



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

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE RELAVES MINEROS
DEBIDO A ACCIDENTES EN UN FLUJO CON LECHO DE GRAVA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLÁS ANDRÉS ACEITUNO REYES

PROFESOR GUÍA:
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
CRISTIAN IHLE BASCUÑÁN

Esta memoria cuenta con el financiamiento del Proyecto Fondecyt 1140767

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: NICOLÁS ANDRÉS ACEITUNO REYES
FECHA: 2017
PROF. GUÍA: Sr. YARKO NIÑO CAMPOS

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL TRANSPORTE DE RELAVES MINEROS DEBIDO A ACCIDENTES EN UN FLUJO CON LECHO DE GRAVA

La contaminación de sistemas fluviales, particularmente ríos con lechos de grava, genera múltiples efectos tanto sobre la sustentabilidad de las formas de vida como sobre el régimen sedimentológico y comportamiento hidráulico natural del río. En las últimas décadas han sido diversos los accidentes que ha sufrido la industria de la minería; la rotura de presas de relave tiene directa relación con la contaminación de ríos con lechos de grava. La naturaleza cohesiva de los sedimentos de tranques de relave los hace sumamente nocivos para sistemas fluviales, sumandos a los distintos metales pesados que poseen y los largos tiempos de permanencia en los lechos de ríos sobre los que han sido depositados. El objetivo principal del presente trabajo de título es estudiar experimentalmente la respuesta de un canal con lecho de grava bajo presencia de contaminación de relaves mineros, obteniendo un primer acercamiento a los fenómenos de transporte de sedimentos que se desarrollan en sistemas fluviales de éste tipo. El estudio se basa en el desarrollo de una serie de experiencias de laboratorio para obtener información necesaria para caracterizar y describir el transporte de sedimentos en la columna de agua, la intensidad de la turbulencia del flujo y estratigrafía depositacional del lecho.

Las experiencias se desarrollaron en un canal de acrílico de sección cuadrada de 30 cm de ancho y un largo de 12 m, el que se encuentra ubicado en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Sobre éste y en el inicio se ubica una tolva consistente en un tornillo sin fin que vierte relaves mineros artificiales fabricados manualmente en base a relaves naturales. Dentro del canal se construye en cada experimento un lecho de grava con un $D_{50} = 0.45 \text{ mm}$. La tolva vierte el sedimento al canal a distintos gastos sólidos de entrada. El perfil de velocidad del flujo en la zona estudiada se registra a través de la técnica PIV, por otra parte, el perfil de sedimentos se registra con un arreglo de cámaras fotográficas localizadas longitudinalmente, mientras que la concentración del sedimento en suspensión se mide con una instrumentación desarrollada por técnicos especializados.

Los resultados muestran una dependencia entre la granulometría de los relaves artificiales y el tipo de arrastre que se genera para las condiciones del flujo. Además, se corrobora que no existe arrastre de fondo a lo largo del canal, debido a que operan fenómenos electroquímicos y de adsorción entre las partículas del sedimento vertido y el lecho de grava que impiden que éstas se despeguen del fondo y sean transportadas por el flujo. Se calcula el arrastre de sólidos en suspensión y se verifican las curvas de Rouse de concentración de sedimentos en suspensión. Se desarrollan parcialmente formas de fondo incompletas, tanto meso como microformas.

A aquellos que me han ayudado de alguna u otra forma.

Agradecimientos

A mi papá y mi mamá por todo lo que han podido hacer en mi favor.

A mi hijo Gaspar por su vida y sus sonrisas.

A Paz por el apoyo correspondiente.

A mi Morenita hermosa por ser mi compañera, por las noches que se quedó acompañándome mientras trabajaba en la universidad, por los días completos que me acompañó mientras trabajaba, por la comida, por apañarme a todas, por ser mi amor.

A la Vivi, por la calidez de su laboratorio, que sin ella no sería nada, por la calidez de su compañía, por las conversaciones y por su mirada positiva.

A mi profesor guía Yarko Niño Campos, por la paciencia.

A Jorge Fuentes Barrera por la ayuda infinita y las buenas intenciones.

A todos ellos, estaré hasta mi muerte agradecido (a algunos más y otros menos) por ayudarme a cumplir uno de los objetivos importantes en mi vida, muchas gracias.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Descripción general	1
1.2. Motivación	1
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Generales	3
1.3.2. Específicos	3
1.4. Organización del informe	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Parámetros adimensionales	5
2.1.1. Número de Reynolds	5
2.1.2. Número de Froude	6
2.1.3. Densidad relativa sumergida del sedimento	7
2.1.4. Esfuerzo de corte adimensional	7
2.2. Antecedentes sobre flujo superficial	8
2.2.1. Movimiento de una partícula de fluido	8
2.2.2. Estratigrafía y perfil de velocidad	10
2.2.3. Caudal	14
2.3. Transporte hidráulico de sólidos	16
2.3.1. Caracterización del sedimento	16
2.3.2. Transporte de sedimentos no cohesivos	19
2.3.3. Relaves mineros	21
2.4. Métodos ópticos para la velocimetría	23
2.4.1. Generalidades	23
2.4.2. Principio de operación PIV	24
2.4.3. Particle Tracking Velocimetry (PTV)	25
2.5. Procesamiento de imágenes y Pivlab	26
3. Descripción del Estudio Experimental	28
3.1. Instalación experimental	28
3.1.1. Descripción de la instalación experimental	29
3.1.2. Sedimento empleado y caracterización	37
3.2. Instrumentación	44
3.2.1. Software Arduino para alimentación de sedimentos	44
3.2.2. Pieza oscura para registro de datos	45
3.2.3. Sistema de cámaras	45
3.2.4. Velocimetría por métodos ópticos	46

3.2.5. Sistema de extracción de muestras de gasto sólido	52
3.3. Metodología experimental	52
3.3.1. Preparación de la experiencia	52
3.3.2. Extracción de muestras de gasto sólido en suspensión	53
3.3.3. Medición de velocidad con PIV	55
3.3.4. Errores Experimentales	56
4. Resultados Experimentales y Análisis	58
4.1. Introducción	58
4.2. Parámetros asociados a la velocidad	59
4.2.1. Perfiles de velocidad	59
4.2.2. Intensidad de la turbulencia	60
4.3. Caracterización esfuerzo de corte mediante técnica PIV	61
4.4. Experimentos	64
4.5. Descripción de la estratigrafía y transporte de sedimentos	67
4.5.1. Estratigrafía conjunta	67
4.5.2. Comportamiento del sedimento y concentración del sedimento en suspensión	70
5. Conclusiones	78
5.1. Montaje experimental	78
5.2. Parámetros derivados de la velocidad del flujo	79
5.3. Arrastre de sedimentos	80
5.4. Descripción estratigrafía	80
6. Bibliografía	82
6.1. Bibliografía	82
A. Anexo I: Granulometría de muestras de relave	86
B. Anexo II: Mediciones de pH	94

Índice de figuras

2.1. Esquema lecho de grava (Nikora et al, 2001).	10
2.2. Lecho de grava y 5 regiones específicas (Nikora et al, 2001).	11
2.3. Esquema de definición de Ley logarítmica.	14
2.4. Variaciones de velocidad y presión en un medidor de caudal tipo Bernoulli (White, 2003).	15
2.5. Orificio en placa delgada, modelo de placa orificio (White, 2003).	15
2.6. Curva granulométrica. Definición de diámetros característicos D_{10} , D_{30} y D_{60}	17
2.7. Esquema de desplazamiento de dos frames consecutivos. Partículas oscuras y claras representan el instante t_0 y $t_0 + \Delta t$, respectivamente (Fuentes, 2017).	25
2.8. Esquema de desplazamiento de dos frames consecutivos, PTV. Partículas oscuras y claras representan el instante t_0 y $t_0 + \Delta t$, respectivamente (Fuentes, 2017).	26
3.1. Esquema del canal (Licanqueo, 2016).	29
3.2. Tanque de entrada.	31
3.3. Vista transversal.	31
3.4. Placa orificio.	31
3.5. Vista transversal (Licanqueo, 2016).	31
3.6. Disposición de placa orificio, (Licanqueo, 2016).	32
3.7. Piezómetro.	32
3.8. Calibración placa orificio.	33
3.9. Tolva.	34
3.10. Placa interior de tolva.	34
3.11. Tornillo sin fin.	34
3.12. Motor.	34
3.13. Estación de tamizado.	36
3.14. Mastersizer 2000 marca Malvern.	37
3.15. Reporte entregado por Mastersizer 2000 para la Muestra 1 de relave.	37
3.16. Granulometría fina de las 9 muestras, Mastersizer 2000.	38
3.17. Granulometría fina de los 3 grupos, Mastersizer 2000.	40
3.18. Granulometría gruesa grupo 1, 2 y 3.	41
3.19. Cilindros e instrumentación método japonés (Izq.) y densidad mínima (der.).	42
3.20. Instrumentación para medición de pH (Izq.), medición primeros 15 <i>min</i> (Central) y últimos 15 <i>min</i> (Der.).	43
3.21. Evolución temporal de pH de muestras de relaves artificiales grupo 1, 2 y 3.	44
3.22. Disposición de las cámaras, (Licanqueo, 2016).	46
3.23. Cámara de alta velocidad FASTCAM Mini UX50/100.	47
3.24. Lente de alta precisión.	47

3.25. Láser.	48
3.26. Esquema de carro que porta el láser (Licanqueo, 2016).	48
3.27. Tubos de rodamina.	49
3.28. Partículas de rodamina.	49
3.29. Metodología para fabricar rodamina (Fuentes 2017).	49
3.30. Curva granulométrica muestra rodamina.	50
3.31. Imagen original (izquierda) y pre-procesada (derecha) en Software de Matlab Pivlab.	51
3.32. Vectores de velocidad mediante FFT en región de interés.	51
3.33. Carro que extrae gastos sólido en suspensión.	52
3.34. Tubería receptora de partículas.	52
3.35. Filtros Boro-Silicato (Izq.) y sistema de filtrado (Central y Derecha).	54
3.36. Promedio temporal de velocidades para distintos tiempos a 3 alturas de columna de agua.	56
4.1. Perfil de velocidad adimensionalizado para el plano de medición con técnica PIV y perfil logarítmico.	59
4.2. Comparación de los perfiles de la intensidad turbulenta u' y v' con las expresiones universales de Nezu y Nakagawa (1993).	61
4.3. Perfiles de esfuerzo de corte adimensional total, espacial, laminar y de Reynolds.	62
4.4. Porcentaje de relave depositado para cada tramo.	66
4.5. Distribución longitudinal del relave minero en función del tiempo, comparación a 6 kg/h	68
4.6. Distribución longitudinal del relave minero en función del tiempo, comparación a 12 kg/h	69
4.7. Perfil de concentración media puntual. Datos muestreados, Granulometría G1.	71
4.8. Perfil de concentración media puntual. Datos muestreados, Granulometría G2.	71
4.9. Perfil de concentración media puntual. Datos muestreados, Granulometría G3.	72
4.10. Concentración de sedimento en suspensión adimensional en función de y/h ($\xi_{ref} = 0.05$) para G1.	74
4.11. Concentración de sedimento en suspensión adimensional en función de y/h ($\xi_{ref} = 0.05$) para G2.	74
4.12. Concentración de sedimento en suspensión adimensional en función de y/h ($\xi_{ref} = 0.05$) para G3.	75
A.1. Granulometría fina Muestra 1.	86
A.2. Granulometría fina Muestra 2.	87
A.3. Granulometría fina Muestra 3.	87
A.4. Granulometría fina Muestra 4.	88
A.5. Granulometría fina Muestra 5.	88
A.6. Granulometría fina Muestra 6.	89
A.7. Granulometría fina Muestra 7.	89
A.8. Granulometría fina Muestra 8.	90
A.9. Granulometría fina Muestra 9.	90
A.10. Granulometría fina Grupo 1.	91
A.11. Granulometría fina Grupo 2.	91
A.12. Granulometría fina Grupo 3.	92

