



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

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN TÚNEL PARA EL  
ESTUDIO DE FORMAS DE FONDO CON FLUJO OSCILATORIO Y  
UNIDIRECCIONAL DE UN FLUIDO NO-NEWTONIANO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

SEBASTIÁN RICARDO ALDAY SAGREDO

PROFESOR GUÍA:  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SANTIAGO MONTSERRAT MICHELINI  
YARKO NIÑO CAMPOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por FONDECYT a través del proyecto de investigación N°1161751.

SANTIAGO DE CHILE  
2017



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: SEBASTIÁN RICARDO ALDAY SAGREDO  
FECHA: 2017  
PROF. GUÍA: ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN TÚNEL PARA EL  
ESTUDIO DE FORMAS DE FONDO CON FLUJO OSCILATORIO Y  
UNIDIRECCIONAL DE UN FLUIDO NO-NEWTONIANO

La presente memoria para optar al título de ingeniero civil consiste en el diseño, construcción y puesta en marcha de un túnel construido en acrílico. El objetivo de la instalación es estudiar las formas de fondo que se formen en un lecho granular no-cohesivo depositado en el fondo debido a un flujo oscilatorio inducido por el movimiento de un pistón en solitario y en conjunto a un flujo unidireccional base. Los fluidos que se utilizarán en el túnel serán soluciones de CMC a distintas concentraciones y agua. El CMC es un espesante en polvo, que al mezclarlo con agua genera un fluido no-newtoniano pseudoplástico, por lo que se tienen condiciones distintas respecto a los demás túneles de agua que se han construido en otras partes del mundo (Cataño-Lopera et al. (2007), Ribberink & Al-Salem (1994), O'Donoghue & Clubb (2001), Calantoni et al. (2013)). Hasta el momento el flujo oscilatorio de un fluido no-newtoniano sobre un lecho granular no cohesivo no ha sido estudiado. En el diseño del mecanismo que genera las oscilaciones dentro de la tubería como en la elección de la bomba que realiza la recirculación se tomó en consideración que sería un fluido no-newtoniano el que se utilizaría en la instalación. La principal diferencia se produce en el cálculo de las pérdidas de energía generadas por la mayor viscosidad del fluido pseudoplástico.

Luego del diseño y construcción, se procedió a la puesta en marcha de la instalación, etapa en la que se establecieron los rangos de funcionamiento en los cuales se puede utilizar, tanto del tamaño de las partículas que forman el lecho de arena, la velocidad oscilatoria y unidireccional del flujo, la amplitud y frecuencia del movimiento del pistón.

La puesta en marcha del túnel de acrílico incluyó la instalación de sistemas de medición para la obtención de resultados. Estas mediciones incluyen los siguientes parámetros: presión, temperatura, caudal, campo de velocidades del flujo, frecuencia del movimiento, además de la visualización de las formas de fondo. Para ello se instalaron transductores de presión a lo largo de la tubería, termómetro, flujómetro, tacómetro, sistema PIV y FTP. Además, se instaló un intercambiador de calor que permite que los experimentos tengan una temperatura relativamente uniforme, para así no tener cambios en la reología del fluido.



*A mi mamá, papá y hermana.*



# Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a mi mamá, quien ha estado siempre apoyándome y me ha soportado siempre, cuando estoy en otra y cuando estoy en la de ella. A mi papá, con quien he pasado menos tiempo, pero su apoyo es igual de incondicional. A mi hermana, que con nuestras diferencias, siempre voy a estar para ti.

A Nitza, con quien nos hemos acompañado este último tiempo en la vida y en la universidad. Has sido muy importante en este cansador proceso, en largas jornadas de laboratorios y escribiendo hasta tarde en la noche. Gracias por llevarme al estadio a seguir al equipo, algo que me habría gustado hacer siempre y mejor contigo.

A la gente de civil. En especial a los del laboratorio, Manuel y JD, quienes, a su ritmo, fueron fundamentales para hacer mi memoria. Y a todos los que componen el departamento, Jackie, Paty, Mónica, Geovanni, y tantos otros que dan vida a civil. A mi profesor guía, que me permitió terminar en un tiempo prudente.

A mis amigos de siempre, Yayo, Pablo, Kevin, Morales, Axel, Potito, con los que he compartido grandes momentos, tremendos carretes y conversaciones de la vida.

A mis amigos de hace menos, pero igual de importantes, Franco, Cabecilla, Javier y Jorge. Han sido muy importantes en los últimos años y un tremendo cable a tierra para ver la realidad tal cual es, cuando uno se nubla en la universidad. Compartiremos muchos más asaditos.

A los compañeros de civil. Traslaviña, que me ayudó en parte de esta memoria y con quien compartimos bastas derrotas con el equipo de baby, Román y Peillard. A los de la pecera, ya se va a terminar el tortuoso proceso.

Muchas gracias a toda la gente que me ha acompañado de alguna u otra forma en este proceso. Este es solo un paso.





# Tabla de Contenido

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .                                               | 1         |
| 1.2. Objetivos . . . . .                                                | 3         |
| 1.2.1. General . . . . .                                                | 3         |
| 1.2.2. Específicos . . . . .                                            | 3         |
| 1.3. Contenidos del informe . . . . .                                   | 4         |
| <b>2. Revisión bibliográfica</b>                                        | <b>5</b>  |
| 2.1. Otras instalaciones experimentales . . . . .                       | 5         |
| 2.2. Fluidos no-newtonianos y flujo en tuberías rectangulares . . . . . | 9         |
| 2.3. Flujo oscilatorio . . . . .                                        | 11        |
| 2.4. Formas de fondo . . . . .                                          | 12        |
| 2.5. Sistemas de medición . . . . .                                     | 17        |
| 2.5.1. PIV . . . . .                                                    | 17        |
| 2.5.2. FTP (Perfilometría por Transformada de Fourier) . . . . .        | 19        |
| <b>3. Metodología</b>                                                   | <b>22</b> |
| 3.1. Instalación experimental . . . . .                                 | 22        |
| 3.1.1. Preparación de la mezcla . . . . .                               | 24        |
| 3.1.2. Túnel principal . . . . .                                        | 24        |
| 3.1.3. Mecanismo de oscilación . . . . .                                | 28        |
| 3.1.4. Sistema de recirculación . . . . .                               | 37        |
| 3.1.5. Sistemas de medición del flujo y formas de fondo . . . . .       | 40        |
| 3.1.6. Otros instrumentos utilizados . . . . .                          | 42        |
| 3.2. Puesta en marcha . . . . .                                         | 43        |
| <b>4. Resultados</b>                                                    | <b>45</b> |
| 4.1. Construcción de la instalación experimental . . . . .              | 45        |
| 4.2. Puesta en marcha . . . . .                                         | 49        |
| 4.2.1. Pruebas realizadas en la puesta en marcha . . . . .              | 49        |
| 4.2.2. Análisis general de la puesta en marcha . . . . .                | 64        |
| 4.3. Recomendaciones de la instalación . . . . .                        | 65        |
| <b>5. Conclusiones</b>                                                  | <b>66</b> |
| <b>Bibliografía</b>                                                     | <b>67</b> |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Anexos</b>                                                         | <b>72</b> |
| <b>Anexo A. Cálculo Potencia</b>                                      | <b>73</b> |
| <b>Anexo B. Calibración Transductores de Presión</b>                  | <b>76</b> |
| <b>Anexo C. Obtención índices de flujo y consistencia</b>             | <b>77</b> |
| <b>Anexo D. Cálculo Errores</b>                                       | <b>81</b> |
| D.1. Error amplitud de la oscilación en el túnel . . . . .            | 81        |
| D.2. Errores de los índices de consistencia y de flujo . . . . .      | 82        |
| D.3. Errores en calibración de los transductores de presión . . . . . | 83        |

# Índice de Tablas

|                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Constantes geométricas para sección rectangular (Kozicki et al., 1966). . . . .                                                                                                                                | 10 |
| 2.2. Cuadro comparativo entre sistemas PIV y PTV. . . . .                                                                                                                                                           | 18 |
| 3.1. Transductores de presión asociadas a su posición en el túnel y sus ecuaciones de presión, donde $P_i$ corresponde a la presión en metros columna de agua y $T_i$ a la medida del transductor en volts. . . . . | 28 |
| 3.2. Características del motorreductor. . . . .                                                                                                                                                                     | 34 |
| 3.3. Curva característica de la bomba. . . . .                                                                                                                                                                      | 37 |
| 3.4. Parámetros de las pruebas con agua realizadas en la puesta en marcha. . . . .                                                                                                                                  | 44 |
| 3.5. Parámetros de las pruebas con solución de CMC realizadas en la puesta en marcha. . . . .                                                                                                                       | 44 |
| B.1. Datos de calibración de los transductores de presión. . . . .                                                                                                                                                  | 76 |
| C.1. Datos de tasa y esfuerzo de corte para cálculo de reología. Parte 1. . . . .                                                                                                                                   | 78 |
| C.2. Datos de tasa y esfuerzo de corte para cálculo de reología. Parte 2. . . . .                                                                                                                                   | 79 |
| C.3. Datos de tasa y esfuerzo de corte para cálculo de reología. Parte 3. . . . .                                                                                                                                   | 80 |
| D.1. Errores y valores utilizados para el cálculo de la amplitud de la oscilación en el túnel de prueba. . . . .                                                                                                    | 81 |
| D.2. Desviación estándar de las mediciones de los transductores de presión durante la calibración . . . . .                                                                                                         | 83 |

# Índice de Ilustraciones

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Esquema del LOWST Pedocchi & García (009b). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 6  |
| 2.2. Esquema de túnel oscilatorio utilizado por Admiraal et al. (2006). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 8  |
| 2.3. Esquema de túnel oscilatorio utilizado por An et al. (2013) en forma de O. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 8  |
| 2.4. Tipos de comportamiento de fluidos no-newtonianos y newtonianos (Chhabra & Richardson, 2008). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 9  |
| 2.5. Principales formas de fondo (Dey, 2014). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 13 |
| 2.6. Diagrama de fase para flujos combinados de campos de estabilidad de las formas de fondo en un gráfico de velocidad oscilatoria y unidireccional $U_o$ vs $U_u$ , donde NM: sin movimiento, SR: rizados simétricos, SD: dunas simétricas, AR: rizados asimétricos, QAR: rizados cuasi-asimétricos, AD: dunas asimétricas, USPB: etapa superior de fondo plano, CR: rizo de corriente, CD: duna de corriente. Líneas sólidas representan transición abrupta, líneas punteadas representan transición gradual y líneas con signo de interrogación representan transiciones sin información experimental (Perillo et al., 2014). . . . . | 14 |
| 2.7. Predictor formas de fondo desarrollado por Liu (1957) y mejorado por Simons (1961) para flujos unidireccionales. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 16 |
| 2.8. Predictor formas de fondo desarrollado por Chabert & Chauvin (1963) para flujos unidireccionales. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 17 |
| 2.9. Izquierda: Marco euleriano utilizado en el método PIV. Derecha: Marco lagrangiano utilizado en método PTV. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 18 |
| 2.10. Esquema del sistema FTP con disposición en ejes paralelos (Takeda & Mutoh, 1983). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 20 |
| 3.1. Esquema de la instalación experimental. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 23 |
| 3.2. Esquema de la sección transversal del túnel. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 25 |
| 3.3. Fotografía del túnel de prueba. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 25 |
| 3.4. Izquierda: Corte transversal rectificador de flujo. Derecha: Vista lateral rectificador de flujo y trampa de arena. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 26 |
| 3.5. Esquema de la sección transversal del túnel. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 26 |
| 3.6. Transductor de presión instalado en el túnel de prueba. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 27 |
| 3.7. Gráfico de las medidas teóricas de presión donde se ubican los transductores 1, 4 y 6 en el túnel. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 28 |
| 3.8. Esquema cámara donde se ubica el pistón (Vista frontal). . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 29 |
| 3.9. Esquema simplificado del problema. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 30 |
| 3.10. Ajustes polinómicos de las constantes a y b en función de la relación de forma E. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 32 |

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.11. Potencia necesaria para mover el fluido en función del tiempo. . . . .                                                                                                                          | 33 |
| 3.12. Presión en la superficie bajo el pistón. . . . .                                                                                                                                                | 34 |
| 3.13. Fotografía lateral del motorreductor instalado en la estructura. . . . .                                                                                                                        | 35 |
| 3.14. Fotografía del variador de frecuencia instalado en el Laboratorio Francisco J. Domínguez. . . . .                                                                                               | 36 |
| 3.15. Esquema de funcionamiento de biela-manivela y pistón. . . . .                                                                                                                                   | 36 |
| 3.16. Esquema de la recirculación del flujo en el intercambiador de calor. Izquierda: Vista isométrica. Derecha: Corte transversal. . . . .                                                           | 38 |
| 3.17. Imagen de sensor de caudal Siemens MAG3100. . . . .                                                                                                                                             | 39 |
| 3.18. Imagen de transmisor de señal Siemens MAG5000. . . . .                                                                                                                                          | 39 |
| 3.19. Ubicación de los sistemas de medición en el túnel. . . . .                                                                                                                                      | 40 |
|                                                                                                                                                                                                       |    |
| 4.1. Fotografía general de la instalación. Las dos chimeneas son verticales, sólo se ven inclinadas por la perspectiva de la fotografía. . . . .                                                      | 46 |
| 4.2. Fotografía del mecanismo de oscilación. . . . .                                                                                                                                                  | 47 |
| 4.3. Fotografía de flujómetro. . . . .                                                                                                                                                                | 47 |
| 4.4. Fotografía de la trampa de arena del extremo contrario al émbolo y su respectivo desagüe. . . . .                                                                                                | 48 |
| 4.5. Fotografía del termómetro de pinchar en su lugar de funcionamiento. . . . .                                                                                                                      | 48 |
| 4.6. Presión medida por los transductores 1, 2, 4 y 6 durante la Prueba 3. . . . .                                                                                                                    | 51 |
| 4.7. Fotografía en perspectiva de las formas de fondo generadas en el túnel con agua. Las líneas que se ven sobre el lecho son la proyección de la imagen que se utiliza para el sistema FTP. . . . . | 52 |
| 4.8. Presión medida por los transductores 1, 2, 4 y 6 durante la Prueba 4. . . . .                                                                                                                    | 53 |
| 4.9. Fotografía lateral de las formas de fondo que se generaron durante la prueba 4. . . . .                                                                                                          | 53 |
| 4.10. Fotografía lateral de la trampa de arena al finalizar la prueba 4. . . . .                                                                                                                      | 54 |
| 4.11. Medición de los transductores de presión 1, 2, 4 y 6 durante la prueba 5. . . . .                                                                                                               | 55 |
| 4.12. Medición de 6 transductores de presión al final de la prueba 5 con el lecho deformado. . . . .                                                                                                  | 56 |
| 4.13. Fotografía lateral de las formas de fondo que se generaron durante la prueba 5 con escala de 50 cm en la parte superior. . . . .                                                                | 56 |
| 4.14. Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 6. . . . .                                                                                                                             | 57 |
| 4.15. Resultado de perfilometría por transformada de Fourier al final de la prueba 6 (Frecuencia oscilación: 26 RPM). . . . .                                                                         | 58 |
| 4.16. Resultado de perfilometría por transformada de Fourier al final de la prueba 6 (Frecuencia oscilación: 26 RPM; Q: 42 l/min). . . . .                                                            | 58 |
| 4.17. Túnel de prueba con <i>fondo falso</i> instalado. . . . .                                                                                                                                       | 59 |
| 4.18. Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 30 RPM. . . . .                                                                                         | 60 |
| 4.19. Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 35 RPM. . . . .                                                                                         | 60 |
| 4.20. Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 40 RPM. . . . .                                                                                         | 61 |
| 4.21. Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 20 RPM y recirculación de 60 l/min. . . . .                                                             | 61 |

|                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.22. Resultado del campo de velocidades obtenido con PivLab en distintos tiempos de la oscilación. Izquierda: Velocidad negativa. Centro: Velocidad nula. Derecha: Velocidad positiva. . . . . | 62 |
| 4.23. Perfiles de velocidad en 3 tiempos distintos. . . . .                                                                                                                                     | 63 |
| 4.24. Perfiles de velocidad para tres secciones (izquierda, centro y derecha) en un mismo tiempo con velocidades negativas. . . . .                                                             | 63 |
| A.1. Esquema simplificado del problema utilizado para el cálculo de la potencia del motor. . . . .                                                                                              | 73 |

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Las ondas sedimentarias se generan cuando el flujo de un fluido pasa sobre un lecho de sedimentos y, debido a la interacción de ambos, deforma el lecho. Este tipo de fenómeno es muy común en nuestro planeta, donde se generan este tipo de formas de fondo por corrientes de agua en ríos y mares, o de viento en la superficie terrestre. Las formas de fondo también pueden ser generadas por flujos donde hay mezclas de fluido y sólidos, los que tienen una reología distinta. Esto sucede por ejemplo en flujos piroclásticos o en condiciones de mal funcionamiento en el transporte hidráulico de sólidos en tuberías utilizadas en la industria minera. Los estudios teóricos para explicar el origen de las formas de fondo los inició Kennedy en su trabajo de 1963, donde analizó la mecánica de dunas y antidunas en canales abiertos (Kennedy, 1963). Posteriormente lo estudió en conductos cerrados y en el desierto (Kennedy, 1964).

Los fenómenos mencionados anteriormente son provocados por flujos unidireccionales, pero las formas de fondo también pueden observarse en situaciones de flujo oscilatorio y superposición de flujo oscilatorio y unidireccional. Esto puede ser observado en las olas y las corrientes del mar.

Para el estudio de las formas de fondo es necesario conocer el campo de velocidades del flujo, ya que la interacción entre el flujo y el sedimento puede cambiar la forma del lecho, y la forma del lecho puede hacer cambiar la velocidad del flujo. Esta interacción se da hasta que se alcanza un eventual equilibrio.

Con el objetivo de estudiar la relación entre las formas de fondo, incluido el transporte de sedimentos y el flujo oscilatorio, es que se han realizado investigaciones teóricas y experimentales, tanto con flujos en presión como en contornos abiertos. Se han construido túneles y canales con fin experimental en varias universidades y centros de investigación, en diferentes partes del mundo. Es el caso del Large Oscillating Water-Sediment Tunnel (LOWST) (Cataño-Lopera et al., 2007) , el Large Oscillating Water Tunnel (LOWT) (Ribberink & Al-Salem, 1994), Aberdeen Oscillatory Flow Tunnel (A-OFT) (O'Donoghue & Clubb, 2001)

o el Small Oscillatory Flow Tunnel (SOFT) (Calantoni et al., 2013) y otras. Algunos de los canales que se han construido con fines similares son presentados en Bakhtyar et al. (2009) y Brevik & Bjørn (1979). Cabe destacar que en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez actualmente se encuentra en funcionamiento un canal con flujo oscilatorio que forma parte del mismo proyecto de investigación (Fondecyt 1161751).

En todas las instalaciones de las que se tiene referencia se ha utilizado agua, es decir, un fluido newtoniano. En el proyecto de investigación mencionado se extiende el alcance y se utiliza el flujo oscilatorio de un fluido no-newtoniano, tanto en un túnel, cuyo diseño, construcción y puesta en marcha son parte de esta memoria de título, como en un canal abierto.

El objetivo de esta memoria es el diseño, construcción y puesta en marcha de un túnel donde se genere un flujo oscilatorio y tenga la posibilidad de generar superposición de flujos mediante la recirculación del fluido no-newtoniano.

El diseño comprende principalmente dos aspectos. El primero de ellos es la definición de las dimensiones del mismo túnel, incluyendo trampas de sedimento, rectificadores de flujo (“honeycomb”), características del material granular, etc. El segundo es el mecanismo que generará el flujo oscilatorio, el que consistirá en un pistón accionado por un motor. Esto requiere determinar la potencia del motor, considerando principalmente las pérdidas friccionales, debido a las características altamente viscosas del fluido no-newtoniano que se utilizará, así como la fricción del pistón. En esta parte del diseño se debe incluir además la dimensión y tipo de motor y variador de frecuencia, los que en su conjunto permitirán variar la frecuencia del movimiento oscilatorio dependiendo del experimento que se quiera realizar.

La instalación experimental se ubicó en el Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y fue construido por personal del mismo laboratorio. El material principal utilizado en la construcción del aparato fue acrílico, el que brinda la posibilidad de observar los procesos que ocurren dentro del túnel y es fácil de manejar en el laboratorio. Además, tiene un índice de refracción igual al del agua lo que hace más simple el procesamiento de los datos obtenidos por medios ópticos.

La puesta en marcha consistió en una serie de pruebas que permitieron definir los rangos de los principales parámetros que afectan los experimentos a desarrollar. Estos son el tamaño de partículas del lecho, la amplitud y frecuencia del pistón, la velocidad del flujo y el caudal de sentido único. Estos rangos deben permitir poder obtener el arrastre incipiente en flujo oscilatorio de un fluido no-newtoniano y la visualización de formas de fondo a lo largo del lecho.



## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. General

El objetivo de esta memoria de título es el diseño, construcción y puesta en marcha de una instalación experimental consistente en un túnel donde se generan flujos oscilatorios y unidireccionales de un fluido no newtoniano en interacción con el lecho y se puedan observar y registrar las formas de fondo que se generan.

### 1.2.2. Específicos

El estudio experimental tiene cuatro objetivos específicos:

1. Diseño del túnel principal, estanques verticales ubicados en los extremos del túnel, trampas de arena y rectificadores de flujo. Esta instalación debe ubicarse en el laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez de la Universidad de Chile.
2. Diseño del mecanismo que generará la componente oscilatoria del flujo dentro del túnel y del mecanismo que permitirá la recirculación del flujo para generar la componente unidireccional del flujo.
3. Construcción del túnel.
4. Puesta en marcha del túnel en base a pruebas que utilizan agua y un fluido no-newtoniano (solución de CMC), con el objetivo de obtener los rangos para los parámetros representativos del experimento, como la amplitud del movimiento del pistón, período de las oscilaciones, velocidad del flujo, tamaño de los granos de arena del lecho, y sus diferentes combinaciones.

### 1.3. Contenidos del informe

El informe de memoria de título consta de un resumen y 5 capítulos, los que se enumeran y definen a continuación:

- Resumen: Se expone el tema de memoria de título y los principales resultados.
- Introducción: Se explica la motivación del tema de memoria, cuál será su fin y en qué está enmarcado y se presentan los objetivos generales y específicos del trabajo.
- Revisión bibliográfica: Se presenta la revisión de estudios preliminares, donde se presentan las instalaciones experimentales que han sido utilizadas para estudiar fenómenos similares a los que se pretenden analizar. Se exponen los principales conceptos y parámetros adimensionales involucrados en el diseño y construcción de la instalación experimental. Finalmente, se exponen los sistemas de medición que serán implementados en la instalación, para la caracterización de las formas de fondo y la velocidad del flujo.
- Metodología: Se explica el diseño de la instalación experimental, sus principales parámetros y materiales, así como el procedimiento de puesta en marcha del aparato.
- Resultados: Se presentan los resultados de la construcción de la instalación experimental y de la puesta en marcha de la misma, así como recomendaciones para su uso.
- Conclusiones: Se presentan los alcances de la instalación experimental, sus rangos de funcionamiento y cuáles pueden variarse para un posterior estudio de formas de fondo.

# Capítulo 2

## Revisión bibliográfica

### 2.1. Otras instalaciones experimentales

En la literatura existe una serie de instalaciones experimentales de tuberías de sección cuadrada o circular con componente de flujo oscilatoria, con y sin presencia de caudal base. Cada una de ellas tiene ventajas y desventajas y han sido utilizadas para diversos estudios.

Calantoni et al. (2013) estudiaron la evolución de las formas de fondo, en específico ondas de arena, con una distribución bimodal del tamaño de partículas bajo un flujo oscilatorio asimétrico en el Small Oscillatory Flow Tunnel (S-OFT) ubicado en el Sediment Dynamics Laboratory perteneciente al Naval Research Laboratory de Estados Unidos. Este consiste en un túnel de flujo en forma de U con una sección de prueba de 2 metros de largo, una sección transversal de  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  y un lecho de 35 cm de profundidad. El flujo oscilatorio es producido por un pistón ubicado en uno de los extremos del túnel el que es accionado por un motorreductor unido a una biela. Su frecuencia es regulada por un variador de frecuencia, el que permite un periodo mínimo,  $T$ , de 2,3 s. La oscilación tiene cuatro posibles amplitudes, las que se fijan en cuatro puntos del motorreductor. La instalación está construida en acrílico y cuenta con una webcam que graba a 30 fps y tiene un tamaño de  $1600 \times 1200$  pixeles por cuadro. Su campo visual es de 1 m en el centro de la sección de prueba y las imágenes fueron procesadas mediante un código de MATLAB para extraer la interfaz agua-sedimento y aplicar la transformación espacial correctiva a 2D (cambiar perspectiva de la fotografía a plano longitudinal). Las amplitudes utilizadas en este experimento fueron 8,7; 17,5 y 26,2 cm; y sus períodos 2,4; 3,4 y 5,3 s, respectivamente. Los diámetros característicos de la arena,  $D_{50}$ , ocupados son de 0,30 y 0,70 mm. La principal ventaja de esta instalación experimental es que la generación de movimiento del pistón es bastante simple mecánicamente y se utilizó para observar formas de fondo, para lo mismo que se requerirá la instalación de este estudio.

La gran mayoría de túneles de agua oscilatorios que se han construido son de grandes dimensiones. Es el caso del Large Oscillating Water Sediment Tunnel (LOWST), utilizado por Cataño-Lopera et al. (2007), quienes midieron el enterramiento de cilindros cortos en el sedimento bajo flujo oscilatorio. Además de los movimientos del cilindro en la longitudinal del túnel y las formas de fondo generadas y su influencia en el enterramiento del cilindro. La forma

de medición fue con fotografías desde diversos ángulos y sensores acústicos subacuáticos. El LOWST tiene 15 m de largo, con una sección de prueba de 12,5 m, una sección transversal de 0,6x0,8 m<sup>2</sup> (alto x ancho) y 0,6 m de lecho de arena (Figura 2.1). Este túnel posee dos bombas que pueden generar superposición de corrientes en el flujo oscilatorio. El mecanismo que genera las oscilaciones consta de tres pistones que deslizan, cada uno dentro de un cilindro de 0,78 m de diámetro, con una amplitud máxima nominal de 2,1 m. Se utilizan 3 servomotores para producir el movimiento de los pistones mediante un sistema de engranajes. Los pistones se pueden mover un máximo de 0,8 m<sup>3</sup>/s, con una velocidad máxima nominal de 2 m/s. La aceleración máxima del pistón es de 2,1 m/s<sup>2</sup>. Para evitar efectos de golpe de ariete, las primeras 5 a 10 oscilaciones se realizan lentamente. El período de las oscilaciones tiene un mínimo de 2 segundos. Pedocchi & García (009b) ocuparon el LOWST para estudiar la morfología de las ondas generadas en el sedimento bajo flujo oscilatorio, midiendo las ondas mediante el sistema Pencil Sonar Beam.

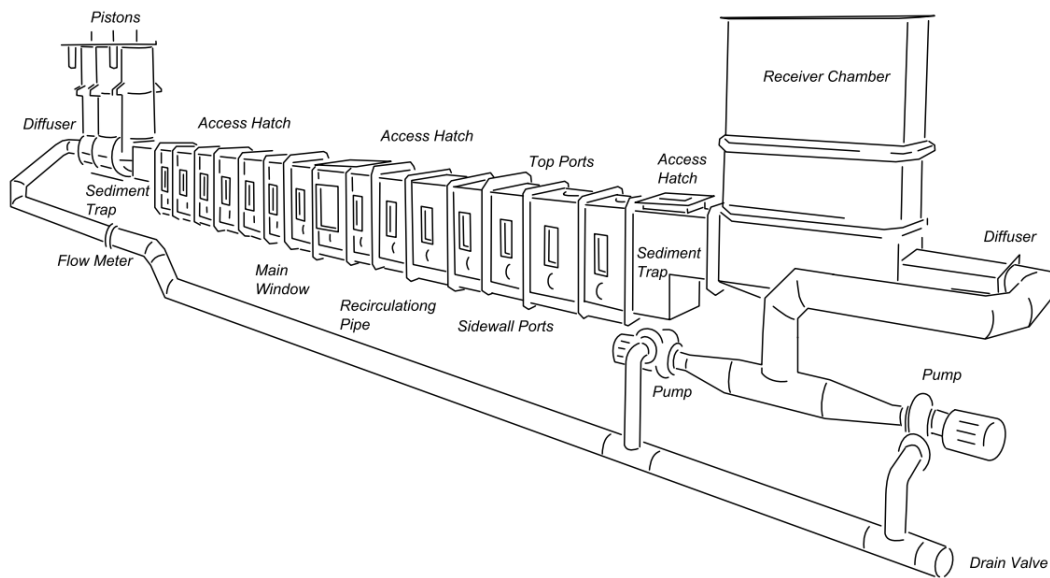


Figura 2.1: Esquema del LOWST Pedocchi & García (009b).

Otro túnel de características similares al LOWST es The large oscillating water tunnel (LOWT), ubicado en el Delft Hydraulics. Ribberink (1989) da detalles técnicos de la instalación. El LOWT consiste en un tubo en U con una sección de prueba de 15 m, una sección transversal de 0,8x0,3 m<sup>2</sup> (alto x ancho) y 0,3 m de profundidad para el lecho de sedimento. En cada extremo del túnel principal se ubican chimeneas de acero con un diámetro interno de 1 m, siendo la altura total de la instalación de 9 m. Las oscilaciones del flujo se generan con un pistón en uno de los extremos, mientras que el otro queda a presión atmosférica. El pistón está conducido por un servocilindro montado en la cima del tubo. El servocilindro mueve el pistón del túnel vertical en respuesta a la diferencia de presión hidráulica a ambos lados del pistón del servocilindro y es controlada por una válvula de control hidráulica/eléctrica. La frecuencia de las oscilaciones se controla con un oscilador armónico electrónico o con una unidad de cintas de papel perforado (para oscilaciones aleatorias), sistema utilizado en computadoras muy antiguas. La velocidad máxima del pistón es de 0,53 m/s y la amplitud máxima del pistón es 0,75 m. La principal desventaja de este túnel es que el mecanismo de funcionamiento del pistón está desactualizado. Las investigaciones desarrolladas en esta

instalación son sobre transporte de sedimentos, principalmente carga de fondo, en flujo oscilatorio y régimen laminar (Dohmen-Jansen et al., 2002; Hassan & Ribberink, 2005; Davies et al., 1997; Ribberink & Al-Salem, 1994).

En el Aberdeen Oscillatory Water Tunnel (AOWT) se han realizado trabajos en los que se identifican formas de fondo (O'Donoghue & Clubb, 2001) y concentraciones en el flujo (O'Donoghue & Wright, 2004). Este túnel tiene un largo de 16 *m* y 10 *m* de sección de prueba y su sección transversal es de 0,75x0,3 *m*<sup>2</sup> (alto x ancho). El lecho se ubica entre dos plataformas de 0,5 *m* de largo cada una y una altura de 20 *cm*. A los extremos del túnel tiene dos estanques abiertos a la atmósfera y las oscilaciones son generadas por un pistón que se mueve horizontalmente al final del túnel en la sección de prueba, controlado electrohidráulicamente por un sistema de retroalimentación de circuito cerrado. El mínimo periodo del movimiento del pistón es 2 *s*. Se utilizó un sensor de desplazamiento láser para medir la geometría de las ondas formadas en el sedimento, pero este método tiene la desventaja de necesitar que se drene un poco del túnel y se deba sacar el techo de la instalación para medir.

