.0 ± 1	0.34 ± 0.02	-0.154 ± 0.0006	20.3 ± 0.3
22	m2	dunas	471 ± 5	25.0 ± 1	0.36 ± 0.02	-0.154 ± 0.0006	20.2 ± 0.3
23	m2	dunas	530 ± 5	28.0 ± 1	0.36 ± 0.02	-0.154 ± 0.0006	20.2 ± 0.3
24	m2	dunas	598 ± 5	32.0 ± 1	0.36 ± 0.01	-0.154 ± 0.0011	20.2 ± 0.3
25	n1	no mov	107 ± 5	17.6 ± 1	0.12 ± 0.01	0.091 ± 0.0005	22.0 ± 0.3
26	n1	no mov	140 ± 5	17.6 ± 1	0.15 ± 0.01	0.091 ± 0.0005	23.0 ± 0.3
27	n1	a incipiente	180 ± 5	17.6 ± 1	0.20 ± 0.01	0.091 ± 0.0008	25.0 ± 0.3
28	n1	dunas	264 ± 5	18.9 ± 1	0.27 ± 0.02	0.091 ± 0.0004	27.0 ± 0.3
29	n1	dunas	298 ± 5	20.9 ± 1	0.27 ± 0.02	0.091 ± 0.0003	28.0 ± 0.3
30	n1	dunas	373 ± 5	23.9 ± 1	0.30 ± 0.02	0.091 ± 0.0005	29.0 ± 0.3
31	n1	dunas	443 ± 5	27.4 ± 1	0.31 ± 0.01	0.091 ± 0.0005	29.0 ± 0.3
32	n1	dunas	514 ± 5	32.0 ± 1	0.31 ± 0.01	0.091 ± 0.0005	26.0 ± 0.3
33	n1	dunas	579 ± 5	36.6 ± 1	0.30 ± 0.01	0.091 ± 0.0006	26.0 ± 0.3
34	n2	no mov	107 ± 5	16.2 ± 1	0.13 ± 0.01	0.168 ± 0.0004	20.2 ± 0.3
35	n2	no mov	140 ± 5	16.2 ± 1	0.17 ± 0.01	0.168 ± 0.0004	20.2 ± 0.3
36	n2	a incipiente	184 ± 5	16.1 ± 1	0.22 ± 0.02	0.168 ± 0.0005	20.2 ± 0.3
37	n2	dunas	258 ± 5	17.5 ± 1	0.28 ± 0.02	0.168 ± 0.0004	22.0 ± 0.3
38	n2	dunas	307 ± 5	19.5 ± 1	0.30 ± 0.02	0.168 ± 0.0004	20.6 ± 0.3
39	n2	dunas	386 ± 5	22.9 ± 1	0.32 ± 0.02	0.168 ± 0.0006	20.6 ± 0.3
40	n2	dunas	446 ± 5	26.7 ± 1	0.32 ± 0.01	0.168 ± 0.0006	20.6 ± 0.3
41	n2	dunas	524 ± 5	31.1 ± 1	0.32 ± 0.01	0.168 ± 0.0006	20.5 ± 0.3
42	n2	dunas	587 ± 5	35.5 ± 1	0.32 ± 0.01	0.168 ± 0.0006	20.5 ± 0.3

Tabla F.7: Condiciones experimentales 1 con agua

			A_{tot} [cm ²]	A_2 [cm ²]	A_2 [cm ²]	J
1	0	no mov	11.7 ± 0.6	6.8 ± 0.7	4.9 ± 0.4	0.0010 ± 0.0005
2	0	a incipiente	11.7 ± 0.6	6.8 ± 0.7	4.9 ± 0.4	0.0022 ± 0.0005
3	0	dunas	12.0 ± 0.6	7.0 ± 0.7	5.0 ± 0.4	0.0054 ± 0.0009
4	0	dunas	12.5 ± 0.6	7.4 ± 0.7	5.1 ± 0.4	0.0081 ± 0.0006
5	0	dunas	13.5 ± 0.6	8.1 ± 0.7	5.4 ± 0.4	0.0122 ± 0.0007
6	0	dunas	15.1 ± 0.6	9.3 ± 0.7	5.7 ± 0.4	0.0122 ± 0.0008
7	0	dunas	17.2 ± 0.6	11.0 ± 0.8	6.1 ± 0.4	0.0095 ± 0.0009
8	m1	no mov	9.0 ± 0.6	5.0 ± 0.7	4.0 ± 0.3	0.0019 ± 0.0006
9	m1	no mov	9.0 ± 0.6	5.0 ± 0.7	4.0 ± 0.3	0.0041 ± 0.0006
10	m1	a incipiente	9.0 ± 0.6	5.0 ± 0.7	4.0 ± 0.3	0.0047 ± 0.0005
11	m1	dunas	9.4 ± 0.6	5.2 ± 0.7	4.2 ± 0.3	0.0102 ± 0.0005
12	m1	dunas	10.4 ± 0.6	5.9 ± 0.7	4.5 ± 0.3	0.0096 ± 0.0006
13	m1	dunas	12.0 ± 0.6	7.0 ± 0.7	5.0 ± 0.4	0.0121 ± 0.0008
14	m1	dunas	13.8 ± 0.6	8.3 ± 0.7	5.5 ± 0.4	0.0099 ± 0.0008
15	m1	dunas	15.9 ± 0.6	10.0 ± 0.7	5.9 ± 0.4	0.0099 ± 0.0008
16	m2	no mov	10.2 ± 0.6	5.8 ± 0.7	4.5 ± 0.3	0.0014 ± 0.0004
17	m2	no mov	10.2 ± 0.6	5.8 ± 0.7	4.5 ± 0.3	0.0029 ± 0.0005
18	m2	no mov	10.2 ± 0.6	5.8 ± 0.7	4.5 ± 0.3	0.0036 ± 0.0005
19	m2	a incipiente	10.2 ± 0.6	5.8 ± 0.7	4.5 ± 0.3	0.0043 ± 0.0005
20	m2	dunas	10.9 ± 0.6	6.2 ± 0.7	4.7 ± 0.4	0.0090 ± 0.0004
21	m2	dunas	12.0 ± 0.6	7.0 ± 0.7	5.0 ± 0.4	0.0123 ± 0.0006
22	m2	dunas	13.0 ± 0.6	7.7 ± 0.7	5.3 ± 0.4	0.0131 ± 0.0006
23	m2	dunas	14.6 ± 0.6	8.9 ± 0.7	5.6 ± 0.4	0.0115 ± 0.0006
24	m2	dunas	16.6 ± 0.6	10.6 ± 0.8	6.1 ± 0.4	0.0101 ± 0.0011
25	n1	no mov	9.1 ± 0.6	5.0 ± 0.7	4.1 ± 0.3	0.0013 ± 0.0005
26	n1	no mov	9.1 ± 0.6	5.0 ± 0.7	4.1 ± 0.3	0.0021 ± 0.0005
27	n1	a incipiente	9.1 ± 0.6	5.0 ± 0.7	4.1 ± 0.3	0.0034 ± 0.0008
28	n1	dunas	9.8 ± 0.6	5.5 ± 0.7	4.3 ± 0.3	0.0079 ± 0.0004
29	n1	dunas	10.9 ± 0.6	6.2 ± 0.7	4.7 ± 0.4	0.0103 ± 0.0003
30	n1	dunas	12.4 ± 0.6	7.3 ± 0.7	5.1 ± 0.4	0.0100 ± 0.0005
31	n1	dunas	14.2 ± 0.6	8.7 ± 0.7	5.6 ± 0.4	0.0112 ± 0.0005
32	n1	dunas	16.7 ± 0.6	10.6 ± 0.8	6.1 ± 0.4	0.0070 ± 0.0005
33	n1	dunas	19.0 ± 0.7	12.6 ± 0.8	6.4 ± 0.4	0.0065 ± 0.0006
34	n2	no mov	8.4 ± 0.6	4.6 ± 0.7	3.8 ± 0.3	0.0016 ± 0.0004
35	n2	no mov	8.4 ± 0.6	4.6 ± 0.7	3.8 ± 0.3	0.0026 ± 0.0004
36	n2	a incipiente	8.4 ± 0.6	4.6 ± 0.7	3.8 ± 0.3	0.0043 ± 0.0005
37	n2	dunas	9.1 ± 0.6	5.0 ± 0.7	4.1 ± 0.3	0.0067 ± 0.0004
38	n2	dunas	10.1 ± 0.6	5.7 ± 0.7	4.4 ± 0.3	0.0068 ± 0.0004
39	n2	dunas	11.9 ± 0.6	6.9 ± 0.7	5.0 ± 0.4	0.0083 ± 0.0007
40	n2	dunas	13.9 ± 0.6	8.4 ± 0.7	5.5 ± 0.4	0.0066 ± 0.0007
41	n2	dunas	16.2 ± 0.6	10.2 ± 0.8	6.0 ± 0.4	0.0088 ± 0.0007
42	n2	dunas	18.5 ± 0.7	12.1 ± 0.8	6.3 ± 0.4	0.0053 ± 0.0007

Tabla F.8: Condiciones Experimentales 2 con agua

			Re	$Re_{acrílico}$	Re_{lecho}	Re_{*p}
1	0	no mov	3500 ± 400	3200 ± 400	4200 ± 500	6 ± 1
2	0	a incipiente	5700 ± 600	5100 ± 700	6800 ± 800	9 ± 2
3	0	dunas	7600 ± 700	6800 ± 900	9200 ± 1000	13 ± 2
4	0	dunas	9100 ± 900	8200 ± 1000	11000 ± 1200	15 ± 3
5	0	dunas	11200 ± 1000	10100 ± 1200	13400 ± 1400	18 ± 3
6	0	dunas	12600 ± 1100	11400 ± 1300	14900 ± 1600	19 ± 3
7	0	dunas	14000 ± 1200	12900 ± 1300	16400 ± 1700	18 ± 3
8	m1	no mov	3800 ± 500	3300 ± 600	4500 ± 600	8 ± 1
9	m1	no mov	5800 ± 700	5100 ± 800	6900 ± 900	12 ± 2
10	m1	a incipiente	6300 ± 700	5500 ± 900	7500 ± 1000	13 ± 2
11	m1	dunas	8500 ± 900	7500 ± 1200	10200 ± 1300	17 ± 3
12	m1	dunas	9900 ± 1000	8800 ± 1300	11900 ± 1400	18 ± 3
13	m1	dunas	11600 ± 1100	10400 ± 1400	13900 ± 1600	20 ± 3
14	m1	dunas	12400 ± 1100	11200 ± 1300	14900 ± 1600	19 ± 3
15	m1	dunas	13800 ± 1200	12700 ± 1400	16300 ± 1700	19 ± 3
16	m2	no mov	3600 ± 400	3200 ± 500	4300 ± 500	7 ± 1
17	m2	no mov	5500 ± 600	4900 ± 700	6600 ± 800	10 ± 2
18	m2	no mov	6200 ± 700	5500 ± 800	7400 ± 900	11 ± 2
19	m2	a incipiente	6800 ± 700	6000 ± 900	8200 ± 1000	12 ± 2
20	m2	dunas	8600 ± 900	7600 ± 1100	10300 ± 1200	16 ± 3
21	m2	dunas	10700 ± 1000	9500 ± 1200	12800 ± 1400	19 ± 3
22	m2	dunas	12200 ± 1100	11000 ± 1300	14600 ± 1600	20 ± 3
23	m2	dunas	13200 ± 1200	12000 ± 1400	15700 ± 1600	20 ± 3
24	m2	dunas	14200 ± 1200	13100 ± 1400	16700 ± 1700	19 ± 3
25	n1	no mov	3100 ± 400	2700 ± 500	3700 ± 500	6 ± 1
26	n1	no mov	4000 ± 500	3500 ± 600	4800 ± 600	8 ± 1
27	n1	a incipiente	5200 ± 600	4500 ± 800	6200 ± 800	10 ± 2
28	n1	dunas	7400 ± 800	6600 ± 1000	8900 ± 1100	15 ± 3
29	n1	dunas	8200 ± 800	7200 ± 1000	9800 ± 1100	16 ± 3
30	n1	dunas	9800 ± 900	8800 ± 1100	11800 ± 1300	17 ± 3
31	n1	dunas	11100 ± 1000	10100 ± 1200	13300 ± 1400	17 ± 3
32	n1	dunas	12200 ± 1000	11200 ± 1200	14300 ± 1500	16 ± 3
33	n1	dunas	13000 ± 1000	12200 ± 1200	15000 ± 1500	16 ± 3
34	n2	no mov	3100 ± 400	2800 ± 500	3700 ± 500	7 ± 1
35	n2	no mov	4100 ± 500	3600 ± 600	4900 ± 700	9 ± 2
36	n2	a incipiente	5400 ± 700	4700 ± 800	6400 ± 900	12 ± 2
37	n2	dunas	7400 ± 800	6500 ± 1100	8900 ± 1100	15 ± 3
38	n2	dunas	8600 ± 900	7600 ± 1100	10300 ± 1200	16 ± 3
39	n2	dunas	10300 ± 1000	9200 ± 1200	12300 ± 1400	17 ± 3
40	n2	dunas	11300 ± 1000	10200 ± 1200	13500 ± 1400	16 ± 3
41	n2	dunas	12600 ± 1100	11500 ± 1200	14800 ± 1500	17 ± 3
42	n2	dunas	13400 ± 1100	12500 ± 1200	15500 ± 1600	16 ± 3