A.13. Granulometría gruesa Grupo 1.	92
A.14. Granulometría gruesa Grupo 2.	93
A.15. Granulometría gruesa Grupo 3.	93

Índice de tablas

3.1. Mediciones para la calibración de la pendiente.	30
3.2. Calibración de la pendiente.	30
3.3. Calibración placa orificio y errores asociados al caudal y diferencia de presiones.	33
3.4. Calibración de la tolva.	35
3.5. Desviación estándar de G.S.E. y frecuencia.	35
3.6. Diámetros característicos y estadísticos relevantes para las 9 muestras.	39
3.7. Producción de relaves mineros artificiales.	39
3.8. Diámetros característicos y estadísticos relevantes, granulometría láser.	40
3.9. Diámetros característicos y estadísticos relevantes para G1, G2 y G3.	41
3.10. Densidad máxima, mínima y media Grupo 1, 2 y 3.	43
3.11. pH medido de grupo 1, 2 y 3.	44
3.12. Errores experimentales.	56
4.1. Velocidad de corte por método de esfuerzos de Reynolds y logarítmico.	60
4.2. Resumen condiciones experimentales.	64
4.3. Pesos sedimento depositado por tramo y total.	65
4.4. Pesos sedimento depositado por tramo y total en forma porcentual.	66
4.5. Velocidad de sedimentación grupo 1.	73
4.6. Velocidad de sedimentación grupo 2.	73
4.7. Velocidad de sedimentación grupo 3.	73
4.8. Resumen datos utilizados para el cálculo del Gasto sólido en suspensión total, Experiencia 1 y 2.	75
4.9. Resumen datos utilizados para el cálculo del Gasto sólido en suspensión total, Experiencia 3 y 4.	76
4.10. Resumen datos utilizados para el cálculo del Gasto sólido en suspensión total, Experiencia 5 y 6.	76
4.11. Resumen gasto sólido en suspensión calculada y real.	77
B.1. Medición de pH grupo 1	95
B.2. Medición de pH grupo 2	96
B.3. Medición de pH grupo 3	97

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción general

La industria de la minería ha sido históricamente un potencial contaminante de sistemas fluviales debido a la cantidad de desechos de los procesos mineros que son transportados por largas tuberías y depositados en tranques de relaves. En este contexto se enmarca este trabajo de título, que consiste en un estudio experimental del transporte de relaves mineros debido a accidentes en un flujo con lecho de grava. La presencia de relaves mineros en lechos de ríos resulta nocivo provocando efectos a largo y corto plazo, en particular en Chile, dada la influencia de la minería del cobre y donde existen registros de múltiples accidentes donde se ha vertido desechos metálicos de altas concentraciones así como rotura de presas de relave, lo que resulta por si solo un riesgo para la vida humana y el desarrollo sustentable (Macklin et al, 2006).

El presente estudio se enmarca dentro del proyecto Fondecyt N° 1140767 y busca recrear experimentalmente los fenómenos que afectan sistemas fluviales condicionados al vertimiento accidental de relaves mineros en el flujo, para estudiar la evolución espacial y temporal de la estratigrafía del lecho debido a éste y las relaciones que se generen entre la granulometría del relave vertido, los parámetros hidráulicos del sistema y el transporte de sedimentos. Para llevar a cabo lo anterior, se realizó inicialmente un estudio de los fenómenos físicos que gobiernan el problema, luego se modificaron los instrumentos necesarios y se puso en marcha el montaje experimental, consistente en un canal abierto con lecho de grava inmóvil, ubicado en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez, Universidad de Chile, sobre el cual se indujo un flujo permanente y uniforme de agua donde se vertió aguas arriba relave minero a una tasa constante. Posterior a esto se desarrolló una metodología para llevar a cabo los experimentos así como para el procesamiento de datos derivados de éstos.

1.2. Motivación

Múltiples casos de contaminación por derrames de concentrados de cobre y/o relaves mineros sobre sistemas fluviales han ocurrido en muchas partes del mundo, incluyendo Chile considerando el actual e histórico papel que ha jugado la minería, lo que ha traído consecuencias nefastas, volviendo a estos sistemas fluviales en contaminados por desechos ricos en metales en concentraciones que representan un riesgo para los sistemas de vida

humanos y el desarrollo sustentable (Coulthard and Macklin, 2003; Macklin et al, 2006; Dennin et al., 2009).

Los ríos de Chile en la zona central presentan lechos de grava que ante situaciones como la descrita, ocurrente regularmente por fallas en tuberías o canales de transporte de relaves y rotura de presas de relaves, son contaminados alterando los procesos de transporte y estratigrafía depositacional, por ejemplo, un estudio experimental sobre un canal con lecho de grava inmóvil en flujo permanente y uniforme mostró que los esfuerzos de corte sobre el lecho eran menores según más sedimento fino se deposite en el interior de la grava (Kuhnle et al., 2013). Existen además diversos estudios experimentales que han investigado el transporte de sedimento en lechos compuestos por arena-grava (Wilcock and Crowe, 2003), con predicciones razonables, que dejan de tener validez cuando la granulometría no es gradualmente variada, como sucede en este estudio. Estudios experimentales actuales, con una configuración similar a la de este estudio, como los de Kuhnle et al. (2013) y Niño et al. (2017), hacen alusión a lo que debería ser un ajuste para sedimento fino en lechos de grava.

Un estudio anterior demostró que diversos impactos sobre el medioambiente y la salud humana surgen comúnmente debido a la residencia prolongada en el tiempo de metales pesados en sedimentos de ríos y suelos aluviales y que además éstos presentan características bioacumulatorias en plantas y animales (Macklin y Wilcock, 1992). Por otro lado, desde 1970 los esfuerzos en las investigaciones que se han desarrollado principalmente en Europa y norteamérica y que han estado relacionadas con la contaminación de sistemas fluviales por relaves mineros han reconocido que la dispersión, almacenamiento y removilización de metales transportados como sedimentos en ríos pueden estar directamente relacionados al estudio de los procesos de transporte de sedimento (Lewin et al., 1977; Lewin and Wolfenden, 1978; Bradley, 1984; Lewin and Macklin, 1987; Marcus, 1987; Graf and Schmidt, 1990; Axtmann and Luoma, 1991; Taylor and Kesterton, 2002; Walling et al., 2003).

Por otra parte, un entendimiento del comportamiento geotécnico de relaves mineros es esencial para evaluar la estabilidad y resistencia a la erosión de lechos sobre los cuales han sedimentado relaves mineros, tanto para el diseño como para el manejo de la disposición final de los relaves (Dimitrova and Yanful, 2012).

La motivación de realizar el estudio experimental propuesto en el siguiente documento es estudiar el transporte de relaves mineros en un canal con lecho de grava, comprendiendo la estratigrafía depositacional, relacionada al registro de la distribución y cuantificación del sedimento en el lecho de grava, tanto de fondo como en suspensión y los parámetros derivados de la velocidad en el flujo, lo que en conjunto con desarrollos teóricos y experimentales posteriores permitirá mejorar la comprensión de los procesos de contaminación producto del derrame de relaves mineros.

1.3. Objetivos

1.3.1. Generales

El objetivo principal de esta investigación es estudiar experimentalmente la respuesta de un canal con lecho de grava bajo presencia de contaminación de relaves mineros.

1.3.2. Específicos

- Modificación y puesta en marcha de un canal de acrílico localizado en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez de la Universidad de Chile.
- Caracterizar mediante la técnica Particle Image Velocimetry (PIV) el perfil de velocidad del flujo. Mediante la extracción de muestras caracterizar el gasto sólido en suspensión y de fondo. Producir relaves mineros artificiales.
- Realizar un análisis y discusión de los resultados obtenidos, considerando distintos gastos sólidos de entrada para distintas granulometrías de relave a igual caudal y pendiente.

1.4. Organización del informe

El informe está dividido en 6 capítulos, descritos a continuación.

- **Capítulo 1: *Introducción.*** Se contextualiza el estudio experimental en forma general justificando el desarrollo de éste y se detallan los objetivos de la investigación.
- **Capítulo 2: *Marco Teórico.*** Se dan a conocer las teorías y diferentes investigaciones realizadas en torno a las técnicas PIV y PTV, estratigrafía del lecho de grava en su interacción con sedimento fino. Se caracteriza de múltiples formas el esfuerzo de corte, se incluyen relaciones predictivas para el gasto sólido de fondo para sedimentos uniformes, no uniformes, no cohesivos y cohesivos y mediante la revisión de los antecedentes relacionados al problema se determinan las condiciones óptimas para la realización de los experimentos.
- **Capítulo 3: *Descripción del Estudio Experimental.*** Se entrega una descripción detallada del estudio, considerando la instalación experimental y las metodologías utilizadas durante la experimentación.
- **Capítulo 4: *Resultados Experimentales y Análisis.*** Se presentan los resultados obtenidos utilizando métodos de visualización ópticas, toma de muestras de gasto sólido de fondo y en suspensión y registro de la altura del sedimento en el tiempo. Se analizan los datos y proponen relaciones predictivas, se incluye además información descriptiva de la calidad de las mediciones.
- **Capítulo 5: *Conclusiones.*** Se discute y concluye acerca de la metodología experimental, sus limitaciones y potencialidades, gasto sólido de fondo y en suspensión y alturas de sedimento, instrumentación y alcances del estudio.

- **Capítulo 6: *Anexos*.** Se detallan las curvas granulométricas de cada muestra junto con las mediciones de pH y temperatura para el ensayo a las muestras de los grupos 1,2 y 3.

Capítulo 2

Marco Teórico

El fenómeno de transporte de relaves mineros en un canal con lecho de grava inmóvil se analiza a través del transporte de sedimentos y la mecánica de fluidos de flujos turbulentos. El marco teórico con el que se desarrolla el análisis de los datos experimentales se muestra a continuación:

2.1. Parámetros adimensionales

La teoría de análisis dimensional (Buckingham, 1914) para el problema experimental analizado, conceptualmente un problema de hidráulica fluvial, define que los siguientes números adimensionales gobiernan el fenómeno de interacción entre el flujo, el lecho inmóvil y las partículas de sedimento:

2.1.1. Número de Reynolds

La relación entre las fuerzas de inercia del flujo y las origen viscoso para un canal prismático se caracteriza con el siguiente adimensional:

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

Donde U indica la velocidad media del flujo; R_h el radio hidráulico (longitud característica del fenómeno) y ν la viscosidad cinemática.

El número de Reynolds permite diferenciar si un flujo es turbulento, laminar o se encuentra en la transición laminar-turbulento lo que se conoce como régimen, el que permite definir con qué ecuaciones se analizará el fenómeno, dado que la turbulencia agrega términos a las ecuaciones de movimiento y continuidad que diferencian el análisis del estudio.

Los siguientes valores definen el tipo de régimen para un canal prismático:

$$\begin{aligned} R_{eR_h} < 500 & \text{ Regimen laminar} \\ 1000 > R_{eR_h} > 500 & \text{ Regimen transición} \\ R_{eR_h} > 1000 & \text{ Regimen turbulento} \end{aligned} \quad (2.2)$$

En problemas de transporte de sedimentos es común definir en número de Reynolds de la partícula:

$$R_{ep} = \frac{u_* d_s}{\nu} \quad (2.3)$$

Donde $u_* = \sqrt{g R_h i}$ es la velocidad friccional o de corte para un flujo uniforme (g aceleración de gravedad e i la pendiente del lecho); d_s es un diámetro característico del sedimento, obtenido de la curva granulométrica y ν la viscosidad cinemática.

2.1.2. Número de Froude

La relación entre las fuerzas de inercia y las gravitacionales para un canal prismático se caracteriza con el siguiente adimensional:

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{g \bar{h}}} \quad (2.4)$$

Donde U indica la velocidad media del flujo; $\bar{h} = \frac{A}{l}$ con l el ancho superficial y A el área de escurrimiento del flujo; y g la aceleración de gravedad.