Dumas et al. (2005) utilizaron un túnel con forma de tubo en U de 15 *m* de largo y una sección transversal de 1,20x0,65 *m*<sup>2</sup> (alto x ancho). Los 5 *m* centrales del túnel principal cuentan con una placa removible para acceder al lecho del túnel y sus paredes son transparentes, pero el resto del túnel está hecho de propileno y reforzado con acero. Cuenta con un sistema de recirculación accionado por una bomba para la generación del flujo en un solo sentido y con dos pistones en los tanques verticales de los extremos del túnel que son unidos por una armadura que se mueve oscilatoriamente debido a la acción de un motor. En este túnel estudiaron las formas de fondo generadas y se compararon con las condiciones del lecho marino, además de medir las velocidades del flujo. El periodo mínimo de las oscilaciones en este estudio fue de 7,9 *s*, el tamaño de grano de la arena utilizada,  $D_{50}$ , va entre 0,13 y 0,23 *mm*, la velocidad del flujo llega a 0,2 *m/s*. Las formas de fondo generadas fueron muy variadas, bi y tridimensionales.

Otro túnel en forma de U que utiliza pistones para hacer las oscilaciones es el presentado por Lofquist (1977). Este tiene un largo de 2,5 *m*, y una sección transversal de 29,8x20,8 *cm*<sup>2</sup> (alto x ancho). El pistón es movido por un motor y un sistema de bielas y contrapesos. En los extremos del túnel principal tiene dos tubos de acero verticales. De similares características es el tubo en U ubicado en la Universidad de Cambridge, Inglaterra, utilizado por Dick & Sleath (1992) para estudiar el transporte de sedimentos en un flujo laminar oscilatorio, para lo que midieron las velocidades del flujo a lo largo de una sección. El túnel tiene una sección de prueba de 3,66 *m*, sección transversal de 0,45x0,31 *m*<sup>2</sup> (alto x ancho) y un lecho de sedimento de 0,14 *m*. Las oscilaciones del flujo son inducidas por un pistón accionado por un motorreductor a través de una biela. Su período mínimo es de 2 *s*.

En el Institute of Mechanics de la Chinese Academy of Science, Pu et al. (2001) estudiaron el escurrimiento del lecho marino en un túnel en U de 2,12 *m* de largo, de los cuales 0,8 *m* corresponden a la sección de prueba, su sección transversal es de 0,2x0,2 *m*<sup>2</sup> y el lecho tiene una profundidad de 0,035 *m*. El mecanismo para la generación de las oscilaciones es un soplador de aire ubicado en uno de los extremos con una válvula de mariposa que se cierra periódicamente con un período de 2,59 *s*. Para sus estudios utilizaron partículas de plexiglás de  $D_{50}=28,9$  y 19,1 *mm*.

Admiraal et al. (2006) estudiaron la trayectoria de los vórtices sobre las ondas formadas en el sedimento, para ello utilizaron un tubo en U de 3,92 m de largo, sección de prueba de 2,08 m y sección transversal de 0,23x0,21 m<sup>2</sup> (alto x ancho) (Figura 2.2). El período de oscilación mínimo es de 1,7 [s]. El mecanismo de generación de las oscilaciones es un pistón horizontal que se mueve gracias a un motor y deja ambos extremos del tubo en U a presión atmosférica. Se utilizó un sistema de PIV para la medición de las velocidades.

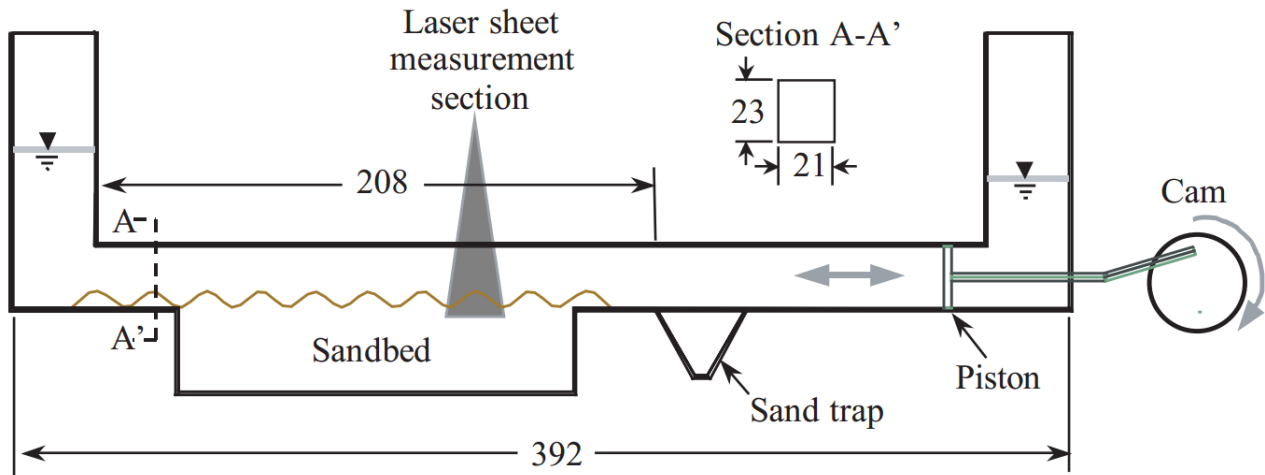


Figura 2.2: Esquema de túnel oscilatorio utilizado por Admiraal et al. (2006).

Otro de los tipos de túneles oscilatorios que existen en la actualidad en el mundo son cerrados, es decir, tienen forma de O (Figura 2.3) y, en general, son de gran tamaño. Uno de ellos es el desarrollado por An et al. (2013), el que tiene un largo de 24 m, sección de prueba de 17,6 m, sección transversal de 1,4x1 m<sup>2</sup> (alto x ancho). Tiene un rango de periodo de oscilación que va de los 5 a los 13 segundos y la velocidad del flujo en régimen permanente es de 3 m/s, mientras que en régimen oscilatorio tiene un máximo de 2,5 m/s. Para tener un control del flujo tiene ubicados transductores de presión a lo largo de la tubería. Otros túneles en forma de O son presentados en Hall et al. (1995), De Wit & Kranenburg (1997) y Sato et al. (1984).

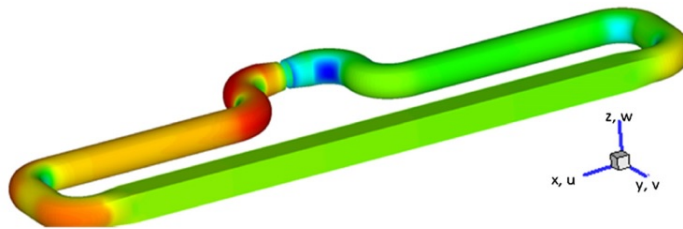


Figura 2.3: Esquema de túnel oscilatorio utilizado por An et al. (2013) en forma de O.

## 2.2. Fluidos no-newtonianos y flujo en tuberías rectangulares

En esta sección se presentan las características de fluidos no-newtonianos y del flujo de ellos en tuberías rectangulares, además de flujo oscilatorio de estos fluidos en tuberías. Cabe destacar que este último tema, que es el más relacionado al presente trabajo, es el menos trabajado en la literatura consultada.

Los fluidos no-newtonianos son definidos como aquellos en que la viscosidad aparente, esfuerzo de corte  $\tau$  dividido por la tasa de deformación angular  $\dot{\gamma}$ , no es constante. Los fluidos de tipo Ostwald de Waele o de ley de potencia son aquellos que siguen la relación  $\tau = K\dot{\gamma}^n$ , donde  $K$  corresponde al índice de consistencia y  $n$  al índice de flujo, ambos índices propiedades del fluido y son determinadas en laboratorio mediante un reómetro. Los fluidos pseudoplásticos ( $n < 1$ ), por lo general, tienen alta viscosidad por lo que, comparado con un fluido newtoniano, es más frecuente tener un flujo laminar (Chhabra & Richardson, 2008). Los tipos de fluidos no-newtonianos se presentan en la Figura 2.4.

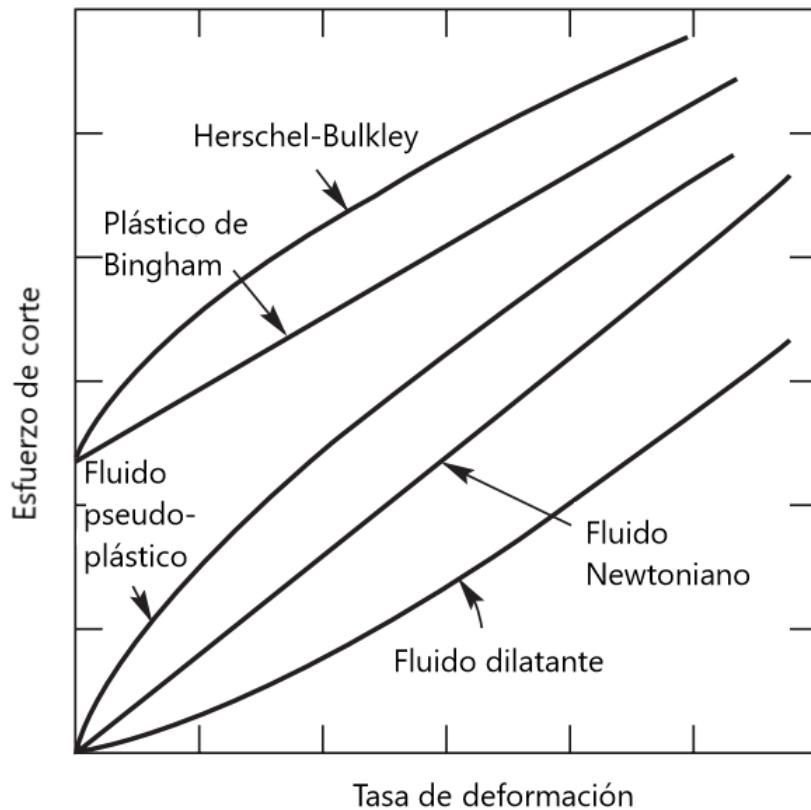


Figura 2.4: Tipos de comportamiento de fluidos no-newtonianos y newtonianos (Chhabra & Richardson, 2008).

El comportamiento de fluidos no-newtonianos de tipo Ostwald de Waele bajo un flujo oscilatorio con caudal base ha sido estudiado teóricamente por Daprà & Scarpi (2006). En particular en aquella investigación se encuentra la velocidad en la tubería y el problema se

resuelve de forma analítica y numérica.

El flujo de fluidos no-newtonianos en ductos de sección transversal arbitraria fue estudiado por Kozicki et al. (1966). En particular los factores de fricción encontrados en esta investigación son para régimen de flujo laminar, permanente e isotérmico. El estudio fue realizado de manera teórica, comparándolo con datos experimentales para verificar los resultados (Chhabra & Richardson, 2008). En su artículo definieron un número de Reynolds generalizado que depende de dos constantes características de la geometría de la sección. Para el caso de un fluido no-newtoniano tipo ley de potencia el número de Reynolds se define como:

$$Re_g = \left( \frac{n}{a + bn} \right)^n \frac{\rho U^{2-n} R_h^n}{K 8^{n-1}} \quad (2.1)$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes geométricas,  $R_h$  es el radio hidráulico y  $U$  la velocidad en la sección. Esta definición considera una viscosidad efectiva  $\mu_{eff} = K((a + bn)/n)^n (8v/4R_h)^{n-1}$ .

Esta definición permite recuperar la relación entre el número de Reynolds y el factor de fricción de Fanning:

$$f = \frac{16}{Re_g} \quad (2.2)$$

En el trabajo de Kozicki et al. (1966) se presenta la Tabla 2.1 con las constantes  $a$  y  $b$  para distintas geometrías de los ductos. En particular, se entrega para tuberías rectangulares. Las constantes  $a$  y  $b$  dependen de la relación geométrica entre el ancho y el alto del rectángulo  $E = h/b$ , llamada relación de aspecto.

Tabla 2.1: Constantes geométricas para sección rectangular (Kozicki et al., 1966).

| E    | a      | b      |
|------|--------|--------|
| 0,00 | 0,5000 | 1,0000 |
| 0,25 | 0,3212 | 0,8182 |
| 0,50 | 0,2440 | 0,7276 |
| 0,75 | 0,2178 | 0,6866 |
| 1,00 | 0,2121 | 0,6766 |

Todos estos valores y expresiones se tienen cuando el supuesto de flujo laminar se cumple. Kozicki & Tiu (1988) postulan que el criterio de Dodge-Metzner, es decir,  $Re_g = 2500$ , puede ser utilizado para definir el límite en el que existe flujo laminar para tuberías no circulares. Mishra & Tripathi (1971) generaron una expresión que solo depende del índice de flujo  $n$  y que usa el valor de  $Re = 2100$  como límite de flujo laminar para los fluidos newtonianos. La expresión corresponde a:

$$Re_{MT} = \frac{2100(4n + 2)(5n + 3)}{3(3n + 1)^2} \quad (2.3)$$



Otro de los números adimensionales importantes para este estudio es el número de Reynolds de la partícula, el que para fluidos newtonianos corresponde a:

$$Re_{*p} = \frac{u_{*lecho} d_p}{\nu} = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} \frac{d_p}{\nu} \quad (2.4)$$

donde  $u_{*lecho}$  es la velocidad friccional asociada al lecho,  $\tau_*$  es el esfuerzo de corte en el fondo,  $\rho$  es la densidad del agua,  $d_p$  es el diámetro característico de la partícula y  $\nu$  la viscosidad cinemática del fluido.

Para fluidos pseudoplásticos el número de Reynolds de la partícula,  $Re_{*p}^K$  es (Chhabra & Richardson, 2008):

$$Re_{*p}^K = \frac{\rho u_{*lecho}^{2-n} d_p^n}{K} \quad (2.5)$$

donde  $K$  es el coeficiente de consistencia y  $n$  el índice de flujo.

Otro adimensional importante es el número de Shields, ya que indica el inicio del movimiento de una partícula provocada por la velocidad de flujo de un fluido newtoniano. El número corresponde a:

$$\Theta = \frac{u_{*lecho}^2}{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d_p} \quad (2.6)$$

donde la nomenclatura es la misma utilizada durante este capítulo, con  $\rho_s$  la densidad del sedimento y  $\rho$  la densidad del fluido.

Las bombas más utilizadas para el transporte de fluidos no-newtonianos, sobretodo en la industria química, son las bombas centrífugas, pese a que su rendimiento y altura de elevación se deteriora a medida que se aumenta la viscosidad. También se debe tener cuidado con los sedimentos que se encuentren en el fluido, ya que el ingreso de ellos produce erosión en el impulsor y en la carcasa de la bomba. Pese a estas dificultades, las bombas centrífugas se utilizan debido a que, basado en una amplia experiencia práctica con una gran variedad de materiales y con impulsores de hasta más de 380 mm, se ha encontrado que el factor de eficiencia se deteriora solo en un 10 % (Chhabra & Richardson, 2008).

## 2.3. Flujo oscilatorio

El comportamiento de un lecho granular bajo un flujo oscilatorio ha sido estudiado desde la década de los 60' mediante túneles como los descritos en la sección 2.1. Como fruto de estos estudios es que existen números adimensionales que describen este tipo de fenómenos para fluidos newtonianos.

Es importante recordar que no se ha estudiado aún el efecto de una reología no-newtoniana en flujo oscilatorio, por lo que se entregan los adimensionales que corresponden a fluidos newtonianos. El número de Reynolds para el caso de flujo oscilatorio corresponde a (Andersen, 1999):

$$Re_w = \frac{U_{m\acute{a}x}A}{\nu} = \frac{A^2\omega}{\nu} \quad (2.7)$$

donde  $U_{m\acute{a}x}$  es la magnitud máxima de la velocidad oscilatoria,  $A$  es la amplitud de la oscilación,  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $\omega$  la frecuencia de oscilación.

El factor de fricción para el caso oscilatorio cambia debido a las diferencias que se observan en los flujos de la capa límite. Para flujo de capa límite oscilatoria sobre una superficie plana cubierta con partículas de tamaño  $D_{50}$ , la rugosidad hidráulica  $k$  se puede calcular como  $k = 2,5D_{50}$  (Jensen, 1989). Una expresión para el factor de fricción fue desarrollada por Pedocchi & García (009a) para condiciones en transición y rugosa. Para  $A/k > 30$ , con  $A$  la amplitud de la oscilación, y  $Re_w > 6,6 \cdot 10^4$ , el flujo es turbulento en paredes en transición lisa-rugosa y  $f_w$  se obtiene usando el siguiente esquema iterativo:

$$\frac{1}{\sqrt{f_w}} = 1,9 \ln \left( \frac{1}{1,5} \frac{A}{k} \sqrt{\frac{f_w}{2}} L_w \right) \quad (2.8)$$

donde

$$L_w = \left\{ \frac{1}{7,5} \left[ 1 - \exp \left( - \left\{ \frac{1}{90} \frac{Re_w}{A/k} \sqrt{\frac{f_w}{2}} \right\}^2 \right) \right] + \frac{1}{2,1} \left( \frac{Re_w}{A/k} \sqrt{\frac{f_w}{2}} \right)^{-1} \right\}^{-1} \quad (2.9)$$

Para el caso en que  $A/k > 30$  y  $Re_w < 6,6 \cdot 10^4$ , el flujo es considerado laminar y la solución analítica es

$$\frac{1}{\sqrt{f_w}} = \frac{Re_w^{1/4}}{\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

## 2.4. Formas de fondo

Las formas de fondo son nombradas de distintas maneras, pero la más utilizada es la presentada en Dey (2014), donde se describen rizos, dunas y antidunas. Dey (2014) ocupa estas definiciones para canales abiertos o ríos, pero se puede utilizar para tuberías.

Las formas de fondo que se pueden formar en flujos unidireccionales en canales, presentadas en la Figura 2.5 son rizos, dunas, antidunas y combinaciones de ellos.

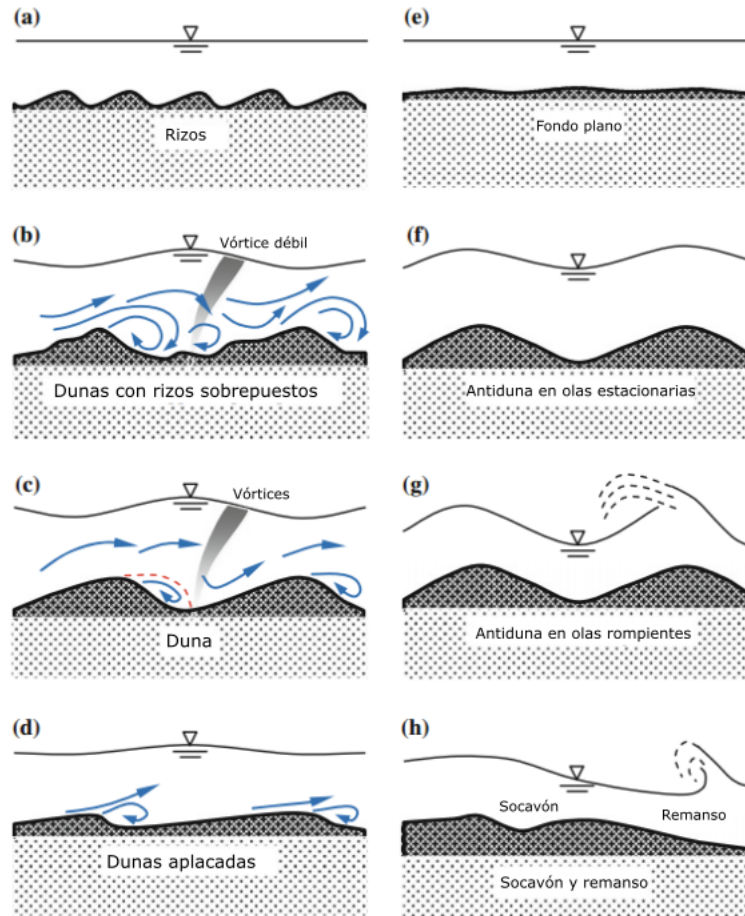


Figura 2.5: Principales formas de fondo (Dey, 2014).

En Perillo et al. (2014) se analizan las formas de fondo que se generan en un túnel con flujo oscilatorio y flujo base. Además, se propone una terminología para definir las formas de fondo y el flujo que los produce, los que se presentan a continuación. En el mismo artículo, se propone un diagrama de fase en función de la máxima velocidad oscilatoria y la máxima velocidad unidireccional, para los periodos de onda y tamaños de grano utilizados en sus experimentos (Figura 2.6).

## Tipo de flujo

- Flujo unidireccional:  $U_u \neq 0$  y  $U_o = 0$
- Flujo oscilatorio:  $U_u = 0$  y  $U_o \neq 0$
- Flujo combinado:  $U_u \neq 0$  y  $U_o \neq 0$
- Flujo combinado dominado por el oscilatorio: El máximo esfuerzo de corte del flujo en dirección hacia aguas arriba es mayor que el esfuerzo de corte crítico para el arrastre de sedimento.
- Flujo combinado dominado por una corriente: El máximo esfuerzo de corte del flujo hacia aguas arriba es menor al esfuerzo de corte crítico para el arrastre de sedimento.

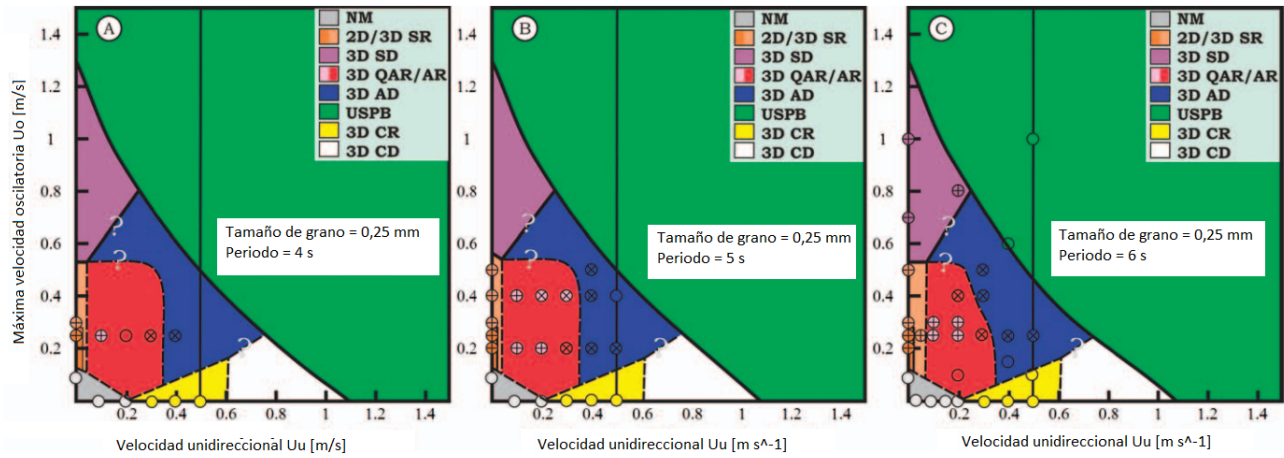


Figura 2.6: Diagrama de fase para flujos combinados de campos de estabilidad de las formas de fondo en un gráfico de velocidad oscilatoria y unidireccional  $U_o$  vs  $U_u$ , donde NM: sin movimiento, SR: rizos simétricos, SD: dunas simétricas, AR: rizos asimétricos, QAR: rizos cuasi-asimétricos, AD: dunas asimétricas, USPB: etapa superior de fondo plano, CR: rizo de corriente, CD: duna de corriente. Líneas sólidas representan transición abrupta, líneas punteadas representan transición gradual y líneas con signo de interrogación representan transiciones sin información experimental (Perillo et al., 2014).

Donde  $U_u$  es la velocidad del flujo unidireccional y  $U_o$  es la velocidad del flujo oscilatorio.

## Tipo de forma de fondo

- Sin movimiento:  $\theta < \theta_c$  y fondo plano.
- Rizo:  $\lambda < 0,5 m$  y  $\eta < 0,05 m$
- Dunas:  $\lambda > 0,5 m$  y  $\eta > 0,05 m$
- Régimen inferior:  $\theta \approx \theta_c$  y lecho plano
- Régimen superior:  $\theta > \theta_c$  y lecho plano

Donde  $\theta$  es el esfuerzo de corte,  $\theta_c$  es el esfuerzo de corte crítico para el arrastre de sedimento,  $\lambda$  la longitud de onda de la forma de fondo y  $\eta$  la altura de la forma de fondo.

## Geometría de la forma de fondo

- Bidimensional (2D): Los planos longitudinales son iguales a lo largo de todo el ancho de la forma de fondo.
- Dos dimensiones y media (2.5D): Los planos longitudinales no son iguales, pero una forma de fondo es continua.
- Tridimensional (3D): Los planos longitudinales no son iguales y una forma de fondo no es continua.

Las formas de fondo se han tratado de predecir en flujos oscilatorios con fluidos newtonianos, en particular agua. Pedocchi & García (009b) desarrollaron un predictor de altura y largo de las formas de fondo que se generan en un túnel a presión a partir del tamaño de partícula, la amplitud del movimiento del fluido y su velocidad. Para el largo de onda del rizo  $\lambda$  la ecuación es:

$$\frac{\lambda}{d} = 0,65 [(0,050U_{m\acute{a}x}/w_s)^2 + 1]^{-1} \quad (2.11)$$

Para la altura del rizo,  $\eta$ , se tiene:

$$\frac{\eta}{d} = 0,1 [(0,055U_{m\acute{a}x}/w_s)^3 + 1]^{-1} \quad (2.12)$$

Donde  $U_{m\acute{a}x}$  es la máxima velocidad de oscilación y  $w_s$  es la velocidad terminal de sedimentación de la partícula en un fluido en reposo. Las ecuaciones 2.11 y 2.12 son válidas para  $Re_p > 13$ , que es el rango en el que se realizaron sus experimentos, los cuales correspondieron a ambos tipos de regímenes, laminar y turbulento.

En el mismo estudio, se calculó también un predictor de dimensiones de la forma de fondo, si será bidimensional o tridimensional. El predictor dice que cuando  $Re_w < 7 \cdot 10^4$  las formas de fondo generadas serán de dos dimensiones, lo que se confirmó para el tamaño de partícula utilizado en sus experimentos,  $D_{50} = 250 \mu m$ .

En estudios experimentales realizados en un túnel en U, pero con régimen turbulento, donde se caracterizó la trayectoria de vórtices, realizados por Admiraal et al. (2006), la altura del rizo escala bien con la amplitud de la oscilación del flujo, por lo que el radio  $\eta/A$  permanece prácticamente constante, cercano a 0.2, independiente de las condiciones experimentales. Este estudio corrobora uno de los postulados de Sleath (1973), donde indica que mientras la cantidad de sedimento suspendido desde la parte más alta de los rizos permanece baja, el largo de la onda de los rizos está directamente relacionada con la amplitud de oscilación del flujo.

Nielsen (1981) desarrolló ecuaciones semiempíricas en canales para la altura y longitudes de los rizos provocados por flujos oscilatorios, las que están en función del número de movilidad (*mobility number*)  $\psi = (a\omega)^2/[(s-1)gd]$ , donde  $a$  es la magnitud de la mitad de la amplitud de la oscilación,  $\omega$  es la frecuencia de la onda y  $s$  es la densidad relativa del sedimento, y del parámetro de Shields  $\Theta' = 1/2f_w\psi$ , con  $f_w$  el factor de fricción para flujo oscilatorio. Para ondas regulares creadas en laboratorio se tiene:

$$\frac{\lambda}{a} = 2,2 - 0,345\psi^{-0,34} \quad (2.13)$$

$$\frac{\eta}{\lambda} = 0,182 - 0,24\Theta'^{1,5} \quad (2.14)$$

$$\frac{\eta}{a} = 0,275 - 0,022\sqrt{\psi} \quad (2.15)$$

Otra de las formas con las que se predicen formas de fondo es mediante relaciones gráficas. Las relaciones que se presentan a continuación corresponden a flujos unidireccionales. Liu (1957) desarrolló un predictor relacionando el cociente entre la velocidad de corte y la velocidad de sedimentación con el número de Reynolds de la partícula (Ec. 2.4) y el tamaño de partícula. Este método fue mejorado por Simons (1961) (Figura 2.7). Chabert & Chauvin (1963) desarrollaron un predictor a partir de la relación entre el número de Shields y el Reynolds de la partícula (Figura 2.8).

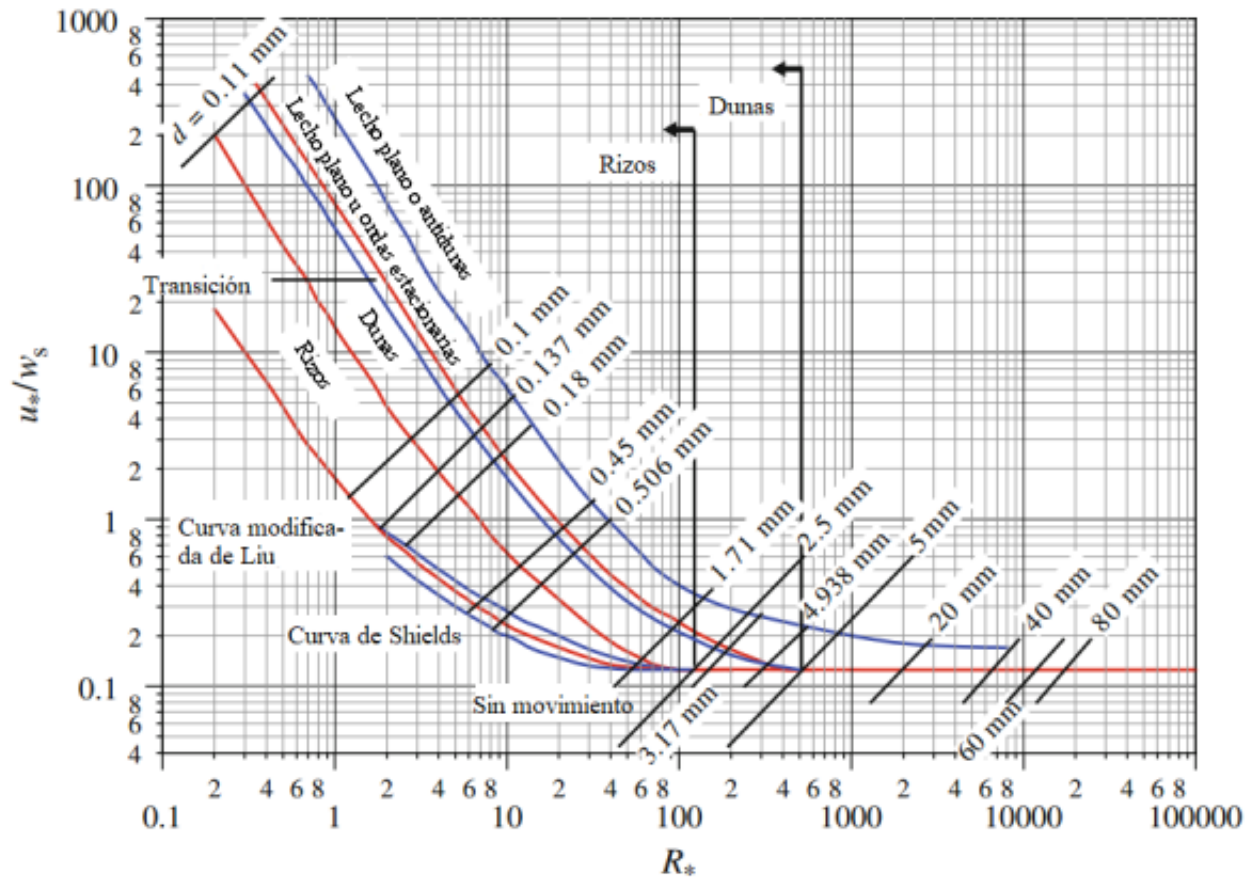


Figura 2.7: Predictor formas de fondo desarrollado por Liu (1957) y mejorado por Simons (1961) para flujos unidireccionales.