Tabla F.9: Números de Reynolds

			τ_{tot}	$\tau_{acrílico}$	τ_{lecho}	τ_*	τ_{**}
1	0	no mov	0.08 ± 0.04	0.07 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
2	0	a incipiente	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.02	0.2 ± 0.1	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
3	0	dunas	0.42 ± 0.07	0.25 ± 0.03	0.7 ± 0.2	0.07 ± 0.02	0.07 ± 0.02
4	0	dunas	0.65 ± 0.06	0.32 ± 0.03	1.3 ± 0.2	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.02
5	0	dunas	1.04 ± 0.08	0.41 ± 0.04	2.3 ± 0.3	0.20 ± 0.04	0.21 ± 0.04
6	0	dunas	1.12 ± 0.09	0.44 ± 0.04	2.6 ± 0.3	0.23 ± 0.04	0.23 ± 0.04
7	0	dunas	0.94 ± 0.09	0.45 ± 0.04	2.0 ± 0.3	0.18 ± 0.04	0.18 ± 0.04
8	m1	no mov	0.12 ± 0.04	0.11 ± 0.02	0.1 ± 0.1	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
9	m1	no mov	0.26 ± 0.04	0.23 ± 0.03	0.3 ± 0.1	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01
10	m1	a incipiente	0.30 ± 0.04	0.27 ± 0.04	0.4 ± 0.1	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
11	m1	dunas	0.67 ± 0.05	0.43 ± 0.06	1.1 ± 0.2	0.09 ± 0.02	0.08 ± 0.02
12	m1	dunas	0.68 ± 0.06	0.49 ± 0.06	1.0 ± 0.2	0.09 ± 0.02	0.08 ± 0.02
13	m1	dunas	0.95 ± 0.08	0.52 ± 0.06	1.8 ± 0.3	0.15 ± 0.03	0.14 ± 0.03
14	m1	dunas	0.85 ± 0.08	0.49 ± 0.05	1.6 ± 0.3	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.03
15	m1	dunas	0.93 ± 0.09	0.48 ± 0.04	1.9 ± 0.3	0.17 ± 0.04	0.15 ± 0.03
16	m2	no mov	0.10 ± 0.03	0.08 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
17	m2	no mov	0.20 ± 0.04	0.18 ± 0.02	0.2 ± 0.1	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
18	m2	no mov	0.25 ± 0.04	0.22 ± 0.03	0.3 ± 0.1	0.03 ± 0.01	0.02 ± 0.01
19	m2	a incipiente	0.30 ± 0.04	0.26 ± 0.03	0.4 ± 0.1	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
20	m2	dunas	0.66 ± 0.05	0.35 ± 0.04	1.2 ± 0.2	0.11 ± 0.02	0.09 ± 0.02
21	m2	dunas	0.96 ± 0.07	0.45 ± 0.05	1.9 ± 0.2	0.17 ± 0.03	0.14 ± 0.02
22	m2	dunas	1.09 ± 0.07	0.51 ± 0.05	2.2 ± 0.2	0.20 ± 0.04	0.16 ± 0.03
23	m2	dunas	1.03 ± 0.07	0.50 ± 0.05	2.1 ± 0.2	0.19 ± 0.03	0.15 ± 0.03
24	m2	dunas	0.98 ± 0.12	0.48 ± 0.04	2.1 ± 0.4	0.19 ± 0.04	0.15 ± 0.04
25	n1	no mov	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
26	n1	no mov	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.02	0.2 ± 0.1	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.01
27	n1	a incipiente	0.22 ± 0.05	0.19 ± 0.03	0.3 ± 0.1	0.02 ± 0.01	0.03 ± 0.02
28	n1	dunas	0.53 ± 0.04	0.32 ± 0.04	0.9 ± 0.1	0.08 ± 0.02	0.10 ± 0.02
29	n1	dunas	0.75 ± 0.05	0.32 ± 0.04	1.5 ± 0.2	0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.03
30	n1	dunas	0.80 ± 0.06	0.37 ± 0.04	1.6 ± 0.2	0.14 ± 0.03	0.17 ± 0.03
31	n1	dunas	0.99 ± 0.07	0.38 ± 0.04	2.2 ± 0.2	0.20 ± 0.03	0.23 ± 0.04
32	n1	dunas	0.68 ± 0.06	0.37 ± 0.03	1.4 ± 0.2	0.12 ± 0.03	0.15 ± 0.03
33	n1	dunas	0.68 ± 0.06	0.35 ± 0.03	1.5 ± 0.2	0.13 ± 0.03	0.16 ± 0.03
34	n2	no mov	0.09 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.1 ± 0.1	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01
35	n2	no mov	0.16 ± 0.03	0.14 ± 0.02	0.2 ± 0.1	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
36	n2	a incipiente	0.26 ± 0.04	0.23 ± 0.04	0.3 ± 0.1	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.02
37	n2	dunas	0.43 ± 0.04	0.35 ± 0.05	0.6 ± 0.1	0.05 ± 0.01	0.07 ± 0.02
38	n2	dunas	0.48 ± 0.04	0.39 ± 0.05	0.6 ± 0.1	0.06 ± 0.02	0.08 ± 0.02
39	n2	dunas	0.65 ± 0.06	0.43 ± 0.05	1.1 ± 0.2	0.09 ± 0.02	0.13 ± 0.03
40	n2	dunas	0.57 ± 0.06	0.40 ± 0.04	0.9 ± 0.2	0.08 ± 0.02	0.11 ± 0.03
41	n2	dunas	0.84 ± 0.07	0.40 ± 0.03	1.8 ± 0.2	0.16 ± 0.03	0.23 ± 0.05
42	n2	dunas	0.55 ± 0.07	0.38 ± 0.03	1.0 ± 0.3	0.08 ± 0.03	0.12 ± 0.04

Tabla F.10: Esfuerzos de corte

		τ_*	τ'_*	τ''_*	$\tau_* - \tau_{*c}$	$\tau_{**} - \tau_{**c}$
1	0	0.01 ± 0.01	0.007 ± 0.001	0.00 ± 0.01	0.04 ± 0.03	0.04 ± 0.03
2	0	0.02 ± 0.01	0.016 ± 0.003	0.00 ± 0.01	0.08 ± 0.03	0.09 ± 0.03
3	0	0.07 ± 0.02	0.030 ± 0.006	0.04 ± 0.02	0.17 ± 0.05	0.18 ± 0.05
4	0	0.11 ± 0.02	0.042 ± 0.008	0.07 ± 0.02	0.20 ± 0.06	0.20 ± 0.06
5	m1	0.20 ± 0.04	0.059 ± 0.011	0.14 ± 0.03	0.15 ± 0.05	0.16 ± 0.06
6	m1	0.23 ± 0.04	0.063 ± 0.011	0.16 ± 0.04	0.07 ± 0.03	0.06 ± 0.03
7	m1	0.18 ± 0.04	0.061 ± 0.011	0.12 ± 0.03	0.06 ± 0.03	0.06 ± 0.03
8	m1	0.01 ± 0.01	0.011 ± 0.002	0.00 ± 0.01	0.13 ± 0.04	0.11 ± 0.04
9	m1	0.03 ± 0.01	0.025 ± 0.005	0.00 ± 0.01	0.11 ± 0.04	0.10 ± 0.04
10	m1	0.03 ± 0.01	0.029 ± 0.006	0.00 ± 0.01	0.14 ± 0.05	0.12 ± 0.05
11	m2	0.09 ± 0.02	0.055 ± 0.011	0.04 ± 0.02	0.08 ± 0.03	0.06 ± 0.02
12	m2	0.09 ± 0.02	0.061 ± 0.012	0.03 ± 0.02	0.14 ± 0.04	0.11 ± 0.04
13	m2	0.15 ± 0.03	0.071 ± 0.013	0.08 ± 0.03	0.17 ± 0.05	0.13 ± 0.04
14	m2	0.14 ± 0.03	0.064 ± 0.011	0.08 ± 0.03	0.16 ± 0.05	0.12 ± 0.04
15	m2	0.17 ± 0.04	0.066 ± 0.011	0.10 ± 0.03	0.16 ± 0.06	0.12 ± 0.05
16	n1	0.01 ± 0.01	0.008 ± 0.002	0.00 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.07 ± 0.03
17	n1	0.02 ± 0.01	0.019 ± 0.004	0.00 ± 0.01	0.11 ± 0.03	0.13 ± 0.04
18	n1	0.03 ± 0.01	0.023 ± 0.005	0.00 ± 0.01	0.12 ± 0.04	0.14 ± 0.05
19	n1	0.03 ± 0.01	0.028 ± 0.005	0.01 ± 0.01	0.17 ± 0.05	0.21 ± 0.06
20	n1	0.11 ± 0.02	0.045 ± 0.009	0.06 ± 0.02	0.10 ± 0.04	0.12 ± 0.04
21	n1	0.17 ± 0.03	0.063 ± 0.012	0.11 ± 0.03	0.11 ± 0.04	0.13 ± 0.05
22	n2	0.20 ± 0.04	0.072 ± 0.013	0.12 ± 0.03	0.02 ± 0.02	0.03 ± 0.03
23	n2	0.19 ± 0.03	0.070 ± 0.012	0.12 ± 0.03	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.03
24	n2	0.19 ± 0.04	0.066 ± 0.011	0.12 ± 0.04	0.07 ± 0.03	0.10 ± 0.05
25	n2	0.01 ± 0.01	0.007 ± 0.002	0.00 ± 0.01	0.05 ± 0.03	0.07 ± 0.04
26	n2	0.01 ± 0.01	0.012 ± 0.003	0.00 ± 0.01	0.13 ± 0.04	0.19 ± 0.06
27	n2	0.02 ± 0.01	0.020 ± 0.004	0.00 ± 0.01	0.06 ± 0.04	0.08 ± 0.05

Tabla F.11: Exceso de esfuerzo de corte

		A [mm]	A/h	c [mm/s]	C_b
1	0	NaN \pm 0.5	NaN \pm NaN	1.48 \pm 0.02	0.8 \pm 0.4
2	0	3.5 \pm 0.5	0.15 \pm 0.02	1.71 \pm 0.02	0.4 \pm 0.1
3	0	5.4 \pm 0.5	0.21 \pm 0.02	2.50 \pm 0.04	0.3 \pm 0.1
4	0	5.6 \pm 0.5	0.19 \pm 0.02	2.56 \pm 0.04	0.2 \pm 0.1
5	m1	6.2 \pm 0.5	0.19 \pm 0.02	2.32 \pm 0.03	0.3 \pm 0.1
6	m1	2.8 \pm 0.5	0.16 \pm 0.03	1.97 \pm 0.03	0.6 \pm 0.2
7	m1	4.0 \pm 0.5	0.20 \pm 0.03	2.66 \pm 0.04	0.9 \pm 0.3
8	m1	6.0 \pm 0.5	0.26 \pm 0.03	3.04 \pm 0.04	0.5 \pm 0.1
9	m1	6.3 \pm 0.5	0.24 \pm 0.02	2.57 \pm 0.04	0.5 \pm 0.1
10	m1	5.5 \pm 0.5	0.18 \pm 0.02	2.38 \pm 0.03	0.3 \pm 0.1
11	m2	1.8 \pm 0.5	0.09 \pm 0.02	1.86 \pm 0.03	0.5 \pm 0.1
12	m2	3.7 \pm 0.5	0.16 \pm 0.02	2.48 \pm 0.04	0.3 \pm 0.1
13	m2	5.1 \pm 0.5	0.20 \pm 0.02	2.69 \pm 0.04	0.3 \pm 0.1
14	m2	6.0 \pm 0.5	0.21 \pm 0.02	2.57 \pm 0.04	0.3 \pm 0.1
15	m2	6.9 \pm 0.5	0.22 \pm 0.02	2.56 \pm 0.04	0.3 \pm 0.1
16	n1	2.4 \pm 0.5	0.13 \pm 0.03	1.25 \pm 0.02	0.5 \pm 0.1
17	n1	3.2 \pm 0.5	0.15 \pm 0.03	1.73 \pm 0.02	0.3 \pm 0.1
18	n1	3.0 \pm 0.5	0.13 \pm 0.02	2.45 \pm 0.03	0.4 \pm 0.1
19	n1	5.3 \pm 0.5	0.20 \pm 0.02	2.54 \pm 0.04	0.3 \pm 0.1
20	n1	4.3 \pm 0.5	0.14 \pm 0.02	1.85 \pm 0.03	0.4 \pm 0.1
21	n1	4.9 \pm 0.5	0.13 \pm 0.01	1.81 \pm 0.03	0.4 \pm 0.1
22	n2	3.1 \pm 0.5	0.18 \pm 0.03	2.26 \pm 0.03	2.0 \pm 0.8
23	n2	2.5 \pm 0.5	0.13 \pm 0.03	2.39 \pm 0.03	1.7 \pm 0.7
24	n2	3.4 \pm 0.5	0.15 \pm 0.02	2.10 \pm 0.03	0.7 \pm 0.2
25	n2	3.5 \pm 0.5	0.13 \pm 0.02	1.85 \pm 0.03	0.8 \pm 0.3
26	n2	6.2 \pm 0.5	0.20 \pm 0.02	1.79 \pm 0.03	0.3 \pm 0.1
27	n2	3.9 \pm 0.5	0.11 \pm 0.01	1.52 \pm 0.02	0.6 \pm 0.2