El Froude define el tipo de escurrimiento o flujo en función de cómo se transmite la información en canales abiertos debido a cambios momentáneos de la altura local del flujo.

Se definen los siguientes tipos de escurrimientos para flujos turbulentos:

$$\begin{aligned} F_r < 1 & \text{ Escurrimiento subcrítico o de río} \\ F_r > 1 & \text{ Flujo supercrítico o de torrente} \\ F_r = 1 & \text{ Escurrimiento crítico} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Además, el número de Froude en conjunto con el tamaño del sedimento no cohesivo transportado permiten determinar en forma general las posibles formas de fondo que el flujo puede desarrollar.

En función del Froude se tiene (Niño, 2013):

- En cauces aluviales con granulometría gruesa y extendida:

$$\begin{aligned} F_r < 1 & \text{ Transición a lecho plano} \\ F_r \approx 1 & \text{ Lecho plano} \\ F_r > 1 & \text{ Macroformas de fondo : Barras} \\ & \text{ Caídas y pozas} \end{aligned} \quad (2.6)$$

- En cauces con granulometría fina y uniforme se desarrollan las siguientes meso y

microformas de fondo:

$$\begin{aligned}
 F_r &\ll 1 && \text{Rizos} \\
 F_r &\ll 1 && \text{Rizos sobre dunas} \\
 F_r &< 1 && \text{Dunas} \\
 F_r &\approx 1 && \text{Lecho plano y transición} \\
 F_r &> 1 && \text{Antidunas estacionarias} \\
 F_r &> 1 && \text{Antidunas}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

2.1.3. Densidad relativa sumergida del sedimento

La relación entre la densidad del sedimento respecto a la densidad del fluido definida como densidad relativa sumergida de las partículas de sedimento en interacción con el flujo se caracteriza con el siguiente adimensional:

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \tag{2.8}$$

Donde ρ_s indica la densidad de los sedimentos transportados o del lecho inmóvil y ρ la densidad del fluido.

2.1.4. Esfuerzo de corte adimensional

El esfuerzo de corte medio sobre el fondo en un canal prismático en régimen uniforme, derivado teorema de cantidad de movimiento en el enfoque integral, se define como:

$$\tau = \rho g R_h i \tag{2.9}$$

En problemas de hidráulica fluvial es usual expresarlo en forma adimensional de la siguiente manera:

$$\tau_* = \frac{\tau}{\rho g R d_s} \tag{2.10}$$

Donde R es la densidad relativa sumergida del sedimento no cohesivo; d_s es el diámetro característico de éste y el resto de parámetros mostrados anteriormente.

Comúnmente se expresa la velocidad de corte en función del esfuerzo de corte medio:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \tag{2.11}$$

Otra forma típica de expresar el esfuerzo de corte adimensional es:

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{g R d_s} \tag{2.12}$$

2.2. Antecedentes sobre flujo superficial

En un flujo de un fluido newtoniano e incompresible en un canal rectangular y prismático con lecho de grava gobiernan las ecuaciones de Navier-Stokes para describir el movimiento de una partícula de fluido en un flujo laminar, si se incluye la turbulencia se deben sumar los esfuerzos turbulentos propios provocados por las fluctuaciones de velocidad características de un flujo turbulento.

2.2.1. Movimiento de una partícula de fluido

Una partícula de fluido newtoniano e incompresible con viscosidad cinemática ν es gobernado por las siguientes ecuaciones de movimiento en un fluido homogéneo.

2.2.1.1. Ecuación de Navier-Stokes

En notación de Einstein se tiene:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (2.13)$$

Donde x_i es el vector unitario de las coordenadas cartesianas, u_i es el conjunto de velocidades respectivas a cada coordenada, g_i es la componente de la aceleración del campo de fuerzas másicas. $x_i, x_j; u_i, u_j$ y g_i con $i, j = 1, 2, 3$.

Las propiedades del fluido se caracterizan a través de la viscosidad cinemática ν y la densidad ρ considerando el fluido homogéneo e incompresible, por tanto estos valores constantes.

En conjunto con la ecuación de Navier-Stokes, del enfoque diferencial se obtiene la ecuación de continuidad para un fluido incompresible.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.14)$$

2.2.1.2. Ecuaciones de Reynolds

En flujos turbulentos se suman las variaciones de las velocidades en el tiempo propias de la turbulencia, esto modifica las componentes de los esfuerzos actuando sobre una partícula de fluido, que se agregan al esfuerzo viscoso de la ecuación (2.13) (lado derecho de la ecuación). Se define en notación de Einstein

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad p_i = \bar{p}_i + p'_i \quad (2.15)$$

Con \bar{u}_i el promedio temporal de las velocidad y u'_i las fluctuaciones temporales, respectivamente para $i = 1, 2, 3$.

Si se aplica la ecuación de Navier-Stokes a (2.15) se obtiene:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.16)$$

Considerando la turbulencia, la ecuación de continuidad queda:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.17)$$

La turbulencia entonces agrega un nuevo término al lado derecho de la ecuación (2.13). De éste se define el esfuerzo de corte turbulento:

$$\tau_{ijt} = -\overline{u'_i u'_j} \quad (2.18)$$

Se define entonces el esfuerzo de corte total actuando sobre la partícula de fluido en un flujo turbulento:

$$\tau_{ij} = \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_i u'_j} \quad (2.19)$$

(2.16) queda entonces:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.20)$$

2.2.1.3. Ecuaciones de Reynolds promediadas en el espacio

En las zonas cercana al lecho rugoso inmóvil, la estructura del flujo se define mediante el promedio espacial de las variables de éste (Wilson and Shaw, 1977). El procedimiento de promediación (promedio espacial a un nivel z desde la superficie promedio del lecho rugoso) se define para una propiedad del fluido en el flujo como:

$$\langle V \rangle (x, y, z, t) = \frac{1}{A_f} \int_{A_f} \int V(x', y', z, t) dx' dy' \quad (2.21)$$

Donde V es cualquier variable definida en el flujo; las llaves simbolizan el promedio espacial; y A_f es el área ocupada por el fluido dentro de la región definida en el plano $x - y$ al nivel z (plano promediado). En las consideraciones se utiliza el sistema de coordenadas donde el eje x está orientado a lo largo del flujo principal, paralelo al lecho promedio (u componente de velocidad), eje y orientado a la orilla izquierda (v componente de velocidad) y el eje z está apuntando hacia la superficie del agua (w componente de velocidad), con un origen arbitrario (Figura 2.1).

Tal como se definió la velocidad para el promedio temporal, para el promedio espacial se define:

$$\bar{u}_i = \langle \bar{u}_i \rangle + \tilde{u}_i \quad (2.22)$$

Con \tilde{u}_i la fluctuación espacial o la fluctuación de forma de la velocidad.

Dado que las ecuaciones de Reynolds se vuelven impracticables para zonas cercanas al lecho rugoso debido a la heterogeneidad espacial y lo altamente 3D de éstas (Nikora et al (2001)), se promedian en planos paralelos al lecho a un nivel z las distintas variables hidrodinámicas del problema, dando origen a las ecuaciones doblemente promediadas, desarrolladas por Gimenez-Curto and Corniero Lera (1996) en base al esquema de la Figura 2.1.

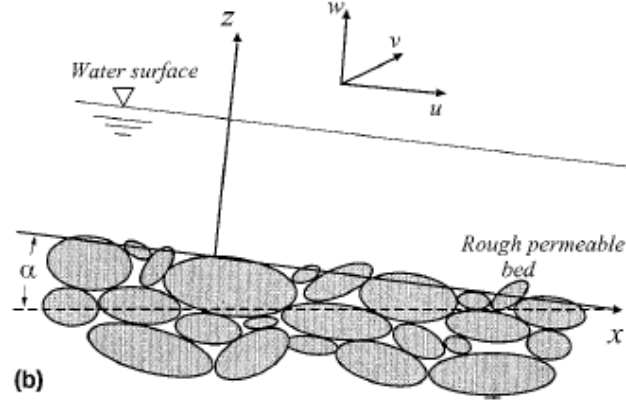


Figura 2.1: Esquema lecho de grava (Nikora et al, 2001).

Para la región del flujo sobre la cresta del lecho rugoso $z > H_{grava}$ se tiene:

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} - \frac{\partial \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j^2} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.24)$$

Por otra parte, para la región bajo la cresta del lecho rugoso $z < H_{grava}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial t} + \langle \bar{u}_j \rangle \frac{\partial \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} - \frac{1}{A} \frac{\partial A \langle \overline{u'_i u'_j} \rangle}{\partial x_j} - \frac{1}{A} \frac{\partial A \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle}{\partial x_j} + \\ \nu \frac{\partial^2 \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_j^2} + \nu \langle \frac{\partial^2 \tilde{u}_i}{\partial x_j^2} \rangle - \frac{1}{\rho} \langle \frac{\partial \langle \bar{p} \rangle}{\partial x_i} \rangle \end{aligned} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial A \langle \bar{u}_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2.26)$$

Donde H_{grava} es la elevación de la cresta de la zona rugosa, elevación del lecho de grava; $A = A(z) = \frac{A_f}{A_0}$ es la función de geometría de la rugosidad para el caso 2D, expresada como el cociente entre el área ocupada por el fluido A_f y el área total A_0 . En la región $z > H_{grava}$ se define $A = 1$; para lechos permeables $A > 0$, con valor mínimo $A = 0$ para lechos impermeables.

2.2.2. Estratigrafía y perfil de velocidad

La mecánica de fluidos permite caracterizar el perfil de velocidad en canales abiertos para distintas condiciones del flujo y de lecho.

La construcción de un lecho de grava en un canal prismático lo define de manera inmediata como rugoso cuando las rugosidades rompen la subcapa viscosa y aunque la hidrodinámica de flujos en lechos rugosos ha sido extensamente estudiada en las últimas 2 a 3 décadas, existen aun muchos problemas sin resolver esperando por ser clarificados. Uno de éstos es la distribución de la velocidad en las zonas cercanas al lecho, especialmente en la zona bajo las crestas de las rugosidades (Nikora et al. 2004).

La Figura 2.2 muestra el esquema del lecho rugoso inmóvil permeable construido para el estudio experimental:

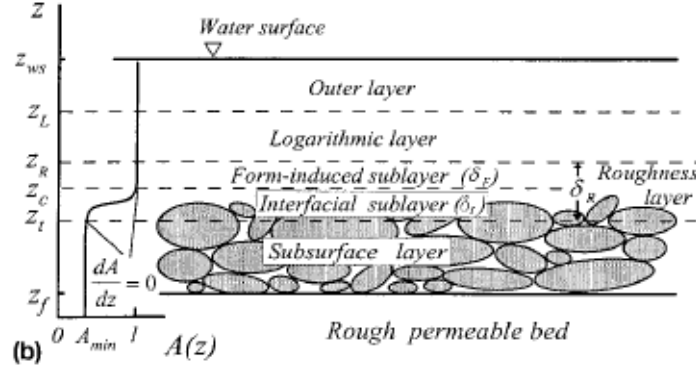


Figura 2.2: Lecho de grava y 5 regiones específicas (Nikora et al, 2001).

La definición de las ecuaciones de Navier-Stokes doblemente promediadas permiten dividir el lecho rugoso permeable en 5 regiones específicas cuando la profundidad del flujo (H) es mucho mayor que la altura característica de las rugosidades (Δ), es decir $H \gg \Delta$ (Nikora et al.2001).

El estudio experimental se realiza en la condición de $H \gg \Delta$ por lo que se desarrollan las 5 regiones que se definen a continuación:

1. Región externa (Outer layer):

Región superior del flujo donde los efectos viscosos y de forma son despreciables. Las ecuaciones doblemente promediadas son idénticas las promediadas en el tiempo (Reynolds).

La distribución de velocidad en esta zona puede ser descrita por la ley por defecto (Nezu and Nakagawa, 1993).

