

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	3
1.2.1. Generales . . . . .	3
1.2.2. Específicos . . . . .	3
1.3. Contenidos del informe . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Fluidos no newtonianos . . . . .	5
2.2. Transporte de sedimentos . . . . .	8
2.3. Sistema de medición FTP . . . . .	14
<b>3. Metodología</b>	<b>17</b>
3.1. Instalación experimental . . . . .	17
3.2. Modificaciones . . . . .	19
3.2.1. Transductores de presión . . . . .	19
3.2.2. Estanque de mezcla . . . . .	20
3.2.3. Sistema de ingreso de partículas . . . . .	20
3.3. Conjunto de experimentos . . . . .	23
3.3.1. Experimentos de arrastre incipiente . . . . .	23
3.3.2. Experimentos de evolución temporal del lecho . . . . .	23
3.4. Análisis de datos experimentales . . . . .	25
3.4.1. Corrección por efecto de pared . . . . .	25
3.4.2. Corrección por pendiente . . . . .	29
3.4.3. Clasificación de arrastre incipiente . . . . .	30
3.4.4. Caracterización de las formas de fondo . . . . .	31
3.4.5. Diagrama de predicción de formas de fondo . . . . .	33
<b>4. Resultados</b>	<b>36</b>
4.1. Condición de arrastre incipiente . . . . .	37
4.2. Evolución temporal del lecho . . . . .	41
4.3. Caracterización de las formas de fondo . . . . .	47
4.3.1. Amplitud . . . . .	47
4.3.2. Celeridad . . . . .	48
4.3.3. Longitud de onda . . . . .	52
4.4. Estabilidad del lecho . . . . .	54

<b>5. Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>Anexos</b>	<b>64</b>
<b>Anexos</b>	<b>64</b>
<b>A. Tratamiento de datos</b>	<b>65</b>
A.1. Pendiente de la línea de energía . . . . .	65
A.2. Parámetros de la reología del fluido . . . . .	66
A.3. Altura de escurrimiento . . . . .	67
A.4. Ángulo de reposo . . . . .	69
A.5. Número de Galileo para fluidos no pseudoplásticos . . . . .	70
<b>B. Propagación de errores</b>	<b>72</b>
<b>C. Tabla de resultados experimentales</b>	<b>79</b>

# Índice de Tablas

3.1. Conjunto de partículas utilizadas para formar el lecho. . . . .	23
3.2. Conjunto de experimentos de arrastre incipiente. . . . .	24
3.3. Conjunto de experimentos de la evolución temporal del lecho. . . . .	25
A.1. Ángulos de reposo de las partículas que forman el lecho. . . . .	69
C.1. Amplitud, celeridad y longitud de onda de las formas de fondo registradas durante el experimento <i>E22</i> . . . . .	80
C.2. Amplitud, celeridad y longitud de onda de las formas de fondo registradas durante el experimento <i>E23</i> . . . . .	80
C.3. Amplitud, celeridad y longitud de onda de las formas de fondo registradas durante el experimento <i>E26</i> . . . . .	81
C.4. Amplitud, celeridad y longitud de onda de las formas de fondo registradas durante el experimento <i>E27</i> . . . . .	81
C.5. Parámetros reológicos, pendiente, caudal y clasificación de los puntos obtenidos, experimentos <i>E1 - E4</i> . . . . .	82
C.6. Parámetros reológicos, pendiente, caudal y clasificación de los puntos obtenidos, experimentos <i>E5 - E8</i> . . . . .	83
C.7. Parámetros reológicos, pendiente, caudal y clasificación de los puntos obtenidos, experimentos <i>E9 - E12</i> . . . . .	84
C.8. Parámetros reológicos, pendiente, caudal y clasificación de los puntos obtenidos, experimentos <i>E13 - E16</i> . . . . .	85
C.9. Parámetros reológicos, pendiente, caudal y clasificación de los puntos obtenidos, experimentos <i>E17 - E21</i> . . . . .	86
C.10. Pendiente de la línea de energía, velocidad, factor de fricción y número de Reynolds, experimentos <i>E1 - E4</i> . . . . .	87
C.11. Pendiente de la línea de energía, velocidad, factor de fricción y número de Reynolds, experimentos <i>E5 - E8</i> . . . . .	88
C.12. Pendiente de la línea de energía, velocidad, factor de fricción y número de Reynolds, experimentos <i>E9 - E12</i> . . . . .	89
C.13. Pendiente de la línea de energía, velocidad, factor de fricción y número de Reynolds, experimentos <i>E13 - E16</i> . . . . .	90
C.14. Pendiente de la línea de energía, velocidad, factor de fricción y número de Reynolds, experimentos <i>E17 - E21</i> . . . . .	91
C.15. Corrección por pendiente, número de Shields, Reynolds de la partícula y número de Galileo modificado, <i>E1 - E4</i> . . . . .	92