Tabla F.12: Amplitud y celeridad

		q_1 [mm ³ /s/mm]	q_{*1}	q_2 [mm ³ /s/mm]	q_{*2}
1	0	1.6 ± 0.6	0.02 ± 0.01	NaN ± NaN	NaN ± NaN
2	0	5.3 ± 0.7	0.07 ± 0.02	2.1 ± 0.3	0.03 ± 0.01
3	0	6.0 ± 1.0	0.08 ± 0.02	4.7 ± 0.4	0.06 ± 0.01
4	0	8.2 ± 1.1	0.11 ± 0.03	5.1 ± 0.5	0.07 ± 0.02
5	m1	5.2 ± 1.0	0.07 ± 0.02	5.0 ± 0.4	0.07 ± 0.02
6	m1	2.4 ± 0.8	0.03 ± 0.01	1.9 ± 0.4	0.03 ± 0.01
7	m1	3.2 ± 1.1	0.04 ± 0.02	3.7 ± 0.5	0.05 ± 0.01
8	m1	8.5 ± 1.2	0.11 ± 0.03	6.3 ± 0.5	0.09 ± 0.02
9	m1	3.6 ± 1.1	0.05 ± 0.02	5.7 ± 0.5	0.08 ± 0.02
10	m1	4.7 ± 1.0	0.06 ± 0.02	4.6 ± 0.4	0.06 ± 0.01
11	m2	1.2 ± 0.7	0.02 ± 0.01	1.2 ± 0.3	0.02 ± 0.01
12	m2	7.4 ± 1.0	0.10 ± 0.03	3.2 ± 0.4	0.04 ± 0.01
13	m2	7.5 ± 1.1	0.10 ± 0.03	4.8 ± 0.5	0.06 ± 0.02
14	m2	7.3 ± 1.0	0.10 ± 0.03	5.4 ± 0.5	0.07 ± 0.02
15	m2	6.5 ± 1.0	0.09 ± 0.02	6.2 ± 0.5	0.08 ± 0.02
16	n1	0.7 ± 0.5	0.01 ± 0.01	1.1 ± 0.2	0.01 ± 0.00
17	n1	1.5 ± 0.7	0.02 ± 0.01	1.9 ± 0.3	0.03 ± 0.01
18	n1	2.7 ± 1.0	0.04 ± 0.02	2.6 ± 0.4	0.03 ± 0.01
19	n1	4.6 ± 1.1	0.06 ± 0.02	4.8 ± 0.5	0.06 ± 0.01
20	n1	2.8 ± 0.8	0.04 ± 0.01	2.8 ± 0.3	0.04 ± 0.01
21	n1	4.9 ± 0.7	0.07 ± 0.02	3.1 ± 0.3	0.04 ± 0.01
22	n2	1.3 ± 0.9	0.02 ± 0.01	2.5 ± 0.4	0.03 ± 0.01
23	n2	1.2 ± 0.9	0.02 ± 0.01	2.1 ± 0.4	0.03 ± 0.01
24	n2	2.6 ± 0.8	0.04 ± 0.01	2.5 ± 0.4	0.03 ± 0.01
25	n2	2.3 ± 0.7	0.03 ± 0.01	2.2 ± 0.3	0.03 ± 0.01
26	n2	3.9 ± 0.7	0.05 ± 0.01	3.9 ± 0.3	0.05 ± 0.01
27	n2	3.7 ± 0.6	0.05 ± 0.01	2.1 ± 0.3	0.03 ± 0.01

Table F.13: MyTableCaption

Anexo G

ARTÍCULO EN XXII CONGRESO CHILENO DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**INSTALACIÓN EXPERIMENTAL E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
MEDICIÓN ÓPTICO NO INTRUSIVO PARA EL ESTUDIO DE FORMAS DE
FONDO EN DUCTOS A PRESIÓN**

ALEX GARCES C.¹
ALDO TAMBURRINO T.²

RESUMEN

En el presente trabajo se detalla la fabricación y puesta en marcha de una instalación experimental diseñada para estudiar la generación y evolución de las formas de fondo. Su tramo de estudio es una tubería cuadrada de 10 m de largo y sección 52x52 mm². Con esto se podrá estudiar la respuesta de un lecho granular frente a distintos tipos de fluido (soluciones de agua y carboximetilcelulosa), condiciones de flujo, partículas que constituyen el lecho y pendientes.

Para la caracterización de las formas de fondo se implementa un sistema óptico de medición no intrusivo basado en un algoritmo conocido como perfilometría por transformada de Fourier, el cual debió ser corregido dada la refracción del haz de luz al entrar en la tubería. El método es capaz de medir características geométricas de la onda, su celeridad y con esto el gasto sólido de fondo. Gracias a este sistema se podrá estudiar la formación y crecimiento de las formas de fondo a partir de un lecho plano.

Se exponen resultados de experimentos preliminares, los cuales fueron necesarios para la calibración y comprobación de los valores registrados por los equipos utilizados. Se analizan el esfuerzo de corte sobre el lecho y condiciones de arrastre incipiente para arena. Los resultados son complementados con modelos numéricos de los casos estudiados.

¹Estudiante Magister, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – agarces@ing.uchile.cl

²Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – atamburr@ing.uchile.cl

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Las formas de fondo son ondas sedimentarias con una cierta periodicidad espacial y geometría definida. Su presencia condiciona la resistencia hidráulica y el transporte de sedimentos, por lo que resulta importante ser capaces de conocer bajo qué condiciones se forman y cuantificar sus características.

Actualmente Chile figura como una potencia en la industria minera. Una técnica de transporte de los recursos extraídos utiliza tuberías para impulsar una mezcla con agua llamada comúnmente concentrado o pulpa. Estos minerales, resultado de un proceso de molienda, presentan una granulometría extendida. A pesar de que el agua tiene un comportamiento reológico newtoniano, en presencia de sólidos en suspensión, el comportamiento reológico de la mezcla puede ser distinto. Las partículas finas interactúan con el agua y esta mezcla se modela como un fluido aparente con características no newtonianas. El modelo empírico de Krieger y Dougherty (1959) por ejemplo, relaciona la viscosidad aparente con la viscosidad del agua y la concentración de sólidos en suspensión.

Las condiciones de transporte hoy en minería evitan el gasto sólido de fondo o partículas estáticas (lecho de partículas). Sin embargo, el transporte de material grueso es atractivo para la industria. Sus principales ventajas son la reducción en costos de molienda y secado del material (Miscoe y Faddick, 1980; Shook et al, 1981). En consecuencia también se reduce el consumo de agua, un recurso escaso en el norte del país. El principal problema del transporte de material grueso es que no se puede trabajar como un fluido equivalente y un modelo de dos fases es necesario (Ouriemi et al, 2010). Esto se debe a que la fuerza gravitacional obliga a los sedimentos más gruesos a transportarse en la parte baja de la tubería (Takahashi, 1989).

Si bien muchos autores han estudiado la generación de formas de fondo, todavía falta para entender sobre cómo estas ondas inciden en las pérdidas de energía (Einstein y Barbarossa, 1952; Engelund, 1966). La literatura existente se reduce aún más cuando el estudio se hace en tuberías o con un fluido de reología no newtoniana (Graf y Acaroglu, 1968; Kuru et al, 1995; Coleman et al, 2003; Admiraal, 2003).

El problema se puede estudiar en una tubería circular o de sección cuadrada, teniendo cada una de ellas ventajas y desventajas. Graf y Acaroglu (1968) trabajaron en una tubería circular de diámetro 76 mm, cuya sección de observación mide 1.85 m de largo. Se usó una grava prácticamente uniforme con gravedad específica $s = 2.67$ y diámetros característicos de 2 y 2.78 mm. Coleman et al (2003) utilizaron una tubería rectangular con sección de estudio 6m x 0.3m x 0.1m, donde la última medida es el alto de la sección transversal. El lecho posee una altura inicial de 5 mm y largo de 4-5 m. Está compuesto por partículas de $d_{50}=0.11$ mm y en otros experimentos por $d_{50}=0.87$ mm, en ambos casos se trata de arena de cuarzo. Admiraal (2003) utiliza una tubería circular de 10.2 cm de diámetro y 9.5 m de largo con un pivote central que le permite inclinaciones de -20° a 20° . El diámetro de partículas usado es $d_p=0.53$ mm.

Kuru et al (1995) trabajaron con una solución de agua y glicerina y un rango de Reynolds de 1000 a 10000. Un problema que abordan los autores es la falta de correlación entre los

datos experimentales y los modelos comúnmente utilizados para analizar el fenómeno. Cada experiencia se repitió cien veces bajo las mismas condiciones. En su trabajo muestran la distribución de las longitudes de onda registradas, donde la dispersión de datos es del orden de la longitud de onda promedio. Esto puede representar un problema para los objetivos de la presente investigación. Ellos concluyen si bien la iniciación de las ondas sedimentarias puede ser resultado de la inestabilidad del flujo de dos fases, sus características geométricas en régimen permanente no se explican correctamente por dicha inestabilidad. Finalmente se menciona que los resultados en los casos donde hay poca saltación son predichos de mejor manera. Lo anterior es probablemente consecuencia de la naturaleza aleatoria de los esfuerzos turbulentos que influyen en el fenómeno de saltación.

Ouriemi et al (2010) grabaron la evolución de las formas de fondo en función del tiempo usando un láser, para un caudal constante. Ellos concluyen que si bien el arrastre incipiente está determinado por el número de Shields, el aspecto de las dunas parece estar mejor descrito por el número de Reynolds. El desarrollo de la técnica de medición por FTP, permitirá hacer un análisis 3D de la evolución y movimiento de las formas de fondo que se generen.

En el laboratorio Francisco Javier Dominguez de la Universidad de Chile se ha utilizado como fluido no newtoniano soluciones en agua de carboximetilcelulosa (CMC) y carbopol para el estudio de la dinámica del transporte de sedimentos por flujos de fluidos no newtonianos (Montserrat et al, 2014; Tamburrino et al, 2014,2015).

El objetivo de este artículo es presentar una instalación especialmente diseñada para caracterizar la deformación del lecho formado por material granular no cohesivo en un ducto a presión, incluyendo un sistema óptico de medición no intrusivo que permite cuantificar las propiedades de las formas de fondo generadas.

2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Tubería

Para estudiar experimentalmente la generación de formas de fondo, se fabricó una tubería cuadrada de 10 m de largo y sección 52x52 mm². El circuito es constituido por dos sistemas cerrados de recirculación de fluidos (donde el fluido es una solución agua-CMC que puede transportar partículas sólidas). Su tramo de estudio, en presión y capaz de variar su pendiente, es la única sección común de ambos sistemas. La pendiente puede ajustarse entre -17.5% y 17.5%. El primer circuito, encargado de generar el lecho plano en la sección de interés, transporta la solución con una alta concentración de partículas. El caudal al que se opera este circuito es tal, que las partículas se mueven a través de la sección de estudio como un lecho deslizante, mientras que en el resto del sistema las partículas se transportan en suspensión. Tales características se logran con ductos de menor diámetro. Una vez que las partículas cubren el tramo deseado, el sistema se detiene. En caso de ser necesario, existe un bypass para reanudar el movimiento y extraer las partículas del circuito excepto aquellas que se encuentran en la tubería cuadrada.

Una vez sedimentadas las partículas, por el segundo circuito transita la misma solución pero sin partículas para generar las formas de fondo. El fluido pasa además por un intercambiador de calor que consta de cuatro tuberías de cobre y una pulgada de diámetro, inmersas en una tubería de cuatro pulgas por las que fluye agua de menor temperatura. El agua refrigerante circula constantemente desde un estanque de grandes dimensiones para no aumentar su temperatura de manera significativa. En la parte superior de la tubería de acrílico se encuentran los sensores de presión para estimar las pérdidas de carga.