Las escalas características en esta región son:

- $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$: Velocidad de corte
- U_{max} : Velocidad máxima del flujo, alcanzada en la superficie del flujo.
- H : profundidad del flujo

2. Región logarítmica (Logarithmic layer):

Región media del flujo donde los efectos viscosos y de forma del lecho aun son despreciables, las ecuaciones doblemente promediadas son idénticas a las de Reynolds. La distribución de velocidad \bar{u} sigue la ley logarítmica mostrada en la ecuación (2.27):

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle(Z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{Z}{\delta_R} \right] + \frac{\langle \bar{u} \rangle(\delta_R)}{u_*} \quad (2.27)$$

Donde k es la constante de Von Karman; $Z = z - z_t$ con z_t la altura de los valles de los elementos de rugosidad, la que es el límite inferior de la subregión interfacial (Nikora et al (2001)) y $\delta_R = z_R - z_t$ con z_R es el límite inferior de la región logarítmica. Las escalas características en esta región son:

- $u_* = \left(\frac{\tau_0}{\rho}\right)^{0.5}$: Velocidad de corte
- H : Profundidad del flujo
- Topografía del lecho: σ_Δ , desviación estándar de las rugosidades del lecho y las longitudes de correlación transversal.

La región logarítmica ocupa la zona de flujo que cumple $(2 - 5)\Delta < (z - z_t) < 0.2H$ (Raupach et al. 1991; Nezu and Nakagawa 1993).

A continuación se describe la **Región Rugosa (Roughness layer)**, la que se subdivide en las 2 subregiones siguientes:

3. Subregión inducida por la forma (Form-induced sublayer):

Región que ocupa la zona justo arriba de las crestas de la rugosidades del lecho rugoso influenciada por los elementos individuales de la rugosidad. Esta región advierte los efectos de forma, que se deben a la forma del lecho y cómo éste separa el flujo de las zonas rugosas.

Los elementos de la rugosidad pueden influenciar la estructura del flujo local dentro de $0 < z - z_c < (1 - 4)\Delta$ (z_c el límite inferior de la subregión inducida por la forma de las rugosidades), es decir, el espesor de esta subregión, $\delta_F = z_R - z_c$ puede estar sobre $(1 - 4)\Delta$.

De acuerdo a la teoría de la capa límite, esta subregión puede ser intepretada como la región de transición (Buffer layer) (Raupach et al. 1991).

4. Subregión interfacial (Interfacial sublayer):

Región del flujo que también es influenciada por los elementos individuales de la rugosidad, ocupada la región del flujo entre la cresta de la zona rugosa y el resta inferior de ésta donde la función de geometría $A(z)$ cambia de 1 a A_{min} . Esta región advierte los efectos de arrastre.

Esta región se puede interpretar como la subcapa viscosa de la teoría de la capa límite. Nikora et al, (2004) plantea 3 modelos de distribución de velocidad y sus combinaciones para describir la subregión interfacial:

a) Modelo 1: Velocidad constante

$$\langle \bar{u} \rangle(z) = \left(\frac{gS_b}{0.5C_D a} \right)^{0.5} \quad (2.28)$$

Donde S_b es la pendiente del lecho; C_D es el coeficiente de arrastre que depende de la forma de los elementos de la rugosidad, densidad y distrubución espacial y $a(z) = Wdz/A_f dz$ densidad local de rugosidades.

En este modelo ni C_D ni a dependen de z . La distribución de velocidad constante se cumple cuando dominan los efectos turbulentos y la rugosidad es homegénea verticalmente.

b) **Modelo 2: Distribución exponencial**

$$\langle \bar{u} \rangle(z) = \langle \bar{u} \rangle(z_c) \exp \beta(z - z_c) \quad (2.29)$$

Donde $\langle \bar{u} \rangle(z_c)$ es la velocidad doblemente promediada en la cresta de las rugosidades (límite superior de la subregión interfacial); β parámetro; y z_c altura de la cresta de las rugosidades.

La distribución de velocidad exponencial se cumple cuando es la inercia más que la presión la que conduce el flujo en la región rugosa.

c) **Modelo 3: Distribución lineal**

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z) - \langle \bar{u} \rangle(z_c)}{u_*} = \frac{z - z_c}{l_c} \quad (2.30)$$

Donde $l_c = \rho k u_*^2 / A[(f_p + f_v) - \rho g S_b]$ es la escala de caracterización hidrodinámica del flujo bajo las crestas de la rugosidades; $A(z)$ es la función de geometría de las rugosidades; k es un coeficiente; y f_v, f_p es la fuerza de arrastre debido a la viscosidad y fuerza de arrastre debido a la presión, respectivamente.

El modelo 3 se puede aplicar para todo tipo de flujo, por lo que se considera la distribución lineal como la válida para la subregión interfacial.

5. **Región sub superficial:**

Región del flujo que ocupa las zonas porosas del lecho y es dominada por el efectos gravitatorios y flujos de momentos bajo las otras regiones. Las escalas características en esta región son:

- u_* : Velocidad de corte
- Porosidad o escalas características de poros.

Estudios más recientes permiten describir la distribución de velocidad en un flujo uniforme desde la región rugosa hasta la región externa totalmente como una ley logarítmica (Czernuszenko, 2011). El esquema de la Figura 2.3 permite definir la situación del estudio experimental:

Donde k es el diámetro característico del sedimento del lecho; d es el desplazamiento del plano $z = 0$; $k_{ef} = H_{lecho} - H_{sedimento}$ es la altura del lecho rugoso efectiva interfiriendo con el flujo; $H_{sedimento}$ es la altura del sedimento de relave dentro del lecho de grava inmóvil y H_{lecho} es la altura del lecho de grava.

Para la zona $z > H_{lecho}$ según la Figura 2.3, que es la zona en la que se realizan las mediciones de velocidad, se cumple:

$$\frac{\langle \bar{u} \rangle(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{z - d}{k_{ef}} \right] + B \quad (2.31)$$

Donde $z - d$ corresponde a la posición del lecho virtual; $k = 0.4$ es la constante universal de Von Karman, la que es independiente del lecho, la forma de éste y si es liso o rugoso; u_* es la velocidad de corte; B es una constante que depende de la naturaleza de la superficie del

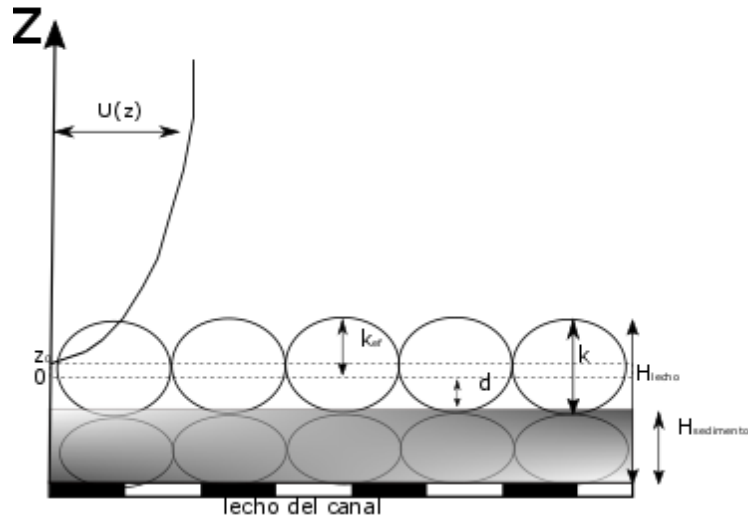


Figura 2.3: Esquema de definición de Ley logarítmica.

lecho del canal, considerada $B = 5 - 5.6$ para lechos de grava (Nikora et al., 2001). Por otra parte, para flujos sobre lechos rugosos con números de Reynolds suficientemente grandes, la distribución de velocidad no depende de la viscosidad y se cumple:

$$B = \frac{\langle \bar{u}_k \rangle}{u_*} \quad (2.32)$$

Donde $\langle \bar{u}_k \rangle$ es la velocidad justo en el límite que separa la capa rugosa.

2.2.3. Caudal

Para el estudio experimental es fundamental poder medir el caudal circulante en el canal de manera rápida, precisa y en cualquier momento de la experimentación.

Los métodos de obstrucción del flujo, basados en la teoría de obstrucción de Bernoulli, permiten medir el gasto líquido o caudal para flujos turbulentos relacionando la variación de presión, provocada por el cambio de sección de escurrimiento que induce la contracción de las líneas de corriente, con el caudal circulante, lo que se muestra en la Figura 2.4.

Considerando las ecuaciones de continuidad (2.33) y Bernoulli (2.34) para el sistema antes y después del orificio de diámetro d (Figura 2.4) se tendrá:

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 V_1 = \frac{\pi}{4} D_2^2 V_2 \quad (2.33)$$

$$p_1 + \alpha \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p_2 + \alpha \frac{1}{2} \rho V_2^2 \quad (2.34)$$

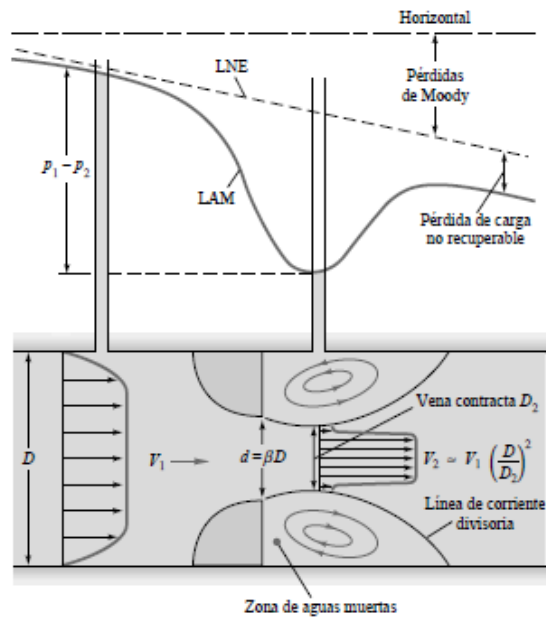


Figura 2.4: Variaciones de velocidad y presión en un medidor de caudal tipo Bernoulli (White, 2003).

Donde el subíndice 1 y 2 indican aguas arriba y aguas abajo de la contracción, respectivamente; α coeficiente de Coriolis, $\alpha \approx 1$ en flujos turbulentos, como el caso en estudio.

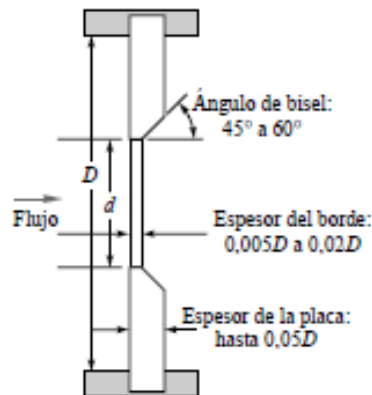


Figura 2.5: Orificio en placa delgada, modelo de placa orificio (White, 2003).

Para la placa orificio (Figura 2.5), una de las configuraciones internacionales estándar de contracción tipo Bernoulli, el desarrollo de la ecuación (2.33) y (2.34), considerando los efectos de la fricción, muestra la siguiente relación entre el caudal del sistema y la fluctuación en la presión inducida por la placa orificio:

$$Q = \eta A_{po} \left[\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

Donde el coeficiente $\eta = \frac{C_d}{(1-\beta^4)^{1/2}}$ se denomina coeficiente de flujo, que depende del coeficiente de descarga C_d , adimensional que toma en cuenta los errores del análisis aproximado, y

$\beta = d/D$ es el factor de velocidad que relaciona el diámetro aguas arriba de la placa orificio (D) y el del orificio (d).

Para la placa orificio los coeficientes deben tomar los siguientes valores:

$$0.8 > \beta > 0.2 \quad (2.36)$$

y

$$d > 12.5 \text{ mm} \quad (2.37)$$

El coeficiente de descarga C_d depende de la posición donde se miden las presiones.

