

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.3. Organización de la tesis . . . . .	4
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
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
<b>3. Metodología</b>	<b>16</b>
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
<b>4. Resultados</b>	<b>29</b>
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
<b>5. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>50</b>
<b>Anexos</b>	<b>53</b>
<b>Anexo A.</b>	<b>54</b>
A.1. Estructura tramo de estudio . . . . .	55

<b>Anexo B.</b>	<b>56</b>
B.1. Mecanismo de transporte de fondo . . . . .	57
<b>Anexo C.</b>	<b>59</b>
C.1. Escalamiento inercial . . . . .	60
<b>Anexo D. Experimentos en agua</b>	<b>63</b>
D.1. Descripción cualitativa . . . . .	64
D.2. Engelund . . . . .	65
D.3. Einstein-Barbarossa . . . . .	65
<b>Anexo E. Metodologías</b>	<b>79</b>
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
<b>Anexo F. Tablas de resultados experimentales</b>	<b>89</b>
F.1. Experimentos con solución de CMC en agua como fluido . . . . .	90
F.2. Experimentos con agua como fluido . . . . .	90
<b>Anexo G. Artículo en XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HI- DRÁULICA</b>	<b>106</b>
<b>Anexo H. Artículo en XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HI- DRÁULICA</b>	<b>121</b>

# 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 $13\text{mm}$ de la pared de acrílico lateral izquierda en el sentido de flujo y $12b/13$ a un eje a $4\text{mm}$ 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 cuociente 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 cuociente 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 $\mu m$ , 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