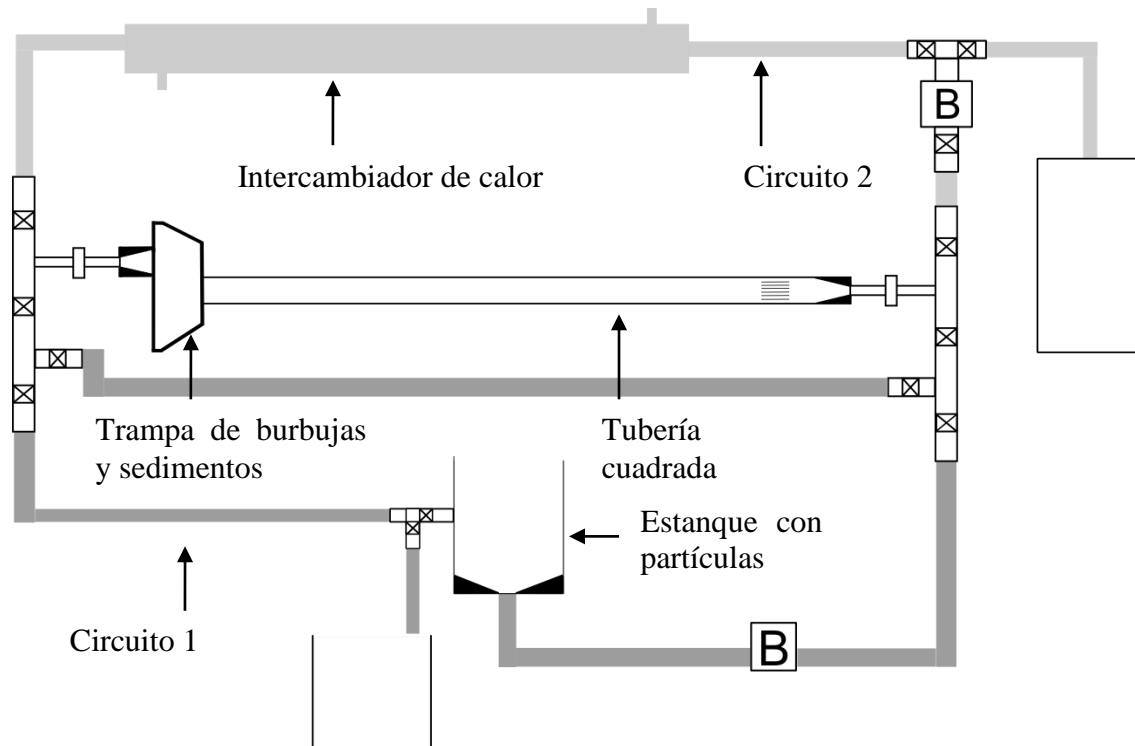


Figura 1. Circuitos 1 y 2

Sistema de medición

En experimentos preliminares con arena como sedimento, se registraron formas de fondo cuya amplitud es del orden de los milímetros. Adicionalmente, la condición de no resbalamiento en las fronteras laterales disminuye la velocidad cercana a las paredes. Esto impide que la totalidad de ondas sedimentarias puedan ser medidas por medio de fotografías laterales del perfil longitudinal.

Para resolver este problema se decidió registrar las formas de fondo mediante un sistema óptico no invasivo conocido como perfilometría por transformada de Fourier (FTP, por su nombre en inglés, *Fourier transform profilometry*) introducido por primera vez por Takeda et al (1982) y mejorado por Cobelli et al (2009). Para su implementación se utilizan un proyector y una cámara digital.

En la Figura 3 se muestra la distribución geométrica de los equipos utilizados. Ambos deben estar a la misma altura y sus ejes de colimación deben ser paralelos y verticales (Takeda y Mutoh, 1983). Las variables importantes para caracterizar la posición de ambos

aparatos son la altura L por sobre la superficie a medir y la distancia entre el lente del proyector y la pupila de la cámara fotográfica D .

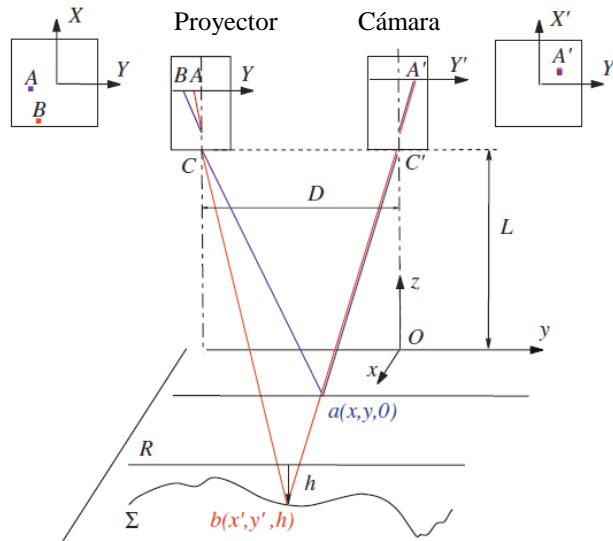


Figura 3. Esquema y variables del sistema FTP. Fuente: (Cobelli et al, 2009)

El plano de referencia $a(x,y,0)$ es la superficie previa a la deformación que se quiere medir. Esta debe ser perpendicular a los ejes de colimación de los aparatos. La pupila del proyector C proyecta un patrón de franjas arbitrario. Un patrón de franjas sinusoidal incrementa considerablemente el desempeño de esta técnica y la calidad de la reconstrucción comparado al patrón Ronchi (Cobelli et al, 2009). De manera simplificada, el fenómeno óptico es que un pixel proyectado B , es capturado en un pixel de la cámara A' . Una vez realizada la perturbación de la zona a medir, A' observa ahora el pixel proyectado por A . Gracias a la escala de grises, se define una fase a cada matiz de gris proyectado $\phi(A)$. Con esto obtiene un mapa de desfase entre los pixeles “ B ” y “ A ” tal que

$$\Delta\phi = \phi(B) - \phi(A) \quad (1)$$

Se entiende por desfase, la diferencia entre el gris registrado en una posición en el caso de referencia y el gris en esa misma posición para el caso deformado. Como se trabaja con fotos monocromáticas y el patrón varía del blanco al negro sinusoidalmente, este desfase de color es identificable directamente. Finalmente para obtener la relación entre el desfase y la altura correspondiente se utiliza la conversión fase-altura de Cobelli et al (2009):

$$h = \frac{\Delta\phi L}{\Delta\phi - 2\frac{\pi}{p}D} \quad (2)$$

Donde p es el periodo del patrón sinusoidal. Para la eliminación del ruido en las mediciones se usó un filtro de Gauss que suaviza los datos resultantes. En la Figura 4 se muestra la estructura metálica de soporte para la tubería y para los equipos utilizados en el sistema de medición.

Corrección por refracción

La teoría anteriormente explicada ha mostrado un error pequeño cuando se miden deformaciones de superficies libres (Maurel et al., 2009). Sin embargo, en el caso de este estudio y antes de llegar al fondo móvil, el haz de luz proveniente del proyector y la línea de visión de la cámara deben atravesar la pared superior del acrílico y el volumen de fluido, siendo refractado en su trayectoria. Una de las principales razones para usar acrílico en las paredes del ducto es que su índice de refracción es igual al del agua. Para la corrección de esta desviación, se usa el razonamiento expuesto en la Figura 4, donde h es la ubicación aparente del punto medido por el algoritmo de Cobelli et al (2009) y H la altura real del plano a medir.

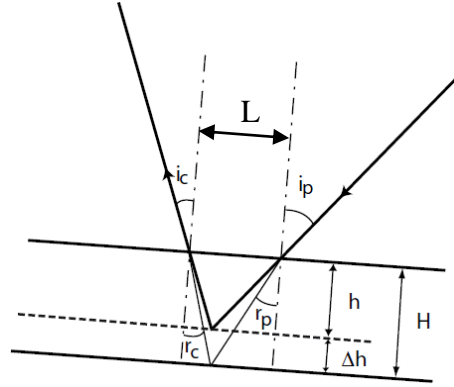


Figura 4. Corrección por refracción al atravesar un medio

Denominando L la distancia entre los puntos de incidencia. Se tiene que

$$L = h \tan(i_p) + h \tan(i_c) \quad (3)$$

Donde i_p e i_c son los ángulos de incidencia del proyector y la cámara respectivamente. Del mismo modo

$$L = h \tan(r_p) + h \tan(r_c) + \Delta h \tan(r_p) + \Delta h \tan(r_c) \quad (4)$$

Donde r_p y r_c son los ángulos de refracción. Igualando ambas expresiones se obtiene que

$$H = \frac{\tan(i_p) + \tan(i_c)}{\tan(r_p) + \tan(r_c)} h \quad (5)$$

Calibración para fluido pseudoplástico

La solución agua-CMC se comporta como un fluido de reología pseudoplástica. El comportamiento de esta solución está definido por una ley de potencia $\tau_{yx} = K\dot{\gamma}^n$. Donde K es el índice de consistencia, n el índice de flujo y $\dot{\gamma}$ la tasa de deformación angular. El valor de las constantes es determinado mediante un reómetro rotativo Anton Paar modelo Rheolab QC de cilindros concéntricos. Para la calibración del sistema de medición, se realizaron ensayos con una solución al 0.25% de concentración peso-peso peso de agua-

CMC. Los coeficientes obtenidos son $K = 0.023 \text{ Pa s}^n$ y $n = 0.84$. El índice de refracción n fue medido a través de fotografías de un rayo láser que atraviesa ambos medios (placa de acrílico y solución). De estas se obtuvo que el índice de refracción es igual para el agua y para la solución.

$$\frac{\sin(i_{\text{agua}})}{\sin(r_{\text{agua}})} = \frac{\sin(i_{\text{solucion}})}{\sin(r_{\text{solucion}})} = n = 1.335 \quad (6)$$

Modelación numérica del flujo

Sin lecho

Con el objeto de ayudar en el diseño, se resolvió numéricamente el escurrimiento en el ducto mediante un modelo k-epsilon para el cierre de la turbulencia. Para ello se utilizó el software comercial Comsol. Se determinó las características del flujo estacionario de agua en un ducto de sección cuadrada de $5.2 \times 5.2 \text{ cm}^2$ y 40 cm de largo. Considerando caudales entre 0.2 y 1.4 L/s, lo que corresponde a flujos con números de Reynolds entre 3840 y 26840. Las condiciones de borde empleadas corresponden a un caudal en la sección de entrada y a una cota piezométrica de 1mca en la sección de salida. En la Figura 5 se presenta un esquema de la distribución de velocidades para $Q = 0.4 \text{ L/s}$. Un análisis de los resultados indica que para este caso en $x = 15 \text{ cm}$ el perfil de velocidad se encuentra plenamente desarrollado.

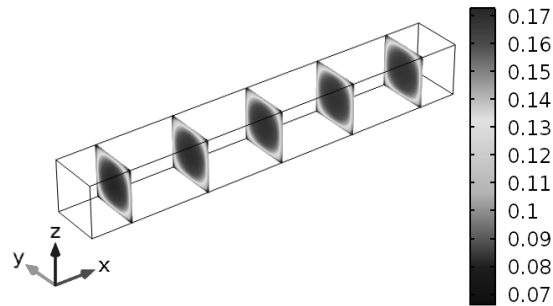


Figura 5. Modelo Comsol

En la Figura 6 se muestran distintos cortes del perfil de velocidades a 30 cm del ingreso del agua para 5 valores de la coordenada y , tal que $y_i = 0.052 \text{ i}/6 \text{ cm}$, con $i=1-5$.

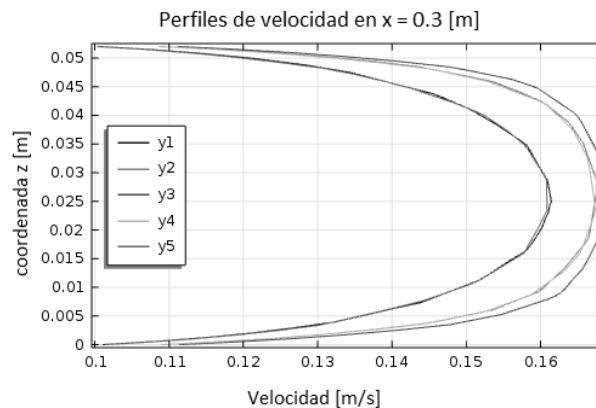


Figura 6. Perfiles de Velocidad sin lecho

Con lecho plano

Usando el mismo esquema en Comsol, se modeló numéricamente la rugosidad del fondo para un lecho plano y $d_p = 0.8$ mm. Asumiendo que el ducto posee arena en el fondo, la altura de la sección de escurrimiento se reduce a 2.7 cm. Con el objeto de determinar el esfuerzo de corte actuando sobre el lecho, es necesario separar los esfuerzos de corte asociados a las tres paredes de acrílico y al lecho. Para esto se definen un área de influencia del lecho y otra del acrílico. Las áreas de influencia se definen basándose en la deformación del perfil de velocidades obtenida en el modelo numérico. El aumento de la rugosidad en el fondo respecto a las paredes de acrílico hace que la velocidad máxima registrada en el perfil de velocidades de la sección transversal se encuentre desplazada hacia arriba como se muestra en la Figura 7. En base a la ubicación de la velocidad máxima, se determinó el área de influencia del lecho generando trapecios. Cuando se investiguen los casos con fluidos pseudoplásticos se deberá modelar considerando este tipo de reología para el fluido aparente.