En este estudio experimental se calibra la curva de la ecuación (2.35) de manera de hallar los coeficientes φ y χ de la siguiente ecuación:

$$Q = \varphi \Delta p^\chi \quad (2.38)$$

El procedimiento de calibración y la curva hallada se describen en la sección 3.1.1.3.

2.3. Transporte hidráulico de sólidos

En cauces naturales se acarrearán sólidos comúnmente debido a cambios en la geomorfología de éste, lo que modifica el cauce natural provocando que el lecho sufra erosión y los sólidos desprendidos se transporten en el flujo o bien por acciones externas de vertimiento de sólidos sobre el cauce.

Los sedimentos transportados naturalmente son las arcillas, limos, arenas, gravas y piedras que se mueven junto con el flujo, por otro lado, por efectos del hombre son múltiples los sólidos que pueden ser vertidos y posteriormente transportados, como por ejemplo relaves mineros debido a la rotura de un tranque y posterior acarreo de la escorrentía hasta el cauce natural. Se considera que limos y arcillas son sedimentos cohesivos; arenas, gravas y piedras no cohesivos y relaves mineros tienen un comportamiento dual debido a que contienen limos, arcillas y arenas. Normalmente en el lecho fluvial de un río dominan los sedimentos no cohesivos, caso que ha sido ampliamente estudiado en las últimas décadas, no así el transporte de sedimentos cohesivos.

Los métodos de transporte de sedimentos en cauces naturales por defecto son clasificados en dos tipos, transporte de fondo (Bed load) y transporte en suspensión. El movimiento de las partículas se efectúa por el fondo, las partículas se mueven a saltos (saltación) o se deslizan o ruedan por el fondo y otras se mueven en suspensión mezcladas con la masa de agua, así van suspendidas en la corriente.

A continuación se describen los tópicos más importantes relacionados al transporte de sedimentos.

2.3.1. Caracterización del sedimento

Para identificar y caracterizar el sedimento transportado en un cauce natural se realizan diversos ensayos que permiten obtener parámetros característicos y diferenciadores entre un

sedimento y otro.

Generalmente los sedimentos se distinguen en 2 en función de su presencia en cauces naturales (Niño, 2013):

- **Sedimentos cohesivos**

Se distinguen por ser limos y arcillas, donde las fuerzas interparticulares de origen electroquímico son importantes. Son partículas finas, por lo que su tamaño es pequeño y el peso no es preponderante en el equilibrio de fuerzas.

El grado de humedad influye en el comportamiento de éstos al ser transportados, así mientras más agua contenga el sedimento más no cohesivo se vuelve su transporte y las fuerzas electroquímicas tienden a no tener relevancia.

Sedimentos naturales cohesivos son limos y arcillas; de carácter artificial pueden ser los relaves mineros y concentrados de cobre.

- **Sedimentos granulares o no cohesivos**

Son las arenas, gravas y piedras. Son los sedimentos más frecuentes en cauces naturales, donde el peso de las partículas es la principal componente que se opone al movimiento.

Se distinguen las siguientes propiedades de los sedimentos no cohesivos (también en algunos casos cohesivos) más importantes para el estudio experimental:

1. **Granulometría:**

Los sedimentos naturales, así los relaves mineros, son mezclas de diferentes partículas en tamaño y forma.

La granulometría permite repartir en promedio las dimensiones de las partículas de una mezcla de sedimentos, expresada en términos del porcentaje del peso total del material, ésta se representa a través de una curva granulométrica (Figura 2.6) trazada en una escala semi-logarítmica (Lambe y Whitman, 1972).

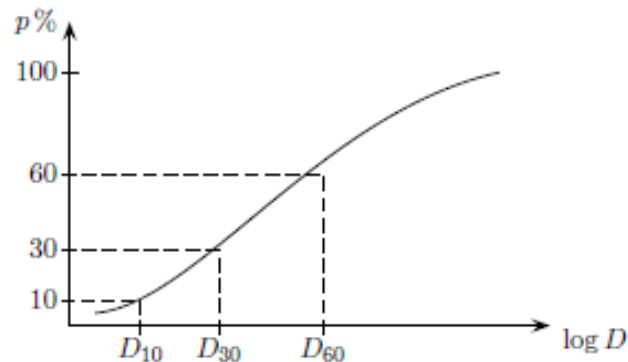


Figura 2.6: Curva granulométrica. Definición de diámetros característicos D_{10} , D_{30} y D_{60} .

En la curva granulométrica las abscisas representan el diámetro medio de las partículas d_s , mientras las ordenadas corresponden al porcentaje en peso del material total que posee un diámetro inferior a d_s con s el porcentaje de la ordenada correspondiente al diámetro d .

Para caracterizar la mezcla de sedimentos se utiliza el coeficiente de forma S , definido como:

$$S = \sqrt{\frac{d_{90}}{d_{10}}} \quad (2.39)$$

Otro parámetro útil es la desviación estándar geométrica basada en una distribución log-normal, dado por:

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (2.40)$$

Los relaves mineros son sedimentos con granulometría extendida o uniforme dependiendo de la naturaleza del lugar de extracción, así pequeños valores de S y σ_g implican una distribución uniforme del sedimento, más en específico, si $\sigma_g > 1.6$ la muestra de sedimento es de granulometría extendida (Poorly sorted) (Parker, 2008). Muchas de las ecuaciones para describir la mecánica del transporte de sedimentos están sujetas a la granulometría de los sedimentos del lecho.

Por otra parte, para describir los sedimentos cohesivos surgen múltiples problemas debido a la diversidad de las técnicas de mediciones, técnicas de muestreos y la preparación de muestras a caracterizar, donde las mediciones pueden ser hechas in situ o en laboratorio (Berlamont et al, 1993). En esta vereda, Berlamont (1993) y Teisson et al.(1993) describen las siguientes principales propiedades para caracterizar sedimentos cohesivos asociadas al estudio experimental, con foco en describir parámetros del comportamiento mecánico para procesos geomorfológicos y de transporte de sedimentos:

1. Velocidad de sedimentación:

La velocidad de sedimentación de una partícula de sedimento de diámetro d_s o una mezcla de sedimento de diámetro característico d_s se define de la siguiente forma (Niño, 2013):

$$\frac{\omega_s^2}{gd_s\rho_r} = \frac{4}{3} \frac{1}{C_D} \quad (2.41)$$

Donde $\rho_r = (\frac{\rho_s}{\rho} - 1)$; C_D es el coeficiente de arrastre (drag) que está en función del número de Reynolds de la partícula Re_p y la forma de las estas. Para modelar C_D se puede utilizar la curva típica, $C_D = f(Re_p = \omega_s d_s / \nu)$, correspondiente a esferas. Esta curva puede ser estimada a partir del ajuste de la Ecuación 2.42 (Yen, 1992).

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{1/2} + 0.017 Re_p) - \frac{0.208}{1 + 10^4 Re_p^{-1/2}} \quad (2.42)$$

El parámetro ω_s se calcula de manera iterativa, para esto se da inicialmente un valor de ω_{si} , lo que permite obtener un Re_{pi} que permite obtener un valor del coeficiente de arrastre inicial C_{Di} , el que en la Ecuación 2.41 arroja un valor para ω_{si2} , el cálculo se termina cuando el valor inicial de ω_s coincide con el final.

Velocidades típicas de sedimentación son del orden de 0.01-10 cm/s, las que aumentan con la concentración debido a la agregación de partículas alcanzando su máximo entre 2-10 g/l.

2. Distribución del tamaño de los sedimentos:

La distribución del tamaño de sedimentos cohesivos se puede medir directamente con métodos como “Counter Coulter” y las técnicas de difracción láser. El primero altera en gran medida la distribución debido a que estimulan la formación de agregados, mientras el segundo es bastante caro, pero de todas maneras preciso. En este estudio experimental se utilizan métodos por difracción láser que permiten obtener una curva

granulométrica de sedimentos finos.

La muestra tomada para realizar el método de difracción propone romper los agregados mediante algún agitador mecánico, el que viene incorporado hoy en día en los instrumentos (Singer et al., 1988). Se agrega típicamente una pequeña cantidad de la muestra ($< 10g$).

Berlamont (1993) concluye que mientras sea posible, los parámetros deberían ser medidos in-situ ya que el transporte de los sedimentos al laboratorio cambia significativamente algunas propiedades.

2.3.2. Transporte de sedimentos no cohesivos

Las definiciones siguientes han sido formuladas teóricamente y verificadas experimentalmente para sedimentos no cohesivos.

2.3.2.1. Caracterización del esfuerzo de corte de fondo

El esfuerzo de corte de fondo es una medida de la resistencia hidráulica del lecho al flujo y en un régimen uniforme se vuelve un parámetro crítico para caracterizar el gasto sólido de fondo. Se suele asociar el esfuerzo de corte al fondo del lecho, justo sobre la altura de la rugosidad en un lecho rugoso, pero también se puede expresar en cualquier altura superior o en alguna posición interior del lecho donde el momento es total o parcialmente absorbido.

Existen diversas formas de caracterizar el esfuerzo de corte de fondo, las que se muestran a continuación:

1. **Esfuerzo de corte medio** Del análisis de la ecuación de momentum en el enfoque integral para un flujo turbulento en régimen uniforme se cumple:

$$\tau = \rho g R_h i \quad (2.43)$$

Donde ρ es la densidad del fluido; g es la aceleración de gravedad; $R_h = A/\chi$ el radio hidráulico e i la pendiente del lecho, denotada igualmente como $i = S$ cuando el flujo es uniforme.

2. **Método logarítmico** En base a la ecuación del perfil logarítmico de velocidad, u_* queda determinado por la siguiente expresión:

$$u_* = \frac{\overline{\langle u(z) \rangle}}{\frac{1}{k} \ln \frac{z-d}{k_{ef}} + B} \quad (2.44)$$

3. **Método de los esfuerzos de Reynolds** Del análisis de las ecuaciones de Navier-Stokes y continuidad doblemente promediadas para un flujo en régimen uniforme en un canal prismático, como el de la Figura 2.3, es posible deducir para $z > H_{lecho}$:

$$\tau(z) = \rho g h i \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \rho (-\overline{\langle u'w' \rangle} - \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle) + \nu \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} \quad (2.45)$$

Donde \tilde{u} , \tilde{w} corresponden a las fluctuaciones turbulentas espaciales en la dirección

longitudinal y vertical al flujo, y u' , w' corresponden a las fluctuaciones turbulentas temporales en las mismas direcciones respectivamente. El símbolo $\langle \quad \rangle$ denota el promedio espacial de las variables y h es la altura del flujo sobre el lecho. De (2.45) se definen 3 esfuerzos de corte característicos del flujo:

a) **Esfuerzo de corte turbulento:**

$$\tau_{tur} = -\rho \langle u'w' \rangle \quad (2.46)$$

Esfuerzo que viene del promedio temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes, el que surge de introducir el concepto de turbulencia.

b) **Esfuerzo de corte espacial o de forma:**

$$\tau_{esp} = -\rho \langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle \quad (2.47)$$

Esfuerzo que surge de realizar el promedio temporal de las ecuaciones promediadas de Reynolds, reflejando la influencia de la geometría de las rugosidades, así considera como éstas afectan al flujo y su celeridad.

c) **Esfuerzo de corte viscoso:**

$$\tau_v = \mu \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z} \quad (2.48)$$

Esfuerzo que cuantifica los efectos de la viscosidad.

De esta forma la ecuación (2.45) se reescribe como:

$$\tau(z) = \tau_{tur} + \tau_{esp} + \tau_v \quad (2.49)$$

El comportamiento del esfuerzo de corte es lineal con su máximo valor justo sobre el lecho rugoso, punto en el que τ_v desaparece al ser destruido el efecto viscoso por las rugosidades del lecho, así τ_{tur} y τ_{esp} se vuelven máximos. El efecto de la viscosidad es importante solo en la capa viscosa, que se encuentra al interior del espesor efectivo del lecho rugoso, k_{ef} de la Figura 2.3, en esta zona los otros 2 esfuerzos son despreciables.