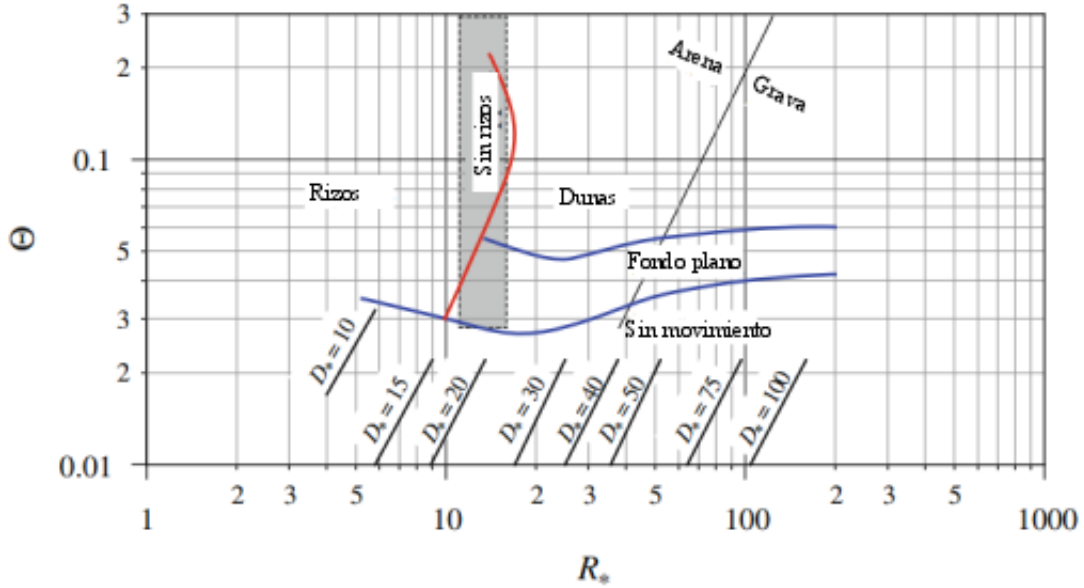


Figura 2.8: Predictor formas de fondo desarrollado por Chabert & Chauvin (1963) para flujos unidireccionales.

## 2.5. Sistemas de medición

En la instalación experimental se utilizan instrumentos para medir caudal, presión a lo largo de la tubería (transductor de presión), temperatura del fluido y viscosidad del fluido (reómetro). Estos instrumentos son ampliamente conocidos. Sin embargo, también se utiliza el sistema PIV para la obtención del campo de velocidades del flujo y FTP (Perfilometría por Transformada de Fourier) para medir las deformaciones del lecho de material no cohesivo.

### 2.5.1. PIV

El sistema de medición PIV es un método de velocimetría por procesamiento de imágenes. Existen dos métodos que utilizan los mismos principios de operación, el ya mencionado PIV y el PTV. Westerweel (1993) explica toda la teoría correspondiente a este sistema. Estos principios de operación son utilizados desde 1926, los que conjugan fotografías más luz que exita las partículas que se quieren medir.

El método obtiene el campo de velocidad bidimensional de un flujo captando las velocidades de un trazador que se mezcla en el mismo. Actualmente se utilizan cámaras de alta velocidad y las partículas del trazador son exitadas con un láser. Como se mencionó, PIV y PTV funcionan de manera similar, pero ocupan marcos teóricos distintos.

- **PIV - Marco Euleriano:** La imagen a analizar se divide en una grilla y evalúa el movimiento de las partículas entre una imagen y otra dentro de cada una de las grillas para dar un vector de velocidad por cada cuadro, por lo que se obtiene directamente un campo de velocidades (Figura 2.9). No importa cada partícula, sino el patrón de partículas.
- **PTV - Marco Lagrangiano:** La imagen se analiza en su totalidad y se sigue el movimiento de cada partícula entre una imagen y la otra. Se obtiene un vector de velocidad por cada una de las partículas que son analizadas (Figura 2.9).

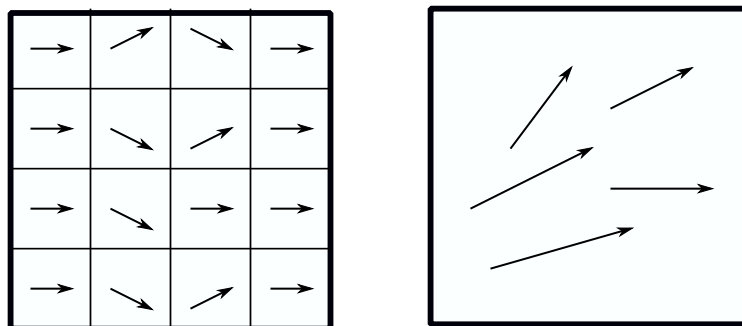


Figura 2.9: Izquierda: Marco euleriano utilizado en el método PIV. Derecha: Marco lagrangiano utilizado en método PTV.

En la Tabla 2.2 se resumen las diferencias, ventajas y desventajas de cada uno de los métodos.

Tabla 2.2: Cuadro comparativo entre sistemas PIV y PTV.

| PIV                                                                                                              | PTV                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gran cantidad de partículas.                                                                                     | Pequeña cantidad de partículas.                                                                           |
| No es posible distinguir de forma clara las partículas.                                                          | Es posible distinguir la trayectoria de las partículas.                                                   |
| Campo de velocidades es obtenido en posiciones espaciales fijas (marco euleriano).                               | Campo de velocidades es obtenido en base a la trayectoria de partículas individuales (marco lagrangiano). |
| La imagen tiene información suficiente para obtener el campo de velocidades espacial en todo el frente de flujo. | Imagen no necesariamente contiene información espacial suficiente para caracterizar el frente de flujo.   |

Por las características del flujo que se tendrán en los experimentos a realizar en la instalación experimental que es fruto de este estudio, que incluyen bajas velocidades y flujo laminar, se tiene que la mejor opción es utilizar el sistema PIV, ya que si bien para estas características de flujo sirven ambos métodos, el sistema PIV entrega el campo de velocidades de manera más completa.

Las partículas trazadoras deben cumplir dos características: ser tan pequeñas como para reflejar con una buena intensidad la luz de forma perpendicular al plano en el que se proyecta el haz del láser y tan grandes como para que sean captadas por la cámara de alta velocidad. Entre 1990 y 2000 se realizaron diversas investigaciones acerca del tamaño ideal de las partículas donde la información recolectada por Fuentes (2017) indica que los tamaños utilizados



están entre 3 y 500  $\mu m$ , siendo el rango más empleado entre 3 y 100  $\mu m$ , con densidad entre 1000 y 1050  $kg/m^3$  correspondiente a distintos tipos de acrílicos. Las partículas de acrílico son costosas y tienen problemas para reflejar la luz, ya que tienen un coeficiente de refracción similar al del agua. Es por esto que Pedocchi et al. (2008) proponen un método económico de fabricación de partículas de acrílico fluorescente, haciendo una mezcla de rodamina acuosa al 20 % y resina, y el uso de un filtro de banda pequeña para atenuar las reflexiones residuales producidas por las partículas.

## 2.5.2. FTP (Perfilometría por Transformada de Fourier)

El sistema FTP fue utilizado por Garcés (2017) para caracterizar las formas de fondo generadas en un ducto a presión debido al flujo en régimen laminar de un fluido pseudoplástico, condiciones muy similares a las que se tendrán en los experimentos que se llevarán a cabo en la nueva instalación experimental que se expone en este informe, a excepción del flujo oscilatorio. Las formas de fondo encontradas por Garcés (2017) tienen una geometría tridimensional, frente redondeado y prácticamente sin arrastre de fondo en las cercanías de las paredes laterales. En las investigaciones desarrolladas en las instalaciones experimentales mencionadas en la sección 2.1, las que involucran la componente oscilatoria del flujo, pero utilizan agua como fluido, se han encontrado formas de fondo tanto en 2D como en 3D.

El sistema de medición *Fourier Transform Profilometry* (FTP, en español Perfilometría por Transformada de Fourier) es un sistema óptico de medición no invasivo, es decir, no interfiere en las características del flujo, y fue introducido por Takeda et al. (1982) y Takeda & Mutoh (1983). El sistema consiste en un patrón de franjas proyectado sobre la superficie que se quiera medir y una cámara que se ubica en un punto de vista distinto al del proyector. Se identifica un plano de referencia perpendicular a la dirección del proyector y se compara con el patrón de franjas, obteniendo un mapa de desfase  $\Delta\phi(x, y)$  que se relaciona con la deformación de la superficie medida, entregando la diferencia entre esta superficie y el plano de referencia. El patrón de franjas puede ser arbitrario. En las investigaciones de Takeda et al. (1982) y Takeda & Mutoh (1983) se utilizó el patrón de Ronchi, el que corresponde a una onda cuadrada, que oscila entre dos valores fijos. Cobelli et al. (2009) considera una mejora en el patrón de franjas, la que consiste en un patrón sinusoidal, el que aumenta el desempeño y la calidad de la reconstrucción (Garcés, 2017).

Las configuraciones posibles para disponer los equipos son las siguientes (Takeda & Mutoh, 1983):

- **Ejes ópticos cruzados:** Los ejes ópticos del proyector y de la cámara se ubican en un mismo plano y se intersectan en un punto cercano al centro del objeto de medición.
- **Ejes ópticos paralelos:** Los dos ejes ópticos son ubicados en el mismo plano y son paralelos. Ambas disposiciones tienen resultados similares, pero la disposición en paralelo tiene ventajas comparativas con la anterior, ya que es más simple de instalar y ya ha sido utilizada en la instalación experimental de Garcés (2017) en el Laboratorio Francisco J. Domínguez. En la Figura 2.10 se presenta un esquema de esta configuración.

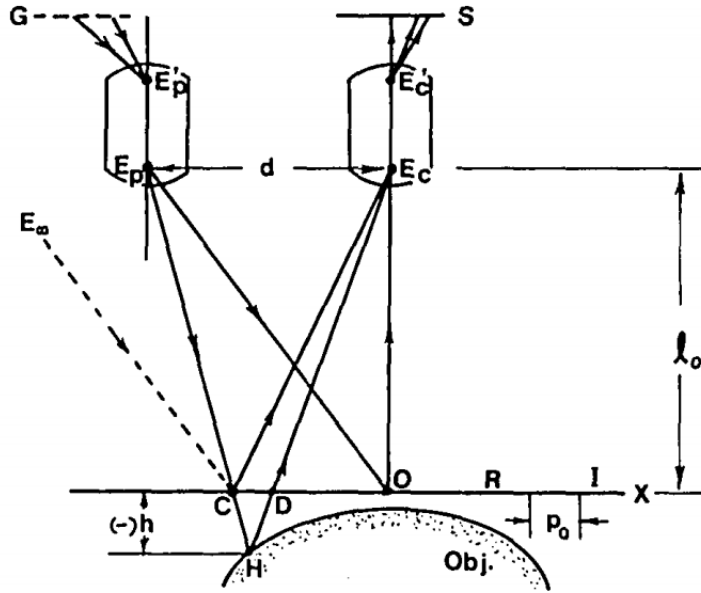


Figura 2.10: Esquema del sistema FTP con disposición en ejes paralelos (Takeda & Mutoh, 1983).

El patrón de franjas es proyectado sobre el plano de referencia  $R$  desde una distancia  $l_0$ . La proyección sobre el plano de referencia se representa mediante una serie de Fourier y de forma generalizada, tanto para la condición inicial como para la condición deformada, se expresa:

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(i(2\pi n f_0 x + n\phi(x, y, t))) \quad (2.16)$$

Donde

- $g(x, y)$ : Distribución espacial de la intensidad de luz sobre el plano de referencia.
- $r(x, y)$ : Distribución de reflectividad no uniforme del plano de referencia.
- $f_0$ : Frecuencia fundamental del patrón de franjas.
- $\phi(x, y, t)$ : Posición para un tiempo  $t$  en la posición  $(x, y)$  respecto al plano de referencia.

La finalidad del algoritmo es separar el ruido de la imagen,  $r(x, y)$ , de la frecuencia principal. Utilizando la transformada de Fourier en  $x$  (dominio espacial) se encuentra el espectro de frecuencias, luego se eliminan todas las frecuencias, exceptuando la fundamental, mediante un filtro pasa banda en este mismo dominio. Posteriormente, se aplica la antitransformada para obtener el mapa de desfases en toda la imagen, quedando este mapa en la parte imaginaria del resultado, y el ruido en la parte real.

Se sabe que el desfase es

$$\Delta\phi(x, y, t) = \phi(x, y) - \phi_0(x) = 2\pi f_0 \bar{C}D \quad (2.17)$$

Además, el mapa de desfases se debe relacionar geoméricamente con la altura. Se relacionan las alturas de los triángulos  $\Delta CDH$  y  $\Delta E_p E_c H$  (Figura 2.10), notando que son triángulos semejantes.

$$\frac{d}{l_0 - h(x, y, t)} = \frac{\bar{C}D}{-h(x, y, t)} \quad (2.18)$$

Con esto, se obtiene que la altura del objeto es

$$h(x, y, t) = \frac{l_0 \Delta\phi(x, y, t)}{\Delta\phi(x, y, t) - 2\pi f_0 d} \quad (2.19)$$

Este sistema debe ser corregido para ser utilizado en una tubería, debido a la refracción que sufre la luz al pasar por el acrílico y el agua. Garcés & Tamburrino (2015) desarrollan una metodología para corregir la altura medida por el FTP considerando la refracción de la luz. Para ello considera que el índice de refracción del acrílico es similar al del agua. Con esto presenta la siguiente corrección:

$$H = \frac{\tan(i_p) + \tan(i_c)}{\tan(r_p) + \tan(r_c)} h \quad (2.20)$$

donde  $H$  es la altura real del objeto,  $i$  son los ángulos de incidencia,  $r$  los de refracción,  $h$  la altura determinada con la Ec. 2.19 y los subíndices  $p$  y  $c$  hacen referencia a las posiciones de proyector y cámara respectivamente.

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Instalación experimental

La instalación experimental fue diseñada con el objetivo de lograr observar formas de fondo en el lecho ubicado en el túnel principal de la instalación, provocadas por un flujo con componente oscilatoria y unidireccional. La componente unidireccional se debe realizar con una recirculación del flujo, debido a que no se puede generar una cantidad constante de solución de CMC (que será el fluido más utilizado en esta instalación). Esta corresponde a una de las restricciones que se debe tener en cuenta para el diseño y la construcción de la instalación, las que se enumeran a continuación:

- Volumen de mezcla de CMC: 180 litros.
- Tiempo de preparación de la mezcla: 5 horas.
- Flujo laminar en el túnel de prueba.

Teniendo estas consideraciones se utiliza como referencia de construcción los tubos en U que tienen un largo menor a 5 *m* y utilizan un pistón en una de las chimeneas laterales con la otra chimenea abierta a la atmósfera (Calantoni et al., 2013; Dick & Sleath, 1992; Lofquist, 1977). Se descarta el mecanismo utilizado por Admiraal et al. (2006) debido a que un pistón en la sección horizontal de la instalación influiría en el flujo unidireccional dado por la recirculación.

En la Figura 3.1, se presenta el diseño final de la instalación experimental y a continuación se especifica el diseño de cada una de las partes del aparato. La instalación consta de una tubería rectangular de prueba de 2 *m*, con una sección de 15 *cm* de ancho y 20 *cm* de alto, la que se divide en 10 *cm* de lecho y 10 *cm* donde pasa el flujo; un sistema generador de oscilaciones conformado por un pistón que es accionado por un motorreductor SITI MHL 30 con reductor coaxial de 1.5 HP y factor de reducción de 15/1 y un variador de frecuencia DELTA modelo VFD-E, al que se le acopla un KEYPAD (panel de control) con potenciómetro; un sistema de recirculación del flujo accionado por una bomba; además, tiene sistemas de medición del campo de velocidades y de las formas de fondo.

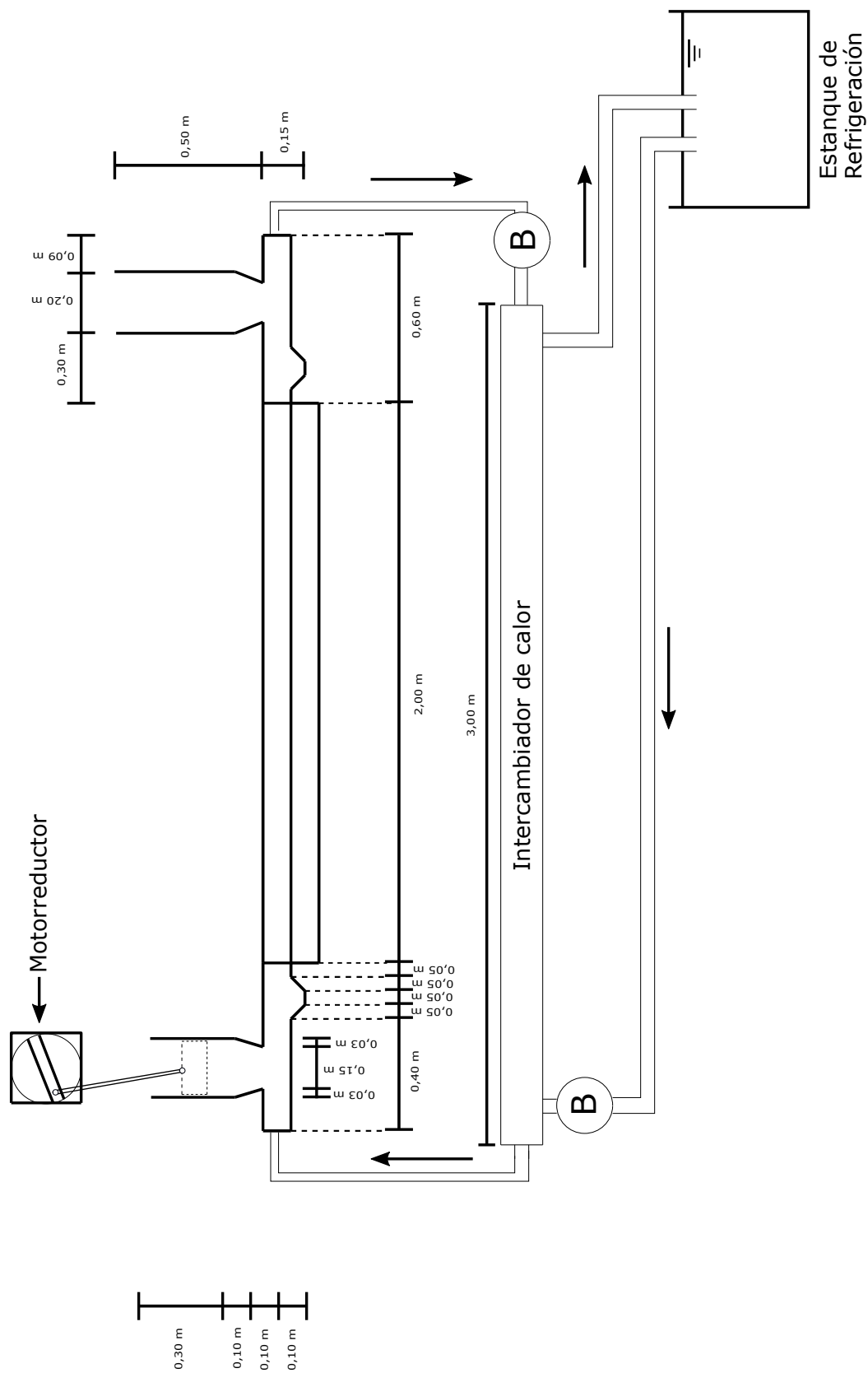


Figura 3.1: Esquema de la instalación experimental.

A continuación, se presentan y explican las distintas partes de la instalación experimental y uso de la misma.

### 3.1.1. Preparación de la mezcla

La mezcla de carboximetilcelulosa (CMC) con agua debe hacerse cuidadosamente y durante 5 horas, ya que no deben quedar grumos en la solución. Con el objetivo de que la solución sea homogénea, el proceso se realiza en un estanque de mezcla. Además, es necesario medir la reología del fluido pseudoplástico cada vez que se prepara, porque tendrá índices de flujo y consistencia distintos para cada una de las soluciones que se utilicen, dependiendo de la concentración y temperatura.

### Estanque de mezcla

El estanque de mezcla es un tambor de 180 litros ubicado en altura que utiliza un motor para mezclar el CMC con agua. Este estanque es el mismo utilizado por Garcés (2017). Para llevar la mezcla desde el estanque a la instalación experimental se utiliza una manguera de 3/4 de pulgada de diámetro con la que se llena el túnel por una de la chimenea abierta a la atmósfera.

### Reómetro

El reómetro Anton Paar modelo Rheolab QC se utiliza para la medición de la reología de la solución de CMC. A partir de los datos de esfuerzo de corte y tasa de corte entregados por el instrumento, se obtienen los parámetros  $n$  y  $k$ , correspondientes al índice de flujo y al de consistencia, respectivamente. Para obtener la reología de la mezcla a la temperatura que va a estar durante los experimentos se tiene un sistema de control de temperatura en base a elementos de Peltier (Montserrat, 2015). Este sistema permite eliminar el error de la viscosidad por los cambios de temperatura que pueda sufrir el fluido.

### 3.1.2. Túnel principal

El túnel principal involucra toda la estructura de acrílico donde se tiene la sección de prueba y se harán las mediciones, además de los extremos de la tubería donde se ubican los elementos que disminuyen turbulencias o vórtices y el transporte de sedimentos a sectores donde podrían ocasionar problemas, como dentro de la bomba. También se instalan medidores de presión para caracterizar las pérdidas de energía dentro de la tubería y un termómetro de pinchar para medir la temperatura de la mezcla.

## Túnel de prueba

La zona de estudio corresponde a un túnel de acrílico de 2 metros de largo y una sección transversal rectangular de 15 *cm* de ancho y 20 *cm* de alto, con 10 *cm* de lecho y 10 *cm* útiles para el flujo (Figura 3.2). Este túnel permite la visualización del flujo desde ambos costados y desde la parte superior (Figura 3.3), donde se deben instalar los sistemas de medición de características del flujo.

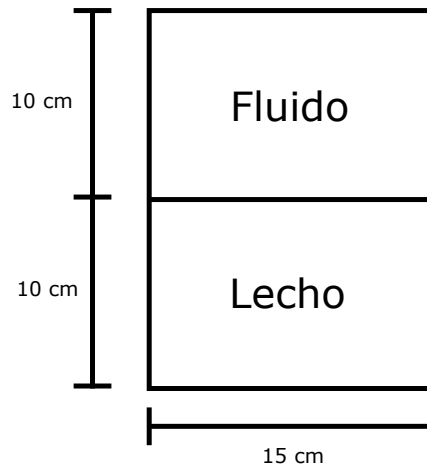


Figura 3.2: Esquema de la sección transversal del túnel.

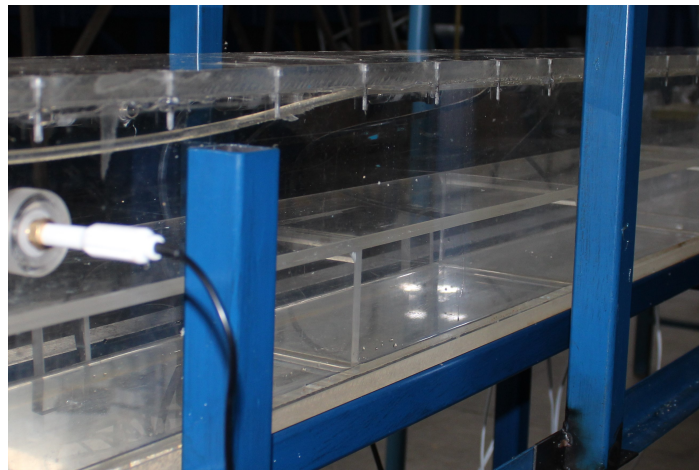


Figura 3.3: Fotografía del túnel de prueba.

El túnel cuenta con una tapa de 2 metros de largo en su parte superior, la que se debe instalar y desinstalar cada vez que se realiza una experiencia. Esta tapa tiene el objetivo de poder rellenar y aplanar el lecho.

## Rectificadores de flujo y trampas de arena

Los rectificadores de flujo o “honeycomb” son estructuras similares a un panel de abejas con las que se rectifica el flujo destruyendo eventuales estructuras vorticosas y uniformándolo.

El “honeycomb” de la instalación tiene una sección transversal de  $15 \times 10 \text{ cm}^2$  y un largo de  $5 \text{ cm}$ . Está constituido por un enjambre de tubos de  $12,7 \text{ mm}$  de diámetro interior y un espesor de  $1 \text{ mm}$ . Los rectificadores de flujo funcionan además como un filtro de arena, que es de utilidad ya que no es deseable que partículas de arena lleguen fuera de la zona de prueba, debido a que puede afectar el funcionamiento de la bomba.

En el mismo sentido, se diseñan dos trampas de arena, una a cada extremo del túnel de estudio. Las trampas están ubicadas en un costado de los rectificadores de flujo y tienen una sección trapezoidal. Su profundidad es de  $5 \text{ cm}$  y los lados laterales y su base inferior son de  $5 \text{ cm}$  cada una (Figura 3.4 y 3.5).

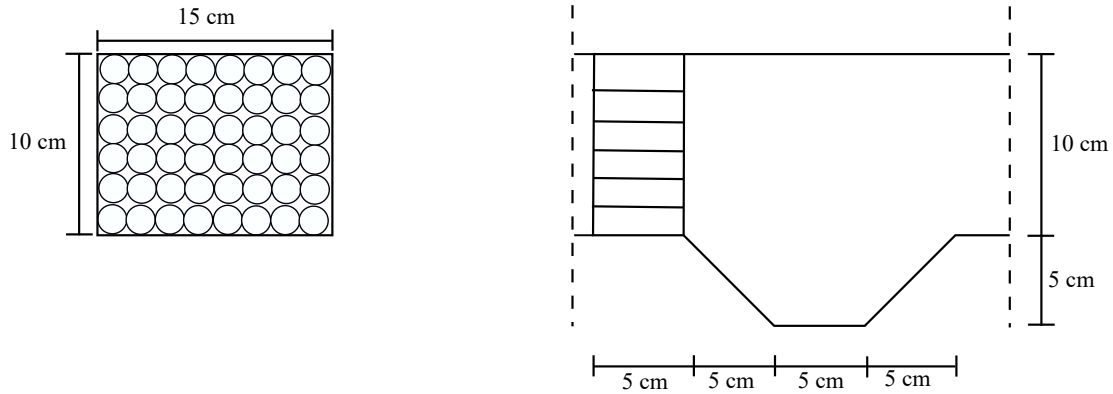


Figura 3.4: Izquierda: Corte transversal rectificador de flujo. Derecha: Vista lateral rectificador de flujo y trampa de arena.

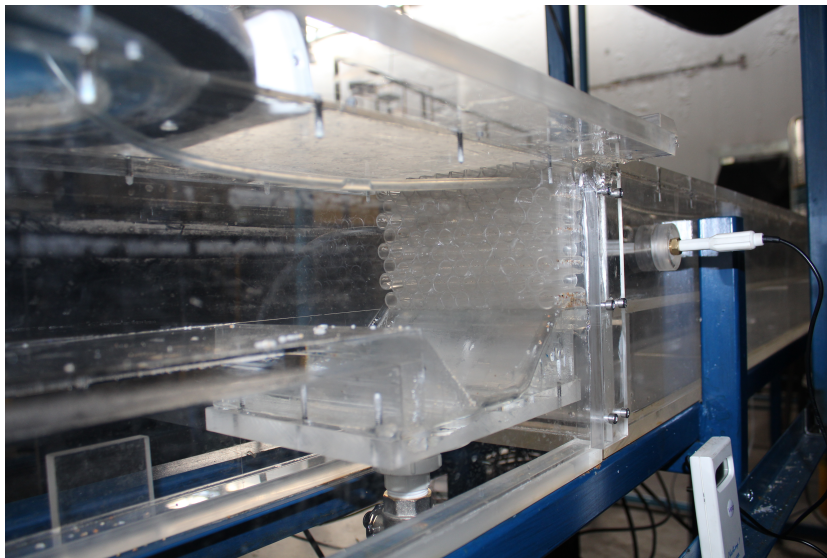


Figura 3.5: Esquema de la sección transversal del túnel.



## Tomas piezométricas

Se instalan 6 tomas piezométricas en el túnel principal para medir las pérdidas de carga dentro de la tubería. Estas se ubican en la cara lateral de la tubería para no afectar las visualizaciones que se realizan a través de la pared superior (Figura 3.6). En la dirección desde la chimenea donde se ubica el pistón hacia la chimenea en presión atmosférica las tomas piezométricas se ubican a 67; 89; 117; 139; 161; y 187 *cm*, midiendo desde el comienzo del túnel de prueba.

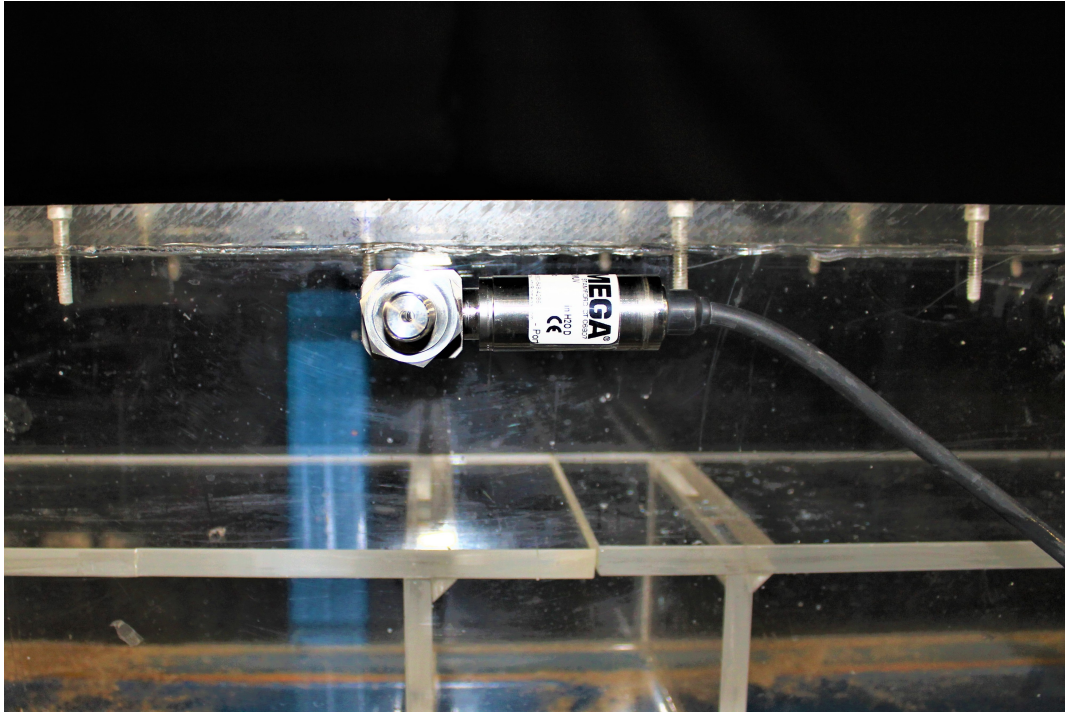


Figura 3.6: Transductor de presión instalado en el túnel de prueba.