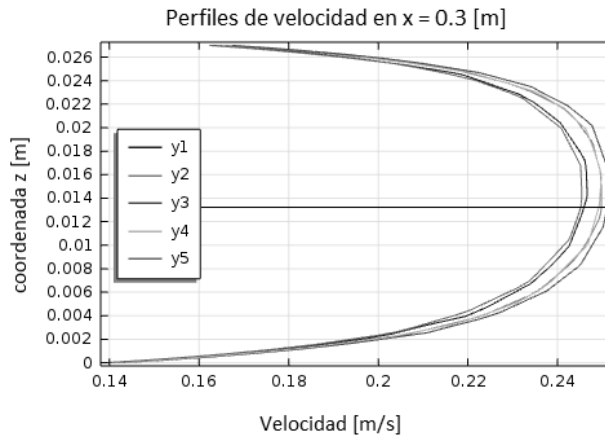


Figura 7. Efecto de la rugosidad del fondo en la ubicación de la velocidad máxima para $Q = 0.3$ L/s

Medición de la presión

La presión se mide en cuatro puntos a lo largo del ducto con transductores de presión diferencial Omega Modelo PX409-015DWUV. Estos sensores entregan la presión en mV, por lo que para su calibración se midieron distintas alturas de columnas de agua y se obtuvo un coeficiente de conversión. Su comprobación se llevó a cabo registrando las pérdidas de energía en la tubería haciendo fluir agua y sin partículas por ella. En la Figura 8 se compara las pendientes de la línea de energía J obtenidas con la modelación numérica y las medidas en la tubería. Estas se grafican en función del caudal.

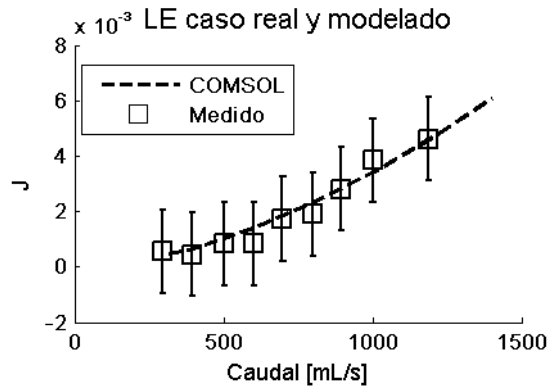


Figura 8. Comparación de la pérdida unitaria de energía para distintos caudales

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Con el objeto de verificar el funcionamiento de la instalación experimental para un lecho granular, se hicieron experimentos con agua y una solución agua-CMC.

Experimentos con agua

Las condiciones experimentales para el caso de agua se presentan en la Tabla 1. Las pendientes negativas corresponden pendiente adversa. En dicha tabla se incluye el rango de los principales parámetros adimensionales representativos del fenómeno estudiado: Número de Reynolds $Re = 4 R_h U / \nu$, donde R_h es el radio hidráulico y U la velocidad media. Número de Reynolds asociado a la partícula $Re_p^* = u_*' d_p / \nu$, donde u_*' es la velocidad friccional asociada al grano y d_p el diámetro representativo de las partículas. Número de Shields $\theta = \tau / (\rho_s - \rho) g d_p$, donde τ es el esfuerzo de corte sobre el lecho móvil, ρ_s la densidad del material no cohesivo, ρ la densidad del fluido y g la aceleración de gravedad.

Tabla 1. Condiciones experimentales con agua como fluido

Partículas de arena	$d_{50} = 0.38$ y 0.75 mm
Pendientes	$-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$
Caudal	0.2 a 0.75 L/s
Re	5000 - 19000
Re_p^*	4 - 15
Shields	0.005 - 0.26

Separación de los esfuerzos de corte

Conocidas las áreas de influencia por medio del modelo numérico, análogo a lo discutido en Chow (1959) para el efecto de una capa de hielo cubriendo la superficie libre en un cauce natural, se consideran velocidades iguales en ambas áreas. La rugosidad del lecho está compuesta por dos factores: el diámetro de las partículas y las formas de fondo (Engelund, 1966; Einstein y Barbarossa, 1952).

La descomposición del esfuerzo de corte actuando sobre el fondo se divide en un término asociado al grano y otro a la forma de fondo de manera análoga al método empírico de Einstein y Barbarossa (1952), $\tau = \tau' + \tau'' = \rho(u'_*)^2 + \rho(u''_*)^2$. Donde la resistencia asociada a los granos puede ser estimada con una relación tipo Keulegan (1938).

$$\frac{U}{u'_*} = 2.5 \ln \left(12.3 x \frac{R'_h}{d_s} \right) \quad (6)$$

Donde x es una función de $Re_{*p} = \frac{u'_* d_s}{\nu}$. Dada la relación $u'^2_* = gR'_h J$, el cálculo de u'_* es recursivo y se debe iterar hasta lograr la precisión deseada. Una vez conocido u'_* , se despeja u''_* .

En la Figura 9, los círculos blancos representan casos donde no hay movimiento de partículas, los círculos grises corresponden al arrastre incipiente y los círculos negros a casos con arrastre de sedimento. En esta figura se presentan los esfuerzos de corte adimensionales total y asociado a los granos, τ_* y τ'_* , respectivamente. La línea muestra el caso $\tau'_* = \tau_*$. Para dicha situación se tiene que no existe esfuerzo adicional por forma del lecho, es decir se está en presencia de un lecho plano. En los casos de pendiente 0%, -16.7% y 16.7%, se generan formas de fondo. Notar que en los casos sin movimiento se cumple $\tau'_* = \tau_*$.

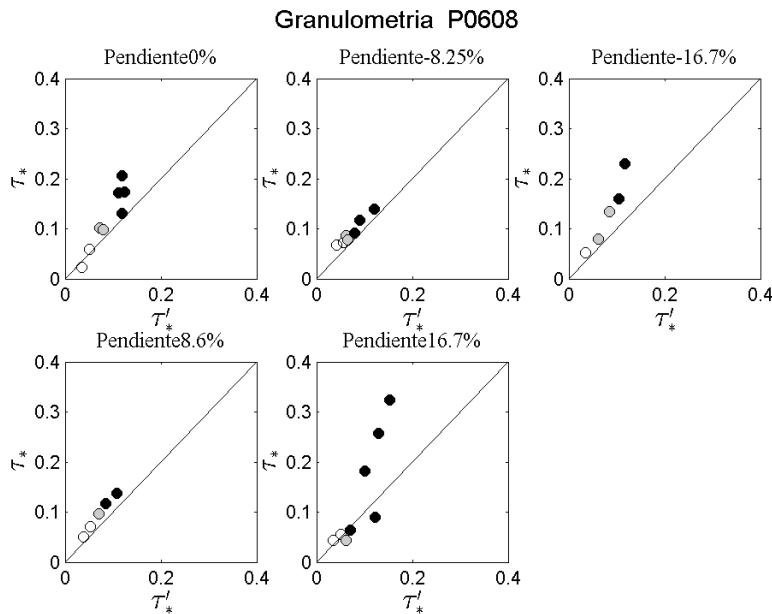


Figura 9. Esfuerzos de corte adimensional asociado a los granos y total

Arrastre incipiente

Desde el punto de vista dinámico, el arrastre incipiente es una condición crítica, donde las fuerzas hidrodinámicas que promueven el movimiento de la partícula se encuentran en equilibrio con las fuerzas que se oponen a dicho movimiento. Desde un punto de vista práctico, el arrastre incipiente puede ser determinado visualmente como el momento donde

las partículas comienzan a moverse pero encuentran el reposo rápidamente. Este movimiento aleatorio e intermitente se debe a la naturaleza estocástica de los esfuerzos turbulentos y el entramamiento dada la granulometría de las partículas. Definir esta condición visualmente no es una tarea sencilla debido a su carácter subjetivo.

En la Figura 10 se presenta el esfuerzo de corte crítico de Shields τ_{*c} que se define como el esfuerzo de corte para el cual se inicia el movimiento.

$$\tau_{*c} = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd_p} \quad (7)$$

Distintos autores han propuesto valores en el rango $0.03 < \tau_{*c} < 0.06$ para el rango de Re_p^* 2 a 20.

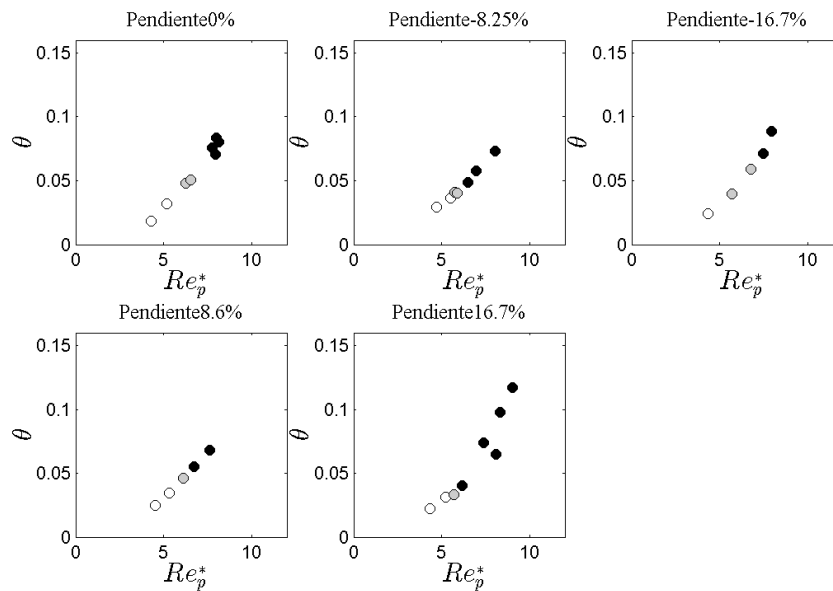


Figura 10. Condición de arrastre incipiente para distintas pendientes del ducto.

Experimentos con fluido pseudoplástico

Con el objetivo de verificar el buen funcionamiento de la técnica para registrar las formas de fondo, se llevó a cabo un experimento considerando una solución de agua-CMC ($K=0.023 \text{ Pa s}^n$ y $n=0.84$) sobre un lecho de arena de tamaño en el rango $0.6 \leq d_p \leq 0.8$ mm. La técnica de perfilometría por transformada de Fourier permite tener registros continuos de la evolución espacio-temporal de las formas de fondo. En la Figura 11 se presentan algunas de las imágenes obtenidas y un perfil de la forma de fondo a lo largo del eje de la tubería. A modo de ejemplo de la información que puede obtenerse del análisis de estas imágenes, se tiene la amplitud y largo de la duna de 8 y 200 mm respectivamente y la celeridad de la onda de 2.3 mm/s. El flujo que generó esta forma de fondo se caracteriza por un número de Reynolds equivalente