2.3.2.2. Gasto sólido de fondo

En forma general puede definirse el transporte de fondo como aquel durante el cual las partículas de sedimento transportadas por el flujo se mantienen en frecuente contacto con el lecho, éste está asociado a sedimento relativamente grueso, en el rango de arenas hacia arriba.

Este modo ocurre fundamentalmente en tres submodos distintos: deslizamiento, rotación y saltación.

- **Deslizamiento:** Mecanismo menos frecuente de transporte de fondo, en éste, la partícula se desliza sin rotar manteniendo un continuo contacto con el lecho.
- **Rotación:** Mecanismo de transporte de fondo que ocurre a bajos valores del esfuerzo de corte o que se produce durante breves intervalos de tiempo entre eventos de saltación. En éste, la partícula rota. Este modo se genera naturalmente al desplazarse las partículas sobre un lecho formado por partículas dispuestas irregularmente.

- **Saltación:** Mecanismo principal de transporte de fondo en el que las partículas sólidas sobre un lecho granular se mueven en la forma de una sucesión de rebotes. Es gobernada por la acción de las fuerzas hidrodinámicas que acarrearán a las partículas transfiriéndoles momentum en la dirección del flujo, la fuerza de gravedad que atrae las partículas hacia el lecho y la colisión de ellas con el lecho, transfiriendo el momentum horizontal a momentum vertical elevándolas en el campo de flujo, manteniendo así el proceso de saltación.

2.3.3. Relaves mineros

Para este estudio experimental se utilizan relaves mineros, sedimentos que son mezcla de limos, arcillas, arenas y en distinta medida metales pesados. El vertimiento de estos en sistemas fluviales genera efectos tanto de largo como corto plazo.

En un tranque de relave se acumulan materiales sólidos, finos, que se descartan de las operaciones de separación y obtención de los valores metálicos (cobre y molibdeno, en este caso). La composición de los sólidos sedimentados en los tranques de relave es muy variada y depende de las características del mineral y de los procesos a que ha sido sometido. Un tranque de relaves presenta impactos ambientales tanto en fase sólida (los sólidos sedimentados en profundidad) como en fase acuosa (las aguas de salida del tranque de relaves).

Los relaves mineros pueden ser vertidos por rotura de tranque cercanos a sistemas fluviales, rotura de tranque y posterior acarreo de sedimentos a través de esorrentía o rotura de tuberías transportadoras de desechos mineros. Los desechos mineros contienen múltiples metales pesados, los que tienen altos tiempos de permanencia en lechos de ríos, quedándose desde cientos a miles de años, caracterizándose por una naturaleza bioacumulatoria en plantas y animales.

La granulometría extendida característica de los relaves mineros, en conjunto con la presencia de sedimentos cohesivos y metales pesados producen una interacción característica en donde más del 90 % de los sedimentos finos y metálicos son transportados como partículas asociadas a la misma carga del sedimento del río.

Recientemente, Turner et al. (2013), reconocieron la contaminación de desechos de la minería dentro de sistemas fluviales como el mayor problema alrededor del mundo relacionado a la contaminación de ríos, donde el mayor problema es que más del 70% de los sedimentos contaminantes presentan tiempos de persistencias mayores a 200 años cuando han sido depositados.

A continuación se detallan aspectos relacionados al trabajo en laboratorio y transporte de relaves mineros:

1. Relaves mineros para ensayos de laboratorio:

Si bien en la literatura actual no existe registro de experimentación acerca del vertimiento de relaves en lechos de grava, investigadores como Dimitrova y Yanful (2012) y Geremew y Yanful (2011) realizaron investigaciones para caracterizar en distintas formas relaves mineros mezclados con arcilla de distintas minerologías respecto a qué factores afectan el esfuerzo de corte, todo desde una mirada geotécnica.

Dimitrova y Yanful (2012) generan una metodología para obtener relaves mineros a

través de mezclas artificiales de éstos con arcillas de distinta mineralogía, permitiendo obtener lechos con diferente composición, grosor y edad mediante procesos de sedimentación. Estos investigadores proponen realizar una curva granulométrica de las muestras de relaves secas y las mezclas realizadas (secas), procedimiento que se realiza en este estudio experimental.

2. Transporte de sedimentos en suspensión

El transporte de sedimentos en ríos es un tema de múltiples investigaciones en la actualidad debido a los efectos relevantes que tiene éste sobre la sustentabilidad del sistema fluvial, elevación de la cota de fondo de ríos y efectos sobre el ecosistema humano y animal.

Anteriormente se describió la composición de los relaves mineros en forma generalizada. Los metales pesados, agentes contaminantes, se transportan con la misma carga de sedimentos del río, por lo que se pueden encontrar adsorbidos en estos y en el mismo sedimento fino y grueso que puedan contener los relaves.

Tanto metales pesados como sedimentos cohesivos y finos pueden ser transportados en suspensión por el flujo. El transporte en suspensión está compuesto del gasto sólido en suspensión proveniente del lecho, el que se ponen en suspensión debido a las fuerzas hidrodinámicas, y del gasto sólido en suspensión que se encuentra circulando y que nunca tiene contacto con el lecho, denominado *Washload*.

En este estudio experimental gran parte del sedimento en suspensión será del tipo "Washload" debido a que los sedimentos son vertidos desde la superficie libre y luego de esto comienzan su proceso de transporte.

Respecto al transporte de sedimentos en suspensión se distinguen los siguientes tópicos a aplicar al estudio experimental:

- **Distribución vertical del sedimento:**

Existe una distribución vertical del sedimento en el flujo, la que depende del rango de velocidades de sedimentación de las partículas que componen el relave, la fluctuaciones turbulentas de la velocidad y la concentración del material presente. Rouse (1937) propone una solución usando el concepto de difusividad turbulenta, que considera un perfil de velocidad en z logarítmico para un canal abierto en la región exterior y logarítmica, obteniendo así el perfil adimensionalizado de concentración de equilibrio de Rouse (Ecuación 2.50).

$$\frac{\bar{C}}{C_{ref}} = \left\{ \frac{1 - \xi}{\xi} \frac{\xi_{ref}}{1 - \xi_{ref}} \right\}^Z \quad (2.50)$$

Donde $Z = \frac{w_s}{ku_*} \approx 2.5 \frac{w_s}{u_*}$, $\xi = z/h$, $\xi_{ref} = z_{ref}/h$; $k \approx 0.4$ la constante de Von Karman; C_{ref} la concentración de referencia a una altura z_{ref} en la región donde es válida la Ley logarítmica, u_* velocidad de corte y w_s velocidad de sedimentación de los sedimentos.

- **Gasto sólido en suspensión q_{ss} :**

El gasto sólido en suspensión por unidad de ancho b se calcula como la integral de la velocidad media del flujo y la concentración de sedimento en suspensión en

toda la zona donde existen sedimentos en suspensión, considerando sólo la región donde la Ley logarítmica de velocidades es válida.

$$q_{ss} = \int_{z_{ref}}^h \bar{u}(z)\bar{C}(z)dz \quad (2.51)$$

La Ecuación 2.51 se puede discretizar y expresar como una sumatoria, lo que se muestra en la Ecuación 2.52 (Niño, 2013).

$$q_{ss} = \sum_{z_{ref}}^h \bar{u}(z)\bar{C}(z)\Delta z \quad (2.52)$$

Donde Δz es el paso de altura donde se cuenta con datos de concentración media y velocidad media.

En todos los casos anteriores, z_{ref} se calcula como el 5 % de la altura sobre la superficie superior del lecho, donde se supone válida la Ley logarítmica de velocidades.

2.4. Métodos ópticos para la velocimetría

Actualmente gran parte de los métodos de velocimetría usados en ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos están basados en el análisis de imágenes del movimiento de trazadores presentes en el flujo (Brevis y Niño, 2014). Estos métodos se conocen como métodos ópticos para el registro de velocidad del flujo. La velocidad del flujo varía en la vertical debido al principio de no resbalamiento en las paredes y a causa de esfuerzos externos. Si las partículas trazadoras se mueven en forma solidaria al flujo, el movimiento se registra a través de cámaras de video de alta velocidad y se utiliza un algoritmo para procesar los datos, se puede obtener la velocidad instantánea, media y variaciones en todas las direcciones que se permita.

2.4.1. Generalidades

En las últimas décadas han sido dos los métodos ópticos para la velocimetría que mas han tenido su auge en la ingeniería hidráulica y mecánica de fluidos (Westerweel et al., 1992; Adrian, 1991); Particle Image Velocimetry (PIV) y Particle Tracking Velocimetry (PTV). Estas técnicas fueron desarrolladas con el objetivo de caracterizar toda la estructura del flujo turbulento en el tiempo mediante el procesamiento de imágenes del flujo. Ambos métodos deben su popularidad a que no producen grandes cambios en las características del flujo y permiten obtener una gran cantidad de información espacial con alta resolución temporal. Éstos consisten en un análisis cuantitativo y automático de imágenes de un trazador en el flujo previamente incorporado, cuya trayectoria es registrada en el tiempo mediante un dispositivo de grabación como cámaras digitales de alta velocidad (Westerwell, 1999). La observación del flujo trazado es cuantitativa pues se implementan diversos algoritmos de análisis estadísticos como la correlación cruzada y auto correlación en el procesamiento de datos, lo que permite obtener el perfil de velocidad instantánea bidimensional del flujo (Musalem, 1999).

- Consideraciones experimentales PIV y PTV

Se requieren las siguientes condiciones experimentales para la utilización de la técnica PTV y PIV (Prasad., 2000; Thielicke y Stamhuis, 2014).:

1. Sección de escurrimiento de baja turbiedad y partículas:

Las partículas trazadora deben reflejar o dispersar la luz de la fuente de iluminación de manera eficiente (láser u otra). La turbiedad impide procesos físicos ligados a la luz haciendo imposible observar el flujo. Si las partículas no reflejan bien la luz se requiere el uso de una cámara más sensible o una fuente de iluminación de mayor intensidad, lo que aumenta el costo.

Se deben usar partículas fluorescentes con un espectro de emisión distinto al de absorción, de diámetros entre 3–100 micrones con densidades entre 1000–1050 kg/m^3 , éstas tienen un alto costo en el mercado. Pedochi et al (2008) exponen un método económico de fabricación de partículas de acrílico fluorescentes mezclando rodamina acuosa al 20% con resina, las que se fabrican por cuenta propia para el estudio experimental.

El sedimento en suspensión de granulometría muy fina genera turbiedades que hacen imposible la aplicación de estos métodos, por lo que la utilización está limitada a la turbiedad de la sección de escurrimiento.

2. Una fuente de iluminación:

Las fuentes de iluminación pueden ser en luz continua y pulsada, y en término de sus características espaciales en fuente de luz difusa o coherente.

En columnas de agua se usan frecuentemente fuentes de luz coherente, continuas y pulsadas. Cuando la velocidad del flujo es alta se usan luz de láser continuo junto a una cámara de alta velocidad.

3. Cámara o dispositivo del registro de movimiento de las partículas:

Se acepta el uso de cámaras digitales del tipo CCD (Charge Coupled Device) y CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductors). Los dispositivos CCD poseen bajo nivel de ruido, el que asegura un alto rendimiento en aplicaciones de alta precisión como es el caso, en comparación con dispositivos CMOS.

4. Capacidades computacionales para el procesamiento de la información

Un computador de mayor potencia de procesamiento permite acortar el tiempo de procesamiento de la información, el que se realiza gracias a distintos programas capaces de procesar imágenes, tales como PTVlab, Digiflow, OpenPTV, PivLab, etc.

La conjugación de todas las condiciones anteriores permiten capturar una secuencia temporal y espacial de imágenes del trazador en el flujo a determinada frecuencia.