Los equipos que se instalan en las tomas piezométricas son transductores de presión diferenciales Omega modelo PX409-010DWUV, los que se conectan a una tarjeta de adquisición de datos que registra la presión en un periodo a elección del usuario en el programa que entrega los datos.

Se realizó una calibración de los transductores de presión en la que se dejó fija una altura de presión, sin flujo, y se obtuvo la lectura del transductor en volts. El valor cero de los transductores se definió en el centro de la toma piezométrica. Repitiendo este procedimiento a distintas alturas se llegó a una correlación entre las lecturas de los transductores y la presión en metros columna de agua (Tabla 3.1). Las mediciones de la calibración se encuentran en el Anexo B.

Teóricamente, siguiendo un procedimiento similar al presentado en el Anexo A, los transductores de presión deben mostrar resultados como los que se muestran en la Figura 3.7 para el caso de un flujo oscilatorio sin flujo base de un fluido no newtoniano, sin lecho, periodo de la oscilación  $T = 1,3$  s y amplitud  $A = 33$  *cm*.

Tabla 3.1: Transductores de presión asociadas a su posición en el túnel y sus ecuaciones de presión, donde  $P_i$  corresponde a la presión en metros columna de agua y  $T_i$  a la medida del transductor en volts.

| Transductor | Posición en el túnel [m] | Presión(Voltaje)                                       |
|-------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|
| 1           | 0,67                     | $P_1 \pm 0,004 [m] = 0,524(T_1 \pm 0,007 [V]) - 0,017$ |
| 2           | 0,89                     | $P_2 \pm 0,005 [m] = 0,533(T_2 \pm 0,009 [V]) - 0,001$ |
| 3           | 1,17                     | $P_3 \pm 0,004 [m] = 0,535(T_3 \pm 0,007 [V]) - 0,001$ |
| 4           | 1,39                     | $P_4 \pm 0,004 [m] = 0,533(T_4 \pm 0,008 [V]) - 0,027$ |
| 5           | 1,61                     | $P_5 \pm 0,004 [m] = 0,531(T_5 \pm 0,007 [V]) - 0,011$ |
| 6           | 1,87                     | $P_6 \pm 0,004 [m] = 0,524(T_6 \pm 0,008 [V]) - 0,026$ |

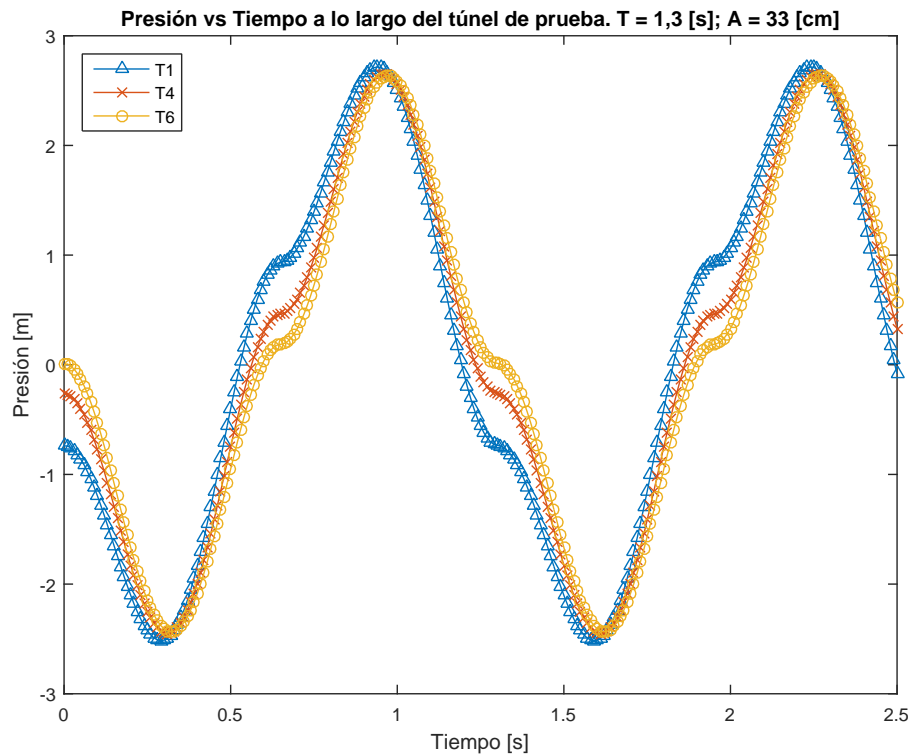


Figura 3.7: Gráfico de las medidas teóricas de presión donde se ubican los transductores 1, 4 y 6 en el túnel.

### 3.1.3. Mecanismo de oscilación

El mecanismo que debe generar la oscilación del fluido en la sección de prueba debe cumplir con producir un desplazamiento máximo del fluido en el túnel de prueba de 33 cm. Este valor se utilizó para el diseño considerando que la instalación descrita y utilizada en Calantoni et al. (2013) tiene una amplitud máxima de 26,2 cm y el mismo largo de esta instalación (2 m). Considerando que en la instalación que se describe en este informe se utilizará principalmente un fluido no-newtoniano se considera una amplitud mayor de movimiento máximo. Para ello, se ha diseñado un sistema de pistón, similar a los presentados en la sección 2.1 del capítulo 2, en particular los mencionados anteriormente en este mismo capítulo (Calantoni et al., 2013; Dick & Sleath, 1992; Lofquist, 1977). Se ha escogido este sistema ya que se considera el más

simple para generar las oscilaciones e influye menos en el flujo dentro del túnel.

Para llevar a cabo el mecanismo de oscilación se deben diseñar o escoger los siguientes elementos: área y forma de la cámara de conducción del pistón, que influirá directamente en la potencia necesaria del motor y en la carrera del pistón (a mayor área, menor potencia y carrera); potencia del motor para que sea capaz de mover el volumen de fluido indicado, considerando la diferencia de energía y las pérdidas friccionales y singulares; relación del reductor para reducir la velocidad (en RPM) del motor escogido; un variador de frecuencia que permita regular la cantidad de oscilaciones del pistón por minuto; y el diseño del pistón y la biela de manera que tenga una buena conducción y no se filtre fluido entre émbolo y cámara y tampoco se generen burbujas en su superficie.

## Cámara de conducción del pistón

En el diseño general de la instalación experimental se indican dos chimeneas en los extremos del túnel, una en la que se ubica el pistón y otra abierta a la atmósfera. La primera es de geometría cilíndrica, la que cuenta con una transición desde el túnel rectangular que tiene un área de  $10 \times 15 \text{ cm}^2$ . Se debe tener en consideración la restricción de las dimensiones del material a utilizar, ya que se debe utilizar menos de una plancha de acrílico en esta chimenea, que el tamaño pueda ser resistido por la estructura principal y el manejo durante la construcción. Tomando en cuenta estas restricciones se definió un diámetro  $D_{\text{pistón}} = 21,1 \text{ cm}$ . El largo total del cilindro es  $45 \text{ cm}$ , el tramo de transición tiene  $9 \text{ cm}$  y el cilindro  $36 \text{ cm}$  (Figura 3.8). La carrera máxima del pistón es  $28 \text{ cm}$ . La altura del émbolo es  $9 \text{ cm}$ .

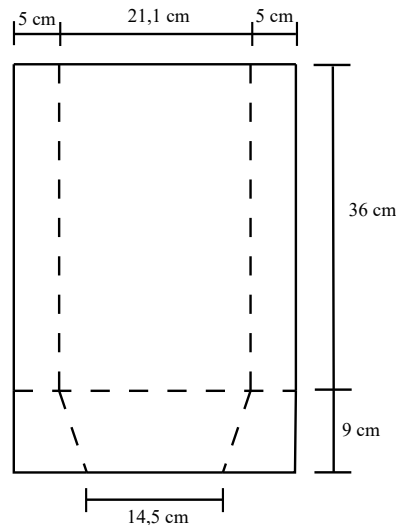


Figura 3.8: Esquema cámara donde se ubica el pistón (Vista frontal).

La cámara del otro extremo del túnel tiene un área transversal similar a la primera, de forma cilíndrica con un diámetro de 8 pulgadas ( $200 \text{ mm}$ ) y altura de  $50 \text{ cm}$ .

## Motorreductor

La potencia del motor de la instalación con el que se accionará el pistón que mueve el fluido se calcula utilizando la ecuación de Euler, con la que se obtiene la presión que debe existir en la cara interior del pistón para el movimiento del fluido. De este modo se realiza una aproximación que se presenta en el modelo conceptual de la Figura 3.9.

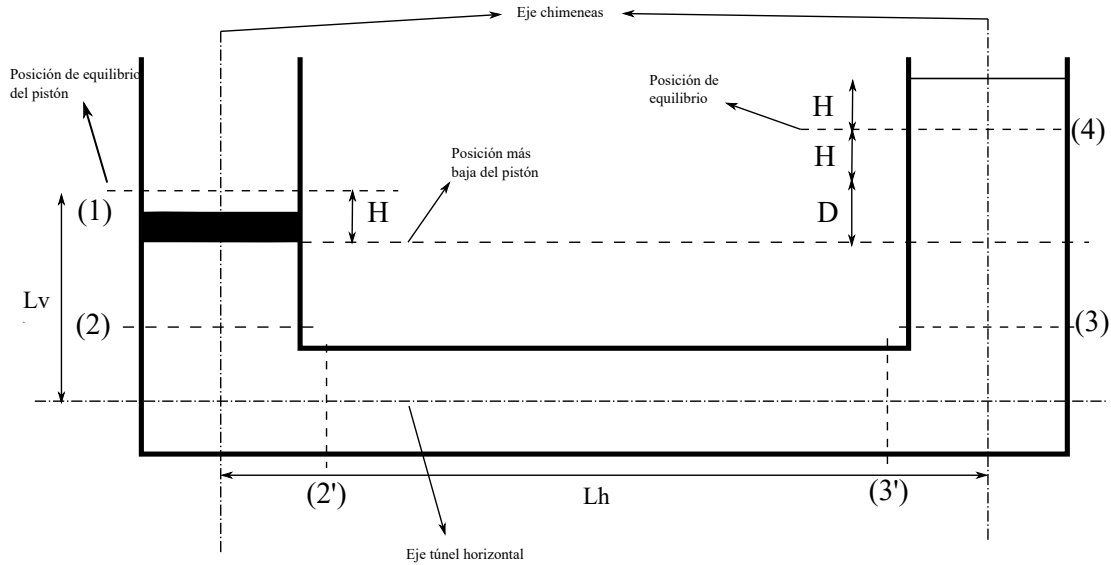


Figura 3.9: Esquema simplificado del problema.

En la sección (1) el Bernoulli  $B_1$ , corresponde a:

$$B_1 = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_v |U_v|}{2g} - H_0 \cos(\omega t) \quad (3.1)$$

Siendo  $H_0$  la amplitud máxima del pistón,  $p_1$  la presión en la cara interior del pistón y  $U_v$  la velocidad del pistón, que por continuidad se considera igual a la velocidad del flujo en la sección vertical. Considerando por continuidad que la velocidad en la sección horizontal es  $U_h = U_v A_c / A_t$ , con  $A_c$  el área transversal de la chimenea y  $A_t$  el área transversal del túnel de prueba, se llega a que la presión en la sección (1) bajo el pistón,  $p_1$ , buscada para conocer la potencia corresponde a la ecuación 3.2. El cálculo completo se encuentra en el Anexo A.

$$p_1 = \gamma \left[ \left( \frac{2L_v + L_h \frac{A_c}{A_t}}{2g} \right) \frac{\partial U_v}{\partial t} - 2H + \frac{U_v |U_v|}{g} + \sum \Lambda_{14} \right] \quad (3.2)$$

Donde  $\sum \Lambda_{14}$  es la sumatoria de las pérdidas friccionales y singulares. El movimiento del pistón se puede modelar de la siguiente forma, tanto para altura, velocidad y aceleración:

$$H = H_0 \cos(\omega t) \quad (3.3)$$

$$U_v = \frac{\partial H}{\partial t} = -H_0\omega \sin(\omega t) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial U_v}{\partial t} = -H_0\omega^2 \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

Se considera la siguiente relación entre la presión y la potencia:

$$P = p_1 A U_v \quad (3.6)$$

El término  $\sum \Lambda_{14}$  corresponde a las pérdidas friccionales y singulares del flujo y del roce del pistón. El desglose del término se expresa de la siguiente forma:

$$\sum \Lambda_{14} = \Lambda_{12} + \Lambda_{23} + \Lambda_{34} + \text{Roce Pistón} \quad (3.7)$$

$$\sum \Lambda_{12} = \frac{U_v |U_v|}{2g} \left( \frac{f_v L_v}{4R_{h-\text{cilindro}}} + k_{ang} + k_{ens} + k_{codo} \right) \quad (3.8)$$

$$\sum \Lambda_{23} = \frac{U_h |U_h|}{2g} \left( \frac{f_h L_h}{4R_{h-\text{túnel}}} + 2k_{ens} + 2k_{ang} + 2k_{div} \right) \quad (3.9)$$

$$\sum \Lambda_{34} = \frac{U_v |U_v|}{2g} \left( \frac{f_v L_v}{4R_{h-\text{cilindro}}} \right) \quad (3.10)$$

Donde  $k_{ang}$  corresponde a la pérdida singular de angostamiento,  $k_{ens}$  a la de ensanchamiento,  $k_{codo}$  a la del codo. Las pérdidas singulares se calculan con las fórmulas presentadas en el Anexo A y son una aproximación a lo que se tiene en la instalación.

Con estas definiciones se puede tener una función de la potencia en el tiempo. Se debe considerar que el motor deberá desplazar un fluido no-newtoniano en una tubería cuadrada, por lo que los factores de fricción se calculan de acuerdo a la sección 2.2. En esta sección se indica que el número de Reynolds corresponde a  $Re = \rho u 4R_h / \mu_{eff}$  y los factores de fricción en régimen laminar  $f_v = f_h = 16/Re$ . La viscosidad efectiva en el caso de una tubería rectangular de  $0,10 \times 0,15 \text{ m}^2$ , con relación de aspecto  $E = \text{Alto}/\text{Ancho} = 0,67$ , corresponde a:

$$\mu_{eff} = K \left( \frac{0,2232 + 0,6964n}{n} \right)^n \left( \frac{2U_h}{R_{h-\text{túnel}}} \right)^{n-1} \quad (3.11)$$

Los factores 0,2232 y 0,6964 representan los parámetros  $a$  y  $b$  de la Ecuación 2.1, respectivamente. Estas constantes se presentan en la Tabla 2.1. Se realizaron ajustes polinómicos

a las dos series de valores para obtener los parámetros  $a$  y  $b$  en función de la relación de aspecto  $E$ , los que se presentan en la Figura 3.10.

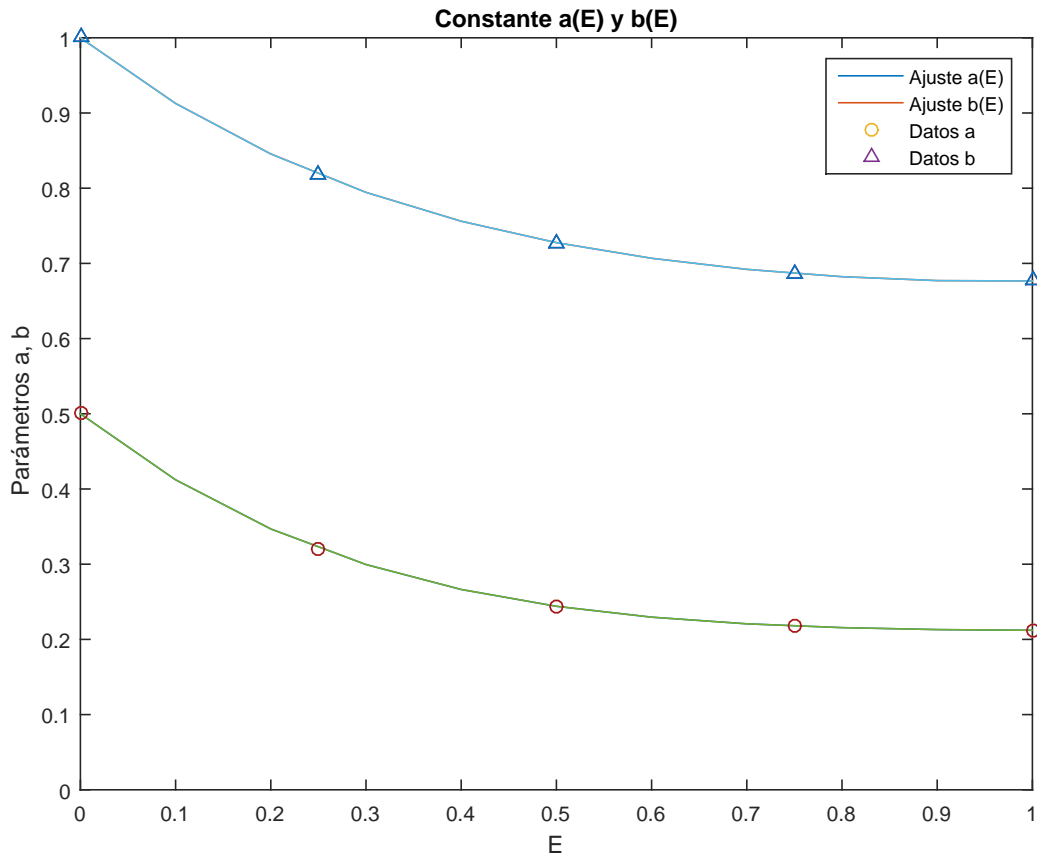


Figura 3.10: Ajustes polinómicos de las constantes  $a$  y  $b$  en función de la relación de forma  $E$ .

Posteriormente, se obtiene el factor de fricción horizontal  $f_h$

$$f_h = 2 \frac{K|U|^{n-2}}{\rho} \left( \frac{0,2232 + 0,6964n}{n} \right)^n \left( \frac{8}{R_{h-túnel}} \right)^n \quad (3.12)$$

En el caso de los cilindros correspondientes a la chimenea donde está el pistón se utiliza la viscosidad efectiva correspondiente a una tubería, esto es  $\mu_{eff} = K((3n+1)/(4n))^n((8U)/(4R_h))^{n-1}$ . Donde  $K$  es el índice de flujo,  $U$  la velocidad del flujo y  $R_h$  el radio hidráulico de la sección transversal.

En la Figura 3.11 se presenta la potencia requerida para mover el fluido pseudoplástico en función del tiempo y en la Figura 3.12 se presenta la presión en el pistón. La situación mostrada corresponde a un período  $T = 1,2$  s y la amplitud de movimiento del pistón  $A = 7$  cm. Los cálculos completos para llegar a la potencia necesaria se presentan en el Anexo A. Los valores negativos en el gráfico de potencia indican que en esa parte del movimiento no se necesita fuerza externa para mover el pistón, el movimiento se realiza por inercia. La diferencia en los máximos se da porque se considera una diferencia (D) en el nivel entre

una chimenea y otra. Del gráfico se puede desprender que la máxima potencia necesaria es  $P_{ot} = 0,56 \text{ HP}$ .

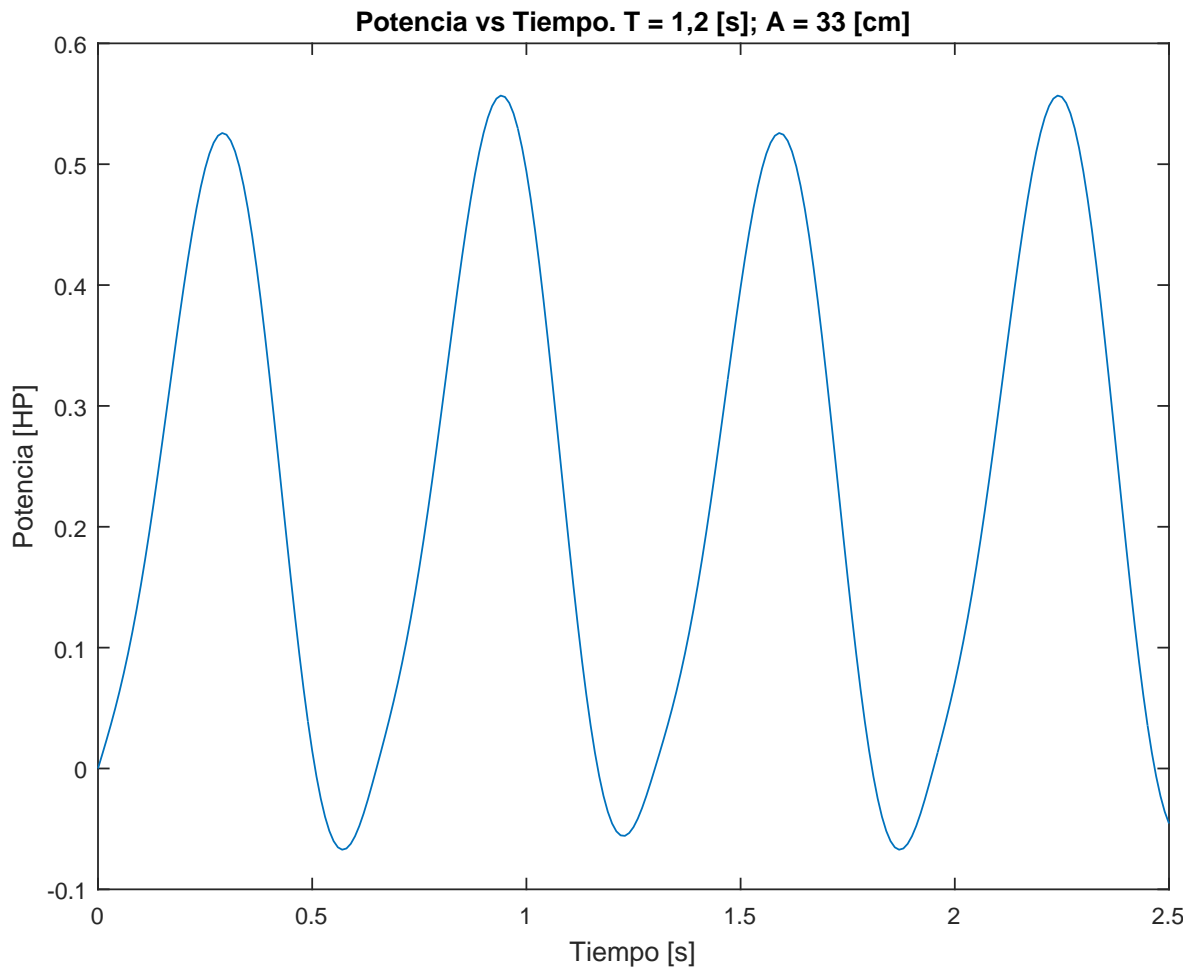


Figura 3.11: Potencia necesaria para mover el fluido en función del tiempo.

Debido a que hay grandes incertidumbres respecto de las pérdidas que se pueden generar entre el émbolo y la chimenea se utiliza un factor de seguridad  $FS \approx 3$ . Es por esto que la potencia ocupada es  $P = 1,5 \text{ HP}$ , que es la potencia existente en el mercado. El mínimo período utilizado en las instalaciones experimentales revisadas en la bibliografía es de  $1,7 \text{ s}$ , lo que corresponde a  $35,3 \text{ RPM}$ . Se utiliza para el diseño un periodo  $T = 1,2 \text{ s}$  considerando que al utilizar un fluido no newtoniano en la instalación puede necesitar una frecuencia mayor para generar formas de fondo. Para llegar a este rango de frecuencias de oscilación se debe contar con un reductor de frecuencia, en este caso se escogió un motorreductor (el reductor se acopla al motor) con una relación  $15/1$ . Al tener esta relación se llega a una velocidad de salida de  $58 \text{ RPM}$  ( $T = 1,03 \text{ s}$ ), lo que está bajo el período mínimo de diseño y con el variador de frecuencia se puede llegar hasta una frecuencia de  $5 \text{ RPM}$ .

El modelo escogido (Figura 3.13) se presenta en la Tabla 3.2, donde se indican las principales características del motor que influyen en su funcionamiento.

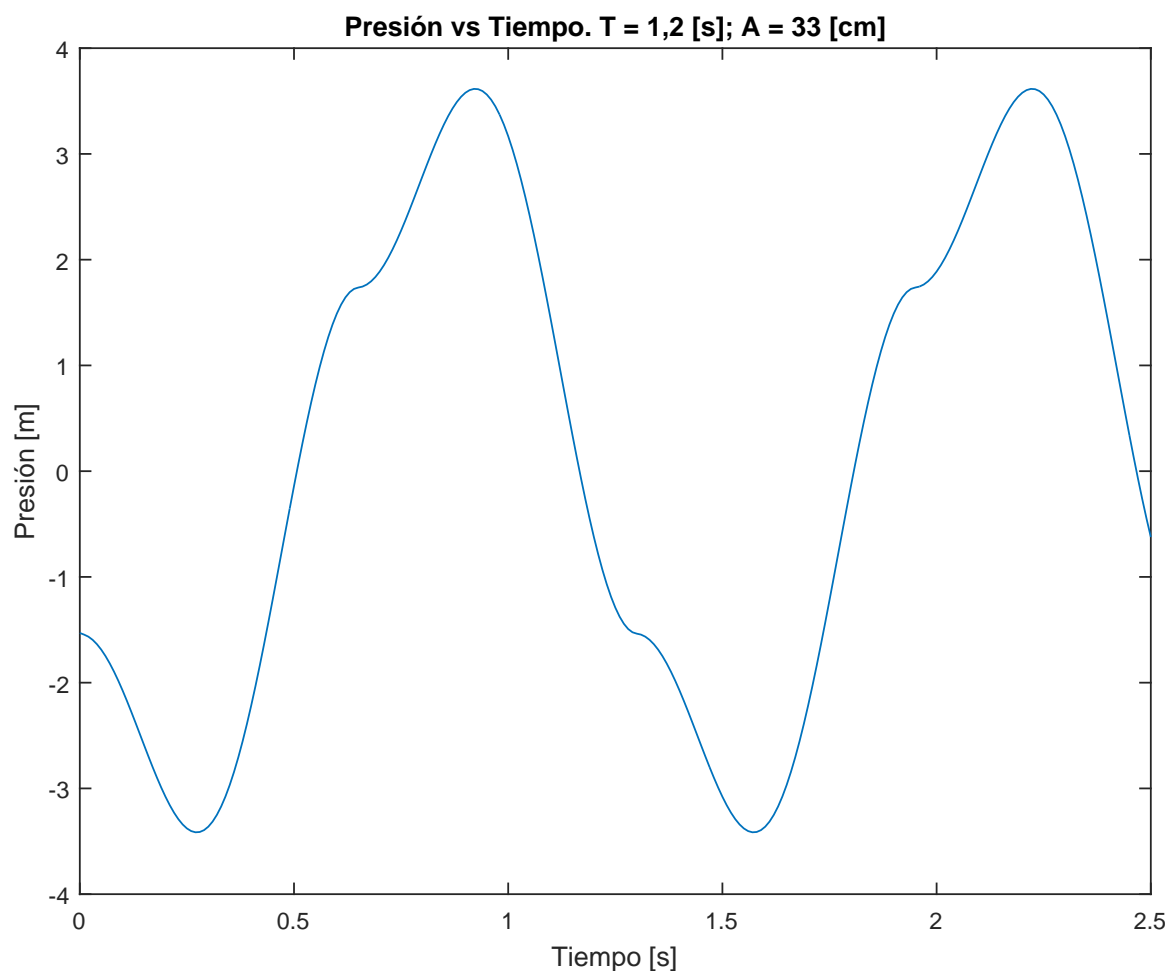


Figura 3.12: Presión en la superficie bajo el pistón.

Tabla 3.2: Características del motorreductor.

| Motorreductor SITI HML 30           |      |
|-------------------------------------|------|
| Potencia [ <i>HP</i> ]              | 1.5  |
| Velocidad de entrada [ <i>RPM</i> ] | 900  |
| Velocidad de salida [ <i>RPM</i> ]  | 58   |
| Reducción                           | 15   |
| Tensión [ <i>V</i> ]                | 380  |
| Rendimiento                         | 0.96 |
| Torque [ <i>Nm</i> ]                | 169  |

## Variador de frecuencia

Se cuenta con un variador de frecuencia, que permite regular las revoluciones por minuto que realiza el motor para regular la frecuencia de las oscilaciones de las ondas generadas por el pistón, en la instalación experimental. El variador de frecuencia es marca DELTA modelo VFD-E, de potencia 1,5 *kW* (Figura 3.14). Este aparato regula las revoluciones que realiza el motor, las que se denominan revoluciones de entrada para el reductor, el que reduce las revoluciones de manera fija en una relación. En el caso de la instalación experimental es la



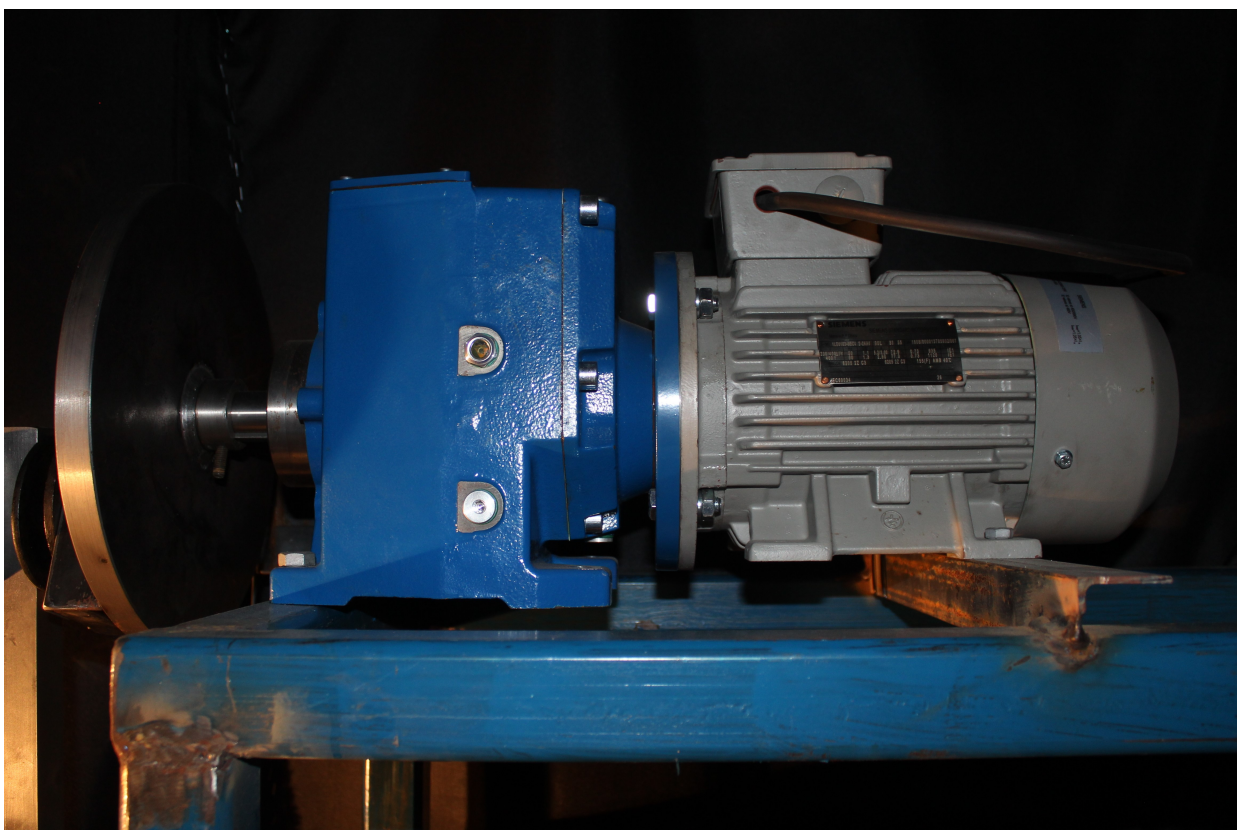


Figura 3.13: Fotografía lateral del motorreductor instalado en la estructura.

relación 15/1, lo que entrega las revoluciones de salida que corresponden a la frecuencia que tendrá el movimiento del pistón.