$$Re_K = \frac{\rho U^{2-n} h^n}{K} = 500 \quad (8)$$

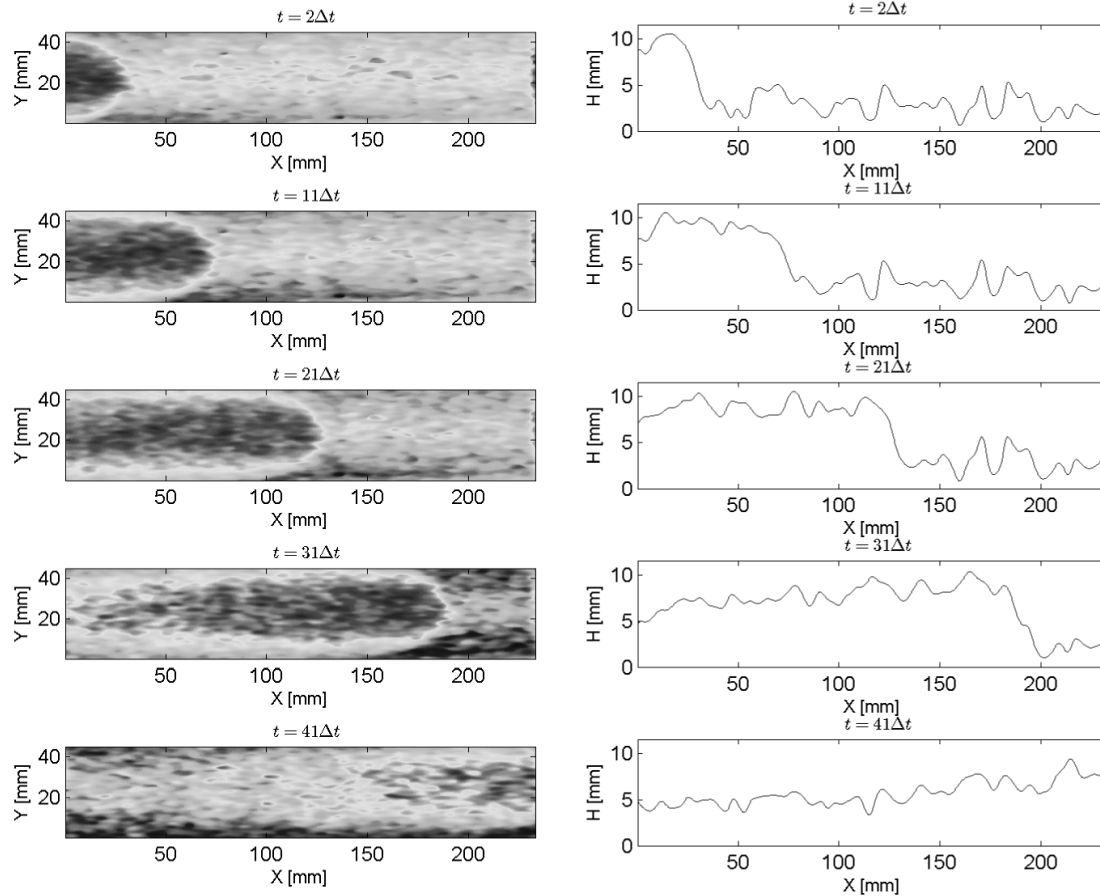


Figura 11. Registro de las formas de fondo obtenidas mediante FTP

4. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una instalación experimental especialmente diseñada para el estudio de las formas de fondo que pueden generarse en un lecho de material granular no cohesivo bajo la acción de un fluido.

Las mediciones preliminares fueron comparadas con un modelo numérico, lo que permitió complementar los resultados obtenidos experimentalmente. Se obtuvieron buenos resultados para la pérdida de carga medida y, especialmente, permitió separar el esfuerzo de corte actuando sobre el fondo respecto del valor total medido. De este modo se determinó el esfuerzo crítico de Shields para el sedimento ensayado.

Se implementó un sistema de medición no intrusivo para caracterizar las formas de fondo que se generan en el lecho. La técnica de perfilometría por transformada de Fourier fue modificada con éxito para tener en cuenta el índice de refracción del medio que debe atravesar el haz de luz al llegar al lecho dentro de la tubería. Esta técnica permitió determinar las dimensiones más importantes de las formas de fondo generadas por un flujo de un fluido pseudoplástico.

La instalación experimental aquí presentada y la técnica de registro de la deformación del lecho se muestran promisorias en el estudio de formas de fondo generadas por flujos en presión de fluidos no newtonianos cuya única restricción es que deben ser transparentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por Fondecyt a través del proyecto de investigación N°1130910.

El primer autor agradece además la beca de Magister en Chile. CONICYT-PCHA/MagísterNacional/2014 - 22141496.

REFERENCIAS

Admiraal, D. 2003. Influence of pipe angle on bedload transport in an inclined pipe. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 18, No. 2, 122-129.

Bagnold, R. A. 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Chapman and Hall, London.

Chow, V. T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

Cobelli, P.J., A. Maurel, V. Pagneux, y P. Petitjeans. 2009. Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry. *Experiments in fluids*, 46(6), 1037-1047.

Coleman, S., J. Fedele, y M. García. 2003. Closed-Conduit Bed-Form Initiation and Development. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 956 – 965.

Einstein, H.A. 1950. The Bedload function for bedload transportation in open channel flows. *Technical Bull. No. 1026*, USDA, Soil Conservation Service, 1-71.

Einstein, H. A., y N. L. Barbarossa. 1952. River channel roughness. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. Vol. 117, No. 1, 1121-1146.

Engelund, F. 1966. Hydraulic resistance of alluvial streams. *Journal of Hydraulics Division*, (HY2) 92(2), 315-326, y closure 93(4), 287-296.

Graf, W. H., y E. R. Acaroglu. 1968. Sediment transport in conveyance systems (part 1). A physical model for sediment transport in conveyance systems. *Hydrological Sciences Journal*, 13(2), 20-39.

Keulegan, G.H. 1938. Laws of turbulent flow in open channel. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 21, pp. 707-741.

Krieger, I. M., y T. J. Dougherty. 1959. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid particles. *Transaction of the Society of Rheology* 3, 137.

Kuru, W. C., D. T. Leighton, y M. J. Mc Cready. 1995. Formation of waves on a horizontal erodible bed of particles. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(6), 1123–1140.

Maurel, A., P. Cobelli, V. Pagneux, y P. Petitjeans. 2009. Experimental and theoretical inspection of the phase-to-height relation in Fourier transform profilometry. *Applied optics*, 48(2), 380-392.

Maurel, A., P. Cobelli, V. Pagneux, y P. Petitjeans. 2009. Experimental and theoretical inspection of the phase-to-height relation in Fourier transform profilometry. *Applied Optics*, 48(2), 380-392.

Montserrat G., A. Tamburrino y C. Ihle (2014) “Estudio Experimental Del Transporte en Régimen Laminar de Mezclas Sólidos-Líquido en Fluidos No-Newtonianos”, XXVI Congreso Latinoamericano de Ingeniería Hidráulica, Santiago, Chile, Agosto 25-30.

Negrete, F. 2014. Estudio experimental de formas de fondo en flujos laminares con superficie libre de fluidos pseudoplásticos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.

Ouriemi, M., J. Chauchat, P. Aussillous, M. Médale, y E. Guazzelli. 2010. Sediment transport and dunes in pipe flow. In *7th International Conference on Multiphase Flow*, 1-6.

Shields, A. 1936. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilungen der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, 26. (English translation by Ott, W.C. & van Uchelon, J.C., "Application of similarity principles and turbulence research to bed load movement", Soil Conservation Service, Cooperative Laboratory, Institute of Technology, Pasadena, California).

Takahashi, H., y T. Masuyama, K. Noda. 1989. Unstable flow of a solid-liquid mixture in a horizontal pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 15(5), 831–841.

Takeda M., H. Ina, y S. Kobayashi. 1982. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *Journal of the Optical Society of America* (1917–1983) 72:156.

Takeda, M., y K. Mutoh. 1983. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*, 22(24), 3977-3982.

Tamburrino, A., D. Carrillo, F. Negrete, and C. Ihle. 2014. “Critical shear stress for incipient motion of non-cohesive particles in open channel flows of pseudoplastic fluids”, 19 International Conference on Hydrotransport, Golden, Colorado, USA, Sept. 24-26.

Tamburrino, A., F. Negrete, and C. Ihle. 2015. “Sedimentary waves in laminar non-Newtonian fluid flows”, 2nd International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow (HTFF'15), Barcelona, España, Julio 20-21.

Anexo H

ARTÍCULO EN XXVII CONGRESO
LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016**

**CARACTERÍSTICAS DE FORMAS DE FONDO GENERADAS EN UN
DUCTO A PRESIÓN DEBIDO AL FLUJO DE UN FLUIDO
PSEUDOPLÁSTICO**

Alex Garcés y Aldo Tamburrino

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Chile

agarces@ing.uchile.cl

atamburr@ing.uchile.cl

RESUMEN:

Las formas de fondo son ondas sedimentarias con una cierta periodicidad espacial y geometría definida. Su presencia condiciona la resistencia hidráulica y el transporte de sedimentos, por lo que resulta importante ser capaces de conocer bajo qué condiciones se forman y cuantificar sus características.

En el presente trabajo se exponen estudios experimentales respecto a las características de las ondas sedimentarias que se generan debido al flujo en presión y régimen laminar de un fluido pseudoplástico en una tubería de sección cuadrada. La característica pseudoplástica del fluido busca reproducir el comportamiento no newtoniano que adquieren las mezclas de agua con sedimento fino. Además del caudal, la instalación experimental permite controlar la pendiente de la tubería.

Para la caracterización de las formas de fondo se utiliza un sistema óptico de medición no intrusivo basado en un algoritmo conocido como perfilometría por transformada de Fourier, el cual fue corregido dada la refracción del haz de luz al entrar en la tubería. El método es capaz de medir características geométricas de la onda y su celeridad, a partir de lo cual es posible estimar el gasto sólido de fondo.

Los principales resultados obtenidos de la investigación son la caracterización geométrica de las formas de fondo para distintas condiciones de pendiente y caudal y el estudio del factor de fricción asociado al lecho.

ABSTRACT:

PALABRAS CLAVES: formas de fondo, no newtoniano, FTP, coeficiente de fricción

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se expone el estudio y los resultados experimentales de ondas sedimentarias que se generan debido al flujo en presión de un fluido pseudoplástico en una tubería cuadrada. El problema es interesante dado que el agua, en presencia de sólidos finos cambia su comportamiento reológico (Krieger y Dougherty, 1959). Por ejemplo, Skipworth et al. (1999) estudiaron este fenómeno con el objetivo de describir los depósitos de sedimentos en alcantarillas combinadas, es decir que transportan tanto aguas lluvias como aguas servidas. Para el caso de intensas precipitaciones, el arrastre de sedimentos influye de gran manera en las condiciones de cómo el agua fluye estas alcantarillas. Caudales cercanos o superiores a los de diseño, sumado a la presencia de formas de fondo pueden provocar que la alcantarilla entre en presión aumentando las pérdidas de energía y que no se cumplan los criterios de diseño. En minería por otro lado, ser capaces de caracterizar situaciones donde existen lechos de partículas puede extender las condiciones de diseño haciendo más flexible al mismo.

La presente investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Hidráulica Francisco Javier Dominguez de la Universidad de Chile en una tubería cuadrada para un conjunto de caudales y pendientes. Tanto la granulometría del sedimento utilizado, como la característica pseudoplástica del fluido se mantuvieron constantes en los experimentos realizados. En futuras investigaciones se variarán estos parámetros.

Los objetivos principales de esta investigación son caracterizar el comportamiento del factor de fricción asociado al lecho móvil, la geometría de las formas de fondo y en la condición de arrastre incipiente bajo la influencia de distintas pendientes de la tubería.

La técnica de medición utilizada está basada en la perfilometría por transformada de Fourier (FTP por su nombre en inglés, *Fourier transform profilometry*) El método fue introducido por primera vez por Takeda et al (1982), mejorado por Cobelli et al (2009) y adaptado para el uso en ductos a presión (Garcés y Tamburrino, 2015). Su implementación fue fundamental para el estudio de las formas de fondo ya que permite un análisis espacio-temporal de muy buena resolución. De la literatura analizada sobre formas de fondo, no se encontraron experimentos que registren un sistema de medición con las capacidades de la técnica aquí utilizada. Los datos analizados corresponden a condiciones permanentes del flujo y arrastre de sedimentos. La técnica de medición permite también estudiar la evolución temporal del lecho.

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

La instalación experimental está constituida por dos sistemas cerrados de recirculación en presión. El primer circuito está encargado de generar el lecho plano en la sección de estudio. Las características de este circuito son tales que cuando en el tramo de sección rectangular se tiene una condición de lecho deslizante, el transporte de sedimentos en el resto del circuito es en suspensión. El segundo, se utiliza para controlar la generación de las formas de fondo en el tramo de sección rectangular. La única sección común para ambos circuitos es un tramo de 10 m de largo formado por una tubería cuadrada de 52x52 mm² de sección transversal y cuya pendiente puede variar entre -17,5% y 17,5%. Llamando z a un eje vertical, positivo hacia arriba y x a un eje en la dirección del flujo, el signo de la pendiente es definido tal que $\frac{dz}{dx} < 0$ implica pendiente positiva y pendiente adversa es equivalente a pendiente negativa ($\frac{dz}{dx} > 0$). Las paredes de esta tubería están construidas de acrílico transparente, lo que permite la visualización del flujo y de las formas de fondo. En la pared superior de la tubería se encuentran cuatro sensores de presión para determinar las pérdidas de carga. Esta instalación se explica con mayor detalle en Garcés y Tamburrino (2015).

El material del lecho que forma el fondo corresponde a partículas no-cohesivas de arena de tamaño medio 700 μm . El fluido pseudoplástico se genera mediante una mezcla de agua y carboximetilcelulosa, el que se ajusta a una ley de potencia del tipo $\tau = K \dot{\gamma}^n$, donde τ es el esfuerzo de corte, $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación angular, K es el coeficiente de consistencia del fluido y n el

índice de flujo. Ensayos reológicos, utilizando un reómetro Anton Paar, modelo Rheolab QC, caracterizaron al fluido con un coeficiente de consistencia $K = 0.21 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ e índice de flujo $n = 0.69$. Es importante verificar el pH neutro-básico (7 a 8) de la mezcla ya que si la solución se vuelve ácida, la viscosidad decae. Debido a la dependencia de la reología con la temperatura, ésta se controla a través de un intercambiador de calor y se mantuvo constante a 23°C .