2.4.2. Principio de operación PIV

Este método óptico de medición de velocidad trabaja en un marco de referencia Euleriano, determinando los cambios temporales de la velocidad de grupos de partículas en posiciones espaciales fijas. La velocidad del trazador y por consecuencia del flujo se calcula de la siguiente forma:

$$\vec{u}_i = \frac{\Delta \vec{x}_i(\vec{x}_i, t)}{\Delta t} \quad (2.53)$$

Donde se deben conocer las posiciones de la partícula o patrón en dos instantes de tiempo. Este método es usado cuando las concentraciones de las partículas trazadoras son altas y no existe traslape entre ellas, como lo muestra la Figura 2.7.

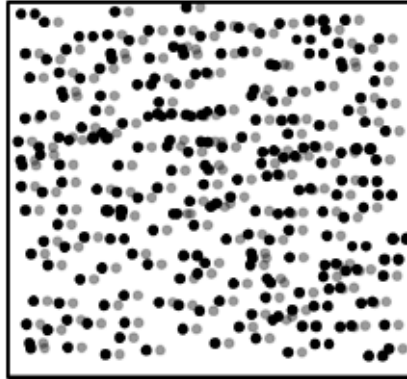


Figura 2.7: Esquema de desplazamiento de dos frames consecutivos. Partículas oscuras y claras representan el instante t_0 y $t_0 + \Delta t$, respectivamente (Fuentes, 2017).

Las limitaciones de éste método radican en que en muchas aplicaciones no es posible alcanzar la densidad de partículas trazadoras necesaria para cumplir la condición mínima, como por ejemplo en canales de gran tamaño donde no existe recirculación de las partículas trazadoras. Además de esto, superficies libres, interfaces o sedimentos en suspensión interfieren con las medidas siendo en algunos casos no posible aplicar PIV.

2.4.3. Particle Tracking Velocimetry (PTV)

Método óptico de medición de velocidad que trabaja en un marco de referencia lagrangeano. La velocidad del trazador se calcula como:

$$\vec{u}_i = \frac{\Delta \vec{x}_i}{\Delta t} \quad (2.54)$$

Este método es usado cuando las concentraciones de las partículas trazadoras son bajas, así la distancia que recorre una partícula en un intervalo pequeño de tiempo es menor en comparación con la separación, como se muestra en la Figura 2.8.

Como se observa, la trayectoria de cada partícula se puede identificar sin dificultades sobre cualquier sector de la casilla de interrogación con baja probabilidad de traslape para luego obtener la velocidad (Adrian, 1991; Prasad, 2000).

Las desventajas de este método radican en la baja densidad de partículas, por lo que fenómenos turbulentos como vórtices de pequeña escala no pueden ser visualizados ya que no es posible trazarlos.

Brevis y Niño (2014) detallan distintos algoritmos para la detección de partículas y métodos de correspondencia temporal citando sus principales debilidades y fortalezas.

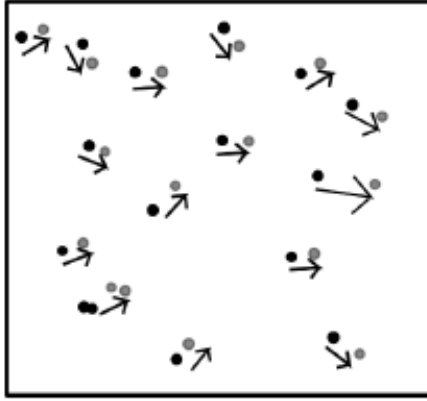


Figura 2.8: Esquema de desplazamiento de dos frames consecutivos, PTV. Partículas oscuras y claras representan el instante t_0 y $t_0 + \Delta t$, respectivamente (Fuentes, 2017).

2.5. Procesamiento de imágenes y Pivlab

Posterior a la grabación de imágenes se realiza el procesamiento, el que se realiza las siguientes dos etapas:

1. **Pre-procesamiento:** Una de las técnicas más usada y simple de pre-procesamiento de imágenes es la sustracción del fondo de la imagen (Honkanen y Nobach, 2005). Esta técnica permite remover objetos sólidos, posibles desperfectos del sensor de imagen y, por sobre todo, mejora la relación ruido señal.
2. **Post-procesamiento:** Las técnicas de post-procesamiento permiten mejorar la precisión de los resultados crudos obtenidos por medio del análisis de las imágenes. Para mediciones bidimensionales las técnicas más utilizadas de post-procesamiento son:
 - a) **Filtrado:** Consiste en filtrar la imagen para identifica resultados erróneos. Se cuenta el filtro promedio, filtro de mediana y filtro por umbral de correlación cruzada, los que se usan considerando la densidad de partículas utilizada y las típicas fuentes de error en las mediciones.
 - b) **Calibración de resultados** Corrige los errores ocasionados por grabaciones no ortogonales, distorsiones de lentes y por las deformaciones ópticas causadas por la penetración de las líneas ópticas a través de medis con distintas densidad. Para esto, transforma la imagen y calibración de la cámara a través de expresiones analíticas o empíricas.
 - c) **Interpolación a una malla regular** Interpola los resultados obtenidos en una marco de referencia Lagrangeano a un marco de referencia Euleriano.

Por otra parte, se procesan las imágenes mediante el programa Pivlab, programa Matlab de código libre para el procesamiento de la información, el que está basado en diversos algoritmos para la detección de partículas, como la correlación cruzada. Es el que se usa para abordar la técnica PIV en este estudio experimental. Fue implementado por Thielicke y Stamhuis (2014).

El algoritmo por defecto es el de correlación cruzada, el que es una medida de la similitud

entre dos series en función de la diferencia entendida como una fase entre ellas.

Si A y B son dos imágenes correspondientes a un tiempo t_0 y $t_0 + \Delta t$, respectivamente, entonces cada imagen puede ser dividida en casillas de interrogación, correspondientes a pequeñas sub imágenes y así cada casilla de interrogación de A es correlacionada con su correspondiente en B generando una matriz de correlación cuyo peak representa la posición del vector desplazamiento.

La correlación cruzada se puede evaluar en base a 2 métodos; Correlación cruzada directa (DDC) y el de frecuencias a través del uso de transformadas de Fourier (FFT).

Capítulo 3

Descripción del Estudio Experimental

En el presente capítulo se describe el proceso de experimentación; se muestra el montaje experimental, la instrumentación y cómo se usó esta última en las experiencias, se describe la metodología y las condiciones experimentales dadas al momento de realizar las pruebas.

La realización de los experimentos se llevó a cabo en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, donde ya se encontraba montado el canal de estudio.

El tiempo de experimentación fue de aproximadamente 9 meses en donde se contempla la construcción y calibración de un piezómetro, calibración de la tolva ya existente en el canal del laboratorio, granulometría para partículas finas (granulometría láser) y gruesas del relave (tamizado), producción de partículas de rodamina, registro de campo de velocidades del flujo a través de partículas de rodamina (PIV), 6 experimentos en el canal con vertimiento de relave, medición de concentración de partículas de relave, montaje de las gravas en el lecho y el aseo y vaciado de la sentina y canal.

La importancia de este capítulo reside en que se pueden conocer las condiciones que se adoptaron para los experimentos y de esta forma poder sacar conclusiones de los resultados obtenidos y de la metodología experimental, ya que los experimentos son sólo un modelo de la realidad y no necesariamente representan la totalidad del fenómeno en estudio.

Dada la naturaleza de la experimentación resulta complejo representar y controlar todas las variables que se presentan en el transporte de relaves mineros debido a accidentes en un flujo con lecho de grava, pero se espera que esta propuesta de modelo sea satisfactoria para lo que se requiera analizar.

3.1. Instalación experimental

Para representar el transporte de relaves mineros debido a accidentes en un flujo con lecho de grava, se utiliza un canal como el mostrado en la Figura 3.1. Sobre éste aguas abajo de su inicio se encuentra el sistema alimentador de sedimentos con su motor correspondiente, seguido por el medidor de gasto sólido en suspensión. Adosado a la estructura metálica que soporta al canal, se encuentran empotradas 2 cámaras Go Pro que permiten registrar

la variación temporal de la estratigrafía del lecho de grava en contacto con el relave minero ingresado; una de estas cámaras corresponde a una GoPro Hero3 White y la otra a una GoPro Hero4 Silver, controladas con un control remoto (Smart Remote) de manera simultánea.

El sedimento con que se experimenta es un relave minero arenoso con distintas cantidades de material fino que posee propiedades cohesivas (3.16).

A continuación se describe en detalle la instalación experimental y la caracterización del sedimento empleado.

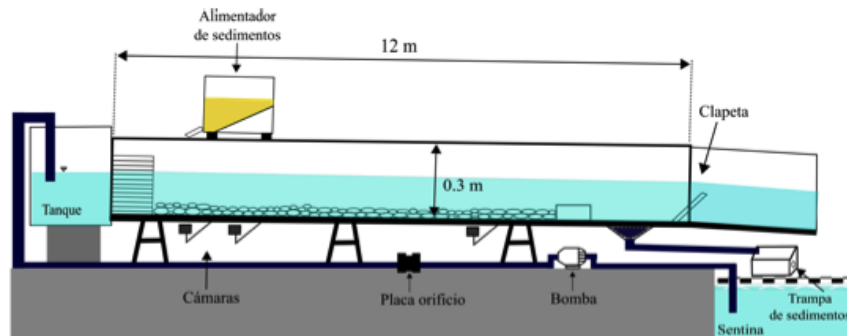


Figura 3.1: Esquema del canal (Licanqueo, 2016).

3.1.1. Descripción de la instalación experimental

3.1.1.1. Canal principal

El canal principal es una estructura que ya se encontraba pre-fabricada de otro estudio en el laboratorio. El esqueleto de la estructura está construido con acero, las paredes de éste están hechas de un acrílico de 10 mm de espesor con parte de la base de madera, la que posee forma rectangular pero sin la base superior, dejando la superficie inferior abierta a la atmósfera. El canal posee 12 m de largo y una sección transversal cuadrada de 30 cm x 30 cm. El esqueleto y la base del canal se encuentran pintados para evitar la corrosión en el acero y la hinchazón en la madera debido a filtraciones, de esta manera se pueden evitar futuras fallas estructurales, es por esto que también las orillas de las paredes del canal se encuentran selladas con silicona. Es importante mencionar que en el canal existen varias fugas, las cuales no fueron reparadas para las experimentaciones, pero debido al despreciable caudal que se pierde no se considera que afecte al experimento de forma significativa.

La estructura posee apoyos que se pueden ajustar para dar al canal la pendiente deseada, en este caso se utilizó una pendiente promedio de 1,22%. Para poder calibrar la pendiente se dividió el primer trayecto del canal en 4 partes de 2 m cada una, se midió con un nivel de ingeniero utilizando como mira una regla metálica, la cual tiene un error asociado de ± 0.5 mm. Las Tablas 3.1 y 3.2 muestran la calibración de la pendiente:

Tabla 3.1: Mediciones para la calibración de la pendiente.

Trayecto	ΔX [cm]	ΔY [cm]	$\sigma_{\Delta x, \Delta y}$ [cm]
1	202.00	2.60	± 0.07
2	202.00	2.40	± 0.07
3	424.00	5.20	± 0.07
4	228.00	2.70	± 0.07

Tabla 3.2: Calibración de la pendiente.

Tramo	i [%]	σ [%]
1	1.29	± 0.04
2	1.19	± 0.04
3	1.23	± 0.02
4	1.18	± 0.03
Promedio	1.22	± 0.01

Al principio del canal y sobre éste se encuentra el alimentador de sedimentos, el cual puede desplazarse a lo largo gracias a un rodado o carril, de la misma forma se encuentra instalado el medidor de la concentración de sólidos en suspensión.

Dentro del canal se disponen las gravas de río de $D_{50} = 4.5$ cm aproximadamente, redondeadas en su mayoría debido a la acción del agua sobre su superficie. Se colocan en la base del canal de manera que alcance una altura de $\approx 6 - 7$ cm de alto, para esto se ponen aproximadamente 2 camas de grava.