## Conjunto pistón-biela

El mecanismo utilizado para generar el movimiento del pistón es similar al que se encuentra en los pistones de un motor de automóvil. Este sistema funciona con una biela unida a un cigüeñal, el que se mueve de forma circular al estar unido al motor. La biela tiene uniones rotuladas en el inicio y fin de la misma, en el cigüeñal y émbolo, respectivamente. El sistema de la biela junto al cigüeñal transforma el movimiento circular en un movimiento lineal, el que es conducido por el ajuste entre el émbolo y la chimenea cilíndrica. La pieza que funciona como un cigüeñal es un disco de metal de 30 *cm* de diámetro unido al eje del motorreductor en el que se puede fijar la biela en un punto a lo largo de su diámetro. Con esto se puede lograr una amplitud (carrera) máxima del movimiento del pistón de 14 *cm*.

Las dimensiones del émbolo son 21,1 *cm* de diámetro y 9 *cm* de alto. Cuenta con 2 o-ring que evitan que fluido o aire pasen de un lado al otro del pistón y hacen que el movimiento del émbolo en la chimenea se realice de manera suave y se disminuyan las pérdidas. Además, cuenta con un despiche de aire con el que se expulsa el aire que hay dentro del túnel. El émbolo está fabricado de PVC.



Figura 3.14: Fotografía del variador de frecuencia instalado en el Laboratorio Francisco J. Domínguez.

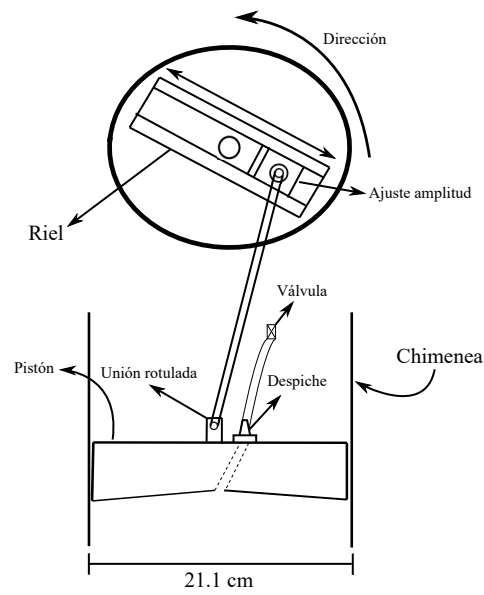


Figura 3.15: Esquema de funcionamiento de biela-manivela y pistón.

### 3.1.4. Sistema de recirculación

El sistema de recirculación consiste en mangueras de 1 1/2 pulgadas conectadas al túnel principal por ambos extremos. La entrada y salida de flujo por los extremos de la instalación está ubicada a 15 *cm* de ambas chimeneas donde estará entrando y saliendo fluido. Esta ubicación tiene el objetivo de evitar influir en el movimiento oscilatorio del flujo. En el trayecto desde un lado a otro del túnel y en la dirección que va desde la salida del túnel principal hasta entrar en el mismo se instala una bomba centrífuga, un intercambiador de calor y un medidor de caudal. Estos elementos de la instalación se explican en los siguientes apartados.

### Sistema de impulsión

La bomba que se utiliza para hacer recircular el fluido a través de la instalación es centrífuga, de rodete abierto y de acero inoxidable. La bomba es marca EBARA modelo CDXM/A 90/10, monofásica, de potencia 1 HP. Se escoge de rodete abierto ya que es más resistente a la abrasión generada por las partículas. Esta bomba se escoge por sobre una excéntrica, tipo de bombas que se ocupan en la industria minera donde se transportan fluidos no-newtonianos, ya que para una escala pequeña como la de la instalación experimental provoca pulsos de presión que afectan el flujo, llamado caudal pulsante, y que hacen inviables las mediciones de presión (Montserrat, 2015). Además, un caudal pulsante afectaría los resultados correspondientes al flujo oscilatorio generado por el movimiento del pistón. Otra ventaja de la bomba centrífuga de rodete abierto es su composición de acero inoxidable, lo que evita la contaminación de la mezcla con óxido.

La curva característica de la bomba se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Curva característica de la bomba.

|                |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|
| Q <i>l/min</i> | 20   | 50   | 80   | 90   | 110  |
| H <i>m</i>     | 30.3 | 27.2 | 23.6 | 22.3 | 19.5 |

Debido a que la altura elevada por la bomba es mucho mayor a la necesaria para hacer recircular el flujo, se hace necesaria la utilización de una válvula donde se pierda la mayor parte de la energía, además de pasar por todas las pérdidas singulares antes de que el flujo pase por la cámara en presión atmosférica. De esta manera se evita que aumente mucho la presión dentro del túnel cuando la bomba esté en funcionamiento.

### Intercambiador de calor

La mezcla de carboximetilcelulosa (CMC) tiene viscosidades que varían entre 20 a 80 veces la del agua, por lo que al ser transportados por la recirculación de la tubería adquieren altas temperaturas, las que pueden llegar a más de 35°C. Además, los fluidos no newtonianos varían su reología dependiendo de la temperatura, por lo que es necesario que durante un

experimento la temperatura de la solución sea prácticamente constante. Para evitar estos cambios de temperatura se instala un intercambiador de calor.

El intercambiador de calor se ubica en la tubería de recirculación del flujo, aguas abajo de la bomba. El sistema de refrigeración consiste en una tubería exterior de PVC de un diámetro de 4" (101 mm) en la que se instalan 4 tuberías de cobre de 1 1/8" (26 mm) de diámetro. En el espacio entre las tuberías pasa agua fría a una temperatura de 14°C aproximadamente, la que enfría las tuberías de cobre por donde pasa la solución de CMC. El agua fría se bombea desde la sentina ubicada en el subterráneo del laboratorio de hidráulica. El flujo de agua fría va en sentido contrario al flujo de la mezcla (Figura 3.16), esto porque tiene una mayor eficiencia el intercambio de calor en esta configuración. El sistema de refrigeración mantiene la temperatura del fluido a aproximadamente 14°C con una oscilación de  $\pm 1^\circ C$ .

El intercambiador de calor funciona solo cuando existe un flujo base en la configuración del experimento a realizar en la instalación. Para los caso en que no hay recirculación no se utiliza ningún tipo de estabilizador de temperatura como el intercambiador de calor, porque al no pasar por la bomba no existe una fuente de calor que haga aumentar abruptamente su temperatura. La temperatura puede aumentar por el roce que se produce del fluido no-newtoniano con las paredes, pero este aumento no es preocupante ya que llega a 1° o menos luego de 1,5 o 2 horas de oscilación (considerando las pruebas de la puesta en marcha que se expondrán en secciones posteriores).

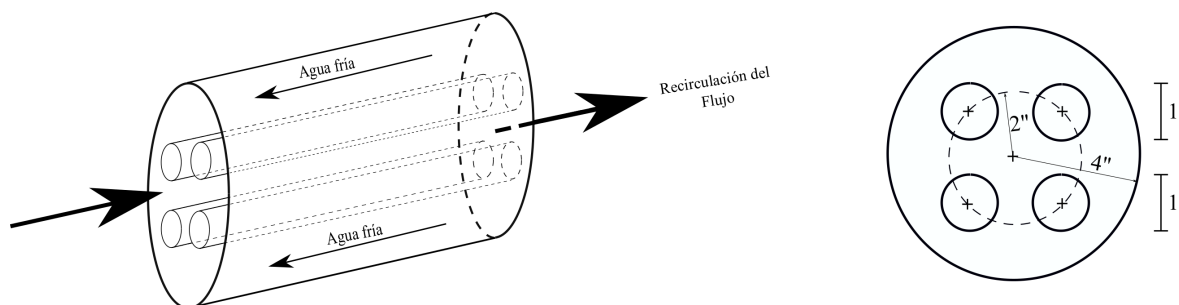


Figura 3.16: Esquema de la recirculación del flujo en el intercambiador de calor. Izquierda: Vista isométrica. Derecha: Corte transversal.

## Flujómetro Magnético

La instalación experimental cuenta con un flujómetro magnético modelo SIEMENS 3100 de 1" (Figura 3.17) y un transmisor de señal SIEMENS MAG-5000 (Figura 3.18), el cual permite visualizar el caudal medido por el flujómetro. El flujómetro magnético ocupa el principio físico de la ley de Faraday. Esta ley indica que el paso de un medio conductor en movimiento, que en este caso sería el fluido no-newtoniano, induce una diferencia de voltaje proporcional a su velocidad. Por lo tanto, conociendo la relación existente entre voltaje y velocidad, además de la sección transversal de la tubería, se puede conocer el caudal con  $Q = \bar{U}\Omega$ , siendo  $\bar{U}$  la velocidad obtenida a partir del voltaje y  $\Omega$  la sección transversal. El fabricante recomienda ubicar el instrumento a una distancia de 5 veces el diámetro de cualquier tipo de singularidad (curvas, ensanchamientos, angostamientos, etc), en un tramo recto y en un

punto bajo del sistema para evitar la formación de burbujas. En este estudio se busca medir el caudal de recirculación, para esto se instala el flujómetro en la manguera de recirculación ubicada debajo del túnel principal, en el tramo recto vertical después del intercambiador de calor. El flujómetro se ubica de forma vertical para disminuir la probabilidad de que se acumule arena en el fondo e intervenga con las mediciones del instrumento.



Figura 3.17: Imagen de sensor de caudal Siemens MAG3100.



Figura 3.18: Imagen de transmisor de señal Siemens MAG5000.

El transmisor de señal SIEMENS MAG-5000 tiene un límite mínimo de caudal de  $0.1 \text{ l/s}$ , el que se presenta en un visor digital. El funcionamiento con un fluido más viscoso, como la solución de CMC, es igual que con agua.

### 3.1.5. Sistemas de medición del flujo y formas de fondo

Para realizar las mediciones del campo de velocidad y la medición de las formas de fondo se utilizarán los sistemas de medición ópticos FTP y PIV. En la presente sección se expondrá la instalación experimental y la metodología de cálculo utilizada para cada uno de los sistemas de medición. En la Figura 3.19 se presenta cómo se utilizan los métodos y dónde se ubican alrededor del túnel de sección rectangular.

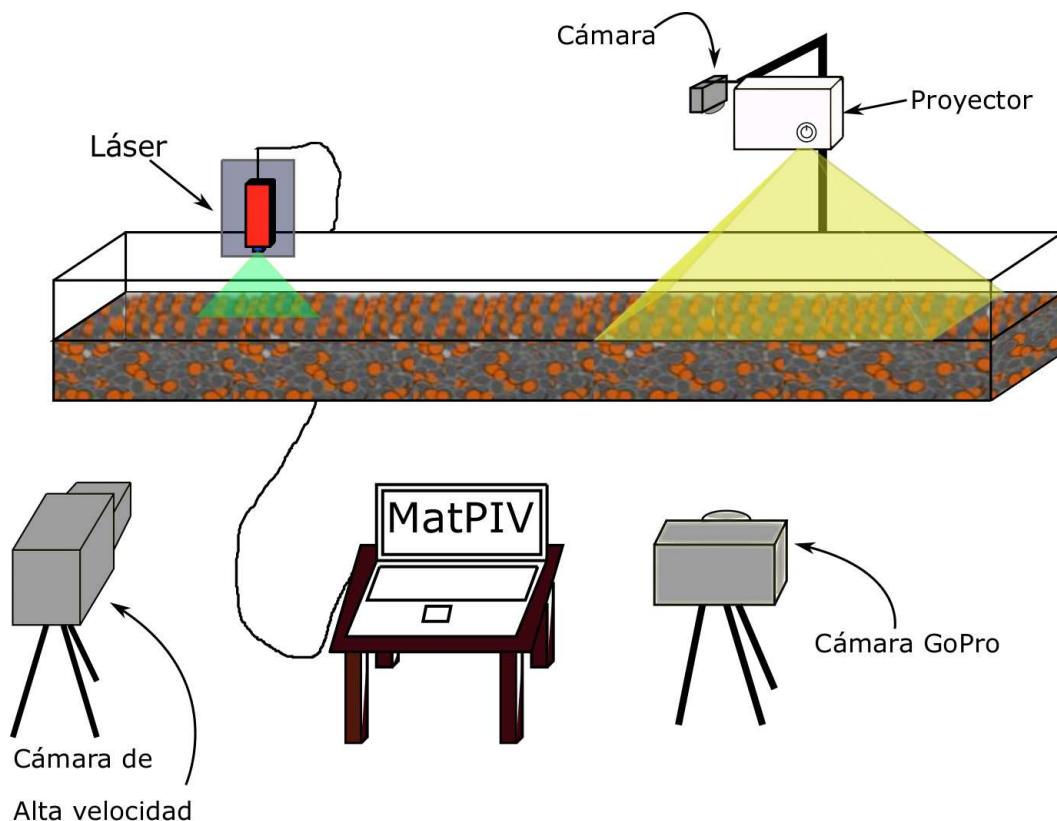


Figura 3.19: Ubicación de los sistemas de medición en el túnel.

### Sistema de medición FTP

El sistema de medición FTP se instala en una estructura que soporta un proyector y una cámara digital, el que se sostiene en la misma estructura del túnel. La sección donde se realiza la proyección está al menos 20 *cm* alejada del final del túnel para no tener influencia de los extremos. La resolución digital de las imágenes utilizadas en este trabajo por el sistema de medición es de 0.25 *mm/pixel*. Con la posición del proyector a 140 *cm* de altura con respecto al fondo de arena, la imagen se proyecta en una sección de 15x100 *cm*<sup>2</sup>. Este sistema de medición tiene ruido debido a dos factores, uno intrínseco del sensor de la cámara a las diferencias de luminosidad, por lo que se utiliza una cámara oscura, y el transporte de sedimentos que genera distorsión en la batimetría (Garcés, 2017). Este ruido también se ve afectado por las partículas de rodaminas utilizadas en el sistema PIV, descrito en la siguiente

sección. Para eliminar este ruido se utiliza un filtro pasa bajo en el código que procesa la información en Matlab.

El procesamiento de las imágenes en Matlab requiere diversos datos previos. Primero se deben tomar entre 20 y 60 fotos del lecho plano con una imagen de franjas proyectadas. El mismo procedimiento se debe repetir con una imagen gris proyectada en el lecho de la instalación. Estas imágenes son utilizadas como base para luego ser comparadas con las imágenes del lecho con cambios en su superficie. Se debe programar la cámara para que saque fotos del lecho con la imagen de franjas proyectadas cada cierto tiempo en el que se puedan verificar cambios durante el experimento. Las fotos se deben abrir en el software LabView para ser corregidas por el error de la curvatura del lente, pasando de formato NEF a formato JPG. Las imágenes se enumeran y se analizan en el programa en Matlab, donde se debe seleccionar sólo la sección de la imagen donde se ubica la zona a analizar.

En complemento al sistema de FTP se instala una cámara lateral, de manera perpendicular al túnel, con la que se registra el perfil longitudinal de las formas de fondo. La resolución de este sistema es  $0,65 \times 0,65 \text{ mm}^2$ , registrando una sección de  $0,20 \times 0,75 \text{ cm}^2$ .

## Sistema de medición PIV

El sistema de medición óptico PIV (*Particle Image Velocimetry*) necesita de oscuridad para captar la luz reflejada de un plano láser por las partículas introducidas en el fluido, por lo que en la sección de estudio se instala una cámara oscura. Las partículas corresponden a una mezcla de resina con rodamina, principalmente, la que luego de solidificar se lima en un torno del laboratorio para que se generen partículas pequeñas ( $75 - 200 \mu\text{m}$ ) que pueden ser utilizadas como trazador. En la Figura 3.19, se muestra cómo se disponen el láser sobre el túnel y la cámara en dirección horizontal a ella. La cámara se sitúa a aproximadamente  $50 \text{ cm}$  del túnel en el tramo donde se realizará el PIV. El sistema es desmontable.

El láser es de la línea Flex, marca BW TEC in, modelo BWI-532-100-E66969. Se compone de una fuente de poder y un dispositivo compacto, que emite el haz de luz. El láser es de tipo continuo, tiene buena estabilidad energética, una señal de bajo ruido y su longitud de onda de operación es  $532 \text{ nm}$ . Se dejó el láser movable a lo largo de la sección transversal del túnel, con el objetivo de poder tener la información de diferentes perfiles longitudinales del flujo. El plano se genera a través de un colimador ubicado a  $1 \text{ cm}$  del origen del láser y su espesor es de  $1 \text{ mm}$  aproximadamente (Fuentes, 2017).

Debido a que el coeficiente de refracción del agua y del acrílico son iguales, no es necesario realizar una corrección para el efecto de refracción considerando que se trata de una tubería cuadrada.

La cámara de alta velocidad utilizada es Photron Fastcam SA3, la que es capaz de grabar  $2,72 \text{ s}$  a una tasa de 1000 cuadros por segundo ( $\text{fps}$ ) a una resolución de  $1024 \times 1024 \text{ px}^2$ . Puede alcanzar 120 mil  $\text{fps}$  a una resolución de  $124 \times 16 \text{ px}^2$ . Al realizar la grabación las imágenes se deben cargar en la aplicación Pivlab de Matlab y se procede a su procesamiento. Primero, cada una de las imágenes es pre-procesada de manera de mejorar la precisión de

los resultados. Posteriormente, se debe seleccionar el área de la imagen que se analizará. En general, se escoge la región media, ya que es la que recibe una mayor intensidad de luz y es más homogénea, mientras que hacia los extremos de la imagen se ven menos partículas porque no reciben la luz suficiente para ser activadas. Se debe eliminar del análisis la zona del lecho de arena. Se escoge el algoritmo FFT con ventanas de deformación para analizar las imágenes. Las ventanas de interrogación son de  $64 \times 64$  y  $32 \times 32$  *pixeles*<sup>2</sup> como primer y segundo paso, respectivamente, con 50 % de margen para evitar que se pierdan partículas entre un momento y otro. Dentro de cada ventana de  $64 \times 64$  *pixeles*<sup>2</sup> se deben contar aproximadamente 8 partículas y el tamaño de cada una debe estar entre 5 a 7 *pixeles*. Luego de obtener el resultado de los vectores en cada imagen se deben validar. Los vectores cuya magnitud promedio superan ampliamente el promedio son eliminados, lo que se realiza haciendo una inspección visual de forma manual o estableciendo un rango de manera que se eliminen automáticamente (Fuentes, 2017). Finalmente, los resultados obtenidos en la aplicación se exportan a Matlab y son trabajados para obtener los perfiles de velocidad.

El campo de velocidades está asociado a un error de propagación. Este error se calcula con el procedimiento indicado por Park et al. (2008), en el que se consideran todos los parámetros involucrados en el proceso de medición. El sistema PIV estima la velocidad del flujo a partir de la distancia que se mueve un patrón de partículas desde una imagen y la siguiente, esto es en un intervalo de tiempo definido. Por lo tanto, la velocidad se define como:

$$u = \alpha \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.13)$$

donde  $u$  es la velocidad,  $\alpha$  es el factor de magnificación de la imagen,  $\Delta x$  el desplazamiento de las partículas y  $\Delta t$  el intervalo de tiempo entre dos cuadros consecutivos. Luego, mediante propagación de errores se puede obtener el error asociado a la velocidad  $\delta_u$ , a partir de los errores de los parámetros  $\alpha$ ,  $\Delta x$  y  $\Delta t$ :

$$\delta_u = \sqrt{\left(\delta_\alpha \frac{\Delta x}{\Delta t}\right)^2 + \left(\delta_{\Delta x} \frac{\alpha}{\Delta t}\right)^2 + \left(-\delta_{\Delta t} \alpha \frac{\Delta x}{\Delta t^2}\right)^2} \quad (3.14)$$

Además del error indicado anteriormente correspondiente al campo de velocidades, se debe analizar el error asociado a la medición de la posición del vector velocidad. El error depende de  $\alpha$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta t$  y  $\delta_{exp}$ . El factor  $\delta_{exp}$  representa la incertidumbre de la medición asociada a la trayectoria de las partículas y al efecto de pasar del campo de velocidades en 3D a 2D.

### 3.1.6. Otros instrumentos utilizados

Para el control de distintos parámetros del experimento se utilizan los siguientes instrumentos:

- Termómetro digital portátil de pinchar con rango de medición  $-50 - 150$  °C con un error del instrumento  $\pm 0,05$ .



- Tacómetro con rango de medición 5 - 99.99 RPM con error de medición del instrumento  $\pm 0,05$  con sensor de proximidad inductivo.

## 3.2. Puesta en marcha

La puesta en marcha de la instalación experimental consiste en un conjunto de experimentos realizados con agua y con solución de CMC en agua. Cada uno de estos fluidos, con lecho y sin lecho de arena. Con estos experimentos se estudian las capacidades de la instalación experimental, siendo su objetivo definir los límites de amplitud, frecuencia y diámetro del sedimento en cada una de las configuraciones. Cuando se tiene lecho se mide el arrastre incipiente en los dos tipos de fluidos. Además, se probará cada una de las configuraciones con flujo oscilatorio y con recirculación del flujo.

En el caso de los experimentos con agua sin aditivos, se tiene que el arrastre incipiente de los granos de arena se da en régimen turbulento, con  $Re \sim 7000 - 8000$ . Esto lo hace muy distinto a los experimentos con fluidos pseudoplásticos donde el régimen de escurrimiento es laminar. Es por ello que los resultados y análisis no son comparables directamente, ya que las metodologías varían. También cambian los mecanismos de transporte, donde en los experimentos con agua, la saltación juega un papel más importante. El movimiento en el fluido pseudoplástico se da a velocidades más bajas, debido a que la mayor viscosidad genera un aumento de la fuerza de arrastre y a la resuspensión viscosa en la iniciación del movimiento de las partículas (Abedi et al., 2014).

Otro de los objetivos de este proceso es poder registrar las diferentes características del flujo y del lecho. Por lo tanto, es necesario poder registrar la presión a lo largo del túnel, el caudal de recirculación, el cambio en el lecho de arena a lo largo del túnel y si se observan formas de fondo.

La duración de las pruebas también es importante para la puesta en marcha, porque es un parámetro que indica cuánto tiempo demoran en aparecer las formas de fondo y, por lo tanto, cuánto deben durar los experimentos. Se debe establecer cuál es la capacidad de las trampas de arena, ya que no es deseable que se llenen y empiece a pasar arena dentro de la bomba. La capacidad de las trampas de arena se mide con el tiempo que demoran en saturarse o que no tengan efecto.

Es necesario determinar, para las diferentes configuraciones, el tipo de flujo, laminar o turbulento para lo cual se utilizan los siguientes límites dependiendo si se trata de agua o solución de CMC y agua.

- CMC + agua:  $Re_g < 2500 \Rightarrow$  Régimen laminar.  $Re_g > 2500 \Rightarrow$  Régimen turbulento.
- Agua:  $Re < 2100 \Rightarrow$  Régimen laminar.  $Re > 2100 \Rightarrow$  Régimen turbulento.

Las condiciones experimentales utilizadas en los experimentos que se realizan solo con agua en la instalación se presentan en la Tabla 3.4. Los parámetros que se incluyen en la tabla son: amplitud de la oscilación dentro del túnel de prueba, si existe o no el lecho de arena, tamaño de grano, y si existe o no recirculación. Para el caso de los experimentos con

solución de CMC en agua se tienen los mismos parámetros que para los experimentos de agua, pero se agregan los valores de los índices  $n$  y  $k$  (Tabla 3.5). Los datos utilizados para obtener estos índices se presentan en el Anexo C.

Tabla 3.4: Parámetros de las pruebas con agua realizadas en la puesta en marcha.

| Agua                              |                 |                 |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|
| Parámetro                         | Prueba 1        | Prueba 2        |
| Amplitud [ $m$ ]                  | $0,32 \pm 0,01$ | $0,32 \pm 0,01$ |
| Lecho                             | No              | Sí              |
| Rango de tamaño de grano [ $mm$ ] | —               | 1 - 1,3         |
| Recirculación                     | No              | Sí              |

Tabla 3.5: Parámetros de las pruebas con solución de CMC realizadas en la puesta en marcha.

| CMC + agua                                 |                   |                   |                   |
|--------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Parámetro                                  | Prueba 3          | Prueba 4          | Prueba 5          |
| Amplitud [ $m$ ]                           | $0,32 \pm 0,01$   | $0,32 \pm 0,01$   | $0,32 \pm 0,01$   |
| Lecho                                      | No                | Sí                | Sí                |
| Rango de tamaño de grano [ $mm$ ]          | —                 | 0,24 - 0,41       | 1 - 1,3           |
| Recirculación                              | No                | No                | Sí                |
| Índice de consistencia ( $n$ )             | $0,593 \pm 0,003$ | $0,731 \pm 0,009$ | $0,756 \pm 0,005$ |
| Índice de flujo ( $k$ ) [ $Pa \cdot s^n$ ] | $0,456 \pm 0,006$ | $0,096 \pm 0,004$ | $0,081 \pm 0,002$ |

Los transductores de presión fueron instalados en dos etapas, primero 4 y luego los 6, por lo que se tienen resultados de 4 transductores en la mayor parte de las pruebas, lo que será debidamente indicado en este informe.

Los sistemas FTP y PIV también fueron utilizados sólo en algunas pruebas que se indicarán, siendo el objetivo probar las instalaciones de los mismos y que estén en funcionamiento.

# Capítulo 4

## Resultados

El presente capítulo presenta el resultado final de la construcción de la instalación experimental, considerando el diseño presentado en el capítulo anterior. Posteriormente se explica la puesta en marcha de la instalación, se realizó mediante pruebas experimentales con agua y CMC, donde se utilizaron distintos métodos de medición de parámetros, lo que permite tener resultados cuantitativos, como presión, medidas de formas de fondo y campo de velocidad, y cualitativos, que se presentarán en base a la observación directa y mediante fotografías. Finalmente, se indican recomendaciones de mejoras en la instalación y de uso de la misma.

### 4.1. Construcción de la instalación experimental

En la presente sección se muestran los resultados de la construcción de la instalación experimental, tanto de forma general como de algunos componentes en específico.

En la Figura 4.1 se presenta una imagen general de la instalación experimental, indicando el sistema FTP, que sostiene un proyector y una cámara fotográfica, el intercambiador de calor, donde se realiza además la recirculación del flujo por las mangueras que se observan en los extremos del túnel, y el mecanismo de oscilación que genera el movimiento sinusoidal del fluido.

La Figura 4.2 muestra el tacómetro funcionando, con un sensor de proximidad, el que se acciona con una vuelta del disco en el motor, y una regleta ubicada en la chimenea del émbolo, la que permite visualizar la amplitud del movimiento del pistón.

La Figura 4.3 muestra el flujómetro en posición vertical, donde la recirculación va desde abajo hacia arriba, con lo que no se acumulan partículas que posiblemente puedan pasar por la manguera a la que se une el flujómetro.

La Figura 4.4 corresponde a una de las trampas de arena y uno de los desagües de la instalación. La Figura 4.5 presenta el termómetro digital con el que se mide la temperatura del fluido dentro del túnel de prueba.



Figura 4.1: Fotografía general de la instalación. Las dos chimeneas son verticales, sólo se ven inclinadas por la perspectiva de la fotografía.

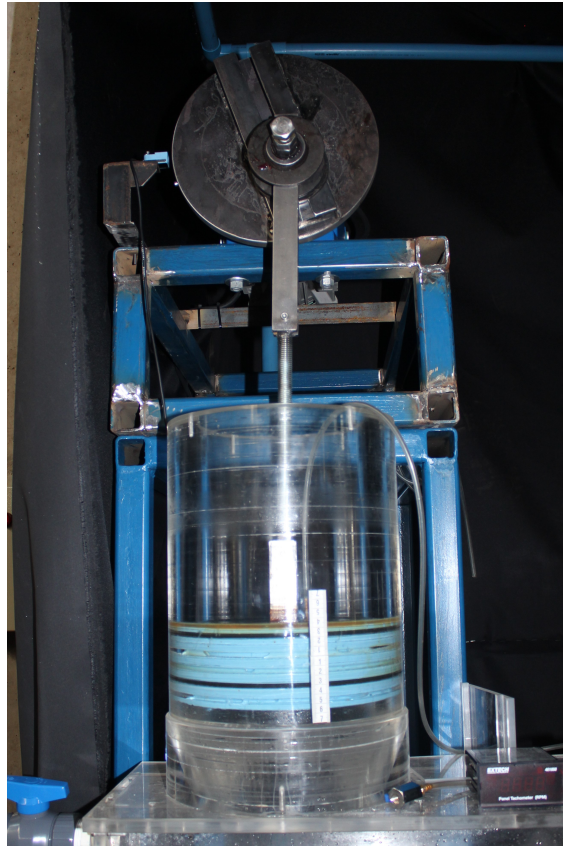


Figura 4.2: Fotografía del mecanismo de oscilación.



Figura 4.3: Fotografía de flujómetro.

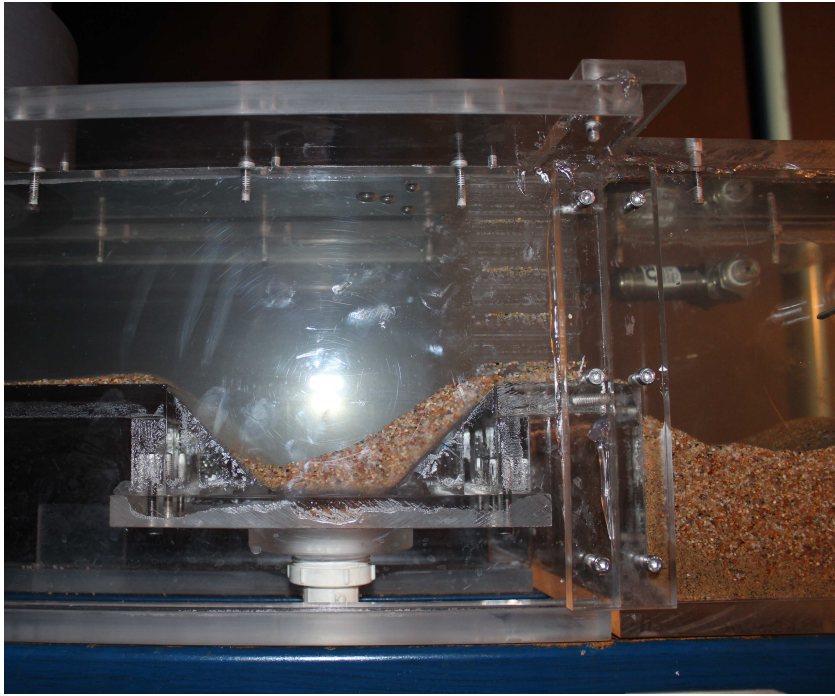


Figura 4.4: Fotografía de la trampa de arena del extremo contrario al émbolo y su respectivo desagüe.