Los caudales estuvieron en el rango entre 34 y 516 mL/s, los que significaron números de Reynolds del flujo ente 8 y 335, definidos según Metzner y Reed como $\rho U D / \mu_{eff}$ con $\mu_{eff} = K((3n + 1)/(4n))^n (8U/D)^{n-1}$ y $D = 4R_H$. Usando la relación de Mishra y Tripathi, $Re_c = 2100(4n + 2)(5n + 3)/(3(3n + 1)^2)$ (Chhabra y Richardson, 2008) se determinó que el número de Reynolds crítico más desfavorable es $Re_c = 2288$. En consecuencia, todos los flujos estuvieron en régimen laminar.

Las características geométricas del lecho y su evolución temporal se registran mediante el sistema óptico de medición no invasivo conocido como perfilometría por transformada de Fourier. Para su uso se utilizan un proyector y una cámara digital en la parte superior del tramo de tubería a estudiar. La resolución digital lograda de las imágenes tomadas por el sistema de medición FTP en esta investigación es de 0.2 mm/pixel. Una sección de $52 \times 460 \text{ mm}^2$ se logró estudiar dado el alcance del proyector. En otra sección de la tubería se encuentra también una cámara que permite registros de video, instalada lateralmente, con la que se registra el perfil longitudinal de las formas de fondo. La resolución de este método de medición es 0,65 mm/pixel, siendo la sección registrada de $52 \times 1500 \text{ mm}^2$.

RESULTADOS

Las pendientes estudiadas son -7.5, -16, 0, 9 y 16.8 %. El número de Reynolds modificado para fluido pseudoplástico (Slatter, 1999) está definido como:

$$Re = \frac{8\rho U^2}{K(2U/R_H)^n} \quad [1]$$

donde U es la velocidad media del flujo y R_H es el radio hidráulico, Las amplitudes registradas son todas menores a un centímetro y las longitudes de onda se encuentran entre los 15 y 140 cm.

En la Figura 1 se muestra a modo de ejemplo el registro 3D de las dunas para dos caudales, para un tiempo dado del experimento. El registro temporal de las imágenes permite estudiar la evolución y migración de las dunas. Durante los experimentos se observó que a medida que aumenta el caudal, las formas de fondo muestran un crecimiento sostenido tanto en la amplitud de la onda como en la longitud de la misma para las condiciones ensayadas. Sin embargo, respecto a la celeridad de la onda no se ha observado una tendencia concluyente relacionada con el aumento de caudal. Debido a que el alcance longitudinal de la técnica de medición FTP es de aproximadamente 46 cm, ondas de longitud mayor se registraron manualmente durante los experimentos.

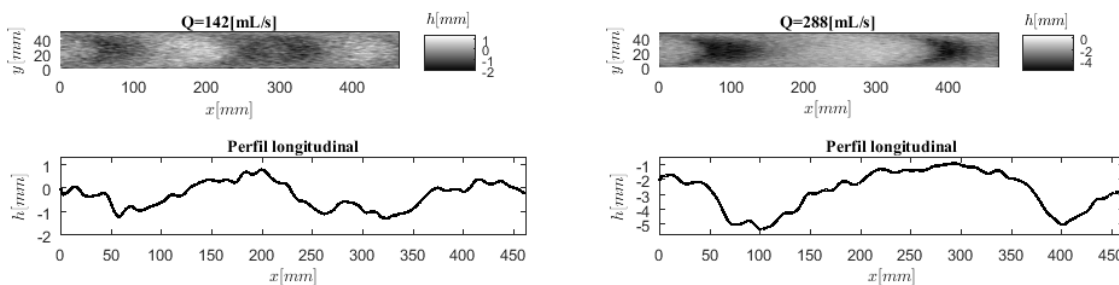


Figura 1.- Caracterización geométrica de las formas de fondo. Las partículas corresponden a arena entre 600 y 800 μm , sin pendiente y un fluido pseudoplástico caracterizado por un índice de flujo $n = 0.69$ y coeficiente de consistencia $K = 0.21 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$. Se expone además el perfil longitudinal a lo largo del eje de la tubería.

Factor de fricción del lecho

Además de la geometría de las formas de fondo, se registró el caudal, la altura media del lecho, la temperatura, la presión en cuatro puntos de la tubería y la reología de la solución.

A partir de la medición de la presión a largo de la tubería se determinó el esfuerzo de corte medio en el contorno de la tubería. Sustrayendo el efecto de pared como se indica en el Anexo, se obtiene el esfuerzo actuando sobre el lecho granular. Con esto, se obtuvieron los gráficos de la Figura 2 donde se muestra la relación entre el Reynolds modificado asociado al lecho (Re_{lecho}) y el factor de fricción asociado al lecho (f_{lecho}), para distintas pendientes de la tubería.

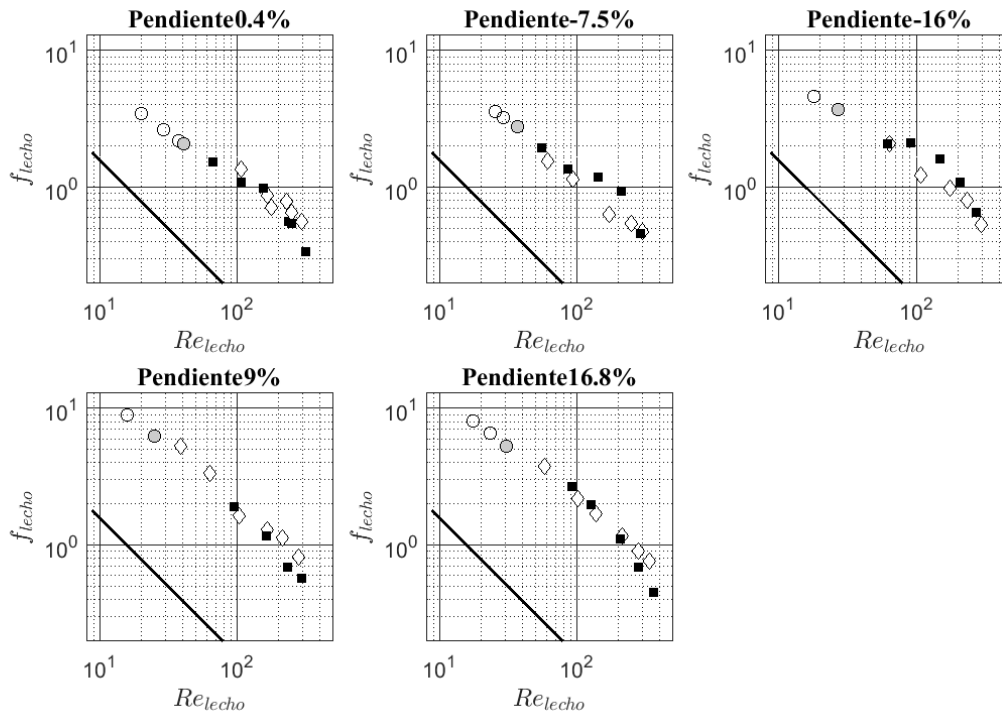


Figura 2.- Relación entre número de Reynolds y el factor de fricción asociado al lecho, para distintas pendientes de la tubería.

En la Figura 2 se presentan los gráficos separados por pendiente de la tubería. Los círculos vacíos indican que no existe movimiento de las partículas que conforman el lecho y los círculos grises corresponden a la condición de arrastre incipiente. Los cuadrados negros son casos donde existe arrastre de fondo generalizado y, en su mayoría, formas de fondo. Los datos asociados a los cuadrados negros son resultado de la geometría de fondo medida con la técnica de medición FTP. Los rombos vacíos representan la misma condición de los cuadrados negros pero para la geometría de fondo caracterizada lateralmente.

La influencia de las ondas sedimentarias se observa claramente para los tres gráficos superiores de esta figura. A medida que la pendiente se hace más negativa, el factor de fricción aumenta para un determinado Reynolds. Por ejemplo, se observa para $Re_{lecho} = 100$, el factor de fricción aumenta mientras las pendiente va de 0.4 a -16%.

Para pendientes positivas de la tubería en cambio, esto no se observa debido a que las formas de fondo cambian abruptamente su geometría. Lo anterior es coherente con la geometría registrada por Admiraal (2003). En la Figura 3 se comparan las formas de fondo registradas para las dos pendientes extremas, -16% y 16.8%. Las formas de fondo en pendiente a favor, es decir pendiente positiva, son más onduladas y presentan un frente menos definido que las formas de fondo de que se generan en pendiente adversa. En esta figura se muestra además que la longitud de onda es mucho menor para pendiente adversa. En la zona de medición se alcanzan a registrar dos dunas mientras que para pendiente positiva la longitud de onda es superior a la longitud de la zona de medición.

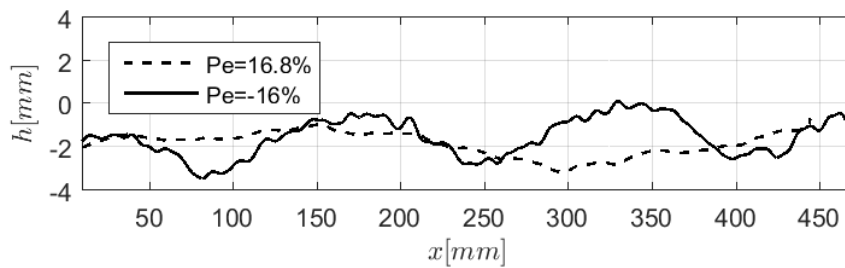


Figura 3.- Comparación de la geometría de dunas en pendientes -16% y 16.8% para caudales 210 y 203 mL/s respectivamente.

Las formas de fondo registradas en el caso horizontal y contrapendientes siguen la forma típica de duna con una sección de aguas arriba suave y la de aguas abajo cercana al ángulo de reposo de las partículas. Los casos de pendiente positiva se describen mejor como una superficie ondulada, siendo la amplitud ambigua. En la Figura 3 se observa que la zona más alta de la duna en pendiente 16.8% se encuentra a 15 cm de la zona más baja aguas abajo. Considerando además que el gasto sólido de fondo que transita sobre el lecho también afecta en la determinación del fondo mediante FTP, no se puede concluir categóricamente que se trate de la amplitud de un frente.

En la Figura 2, para los casos de pendiente adversa se observa una diferencia notoria entre los registros obtenidos con las dos técnicas de medición (FTP y registro lateral). Esto se debe a la forma de las dunas registradas donde la arena se encuentra más alta en los bordes, lo que provoca que la medición lateral del lecho subestime la sección media de escurrimiento. En la Figura 4 se describe este fenómeno con tres perfiles longitudinales. El primer perfil es el eje central de la tubería, el segundo en $y = 3b/4$, siendo b el ancho de la tubería e $y = 0$ una de las paredes de acrílico. El último de los perfiles se encuentra a $y = 12b/13 = 4 \text{ mm}$ de la pared donde se observa claramente que una vista lateral no deja en evidencia la forma de fondo. En consecuencia, para las condiciones experimentales ensayadas, los datos generados de la vista lateral deben ser utilizados con cuidado y preferir los resultados de la técnica de medición FTP. Esta es la razón de porqué fue fundamental desarrollar el sistema de medición FTP.

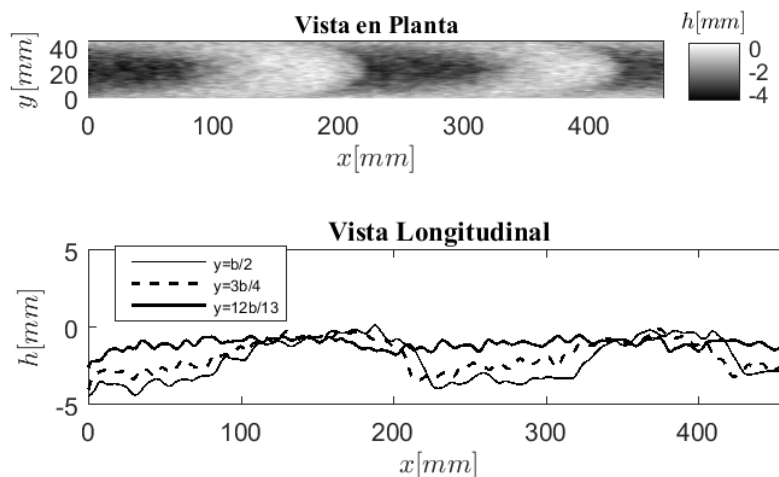


Figura 4.- Diferencia de altura media registrada dependiendo del perfil medido. La imagen corresponde a $Q = 300 \text{ mL/s}$ para la pendiente -7.5%. En esta figura, $b/2$ corresponde al eje central de la tubería, $b/4$ corresponde un eje a 13 mm de la pared de acrílico lateral izquierda en el sentido de flujo y $12b/13$ a un eje a 4 mm de la pared de la tubería.