C.16. Corrección por pendiente, número de Shields, Reynolds de la partícula y número de Galileo modificado, $E5 - E8$ . . . . .	93
C.17. Corrección por pendiente, número de Shields, Reynolds de la partícula y número de Galileo modificado, $E9 - E12$ . . . . .	94
C.18. Corrección por pendiente, número de Shields, Reynolds de la partícula y número de Galileo modificado, $E13 - E16$ . . . . .	95
C.19. Corrección por pendiente, número de Shields, Reynolds de la partícula y número de Galileo modificado, $E17 - E21$ . . . . .	96

# Índice de Ilustraciones

2.1. Fórmulas desarrolladas para calcular el número de Reynolds crítico donde inicia la transición de flujo laminar a turbulento, $Re_{MRc}$ , en función del índice de flujo $n$ . . . . .	7
2.2. Diagrama de Shields con predicción de formas de fondo para flujos en contornos abiertos. . . . .	9
2.3. Diagrama de fase de patrones de dunas para flujo laminar en tuberías. . . . .	12
2.4. Esquema del sistema de medición FTP con ejes ópticos paralelos y sus parámetros reelevantes. . . . .	15
2.5. Esquema de la metodología para corregir por refracción las mediciones del sistema FTP. . . . .	16
3.1. Esquema de la instalación experimental original, indicando los circuitos de recirculación. . . . .	18
3.2. Esquema de la zona de estudio y del sistema de medición FTP. . . . .	19
3.3. Esquema del sistema de ingreso de partículas. . . . .	20
3.4. Esquema de la instalación experimental con las modificaciones implementadas. . . . .	22
3.5. Constantes paramétricas en función de la razón de aspecto $E$ , para calcular el número de Reynolds $Re_{KT}$ , en ductos de sección rectangular. . . . .	27
3.6. Ejemplo de la metodología para calcular la amplitud $A$ de una duna. . . . .	32
3.7. Ejemplo de la metodología para calcular la celeridad $c$ de una duna. . . . .	33
4.1. Diagrama de Shields obtenido a partir del número de Reynolds de la partícula, modificado para fluidos pseudoplásticos, $Re_{*p}^K$ , y el esfuerzo de corte adimensional del lecho, corregido por pendiente, $\tau_{**lecho}$ . . . . .	37
4.2. Diagrama de Shields con los ejes modificados, mostrando solamente los puntos clasificados como arrastre incipiente. . . . .	39
4.3. Relación experimental entre el factor de fricción de Darcy, $f$ , y el número de Reynolds, modificado para fluidos pseudoplásticos, $Re_{KT}$ . . . . .	40
4.4. Registro temporal de la altura relativa del lecho, $\eta/d_s$ , en el punto central de la zona de medición FTP; y del número de Reynolds, modificado para fluidos pseudoplásticos, $Re_{KT}$ . Experimentos con pendiente nula. . . . .	41
4.5. Registro temporal de la altura relativa del lecho, $\eta/d_s$ , en el punto central de la zona de medición FTP; y del número de Reynolds, modificado para fluidos pseudoplásticos, $Re_{KT}$ . Experimentos con pendiente en contra. . . . .	42

4.6. Registro temporal de la altura relativa del lecho, $\eta/d_s$ , en el punto central de la zona de medición FTP; y del número de Reynolds, modificado para fluidos pseudoplásticos, $Re_{KT}$ . Experimentos con pendiente a favor. . . . .	43
4.7. Registro de la evolución en el tiempo del número de Shields del lecho, corregido por pendiente, $\tau_{**lecho}$ . . . . .	44
4.8. Comparación en tres dimensiones de las formas de fondo generadas bajo la acción de un fluido pseudoplástico, en distintos tiempos. . . . .	45
4.9. Registro temporal de la amplitud relativa de las formas de fondo, $A/d_s$ , obtenidas experimentalmente. . . . .	48
4.10. Registro temporal de la celeridad relativa de las formas de fondo, $c/v$ , obtenidas experimentalmente. . . . .	49
4.11. Relación entre el exceso de esfuerzo de corte $\tau_{**} - \tau_{**c}$ y la celeridad de onda $c$ , adimensionalizada por la velocidad friccional $u_{*lecho}$ y por un término viscoso $(\rho_s - \rho)gd_s^3/A\mu_{eff}$ . . . . .	50
4.12. Relación entre la celeridad adimensional $c_b$ y el exceso de esfuerzo de corte multiplicado por el esfuerzo de corte adimensionalizado. . . . .	51
4.13. Registro temporal de la longitud relativa de las dunas, $\lambda/d_s$ , obtenidas experimentalmente. . . . .	52
4.14. Diagrama de formación de formas de fondo, en función de parámetros adimensionales que consideran la reología del fluido, en tuberías bajo régimen laminar. . . . .	55
A.1. Bernoulli medido en función de la posición de los transductores de presión. . . . .	66
A.2. Relación entre la tasa de deformación angular $\dot{\gamma}$ y el esfuerzo de corte $\tau$ de una mezcla de agua con CMC. . . . .	67
A.3. Comparación entre altura del lecho al centro de la zona de medición, $\eta_{PC}$ y la altura del flujo promedio $h_{prom}$ . . . . .	68