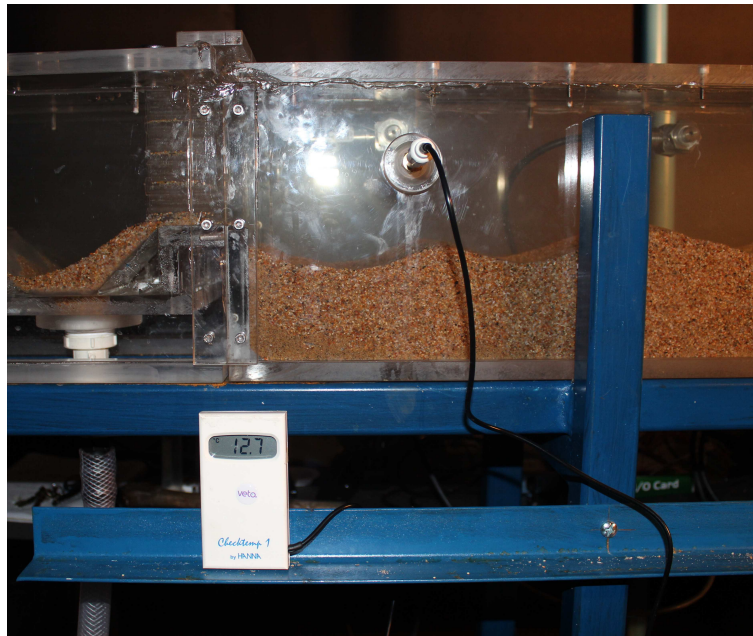


Figura 4.5: Fotografía del termómetro de pinchar en su lugar de funcionamiento.

## 4.2. Puesta en marcha

### 4.2.1. Pruebas realizadas en la puesta en marcha

En la presente sección se presentarán las pruebas realizadas durante la puesta en marcha de la instalación experimental. Las pruebas tienen como objetivo observar la respuesta del mecanismo de oscilación, así como de la estructura de soporte del túnel cuando la instalación es utilizada con agua y con CMC. Se realizan además pruebas con agua y CMC, en las que se tiene un lecho de arena con el fin de conocer si se pueden observar formas de fondo a lo largo del túnel. También se debe registrar el resultado de las formas de fondo que se obtengan durante y al final de las pruebas, para lo que se utiliza una cámara lateral y el sistema FTP.

Otro factor importante que se registra en las pruebas realizadas es el tiempo de las mismas, ya que el transporte de partículas que se produce por la recirculación debe ser menor a la capacidad de las trampas de arena.

En todas las pruebas realizadas se comparte la misma amplitud de movimiento del pistón, la que corresponde a  $A = 13,5 \text{ cm}$ . Esta amplitud de movimiento del pistón corresponde a una amplitud de oscilación de  $15,7 \text{ cm}$  en el túnel de prueba cuando no hay lecho y a  $31,5 \text{ cm}$  cuando sí hay lecho de arena.

En las pruebas 3, 4 y 5 con lecho de arena se presentan las mediciones de arrastre incipiente, siendo el arrastre incipiente definido como el momento en el que comienza un movimiento claro de las partículas de arena en el contacto fluido-sólido. Para ello se presenta el tiempo y la velocidad en la que se produce.

#### **Prueba 1: Agua - Sin lecho de arena**

La primera prueba realizada en la instalación se realizó con agua, sin lecho de arena y con flujo base, con el fin de verificar cómo reacciona la instalación con fluido y cómo funciona el mecanismo. Además, es una prueba que sirve para identificar las fallas en el túnel, como filtraciones o burbujas dentro de él.

La duración de la prueba fue de 1 hora y 5 minutos, la duración más corta de todas las realizadas durante la puesta en marcha. Esto se debió a que habían muchas filtraciones lo que no permitía tener la instalación funcionando continuamente, pero el mecanismo de oscilación pasó la prueba satisfactoriamente. La frecuencia de oscilación fue desde 5 RPM, el mínimo posible de medir, hasta 30,2 RPM. No se continuó aumentando la velocidad del motor debido a las filtraciones y a que se decidió mejorar la estructura de soporte. En esta prueba no se tenía flujómetro ni transductores de presión en funcionamiento.

## Prueba 2: CMC - Sin lecho de arena

La prueba 2 se realizó sin lecho, con flujo base y una solución de CMC con alta viscosidad ( $n = 0,59$  y  $k = 0,46 Pa \cdot s^n$ ), de manera que su comportamiento se alejara de lo observado con el agua. De esta forma se pudo probar el mecanismo con un fluido pseudoplástico y verificar si la potencia del motor sería suficiente para mover el fluido de un lado a otro, considerando que las pérdidas de energía debido a la fricción son mayores en un líquido más viscoso que con agua.

La respuesta de la estructura y del túnel mejoró con respecto a la primera prueba, por los arreglos de las filtraciones y el fortalecimiento de la estructura de soporte. La prueba tuvo una duración de 3 horas y la frecuencia máxima de oscilación fue de 42 RPM, equivalente a un período  $T = 1,43 s$ . Con esto se pudo verificar que el mecanismo de oscilación y el émbolo funcionan de acuerdo a lo esperado con la posibilidad de llegar a 42 RPM y poder aumentar esta velocidad con los cuidados respectivos. Hubo flujo base durante la tercera hora de prueba y a medida que se aumentó el caudal se generaron *microburbujas* que impiden la visión a través de las paredes del túnel. En esta prueba no se tenía el flujómetro instalado, por lo que en las próximas pruebas se tuvo que aumentar el caudal de manera cuidadosa de forma que no se llene el túnel de *microburbujas* y poder encontrar un rango de funcionamiento óptimo de la bomba. Tampoco se tenían los transductores de presión instalados por lo que no se tienen resultados de la presión en el túnel.

## Prueba 3: Agua - Con lecho de arena

La prueba 3 se realizó con agua como fluido dentro del túnel, con lecho de arena en la sección de prueba y flujo base. El diámetro medio del sedimento es  $d_{50} = 1,2 \pm 0,1 mm$ , correspondiente a una arena gruesa, cercana a un tamaño grava ( $2 - 20 mm$ ). Este tamaño se escogió para verificar que se observaran formas de fondo en el lecho del túnel, lo que es esperable según la experiencia en otras instalaciones similares (Calantoni et al., 2013). Si esto sucede se puede concluir que con todos los tamaños menores al utilizado habrá transporte y por lo tanto se pueden estudiar sus formas de fondo.

La temperatura al inicio de la prueba es de  $11,8^{\circ}C$ , y al final es de  $12^{\circ}C$ , luego de 2 horas de funcionamiento del sistema. La presión dentro del túnel se mide con 4 transductores de presión que corresponden a los transductores 1, 2, 4 y 6 definidos en la sección 3.1.2. En estas pruebas no se obtuvieron datos coherentes. Los datos obtenidos se presentan en la Figura 4.6. Como se puede observar, las curvas de presión no siguen un patrón similar a la presión teórica y esta diferencia no podría ser atribuida solo a las formas de fondo. Este error tiene que ver con la instalación de los transductores de presión.

Se inició el movimiento en 5 RPM, observándose arrastre incipiente a los 18,5 RPM ( $T = 3,24 s$ ). Las dunas se pueden observar claramente desde una frecuencia de oscilación igual a 26 RPM ( $T = 2,31 s$ ), habiendo pasado 20 minutos de experimento. La instalación se deja funcionando a una velocidad constante de 27,6 RPM ( $T = 2,17 s$ ) durante 30 minutos. Las formas de fondo encontradas corresponden a una forma entre rizo y duna, ya que  $\lambda < 0,5 m$  y  $\eta > 0,05 m$  (Figura 4.7) Pedocchi & García (009a). Las dunas formadas tienen tres



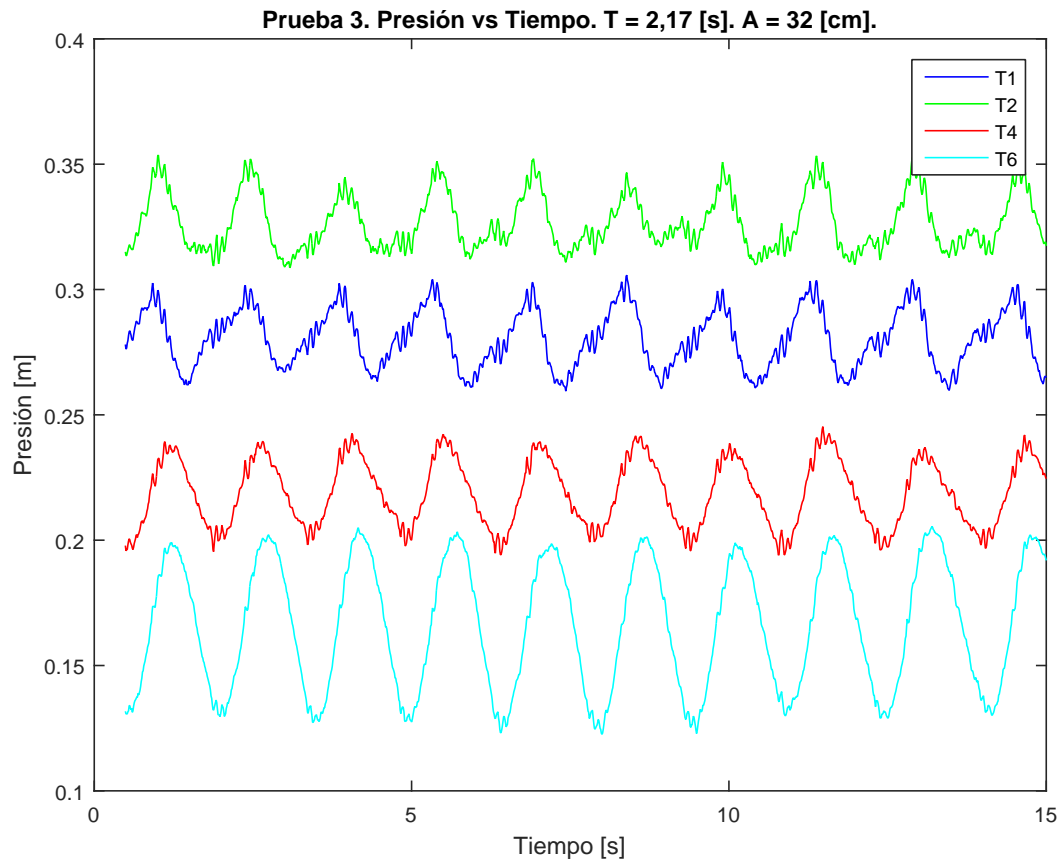


Figura 4.6: Presión medida por los transductores 1, 2, 4 y 6 durante la Prueba 3.

dimensiones (hay un lado del valle de la onda que es más alto que el opuesto, el lado más alto se intercala entre duna y duna) como se observa en la Figura 4.7. Se probó la recirculación del flujo durante 30 minutos con un caudal de  $Q = 1,53 \text{ m}^3/h = 25,5 \text{ l/min}$ . La duración total de la prueba fue de 1,5 horas.

Se pueden observar diferencias en los efectos provocados en las formas de fondo por el flujo oscilatorio y el flujo de recirculación. El flujo oscilatorio genera ondas paralelas en el lecho de arena, mientras que al funcionar el flujo base, el centro de la onda avanza con respecto a los extremos y se produce una forma de parábola.

Las trampas de arena se llenan con sedimento al término de la prueba, por lo que si se realiza un experimento en la instalación con agua su duración debe ser menor a 1,5 horas. La única diferencia en el efecto que se observa en el transporte de sedimentos comparando la oscilación y la recirculación es que mientras en la oscilación se transporta arena hacia ambos extremos del túnel, en la recirculación es solo en el sentido del flujo. Es necesario mencionar que la principal función de la instalación es ser utilizada con fluidos no-newtonianos, por lo que el transporte de sedimentos es menor, como se observará en las siguientes pruebas.

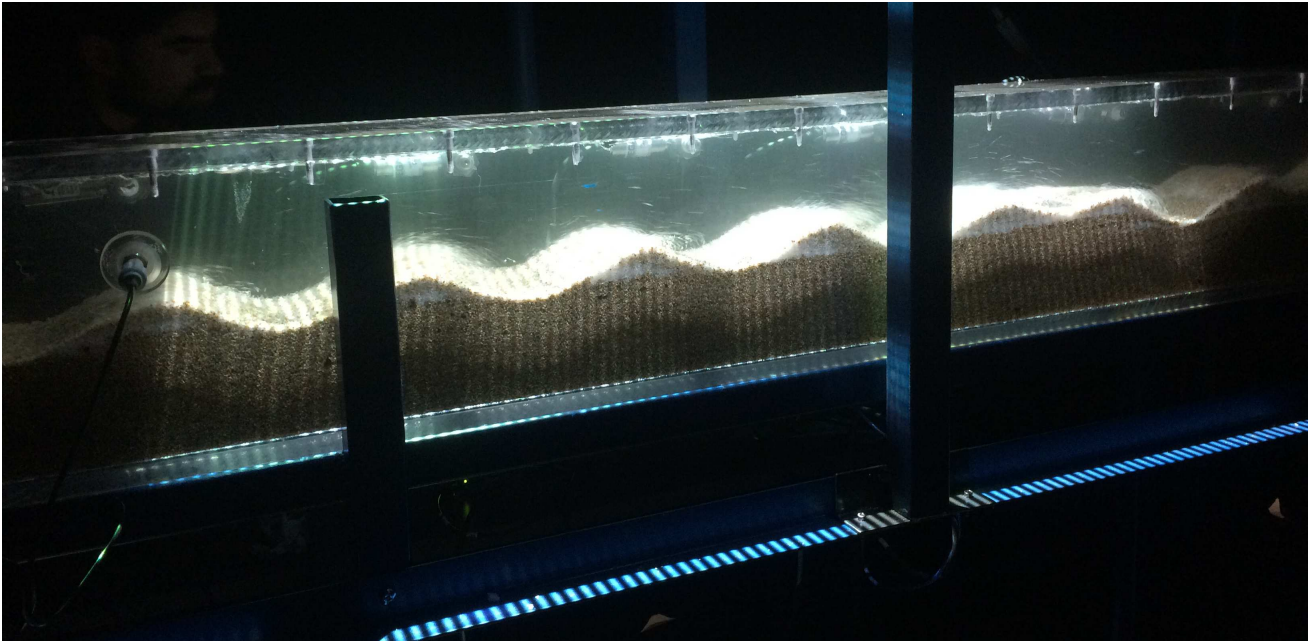


Figura 4.7: Fotografía en perspectiva de las formas de fondo generadas en el túnel con agua. Las líneas que se ven sobre el lecho son la proyección de la imagen que se utiliza para el sistema FTP.

#### Prueba 4: CMC - Con lecho de arena

La prueba 4 se realizó con CMC como fluido y con lecho de arena. Los índices  $n$  y  $k$  son respectivamente 0,73 y 0,10  $Pa \cdot s^n$ . La arena tiene un tamaño  $d_{50} = 0,33 \pm 0,09 \text{ mm}$ . Se escoge este tamaño para probar si existe movimiento de partículas y si se observan formas de fondo con un diámetro de sedimento cercano a la categoría arena fina (0,06 – 0,2 mm), a diferencia de la utilizada en la prueba 3, que es más cercana al tamaño grava. Se prueba con este tamaño ya que en experimentos realizados en un estanque de oleaje con soluciones de CMC como fluido, este tamaño de arena se ha comportado como un material cohesivo, por lo que no se ha observado movimiento de las partículas.

La temperatura al inicio de la prueba fue  $13,3^\circ C$  y al término de la prueba es de  $14,4^\circ C$ . La prueba tuvo una duración de 1,25 horas.

Las tomas piezométricas corresponden a 1, 2, 4 y 6 (las mismas de la prueba 3). En esta prueba tampoco se pudieron obtener resultados coherentes de los transductores de presión. Los datos obtenidos se presentan en la Figura 4.8. Las curvas de los transductores 2 y 6 se alejan de las curvas de los transductores 1 y 4, los que sí tienen un comportamiento similar al teórico.

Se registró arrastre incipiente con una frecuencia de oscilación de 15 RPM ( $T = 4 \text{ s}$ ). Se aumentó gradualmente la frecuencia de oscilación desde 5 hasta 26,6 RPM ( $T = 2,26 \text{ s}$ ) en 20 minutos. Se deja con esta velocidad durante 40 minutos. Se observan formas de fondo de tamaño rizo y tridimensionales (Figura 4.9), por lo que el tamaño de grano escogido sirve

para la visualización de formas de fondo y es posible probar tamaños más pequeños.

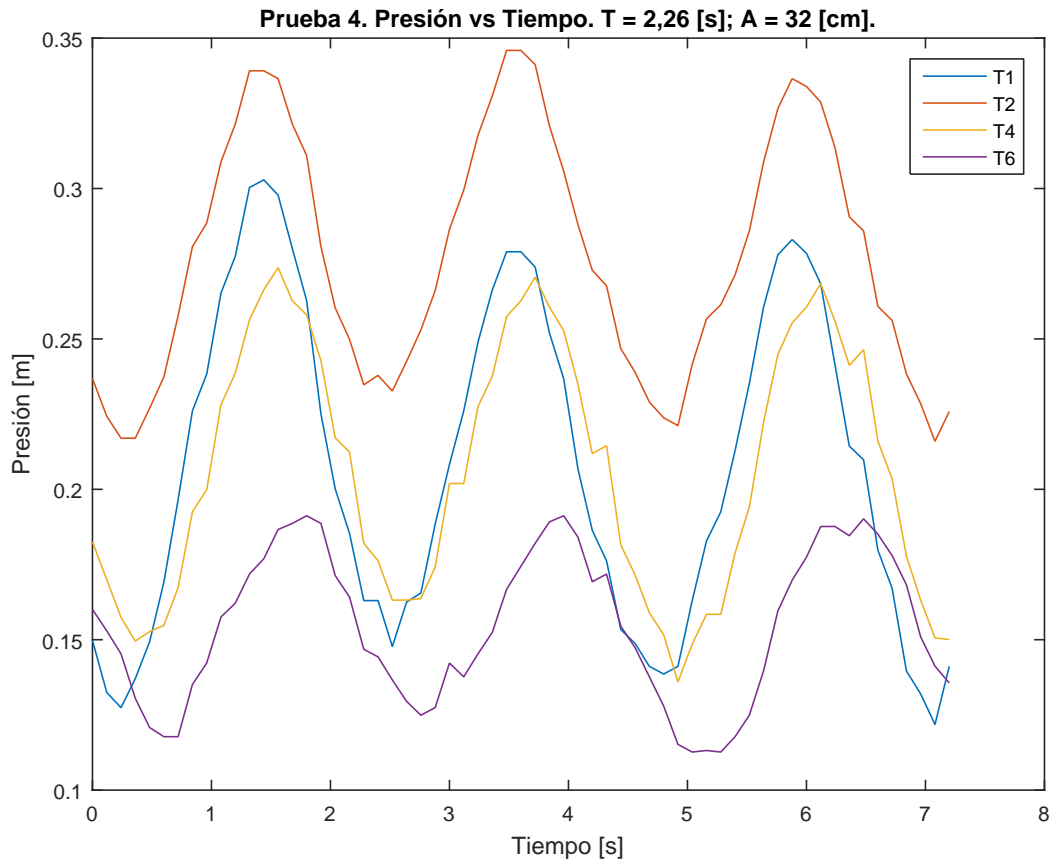


Figura 4.8: Presión medida por los transductores 1, 2, 4 y 6 durante la Prueba 4.



Figura 4.9: Fotografía lateral de las formas de fondo que se generaron durante la prueba 4.

En la presente prueba de la puesta en marcha no se realizó recirculación. De igual forma se puede definir que las trampas de arena funcionan bien para este tamaño de grano por no ocupar mucho espacio de las mismas (Figura 4.10).

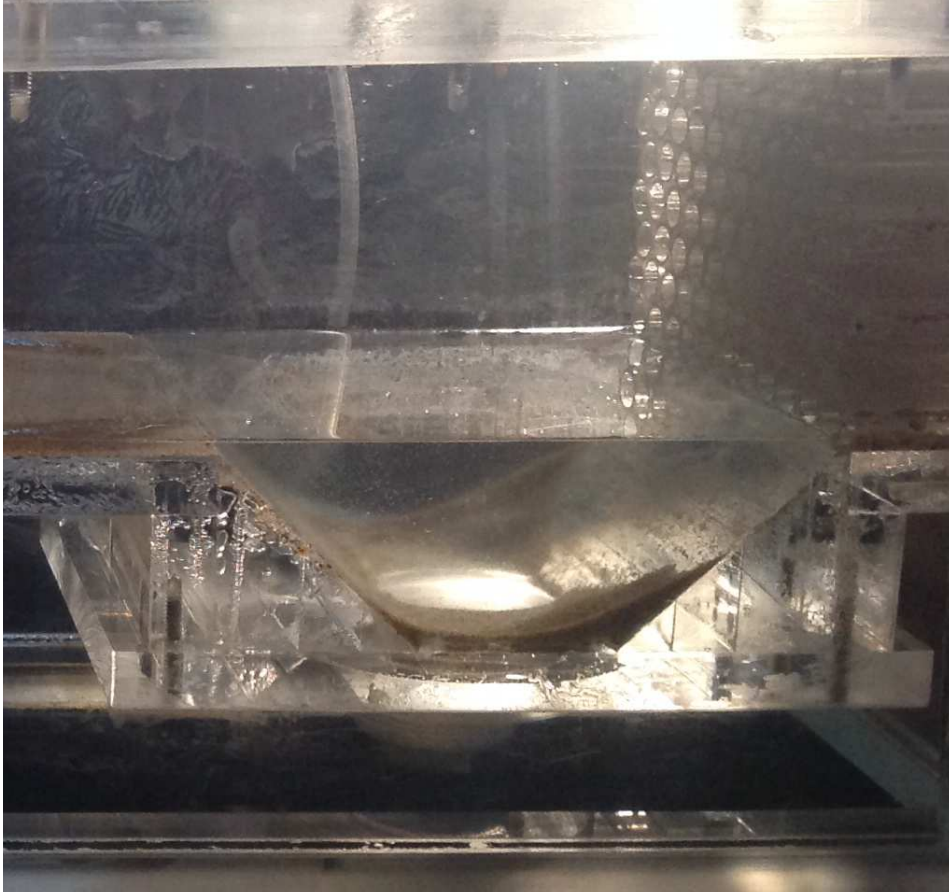


Figura 4.10: Fotografía lateral de la trampa de arena al finalizar la prueba 4.

### Prueba 5: CMC - Con lecho de arena

En la prueba 5 hay lecho de arena, recirculación y solución de CMC como fluido. La solución de CMC tiene índices  $n = 0,76$  y  $k = 0,08 Pa \cdot s^n$ . El tamaño de la arena es  $d_{50} = 1,2 \pm 0,1 mm$ , el mismo de la prueba 3 realizada con agua. El objetivo de realizar la prueba con este tamaño es conocer si en un medio más viscoso que el agua, como el CMC, puede existir transporte de sedimentos y formas de fondo.

La duración de la prueba fue de 1,5 horas y la temperatura varió desde  $13,6^{\circ}C$  al inicio hasta  $16,3^{\circ}C$  al final. Los transductores de presión que se utilizaron en el registro son los mismos de las pruebas 3 y 4. Esta presión se muestra en la Figura 4.11. Las curvas de los datos de presión siguen un comportamiento similar al de la presión teórica (Figura 3.7) con diferencias que se pueden deber a las formas de fondo. Se puede observar ruido proveniente de la electrónica de los transductores en las cimas de las ondas. Además, se presenta una medición de la presión de las 6 tomas piezométricas funcionando tomada al final de la prueba 5 (Figura 4.12). En este caso, las diferencias en la presión con respecto a la presión teórica

y a la situación anterior son las formas de fondo generadas. En esta medición mucho más pronunciadas que en la medición anterior.

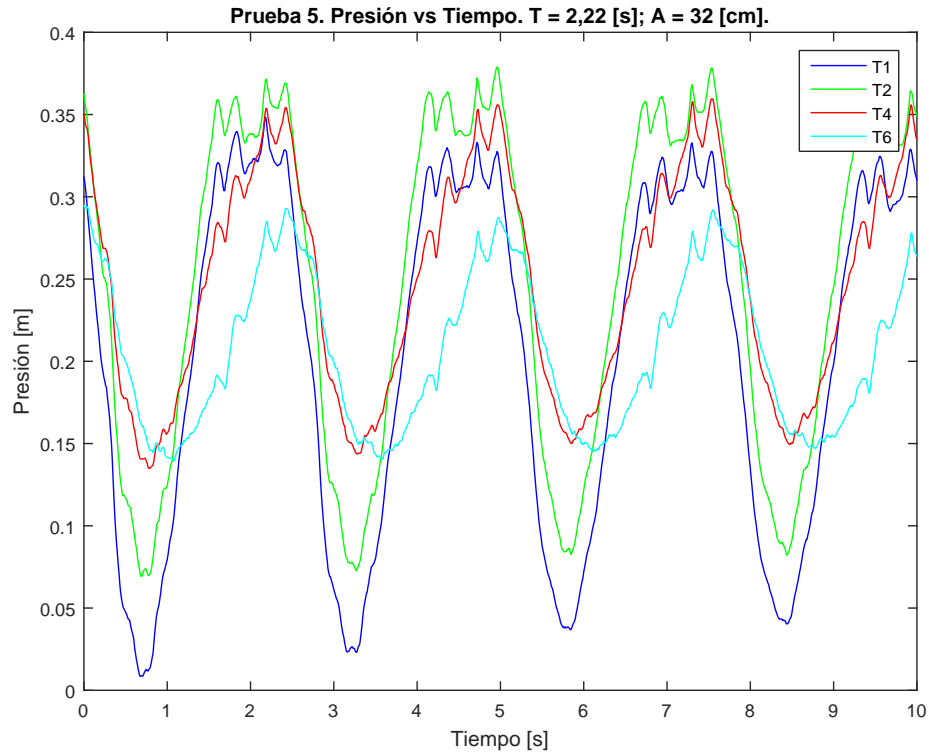


Figura 4.11: Medición de los transductores de presión 1, 2, 4 y 6 durante la prueba 5.

El arrastre incipiente se registra a una frecuencia de la oscilación de 16,7 RPM ( $T = 3,59 s$ ) a los 10 minutos de iniciada la prueba. Posteriormente, se dejó el sistema funcionando a una frecuencia de 27 RPM ( $T = 2,22 s$ ) durante 50 minutos y se observan formas de fondo. Estas formas de fondo se presentan en la Figura 4.13 y se clasifican como rizos bidimensionales.

La recirculación se realizó durante 20 minutos, aumentando el caudal de  $Q = 0,60 m^3/h = 10 l/min$  a  $Q = 3,59 m^3/h = 60 l/min$  con el movimiento oscilatorio a una frecuencia de 23 RPM. La trampa de arena fue sobrepasada en este caso, por lo que tampoco se pueden realizar experimentos de más de 1,5 horas.

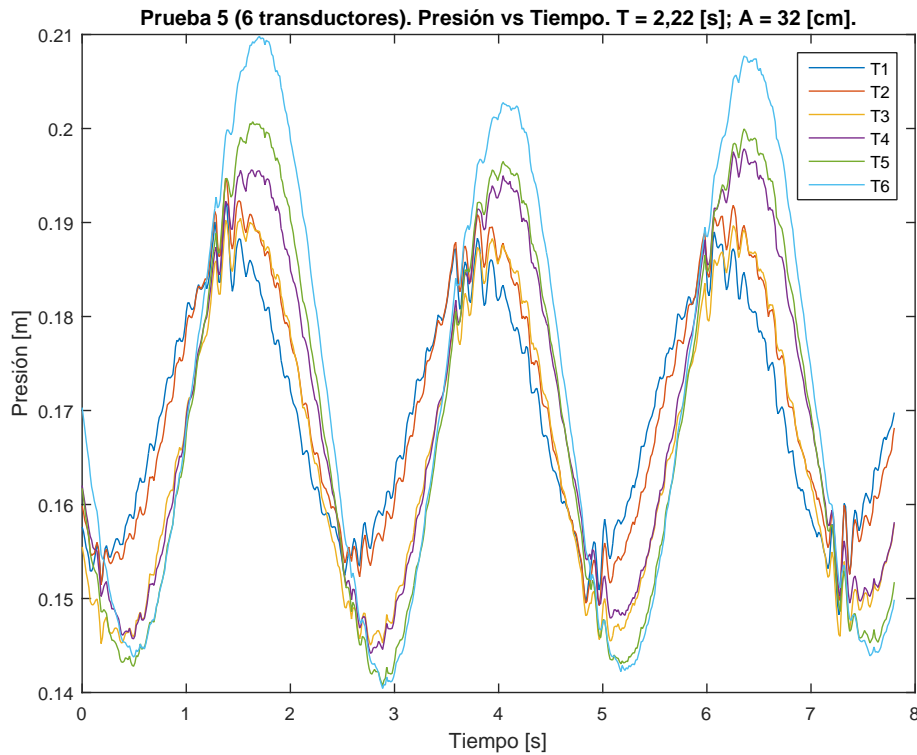


Figura 4.12: Medición de 6 transductores de presión al final de la prueba 5 con el lecho deformado.



Figura 4.13: Fotografía lateral de las formas de fondo que se generaron durante la prueba 5 con escala de 50 cm en la parte superior.

### Prueba 6: CMC - Con lecho de arena - Medición con FTP

La prueba 6 se realizó con CMC, lecho de arena y recirculación. Los índices de flujo y consistencia del fluido pseudoplástico son  $n = 0,68$  y  $k = 0,1 Pa \cdot s^n$ . El diámetro de arena es  $d_{50} = 1,2 \pm 0,1 mm$ . Se utilizaron condiciones similares a la de la Prueba 5, pero en esta prueba se utilizó el sistema de perfilometría por transformada de Fourier. Para utilizar el FTP fue necesario instalar un dren que se ubica en una orilla de la tapa del túnel de prueba. El dren permite eliminar las burbujas que podrían quedar en bajo la tapa, las que impiden utilizar bien el FTP.

El arrastre incipiente se da a una frecuencia de oscilación de 16,5 RPM ( $T = 3,64 s$ ) a 3 minutos de iniciada la prueba. A partir de los 7 minutos de iniciada la prueba, se mantuvo la frecuencia de oscilación en 26 RPM ( $T = 2,3 s$ ) durante 30 minutos. A esta frecuencia las formas de fondo no se obtuvieron claramente, por lo que se subió la frecuencia a 30 RPM ( $T = 2 s$ ) durante 15 minutos, con lo que se obtuvieron formas de fondo similares a las de la Prueba 5 (Figura 4.13). Finalmente, se disminuye la frecuencia a 26 RPM ( $T = 2,3 s$ ) y se activa la recirculación durante 15 minutos con un caudal  $Q = 2,53 m^3/h = 42 l/min$ . La temperatura inició a  $14,2^\circ C$  y luego de 1,25 horas llegó a  $14,8^\circ C$ .

Las mediciones en los transductores de presión se presentan en la Figura 4.14. En esta medición no había recirculación. Se puede observar que el comportamiento de la presión es similar a la presión teórica, ya que prácticamente no había cambios apreciables en el lecho, por lo que se había mantenido la sección de flujo constante.