Análisis de las características geométricas de las formas de fondo

En la Figura 5 se muestra la altura en el centro de la zona de medición en función del tiempo para un experimento, registradas con una frecuencia de adquisición de imágenes es de 0.1 Hz durante 20 minutos. Se observa el paso de cinco dunas, las cuales quedan completamente caracterizadas. El principal resultado de esta imagen es la determinación de la amplitud y periodicidad de las dunas registradas. Kuru et al (1995) expone una distribución de longitudes de formas de fondo mucho más extendida en sus experimentos realizados para una solución de glicerina y régimen turbulento. De la comparación de ambos estudios nace la interrogante de si la naturaleza estocástica de los esfuerzos turbulentos es una de las principales razones para la pérdida de periodicidad en las formas de fondo.

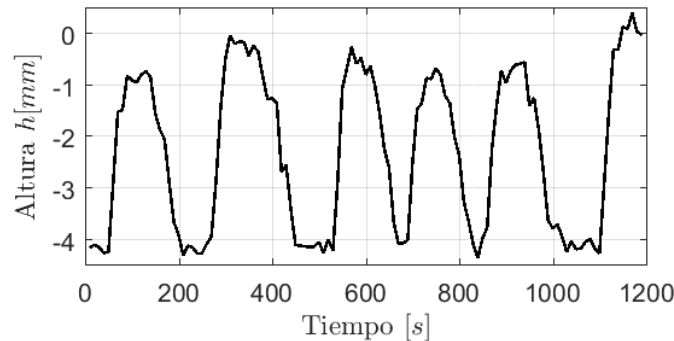


Figura 5.- Registro de la altura del lecho en el centro de la zona de medición FTP. La imagen corresponde a $Q = 300 \text{ mL/s}$ para la pendiente -7.5% .

En la Figura 6 se presenta la relación entre el número de Reynolds del flujo asociado al lecho y la amplitud de las dunas, adimensionalizada con la altura media del flujo. En esta figura sólo se analizan el caso horizontal y los casos con pendiente adversa dada la ambigüedad en la determinación de la amplitud de las formas de fondo con pendiente a favor. Se observa cómo, sistemáticamente, a medida que la pendiente se hace más negativa, el número de Reynolds debe ser mayor para lograr la misma amplitud. Esto demuestra cómo la velocidad media del flujo debe aumentar para vencer la componente de los esfuerzos gravitatorios que se oponen al movimiento.

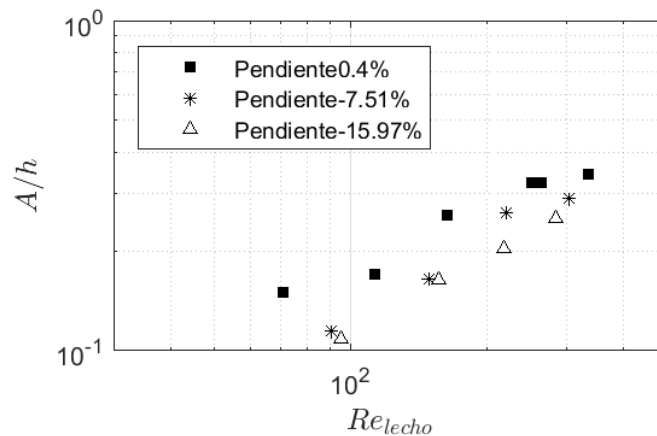


Figura 6.- Relación entre la amplitud de onda y el Reynolds del lecho.

Las fuerzas que actúan sobre un grano característico son la fuerza de arrastre F_D y sustentación F_L , el empuje E , el roce coulombico F_R y el peso W . La pendiente de la tubería afecta de manera importante a estos dos últimos parámetros. Esta inclinación determina la fuerza normal sobre la superficie relacionada con el roce. Además define si la componente en dirección del flujo es a favor o en contra del movimiento, dependiendo si la pendiente es positiva o negativa. Denominando θ al ángulo que forma la tubería respecto a la horizontal, el roce coulombico está dado por:

$$F_R = \mu N = \mu[(W - E)\sin\theta - F_L] \quad [2]$$

donde $\mu = \tan(\phi)$ y ϕ es el ángulo de reposo, el cual para arena es $\phi \sim 30^\circ$.

Del balance de fuerzas sobre el grano para la condición crítica de movimiento se tiene la ecuación

$$F_R = F_D + (W - E)\sin\theta \quad [3]$$

Notar del balance de fuerzas de la ecuación [3] que para $\sin\theta > 0$ la componente del peso es a favor del movimiento, mientras que para $\sin\theta < 0$ la componente se opone al movimiento. Lo anterior es coherente con la definición utilizada anteriormente para la pendiente. Considerando un grano esférico de diámetro d_s y densidad ρ_s se obtiene que la expresión para el esfuerzo de corte crítico adimensional está dada por:

$$\tau_*(\theta) = \frac{u_*^2}{gRd_s} = \frac{4}{3} \frac{(\mu\cos\theta - \sin\theta)}{C_D + \mu C_L} \quad [4]$$

donde u_* es la velocidad friccional, $R = (\rho_s - \rho)/\rho$, siendo C_D y C_L los coeficientes de arrastre y sustentación hidrodinámica del grano, respectivamente. Considerando como situación base la tubería horizontal:

$$\frac{\tau_*(\theta)}{\tau_*(\theta = 0)} = \frac{\mu\cos\theta - \sin\theta}{\mu} \quad [5]$$

Se define un esfuerzo de corte adimensional modificado que considera el efecto de la pendiente de la tubería:

$$\tau_{**} = \frac{\mu \tau_*(\theta)}{\mu\cos\theta - \sin\theta} \quad [6]$$

En la Figura 7 se muestra el esfuerzo de corte adimensional modificado por pendiente en función del número de Reynolds del flujo asociado al lecho. En esta figura se puede ver cómo la corrección por pendiente colapsa todos los datos en una sola tendencia.

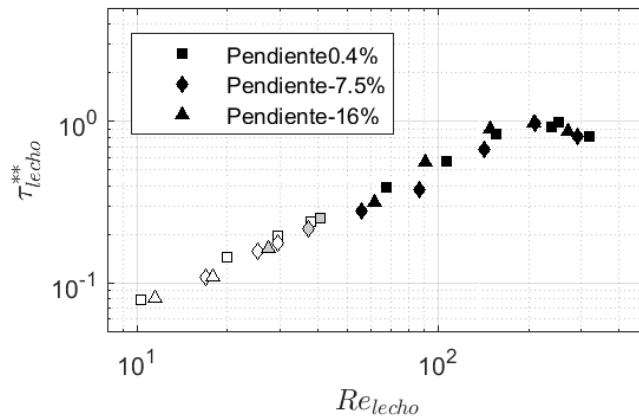


Figura 7.- Esfuerzo de Shields modificado por pendiente en función del número de Reynolds del flujo asociado al lecho. Misma simbología que en la Figura 2.

CONCLUSIONES

El conjunto de experimentos presentados deja en evidencia la importancia de la pendiente en la geometría de las formas de fondo y en consecuencia en las pérdidas de energía. Esto constituye una gran diferencia con las pérdidas de energía de flujos de fluidos en ausencia de lechos móviles, los cuales son independientes de la inclinación del ducto. Para pendiente adversa, las formas de fondo presentan mayores amplitudes y menores longitudes de onda que para pendiente a favor. En consecuencia existe una mayor cantidad de zonas por unidad de largo donde el flujo se expande, lo cual genera mayores pérdidas de energía.

Las formas de fondo registradas con mayor claridad se observaron en la situación horizontal y pendiente adversa. Esto se debe a que poseen longitudes de onda menor por lo que se pueden registrar completamente en la ventana de observación del sistema FTP. Las dunas observadas presentaron la misma forma en todos los experimentos. Este perfil se caracteriza por un frente redondeado y extremos laterales con poca socavación, debido principalmente al régimen laminar de los experimentos. Dado que el esfuerzo de corte es mínimo en las esquinas de la tubería, los granos cercanos a las paredes de acrílico sienten un arrastre insuficiente para moverse. Por esta razón, el registro lateral no generó datos útiles para el tipo de formas de fondo registradas.

En esta investigación se lograron con éxito condiciones cuasi periódicas y temporalmente estables para el lecho, a diferencia de lo registrado por Kuru et al (1995) para régimen turbulento, quienes registraron una alta varianza en la geometría de las formas de fondo debido a la naturaleza estocástica de la turbulencia que influye en el fenómeno de saltación generando formas de fondo más irregulares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido a través del proyecto Fondecyt 1130910. El primer autor agradece además la beca de Magister en Chile. CONICYT-PCHA/MagisterNacional/2014 - 22141496.

Referencias

- Admiraal, D.** (2003). "Influence of pipe angle on bedload transport in an inclined pipe". *International Journal of Sediment Research*, Vol. 18, No. 2, 122-129.
- Chhabra, R.P. and Richardson, J.F.** (2008), Non-Newtonian flow and applied rheology. Elsevier, 2nd edition, Oxford, UK.
- Cobelli, P.J., A. Maurel, V. Pagneux, y P. Petitjeans.** (2009). "Global measurement of water waves by Fourier transform profilometry". *Experiments in fluids*, 46(6), 1037-1047.
- Garcés, A. y A. Tamburrino** (2015) "Instalación experimental e implementación de un sistema de medición óptico no intrusivo para el estudio de formas de fondo en ductos a presión". *XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, SOCHID*; Santiago, Oct., 21 – 23.
- Krieger, I. M., y T. J. Dougherty.** (1959). "A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid particles". *Transaction of the Society of Rheology* 3, 137.
- Kuru, W. C., D. T. Leighton, y M. J. Mc Cready.** (1995). Formation of waves on a horizontal erodible bed of particles. *International Journal of Multiphase Flow*, 21(6), 1123–1140.
- Skipworth, P. J., Tait, S. J., & Saul, A. J.** (1999). Erosion of sediment beds in sewers: Model development. *Journal of environmental engineering*, 125(6), 566-573.
- Slatter, P.** (2000). "The role of rheology in the pipelining of mineral slurries". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 20(1), 281-300.
- Takeda M., H. Ina, y S. Kobayashi.** (1982). "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry". *Journal of the Optical Society of America* (1917–1983) 72:156.

ANEXO

Cálculo del factor de fricción asociado al lecho

El procedimiento para calcular es esfuerzo de corte asociado al lecho para un flujo en régimen laminar fue el que se describe a continuación. A partir de la bisectriz formada por las paredes y el fondo del canal, se define el área de influencia del lecho como un trapecio de altura $0.5 h$, siendo h la altura del flujo. Esta área y el radio hidráulico asociados están dados por:

$$A_{lecho} = 0.5hb - (0.5h)^2 \quad [A1]$$

$$R_{hlecho} = \frac{A_{lecho}}{b} \quad [A2]$$

El área de influencia y radio hidráulico asociados a las paredes de acrílico son:

$$A_{acrílico} = A_{total} - A_{lecho} \quad [A3]$$

$$R_{hacrílico} = \frac{A_{acrílico}}{b + 2h} \quad [A4]$$

Se definen los números de Reynolds asociados a las paredes y al fondo como (Slatter, 1999):

$$Re_{acrílico} = \frac{8\rho U^{(2-n)} R_{hacrílico}^n}{2^n K} \quad [A5]$$

$$Re_{lecho} = \frac{8\rho U^{(2-n)} R_{hlecho}^n}{2^n K} \quad [A6]$$

Ecuaciones A5 y A6 consideran que la velocidad media para cada área de influencia es la misma e igual a la velocidad media del flujo. De este modo, se determina el factor de fricción para el acrílico en régimen laminar el esfuerzo de corte asociado como

$$f_{acrílico} = \frac{16}{Re_{acrílico}} \quad [A7]$$

$$\tau_{acrílico} = \frac{1}{8} \rho f_{acrílico} U^2 \quad [A8]$$

El esfuerzo de corte total es calculado de las mediciones de la pendiente de energía

$$\tau = \rho g R_h J \quad [A9]$$

siendo g la aceleración de gravedad y J el gradiente de la cota piezométrica.

Descomponiendo la fuerza total generada por el esfuerzo de corte en una componente asociada a las paredes y otra al lecho, se obtiene el esfuerzo de corte sobre el lecho

$$\tau_{lecho} = \frac{\tau(2b + 2h) - \tau_{acrílico}(b + 2h)}{b} \quad [A10]$$

Y el factor de fricción asociado al lecho

$$f_2 = \frac{8\tau_{lecho}}{\rho U^2} \quad [A11]$$