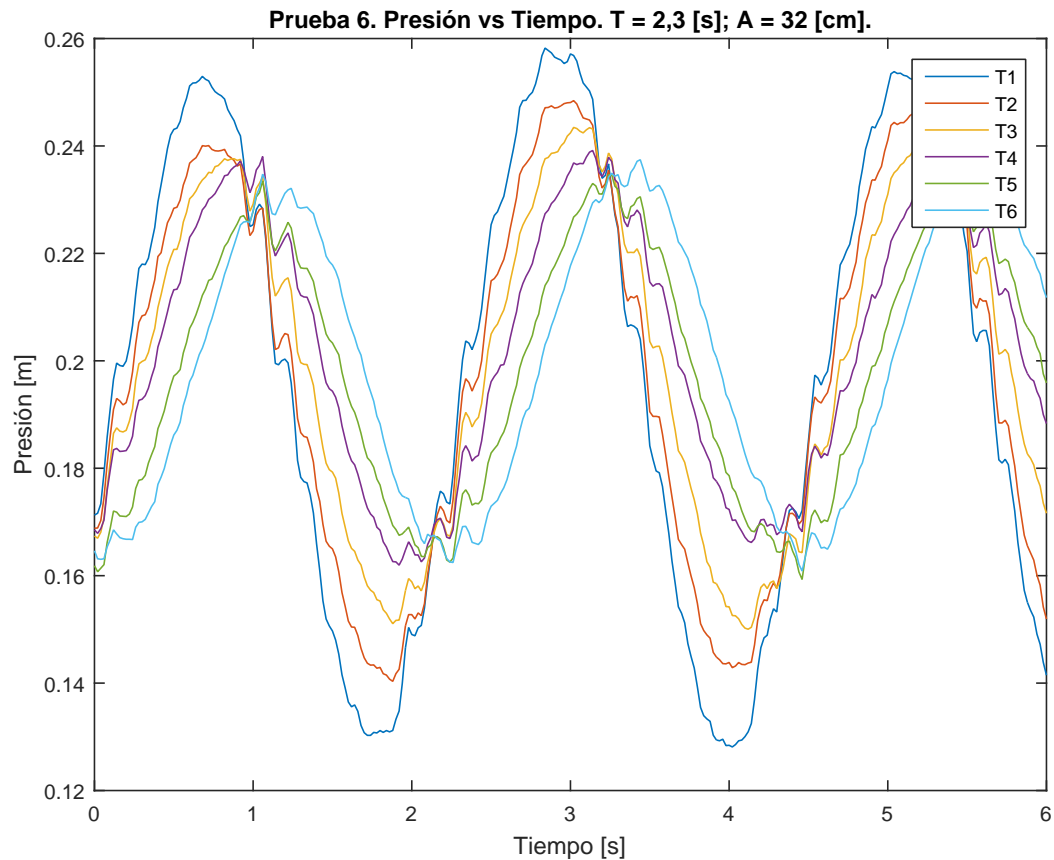


Figura 4.14: Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 6.

Durante esta prueba se utilizó el sistema FTP durante la prueba, en la que se tomaron 55 fotografías para procesar. Se analizó una sección de  $0,15 \times 0,05 cm^2$ . Se presentan los resultados correspondientes al inicio de la prueba (Figura 4.15) y al final de la misma (Figura 4.16). En los gráficos se puede notar que al inicio el fondo es prácticamente plano, mientras que en el final se tiene una duna bien marcada.

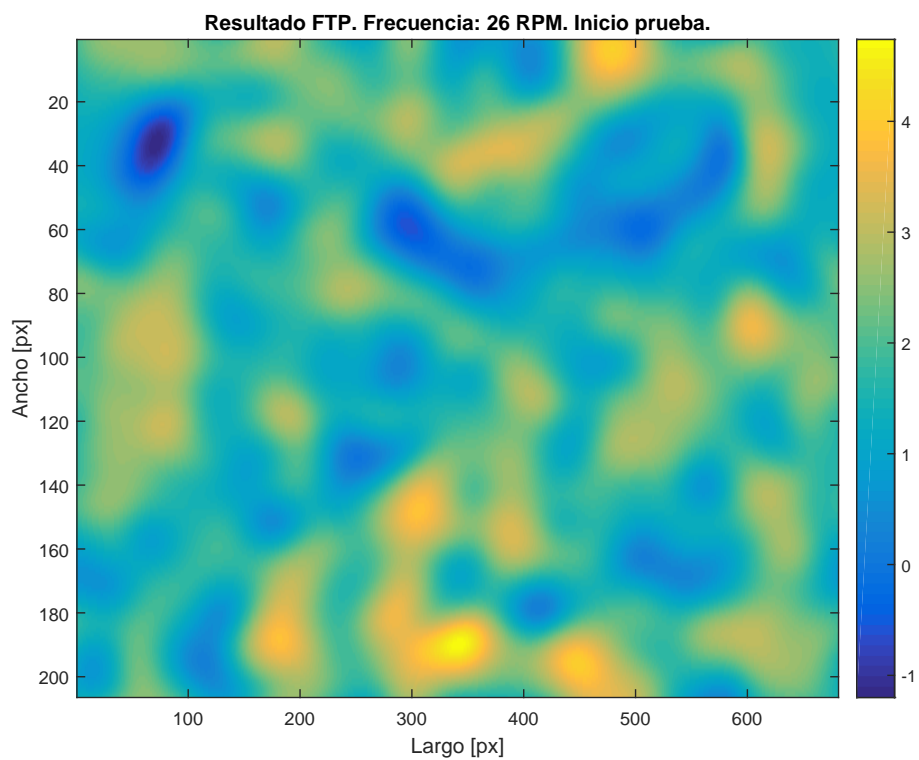


Figura 4.15: Resultado de perfilometría por transformada de Fourier al final de la prueba 6 (Frecuencia oscilación: 26 RPM).

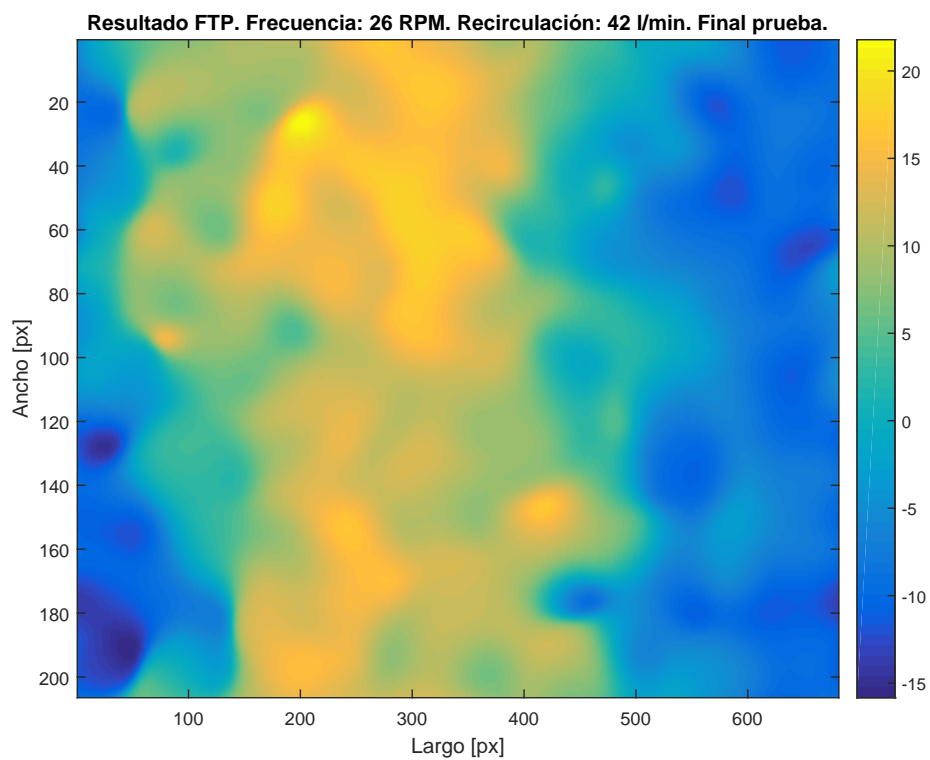


Figura 4.16: Resultado de perfilometría por transformada de Fourier al final de la prueba 6 (Frecuencia oscilación: 26 RPM;  $Q$ : 42 l/min).



## Prueba 7: CMC - Fondo plano - PIV

La prueba 7 necesitó de la instalación de un *fondo falso* que se ubica en el túnel de prueba a la misma altura que se deja el lecho de arena para la realización de las pruebas anteriores (Figura 4.17). De esta forma se tiene una sección transversal constante de  $0,15 \times 0,10$  (ancho x alto)  $cm^2$ .

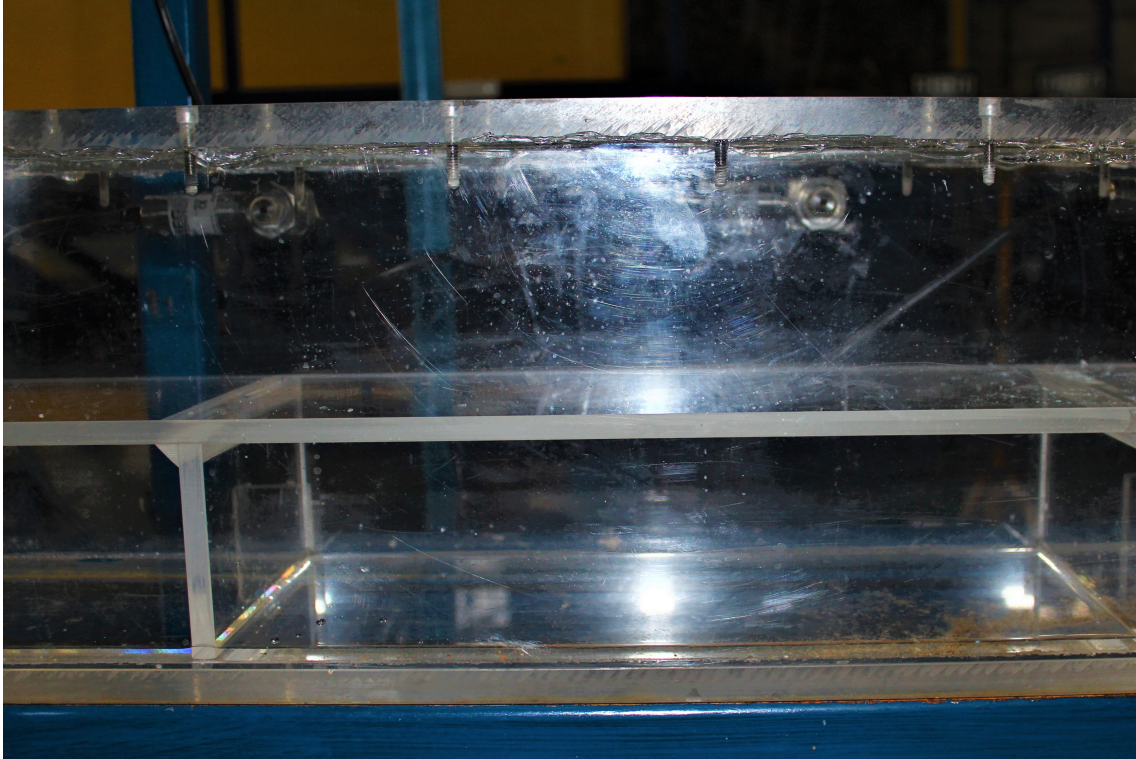


Figura 4.17: Túnel de prueba con *fondo falso* instalado.

El objetivo de esta prueba es comparar la situación teórica de la Figura 3.7 en las mismas condiciones experimentales para las cuales se calculó y poder comparar las presiones, principalmente en la forma de la curva. Se utiliza CMC como fluido con los índices de flujo y consistencia  $n = 0,71$  y  $k = 0,08 Pa \cdot s^n$ .

Los resultados de esta prueba se presentan en las Figuras 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21, correspondientes a frecuencias de oscilación de 30 RPM, 35 RPM, 40 RPM y 20 RPM más recirculación de  $60 l/min$ .

En los gráficos presentados se puede observar que a medida que se aumenta la frecuencia de oscilación se aumenta la amplitud de la onda de presión en el túnel. Además, la amplitud de la onda de presión es mayor en los transductores más cercanos al pistón que en los más alejados de él, como se puede observar también en la Figura 3.7. Para el caso de la recirculación, la curva de presión es desplazada más hacia la derecha en las tomas piezométricas que están más alejadas del pistón que en las más cercanas.

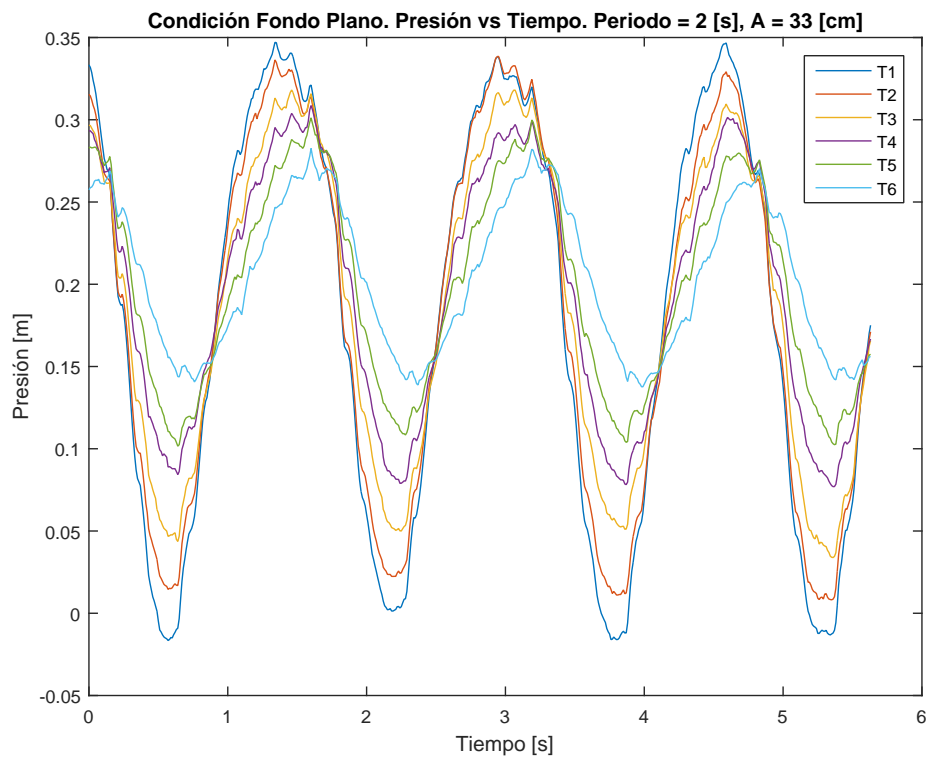


Figura 4.18: Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 30 RPM.

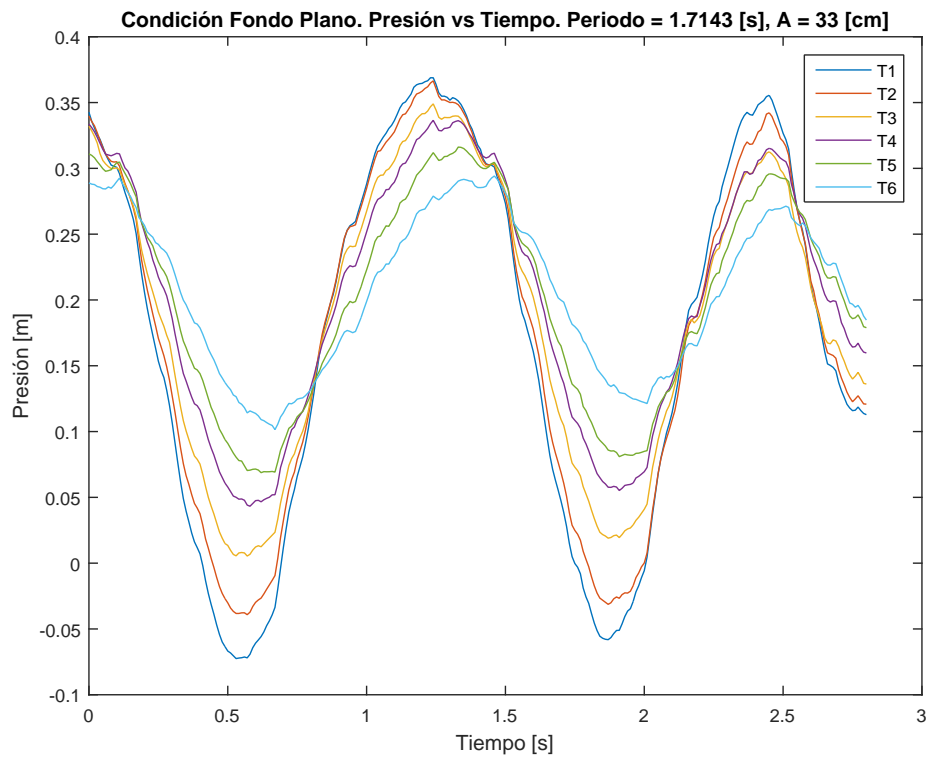


Figura 4.19: Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 35 RPM.

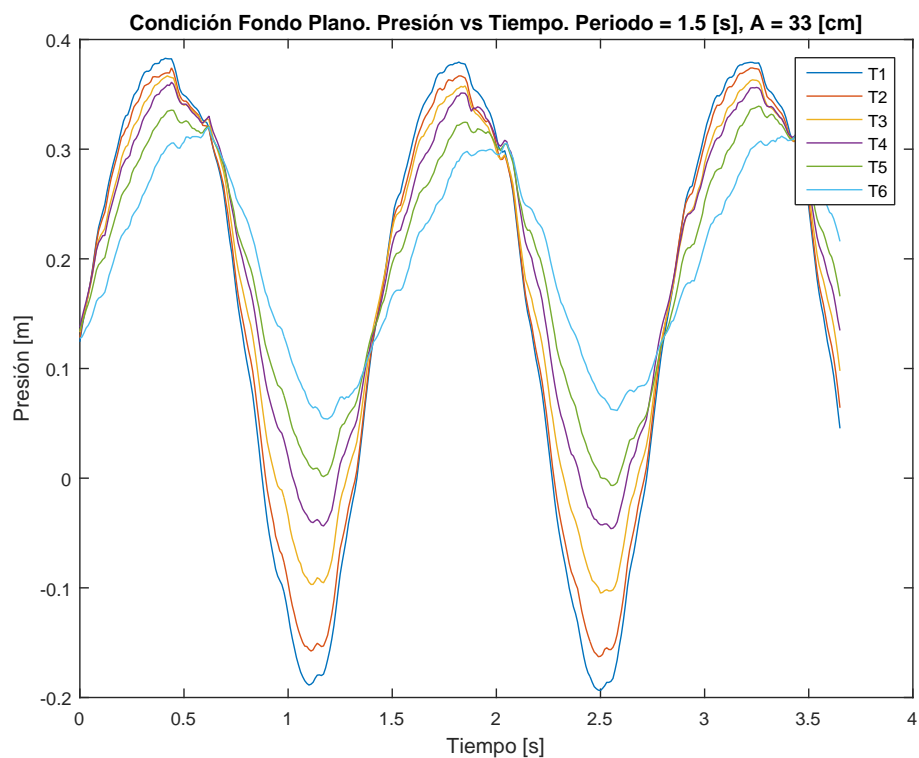


Figura 4.20: Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 40 RPM.

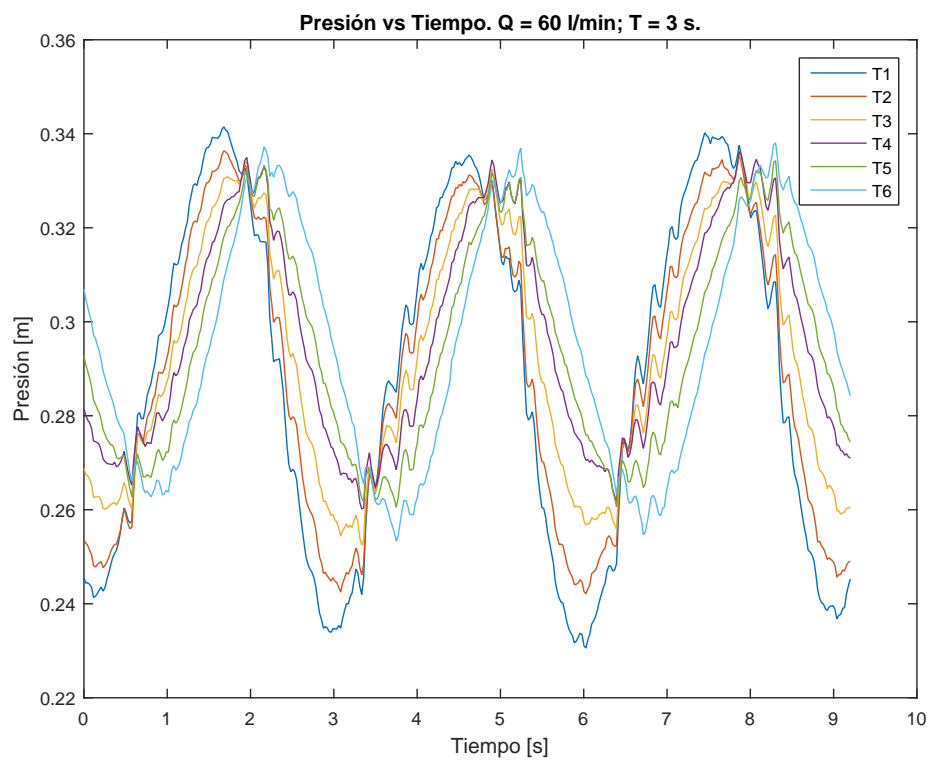


Figura 4.21: Medición de 6 transductores de presión durante la prueba 7 con frecuencia de oscilación 20 RPM y recirculación de 60 l/min.

En esta prueba se utilizó el sistema de medición óptico PIV, el que entrega el campo de velocidades del flujo en el túnel (Figura 4.22). A partir del campo de velocidades se puede obtener el perfil de velocidades instantáneo en distintos tiempos, lo que se presenta en la Figura 4.23, o en distintas secciones de una imagen, es decir, en un mismo tiempo (Figura 4.24). Los resultados obtenidos se encuentran dentro de lo esperado (flujo laminar en tuberías).

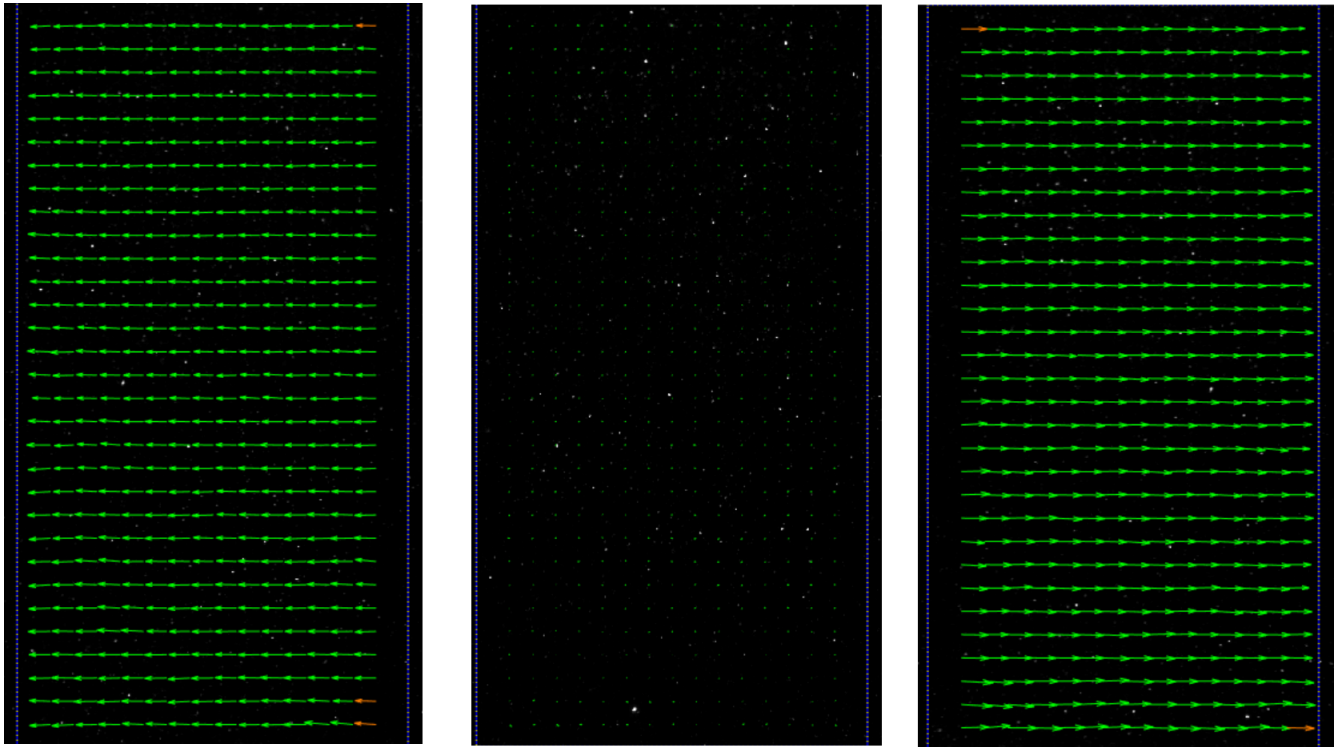


Figura 4.22: Resultado del campo de velocidades obtenido con PivLab en distintos tiempos de la oscilación. Izquierda: Velocidad negativa. Centro: Velocidad nula. Derecha: Velocidad positiva.

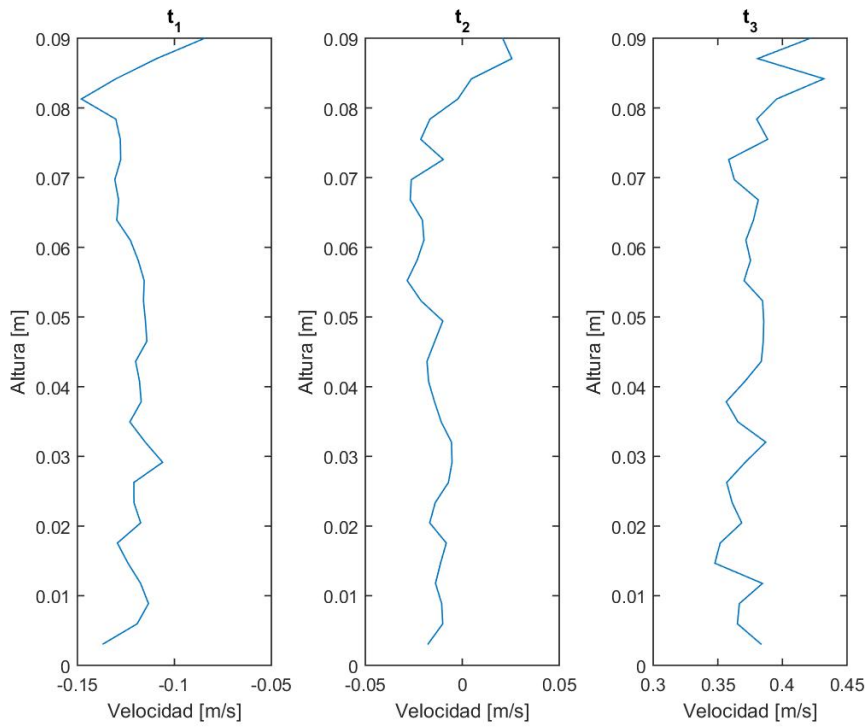


Figura 4.23: Perfiles de velocidad en 3 tiempos distintos.

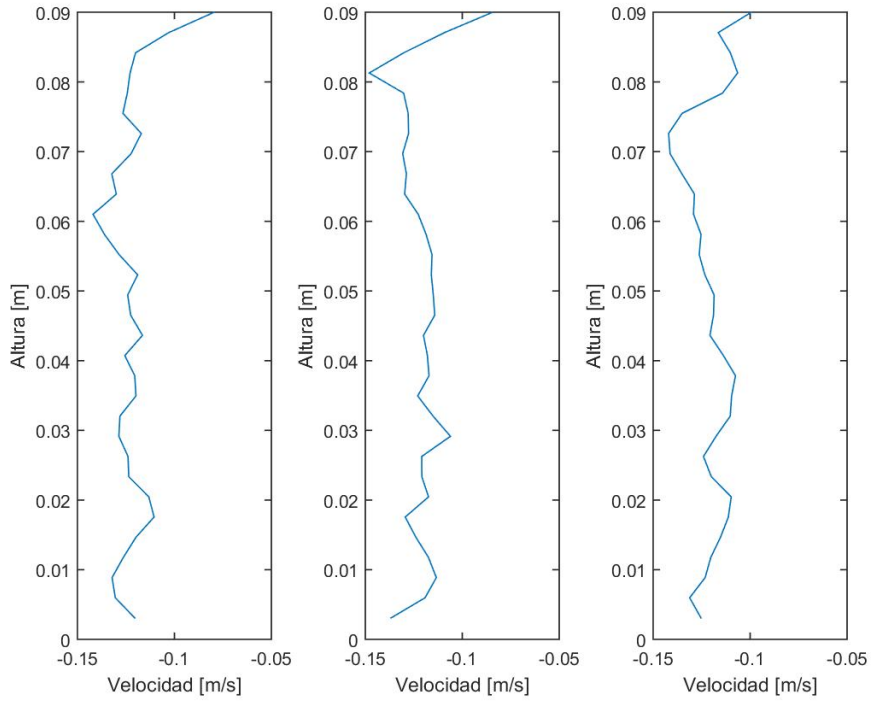


Figura 4.24: Perfiles de velocidad para tres secciones (izquierda, centro y derecha) en un mismo tiempo con velocidades negativas.

## 4.2.2. Análisis general de la puesta en marcha

La puesta en marcha ha permitido establecer rangos de diámetro de arena, periodo de oscilación, caudal de recirculación y duración de los experimentos.

El diámetro de sedimento para el cual se obtuvieron formas de fondo producidas por el movimiento oscilatorio de solución de CMC es entre 0,21 y 1,30 *mm*. En el caso del límite superior se observan formas de fondo bien definidas, por lo que se puede seguir aumentando el diámetro para conocer el límite de movimiento con CMC, en el que se observen formas de fondo. Para el caso del límite inferior se observaron formas de fondo menos definidas, por lo que se espera estar más cerca del límite del movimiento. En diámetros más bajos probablemente el sedimento se comporte de manera cohesiva con el CMC.

La velocidad de la oscilación se ha comprobado que, al menos, puede variar entre 5 y 42 RPM, aproximadamente. Este es un rango bastante amplio para la frecuencia del movimiento, considerando que por lo general en las pruebas realizadas el arrastre incipiente se produjo a una frecuencia de oscilación menor a 20 RPM ( $T = 3,3$  s) y las formas de fondo se distinguen a partir de ese mismo límite de 20 RPM.

El caudal de recirculación se probó entre 10 y 60 *l/min* correspondiente a los límites para los cuales se diseñó la instalación. Estos límites se establecieron en base a los experimentos realizados en las instalaciones descritas en la sección 2.1. El funcionamiento para este caudal fue satisfactorio, considerando que no se produjeron burbujas que impidieran ver con claridad el flujo a través de las paredes. La duración de los experimentos está íntimamente relacionada con el caudal de recirculación debido a que influye en la cantidad de granos de arena que salen a la zona de trampas de arena. En las pruebas realizadas se pudo determinar que la duración de los experimentos puede ir entre 1,5 y 2 horas dependiendo de las características del flujo.

La temperatura del fluido dentro de la instalación se mantuvo estable con diferencias de 2,7°C como máximo, por lo que el intercambiador de calor ha podido funcionar bien durante las pruebas.

La perfilometría por transformada de Fourier arrojó los resultados esperados, realizando una buena representación de las dunas formadas. Es importante para poder representar la tridimensionalidad de la duna cuando corresponda para diversas configuraciones.

El sistema de medición óptico PIV entrega resultados de los campos de velocidades que son esperables para un flujo laminar. Sin embargo, los perfiles de velocidad, al ser datos instantáneos brutos, no son totalmente representativos del flujo. Estos resultados se podrían mejorar haciendo varias filmaciones de una misma oscilación y analizando los instantes coincidentes de la filmación. De esta manera, se podría obtener un promedio de los perfiles de velocidad y realizar un análisis más completo del movimiento.

### 4.3. Recomendaciones de la instalación

En la presente sección se nombran algunas mejoras que se pueden realizar en la instalación experimental y que se han identificado con el uso de la misma en la puesta en marcha del sistema.

La primera limitante que se observa en la instalación es la del tiempo que podrían durar las experiencias, debido a la poca capacidad de las trampas de arena. Además, fue posible observar que la ubicación de las trampas de arena sirve bien para el agua, ya que las partículas se depositan en su mayoría en la trampa. En cambio, con las soluciones de CMC las partículas flotan más, por lo que llegan más lejos y se depositan fuera de las trampas de arena. Para subsanar este problema se propone la creación de nuevas trampas de arena que se ubiquen en los extremos del túnel, después de ambas chimeneas, para lo que se tendría que hacer una pequeña extensión del túnel de unos 20 *cm* en cada uno de los extremos. Esta ampliación no sería complicada en su construcción, ya que el túnel original se diseñó con la posibilidad de extensiones.

Se debe controlar constantemente el ajuste de los o-ring, ya que la goma se puede gastar y debe estar siempre con una lubricación adecuada, la que se realiza con vaselina líquida y en pasta. Esto es importante porque un buen ajuste permite que no filtre agua desde el túnel sobre el émbolo.

Otra de las dificultades que se puede identificar en el sistema es la de la forma que se utiliza para sacar y colocar la placa superior del túnel. El proceso consiste en unirlo con pernos y sellarlo con silicona. Demora cerca de 4 horas de instalación y unas 20 horas de secado, por lo que para un mejor aprovechamiento de la instalación y mayor durabilidad de la misma se podría utilizar otro sistema de sellado. Se puede estudiar la posibilidad de utilizar sellos de goma a presión, los que fueron considerados durante el diseño, pero que debido al tiempo requerido para su confección no se utilizaron en la construcción.

Para un buen funcionamiento del FTP se recomienda la utilización de arena blanca, para de esta forma tener un mejor procesamiento de los datos y lograr mejores resultados.

La obtención de campos de velocidad cuando se tenga un lecho de arena, situación que no se ha llevado a cabo en este trabajo, se deberán tener varias secciones a lo largo del túnel para así representar de mejor manera la interacción del flujo y el fondo. Esta interacción es muy importante para la formación de formas de fondo.

# Capítulo 5

## Conclusiones

El desarrollo de este trabajo consistió en el diseño, construcción y puesta en marcha de una instalación experimental consistente en un túnel con lecho de arena. En el túnel se generan movimientos oscilatorios y en un solo sentido de un fluido no-newtoniano y donde se visualicen y registren formas de fondo debido al movimiento de sedimento por el fondo.

Los aspectos prácticos considerados en el diseño de la instalación fueron, principalmente, las restricciones que se tienen debido al espacio disponible en el laboratorio de hidráulica y a la cantidad de mezcla de CMC que se puede preparar con la misma concentración, esto es 180 litros. El número de Reynolds define las dimensiones del túnel de prueba, considerando que la velocidad alcanzada dentro del mismo influye en el régimen de flujo que se obtenga en los experimentos. En la instalación se desea analizar las formas de fondo provocadas por un fluido no-newtoniano en régimen laminar, por lo que el número de Reynolds ( $Re_g$ , Ecuación 2.1) debe ser menor a 2500. Es por ello que ambos aspectos, tanto el número de Reynolds como el volumen de mezcla que se puede preparar, fueron fundamentales en las decisiones tomadas sobre la instalación. La siguiente decisión importante dentro del diseño fue la elección de la potencia del motor para la realización del movimiento oscilatorio del fluido, así como la utilización de un reductor de frecuencia. El cálculo de la potencia del motor se realizó considerando que el fluido que se utilizaría sería viscoso de naturaleza no-newtoniana y la principal incertidumbre que se debió manejar es la del roce del pistón, por lo que se trabajó con un factor de seguridad cercano a 3. Pese a que el factor de seguridad es alto, la potencia escogida de 1.5 HP permite asegurar un amplio rango de frecuencias el cual fue ratificado posteriormente en la puesta en marcha. Por otro lado, una reducción de frecuencia de relación 15/1 aumenta el torque del motor. La pérdida de energía debido al roce en el pistón es incierta, por lo que con el aumento de torque se asegura poder sobrepasar la condición estática de roce.

Durante la puesta en marcha se verificó el funcionamiento de la instalación dentro de los rangos experimentales para los que se había diseñado, si se pueden generar formas de fondo en el túnel de prueba y si las mediciones de presión durante las pruebas tienen relación con las medidas de presión teóricas. En cuanto a los rangos en los cuales puede funcionar la instalación experimental, los resultados fueron satisfactorios, ya que los parámetros de amplitud y frecuencia del movimiento oscilatorio, el tamaño de grano de arena en el cual



existe transporte de partículas y la viscosidad de la mezcla de CMC para la que funciona la instalación dejan un amplio margen para poder realizar experimentos que cubran la mayor cantidad de casos. De esta forma se podrían deducir adimensionales o diagramas de fase que definan tanto las velocidades en que se produce arrastre incipiente o predigan las formas de fondo en función de algunas de las variables mencionadas. Respecto a la observación de formas de fondo generadas por un flujo oscilatorio, se observaron en todas las configuraciones utilizadas, tanto con agua como con una solución de CMC por lo que cumplió este objetivo. En los futuros experimentos que se realicen en la instalación se podrán obtener los límites donde se observan formas de fondo y donde no, considerando la amplitud de movimiento y el tamaño de grano como variables. Las medidas de presión obtenidas en la prueba con *fondo falso* (Figuras 4.18, 4.19 y 4.20) se pueden comparar con la presión teórica (Figuras 3.7), observándose un patrón similar en ambos, por lo que se puede concluir que las mediciones de presión se ajustan a la teoría y pueden ser utilizadas para encontrar relaciones entre los factores de fricción, número de Reynolds y las características del flujo. Las diferencias en magnitud se deben a que en el cálculo de la presión teórica se sobreestimaron la mayor parte de las pérdidas, tanto singulares como friccionales.

El sistema FTP instalado es de gran importancia para el análisis de formas de fondo en el túnel, ya que en las pruebas realizadas se han encontrado tanto formas bidimensionales como tridimensionales, por lo que no en todos los experimentos se obtiene toda la información de las formas mediante fotos tomadas de forma lateral a la instalación.

El método PIV puede ser utilizado en la instalación, ya que los resultados del campo de velocidad para el flujo laminar pueden ser bien representados. Es importante considerar la dificultad que existe para el análisis de un perfil de velocidad, ya que no se tiene un promedio directo al tener la grabación de una oscilación. Se necesitan de varias oscilaciones para llegar a un perfil de velocidades representativo de una sección en un instante dado de la oscilación. Las formas de fondo tienen estrecha relación con la velocidad del flujo por lo que la obtención del perfil de velocidad es importante para realizar los análisis.

La instalación, pese a que cumple con los objetivos generales y específicos para los que fue construido, tiene mejoras que se le pueden realizar. Estas mejoras comprenden realizar nuevas trampas de arena que se ubiquen en los extremos de la instalación para poder realizar experimentos de largas duraciones; mejorar la tapa removible de la instalación, buscando un sistema que no deteriore a largo plazo el material del que está construido el túnel. El sistema de tapa propuesto es con sellos de goma que quedan a presión en la instalación. Estos sistemas deben estudiarse bien antes de construirse en el laboratorio para saber si existen las condiciones materiales para poder llevarlo a cabo. Una recomendación en el uso es constantemente revisar el ajuste de los o-ring en el émbolo y verificar que tenga una lubricación adecuada, la que hasta el momento se realiza con vaselina en pasta.

Por último, se puede concluir que con la instalación experimental explicada en este informe, es posible analizar las variables que influyen en la obtención de formas de fondo bajo un flujo oscilatorio y unidireccional en rangos amplios, lo que permite desarrollar un estudio exhaustivo de las condiciones que lo provocan, lo que representaría un gran avance en el campo del flujo de fluidos no-newtonianos y las formas de fondo que se generan debido a estos.

# Bibliografía

- Abedi, M., Jalali, M. A., & Maleki, M. (2014). Interfacial instabilities in sediment suspension flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 758, 312–326.
- Admiraal, D., Musalem-Jara, R., García, M., & Niño, Y. (2006). Vortex trajectory hysteresis above self-formed vortex ripples. *Journal of Hydraulic Research*, 44(4), 437–450.
- An, H., Luo, C., Cheng, L., & White, D. (2013). A new facility for studying ocean-structure-seabed interactions: The o-tube. *Coastal Engineering*, 88, 88–101.
- Andersen, K. H. (1999). The dynamics of ripples beneath surface waves and topics in shell models of turbulence.
- Bakhtyar, R., Yeganeh-Bakhtiary, A., Barry, D. A., & Ghaheri, A. (2009). Two-phase hydrodynamic and sediment transport modeling of wave-generated sheet flow. *Advances in Water Resources*, 32(8), 1267–1283.
- Brevik, I. & Bjørn, A. (1979). Flume experiment on waves and currents. I. Rippled bed. *Coastal Engineering*, 3, 149–177.
- Calantoni, J., Landry, B. J., & Penko, A. M. (2013). Laboratory observations of sand ripple evolution using bimodal grain size distributions under asymmetric oscillatory flows. *Journal of Coastal Research*, 65(sp2), 1497–1502.
- Cataño-Lopera, Y. A., Demir, S. T., & García, M. H. (2007). Self-burial of short cylinders under oscillatory flows and combined waves plus currents. *Journal of Oceanic Engineering*, 32, 191–203.
- Chabert, J. & Chauvin, J. (1963). Formation des dunes et des rides dans les modeles fluviaux. *Bulletin du Centre de Recherche et d'Essais de Chatou*, 4, 31–51.
- Chhabra, R. P. & Richardson, J. F. (2008). *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann.
- 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.
- Daprà, I. & Scarpi, G. (2006). Pulsatile pipe flow of pseudoplastic fluids. *Meccanica*, 41(5), 501–508.

- Davies, A., Ribberink, J. S., Temperville, A., & Zyserman, J. (1997). Comparisons between sediment transport models and observations made in wave and current flows above plane beds. *Coastal Engineering*, 31, 163–198.
- De Wit, P. J. & Kranenburg, C. (1997). The wave-induced liquefaction of cohesive sediment beds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45, 261–271.
- Dey, S. (2014). *Fluvial hydrodynamics*. Springer.
- Dick, J. & Sleath, J. (1992). Sediment transport in oscillatory sheet flow. *Journal of Geophysical Research*, 97(C4), 5745–5758.
- Dohmen-Jansen, C. M., Kroekenstoel, D. F., Hassan, W. N., & Ribberink, J. S. (2002). Phase lags in oscillatory sheet flow: experiments and bed load modelling. *Coastal Engineering*, 46, 61–87.
- Dumas, S., Arnott, R., & Southard, J. B. (2005). Experiments on oscillatory -flow and combined-flow bed forms: Implications for interpreting parts of the shallow-marine sedimentary record. *Journal of Sedimentary Research*, 75(3), 501–513.
- Fuentes, J. (2017). Estudio experimental del transporte de sedimento mediante tomógrafo en el marco de la evolución de la contaminación de ríos por sedimento fino. *Memoria de título, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*.
- Garcés, A. (2017). Características de formas de fondo generadas en un ducto a presión debido al flujo en régimen laminar de un fluido pseudoplástico. *Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*.
- 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. *Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*, 22, 21–23.
- Hall, K. R., Smith, G. M., & Turcke, D. J. (1995). Comparison of oscillatory and stationary flow through porous media. *Coastal Engineering*, 24, 217–232.
- Hassan, W. N. & Ribberink, J. S. (2005). Transport processes of uniform and mixed sands in oscillatory flow. *Coastal Engineering*, 52, 745–770.
- Jensen, B. L. (1989). Experimental investigation of turbulent oscillatory boundary layers. *Series paper; N45/Inst. of hydrodynamics and hydraulic engineering (Lyngby)*.
- Kennedy, J. F. (1963). The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 16(04), 521–544.
- Kennedy, J. F. (1964). The formation of sediment ripples in closed rectangular conduits and in the desert. *Journal of Geophysical Research*, 69(8), 1517–1524.
- Kozicki, W., Chou, C., & Tiu, C. (1966). Non-newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape. *Chemical Engineering Science*, 21(8), 665–679.

- Kozicki, W. & Tiu, C. (1988). A unified model for non-newtonian flow in packed beds and porous media. *Rheologica acta*, 27(1), 31–38.
- Liu, H.-K. (1957). Mechanics of sediment-ripple formation. *Journal of the Hydraulics Division*, 83(2), 1–23.
- Lofquist, K. E. (1977). *A positive displacement oscillatory water tunnel*. Technical report, U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center.
- Mishra, P. & Tripathi, G. (1971). Transition from laminar to turbulent flow of purely viscous non-newtonian fluids in tubes. *Chemical Engineering Science*, 26(6), 915–921.
- Montserrat, G. (2015). Estudio experimental de las pérdidas de carga en tuberías con flujos de mezclas sólidos líquido no-newtoniano en régimen laminar. *Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile*.
- Nielsen, P. (1981). Dynamics and geometry of wave-generated ripples. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 86(C7), 6467–6472.
- O’Donoghue, T. & Clubb, G. S. (2001). Sand ripples generated by regular oscillatory flow. *Coastal Engineering*, 44, 101–115.
- O’Donoghue, T. & Wright, S. (2004). Concentrations in oscillatory sheet flow for well sorted and graded sands. *Coastal Engineering*, 50, 117–138.
- Park, J., Derrandji-Aouat, A., Wu, B., Nishio, S., & Jacquin, E. (2008). Uncertainty analysis: particle imaging velocimetry. In *ITTC Recommended Procedures and Guidelines, International Towing Tank Conference*.
- Pedocchi, F. & García, M. H. (2009a). Ripple morphology under oscillatory flow: 1. Prediction. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C12).
- Pedocchi, F. & García, M. H. (2009b). Ripple morphology under oscillatory flow: 2. Experiments. *Journal of Geophysical Research*, 114, 1–17.
- Pedocchi, F., Martin, J. E., & García, M. H. (2008). Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 45(1), 183–186.
- Perillo, M. M., Best, J. L., & Garcia, M. H. (2014). A new phase diagram for combined-flow bedforms. *Journal of Sedimentary Research*, 84(4), 301–313.
- Pu, Q., Li, K., & Gao, F. (2001). Scour of the seabed under a pipeline in oscillating flow. *China Ocean Engineering*, 15(1), 129–137.
- Ribberink, J. S. (1989). *The large oscillating water tunnel. Technical specifications and performances*. Technical report, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren.
- Ribberink, J. S. & Al-Salem, A. A. (1994). Sediment transport in oscillatory boundary

- layers in cases of rippled beds and sheet flow. *Journal of Geophysical Research*, 99(C6), 707–727.
- Sato, S., Misura, N., & Watanabe, A. (1984). Oscillatory boundary layer flow over rippled beds. *Coastal Engineering*, (pp. 2293–2309).
- Simons, D. B. (1961). Forms of bed roughness in alluvial channels. *Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE*, 87(3), 87–105.
- Sleath, J. (1973). Sea bed mechanics. *John Wiley and Sons Inc., New York*.
- Takeda, M., Ina, H., & Kobayashi, S. (1982). Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *JosA*, 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.
- Westerweel, J. (1993). *Digital particle image velocimetry*. Delft University.

# Anexos

# Anexo A

## Cálculo Potencia

Los cálculos para llegar a la potencia necesaria del motor son los presentados en este anexo y son basados en el análisis presentado en la subsección 3.1.3.

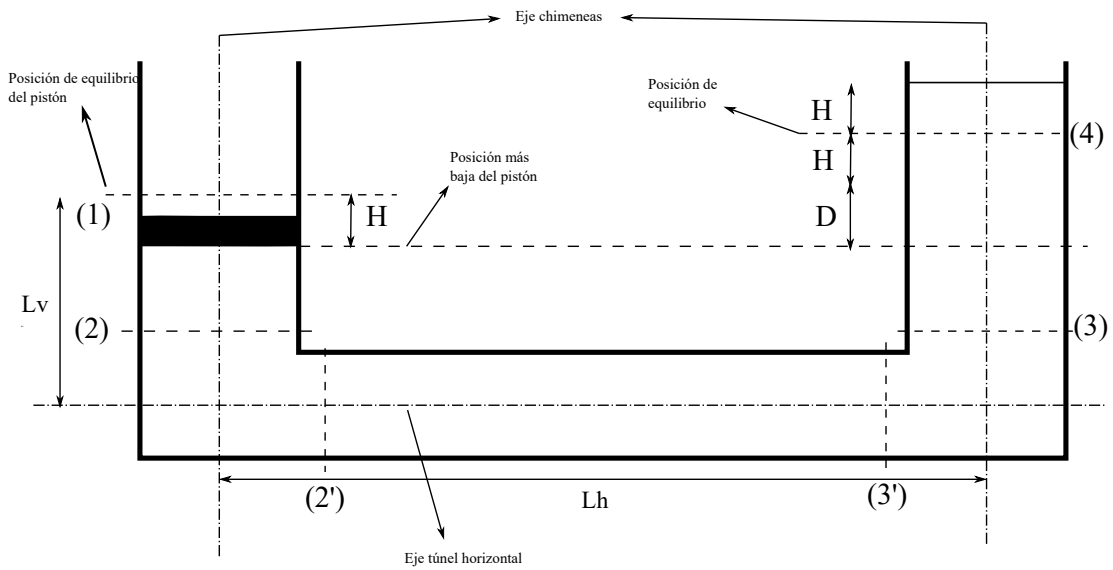


Figura A.1: Esquema simplificado del problema utilizado para el cálculo de la potencia del motor.

$$\frac{L_{12}}{g} \frac{dU_v}{dt} + B_2 - B_1 + \Lambda_{12} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{L_{22'}}{g} \frac{dU_v}{dt} + B_{2'} - B_2 + \Lambda_{22'} = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{L_{2'3'}}{g} \frac{dU_h}{dt} + B_{3'} - B_{2'} + \Lambda_{2'3'} = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{L_{3'3}}{g} \frac{dU_v}{dt} + B_{3'} - B_3 + \Lambda_{3'3} = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{L_{34}}{g} \frac{dU_v}{dt} + B_4 - B_3 + \Lambda_{34} = 0 \quad (\text{A.5})$$

La suma de las ecuaciones A.1, A.2, A.3, A.4 y A.5, corresponde a:

$$2 \frac{L_v}{g} \frac{dU_v}{dt} + \frac{L_h}{g} \frac{dU_h}{dt} + B_4 - B_1 + \Lambda_{14} = 0 \quad (\text{A.6})$$

Se realizan definiciones de bernoulli, la altura, velocidad y aceleración.

$$B_1 = \frac{p_1}{\gamma} - H + \frac{U_v |U_v|}{2g} \quad (\text{A.7})$$

$$B_4 = H - \frac{U_v |U_v|}{2g} \quad (\text{A.8})$$

$$H(t) = H_0 \cos(\omega t) \quad (\text{A.9})$$

$$U_v = \frac{\partial H}{\partial t} = -H_0 \omega \sin(\omega t) \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial U_v}{\partial t} = -H_0 \omega^2 \cos(\omega t) \quad (\text{A.11})$$

Con continuidad se establece:

$$A_c U_v = A_t U_h \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{dU_h}{dt} = \frac{A_c}{A_t} \frac{dU_v}{dt} \quad (\text{A.13})$$

Con lo que se obtiene:

$$\frac{dU_v}{dt} \left( \frac{2L_v}{g} + \frac{L_h}{g} \frac{A_c}{A_t} \right) + 2H - \frac{U_v |U_v|}{g} - \frac{p_1}{\gamma} + \sum \Lambda_{14} = 0 \quad (\text{A.14})$$

Las pérdidas se pueden escribir como sigue:



$$\sum \Lambda_{14} = \Lambda_{12} + \Lambda_{23} + \Lambda_{34} + \text{Roce Pistón} \quad (\text{A.15})$$

$$\sum \Lambda_{12} = \frac{U_v^2}{2g} \left( \frac{f_v L_v}{4R_{h-\text{cilindro}}} + k_{ang} + k_{ens} \right) \quad (\text{A.16})$$

$$\sum \Lambda_{23} = \frac{U_h^2}{2g} \left( \frac{f_h L_h}{4R_{h-\text{túnel}}} + 2k_{ens} + 2k_{ang} + 2k_{div} \right) \quad (\text{A.17})$$

$$\sum \Lambda_{34} = \frac{U_v^2}{2g} \left( \frac{f_v L_v}{4R_{h-\text{cilindro}}} \right) \quad (\text{A.18})$$

Las pérdidas singulares se calculan con las siguientes fórmulas:

- Ensanchamiento:  $(1 - S_1/S_2)^2$
- Angostamiento:  $0,5(1 - S_1/S_2)$
- División de caudal:  $0,5(1 - S_2/S_1)^2$

Los valores de las pérdidas singulares son:

- $k_{ang} = 0,12$
- $k_{ens} = 0,05$
- $k_{div} = 37,9$

Se considera la siguiente relación entre la presión y la potencia con la que se llega al término buscado:

$$P = p_1 A U_v \quad (\text{A.19})$$

# Anexo B

## Calibración Transductores de Presión

En el presente anexo se presentan los datos de la calibración realizada para los 6 transductores de presión. Con estos valores se encontraron las correlaciones presentadas en la Tabla 3.1.

Tabla B.1: Datos de calibración de los transductores de presión.

| Altura de presión [m] | T1 [V] | T2 [V] | T3 [V] | T4 [V] | T5 [V] | T6 [V] |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,225                 | 0,459  | 0,421  | 0,417  | 0,471  | 0,443  | 0,477  |
| 0,242                 | 0,499  | 0,464  | 0,465  | 0,513  | 0,483  | 0,515  |
| 0,258                 | 0,531  | 0,492  | 0,494  | 0,542  | 0,512  | 0,544  |
| 0,278                 | 0,575  | 0,534  | 0,536  | 0,582  | 0,556  | 0,587  |
| 0,292                 | 0,597  | 0,560  | 0,562  | 0,609  | 0,580  | 0,609  |
| 0,324                 | 0,664  | 0,622  | 0,625  | 0,670  | 0,642  | 0,677  |
| 0,335                 | 0,679  | 0,636  | 0,632  | 0,682  | 0,654  | 0,694  |
| 0,342                 | 0,698  | 0,660  | 0,660  | 0,704  | 0,681  | 0,711  |
| 0,373                 | 0,767  | 0,721  | 0,726  | 0,770  | 0,742  | 0,779  |
| 0,383                 | 0,784  | 0,737  | 0,739  | 0,785  | 0,757  | 0,796  |
| 0,415                 | 0,820  | 0,776  | 0,771  | 0,827  | 0,800  | 0,839  |

# Anexo C

## Obtención índices de flujo y consistencia

En este anexo se presentan los datos y se explica el cálculo para calcular las reologías. Los datos de tasa y esfuerzo de corte que se obtuvieron en la primera reología que se presentó en el informe para la prueba 2 se presentan en las Tablas C.1, C.2 y C.3.

Posteriormente, se ajusta el esfuerzo de corte en función de la tasa de corte, con una función potencia del tipo:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (\text{C.1})$$

donde  $\tau$  es el esfuerzo de corte,  $\dot{\gamma}$  es la tasa de corte,  $K$  es el índice de consistencia y  $n$  es el índice de flujo.

Tabla C.1: Datos de tasa y esfuerzo de corte para cálculo de reología. Parte 1.

| Tasa de corte [1/s] | Esfuerzo de corte [Pa] |
|---------------------|------------------------|
| 20                  | 2,6                    |
| 26,7                | 3,15                   |
| 33,5                | 3,61                   |
| 40,2                | 4,13                   |
| 46,9                | 4,51                   |
| 53,7                | 4,97                   |
| 60,4                | 5,31                   |
| 67,1                | 5,62                   |
| 73,9                | 5,99                   |
| 80,6                | 6,34                   |
| 87,4                | 6,64                   |
| 94,1                | 6,93                   |
| 101                 | 7,19                   |
| 108                 | 7,47                   |
| 114                 | 7,76                   |
| 121                 | 8,02                   |
| 128                 | 8,26                   |
| 134                 | 8,52                   |

Tabla C.2: Datos de tasa y esfuerzo de corte para cálculo de reología. Parte 2.

| Tasa de corte [1/s] | Esfuerzo de corte [Pa] |
|---------------------|------------------------|
| 141                 | 8,76                   |
| 148                 | 8,97                   |
| 155                 | 9,21                   |
| 161                 | 9,44                   |
| 168                 | 9,65                   |
| 175                 | 9,87                   |
| 182                 | 10,1                   |
| 188                 | 10,3                   |
| 195                 | 10,5                   |
| 202                 | 10,7                   |
| 209                 | 10,9                   |
| 215                 | 11,1                   |
| 222                 | 11,3                   |
| 229                 | 11,4                   |
| 236                 | 11,6                   |
| 242                 | 11,8                   |
| 249                 | 12                     |
| 256                 | 12,2                   |

Tabla C.3: Datos de tasa y esfuerzo de corte para cálculo de reología. Parte 3.

| Tasa de corte [1/s] | Esfuerzo de corte [Pa] |
|---------------------|------------------------|
| 262                 | 12,3                   |
| 269                 | 12,5                   |
| 276                 | 12,7                   |
| 283                 | 12,9                   |
| 289                 | 13                     |
| 296                 | 13,2                   |
| 303                 | 13,3                   |
| 310                 | 13,5                   |
| 316                 | 13,7                   |
| 323                 | 13,8                   |
| 330                 | 14                     |
| 337                 | 14,1                   |
| 343                 | 14,3                   |
| 350                 | 14,4                   |

# Anexo D

## Cálculo Errores

### D.1. Error amplitud de la oscilación en el túnel

El cálculo del error asociado a la amplitud de la oscilación en el túnel de prueba se calcula con la Ecuación D.1.

$$\delta_A = \sqrt{\left(\frac{\pi R^2}{hb} \delta_L\right)^2 + \left(\frac{\pi 2RL}{hb} \delta_R\right)^2 + \left(\frac{\pi R^2 L}{h^2 b} \delta_h\right)^2 + \left(\frac{\pi R^2 L}{hb^2} \delta_b\right)^2} \quad (\text{D.1})$$

Donde  $R$  es el radio del émbolo,  $h$  es la altura de la sección transversal del túnel,  $b$  es el ancho de la sección transversal del túnel,  $L$  es el desplazamiento del pistón y los parámetros  $\delta_R$ ,  $\delta_h$ ,  $\delta_b$  y  $\delta_L$  son los errores respectivos.

Se presentan los valores de las mediciones hechas por los instrumentos y su respectivo error asociado en la Tabla .

Tabla D.1: Errores y valores utilizados para el cálculo de la amplitud de la oscilación en el túnel de prueba.

| Parámetro | Medición [m] | Error [m]     |
|-----------|--------------|---------------|
| $h$       | 0,100        | $\pm 0,001$   |
| $b$       | 0,1500       | $\pm 0,0005$  |
| $R$       | 0,1055       | $\pm 0,00005$ |
| $L$       | 0,137        | $\pm 0,003$   |
| $A$       | 0,32         | $\pm 0,01$    |

## D.2. Errores de los índices de consistencia y de flujo

El proceso para calcular los índices de consistencia y de flujo considera un ajuste del tipo potencia, por lo que para obtener los errores se debe linealizar aplicando logaritmo natural a la función potencia. De manera que se obtiene:

$$\ln(\tau) = \ln(k) + n \ln(\dot{\gamma}) \quad (\text{D.2})$$

De esta forma se pueden obtener los errores con las siguientes fórmulas:

$$\delta_{n_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln(\tau)_i - n_j \ln(\dot{\gamma}) - \ln(k_j))^2}{(N-2) \sum_{i=1}^N (\ln(\dot{\gamma})_i - \overline{\ln(\dot{\gamma})})^2}} \quad (\text{D.3})$$

$$\delta_{\ln(k_j)} = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(\tau)_i - n_j \ln(\dot{\gamma}) - \ln(k_j))^2}{N-2} \right) \left( \frac{1}{N} + \frac{\overline{\ln(\dot{\gamma})}^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(\dot{\gamma})_i - \overline{\ln(\dot{\gamma})})^2} \right)} \quad (\text{D.4})$$

Siendo  $j$  el subíndice que indica una de las dos mediciones realizadas por el reómetro de esfuerzo de corte en función de la tasa de corte, uno aumentando la tasa de corte y otro disminuyéndola. Al tener dos valores de cada índice se saca el promedio simple de ellos, así sus errores son:

$$\delta_n = \sqrt{\left( \frac{\delta_{n_1}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{n_2}}{2} \right)^2} \quad (\text{D.5})$$

$$\delta_k = \sqrt{\left( \frac{\delta_{k_1}}{2} \right)^2 + \left( \frac{\delta_{k_2}}{2} \right)^2} \quad (\text{D.6})$$



### D.3. Errores en calibración de los transductores de presión

Para calcular el error de medición de los transductores se utilizó la desviación estándar obtenida en cada uno de los transductores para las distintas alturas de presión (Tabla D.2).

Tabla D.2: Desviación estándar de las mediciones de los transductores de presión durante la calibración

| Altura de presión [m] | $\sigma_{T1}$ [V] | $\sigma_{T2}$ [V] | $\sigma_{T3}$ [V] | $\sigma_{T4}$ [V] | $\sigma_{T5}$ [V] | $\sigma_{T6}$ [V] |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0,225                 | 0,007             | 0,007             | 0,007             | 0,008             | 0,007             | 0,006             |
| 0,242                 | 0,006             | 0,007             | 0,007             | 0,008             | 0,005             | 0,008             |
| 0,258                 | 0,009             | 0,011             | 0,005             | 0,007             | 0,010             | 0,010             |
| 0,278                 | 0,008             | 0,011             | 0,006             | 0,008             | 0,006             | 0,006             |
| 0,292                 | 0,008             | 0,009             | 0,008             | 0,008             | 0,008             | 0,009             |
| 0,324                 | 0,008             | 0,012             | 0,007             | 0,010             | 0,007             | 0,008             |
| 0,335                 | 0,004             | 0,007             | 0,005             | 0,006             | 0,004             | 0,004             |
| 0,342                 | 0,008             | 0,008             | 0,008             | 0,008             | 0,009             | 0,008             |
| 0,373                 | 0,008             | 0,010             | 0,006             | 0,007             | 0,008             | 0,008             |
| 0,383                 | 0,007             | 0,010             | 0,006             | 0,007             | 0,008             | 0,008             |
| 0,415                 | 0,007             | 0,007             | 0,006             | 0,009             | 0,005             | 0,007             |

Posteriormente se calcula el promedio de las desviaciones estándar de los errores y se obtiene el error de la medición de los transductores. Luego mediante propagación de errores se calcula el error del cálculo de la altura de presión. Estos valores son presentados en la Tabla 3.1.