El caudal que se utiliza en cada experiencia se ajusta mediante una llave de paso ubicada en la bomba. La estratigrafía del lecho se registra con las cámaras de grabación mencionadas anteriormente (GoPro Hero3 White y GoPro Hero4 Silver) las que se disponen a 6 y 7.5 m del inicio del canal, estas cámaras van adosadas al canal en una estructura metálica que se encuentra empotrada al éste a una distancia de 0.5 m. Para poder el registro de imágenes con las cámaras de grabación de manera adecuada se debe tener una adecuada iluminación en la sección de interés.

3.1.1.2. Tanque y sistema de alimentación de agua

El sistema de alimentación de agua corresponde a un circuito hidráulico cerrado, en el que por medio de una tubería de 4" (10.16 cm) de diámetro se impulsa agua gracias a una bomba desde la sentina hacia la cámara de entrada (Figura 3.2), luego el agua circula por el canal para retornar finalmente a la sentina recién mencionada que posee una capacidad aproximada de $36 m^3$. La bomba es de marca Pedrollo y posee una potencia de 2.2 HP.

La cámara de entrada al canal corresponde a una estructura metálica aparte del canal y posee una sección transversal trapezoidal, con una capacidad de almacenamiento aproximada de $0.5 m^3$, entre la cámara de entrada y el inicio del canal se encuentra un sistema aquietador

de flujo, el cual consiste en una red de tubos PVC dispuestos completamente en la sección transversal del canal, poseen 20 mm de diámetro y 10 cm de largo (Figura 3.3).



Figura 3.2: Tanque de entrada.



Figura 3.3: Vista transversal.

3.1.1.3. Sistema de medición de caudales: Placa orificio

Para medir los caudales que se requieren en las experiencias se utiliza un sistema de medición de caudales el cual consiste en una placa orificio, este dispositivo es capaz de medir el caudal gracias a la diferencia de presiones que se produce en la parte anterior y posterior de la placa. La presión en esos puntos mencionados se mide con un piezómetro, el cual se encuentra conectado a la placa orificio por mangueras de pequeño diámetro, que son parte de dicho piezómetro. Es la diferencia de alturas que se lee en el piezómetro la que indica la diferencia de presión por consiguiente se conoce la velocidad a la cual va el flujo.

En la Figura 3.5 se muestran las dimensiones y la en la Figura 3.6 la disposición de la placa orificio, que posee una diámetro interior de 75 mm y un diámetro exterior de 99 mm.



Figura 3.4: Placa orificio.

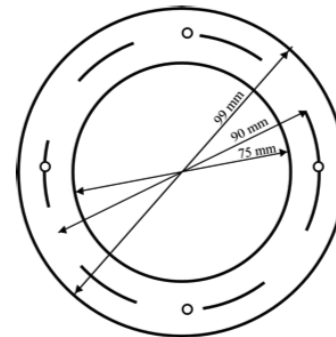


Figura 3.5: Vista transversal (Licanqueo, 2016).

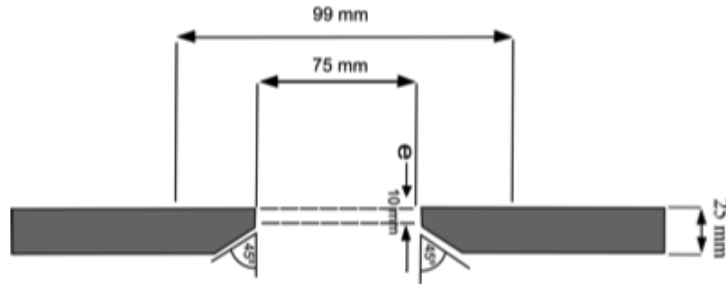


Figura 3.6: Disposición de placa orificio, (Licanqueo, 2016).

A continuación además se muestra el piezómetro utilizado para medir las diferencias de presiones, instrumento que tuvo que ser construido y calibrado para este experimento (Figura 3.7).

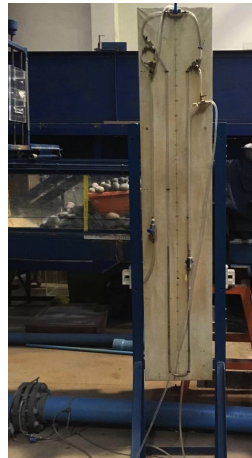


Figura 3.7: Piezómetro.

Para la construcción construcción del piezómetro se ocupa un tablero, el cual está apropiadamente graduado con papel milimetrado, luego de eso se hace la instalación de las mangueras y se vierte el mercurio dentro de ella. Finalmente esto se debe conectar con la placa orificio, una manguera va antes de este dispositivo y la otra después en la tubería.

Para calibrar la placa orificio se hace funcionar el circuito hidráulico, se enciende la bomba y se elige un caudal de manera de poder obtener una diferencia de altura establecida en el piezómetro, todo esto se debe hacer asegurándose que no hay burbujas en las mangueras, luego se debe medir el caudal ya que este se conserva a lo largo del canal y la tubería. Para conocer el caudal, se mide el tiempo en que se demora en llenar un bidón de 500 l. En este caso para calibrar el piezómetro, se midió el caudal para 8 diferencias de alturas diferentes, para cada caudal asociado se tomaron 3 medidas, finalmente se toma el promedio de esas 3 medidas para cada caudal como resume la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Calibración placa orificio y errores asociados al caudal y diferencia de presiones.

Q_{prom} [l/s]	ΔP [cm]	σ_Q [l/s]	$\sigma_{\Delta P}$ [cm]
15.4	7.97	0.2	0.06
14.8	7.13	0.1	0.06
13.02	6.0	0.05	0.2
12.4	5.03	0.3	0.06
11.00	4.2	0.02	0.1
9.38	3.0	0.06	0.2
7.4	1.90	0.2	0.01
5.31	1.10	0.03	0.01

La Figura 3.8 muestra la calibración de la placa orificio de los datos de la Tabla 3.3, para el cual se eligió un arreglo potencial que entrega un error asociado de R^2 de aproximadamente 0.998, por lo que su calibración es satisfactoria.

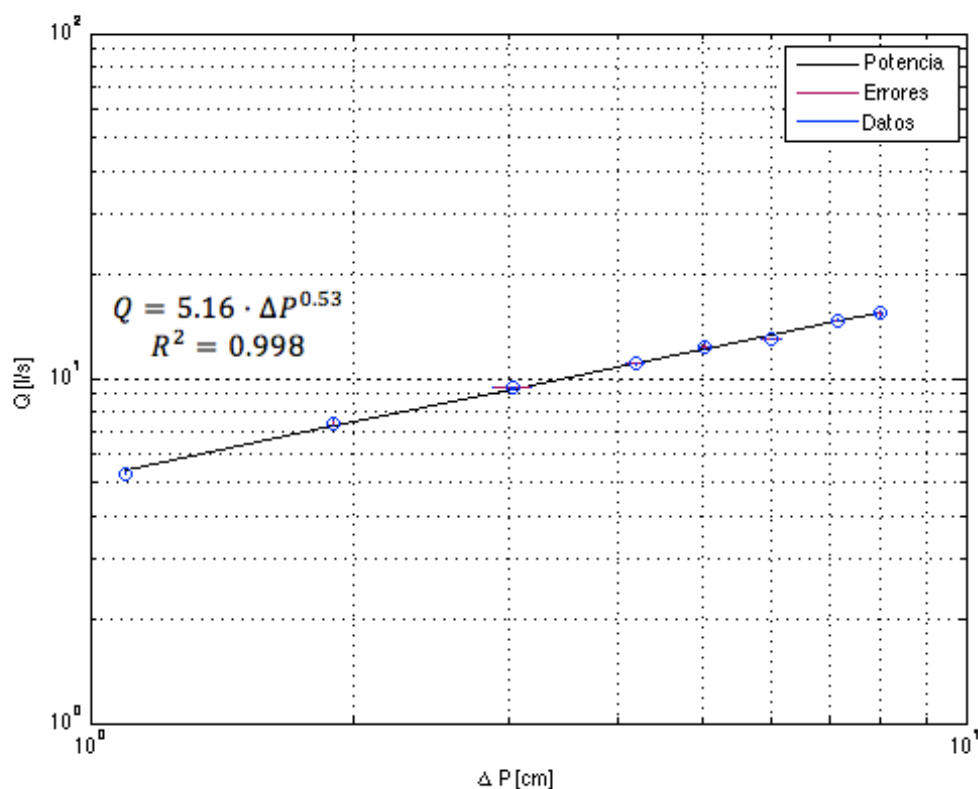


Figura 3.8: Calibración placa orificio.

El arreglo estadístico que se muestra en la Figura 3.8 obedece la siguiente ecuación:

$$Q = 5.16\Delta P^{0.53} \pm 0.02 \left[\frac{l}{s} \right] \quad (3.1)$$

3.1.1.4. Sistema alimentador de sedimentos

Para poder abastecer al canal con el relave se utiliza un sistema alimentador de sedimentos finos o tolva, el cual se muestra en la siguiente imagen como una caja la cual posee 30 cm de ancho con un largo de 40 cm y un alto de 50 cm (Figura 3.9). Esta caja está construida de acero y se encuentra revestida con pintura, en su interior hay una estructura metálica como una placa la cual posee una pendiente de 25° (Figura 3.10), esta estructura metálica se encuentra posicionada sobre un tornillo sin fin, este último corresponde a un dispositivo que transmite movimiento entre sus ejes perpendiculares, tiene forma de helicoide y a esta estructura se encuentra conectado el motor (Figura 3.11).

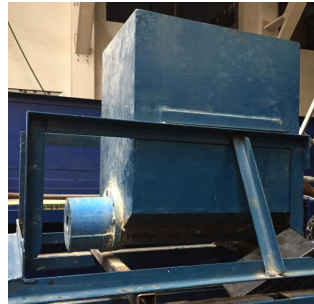


Figura 3.9: Tolva.



Figura 3.10: Placa interior de tolva.



Figura 3.11: Tornillo sin fin.

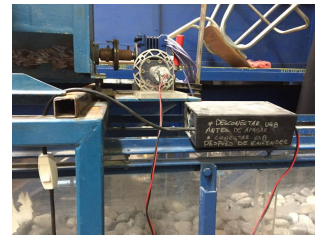


Figura 3.12: Motor.

El motor posee una velocidad máxima de 450 r.p.m. y fue armado por un Ingeniero Civil Eléctrico del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC). Este motor es alimentado por corriente alterna del sistema eléctrico del laboratorio, para poder encenderlo/apagarlo se utiliza un interruptor. Para poder controlar la frecuencia de giro del motor, éste se encuentra conectado a un computador a través de una salida USB, para poder manipularlo se hace uso de un software llamado Arduino, en este programa se inserta como input la frecuencia requerida, la que debe estar dentro del rango [70-250] Hertz, el rango de la frecuencia, está directamente relacionado con la potencia del motor (Figura 3.12).

Luego de tener todo correctamente instalado se debe calibrar la tolva, esto quiere decir, se debe conocer la cantidad de sedimento que sale hacia el canal dada una cierta frecuencia impuesta en el software. Dicha calibración se realiza en el comienzo de cada experiencia y tiene la siguiente metodología:

- Se elige la cantidad (en kilogramos) de sedimento que se quiere vertir por 1 hora en el canal.

- Se enciende el motor y se coloca una frecuencia arbitraria pero conocida en el software Arduino.
- Se coloca una bandeja en donde sale el sedimento de la tolva, se deja ahí aproximadamente 5 minutos.
- Se pesa dicho material con una balanza que admite un peso máximo de 3000 g con un margen de error de ± 0.5 g y se realiza una aproximación a través de una proporción en cuanto material habría en una hora con dicha frecuencia.
- Si la cantidad que se obtiene es la elegida inicialmente se toman 9 medidas más para tomar un promedio de esas cantidades, en el caso de no corresponder a la cantidad pensada inicialmente se debe disminuir/aumentar la frecuencia de forma iterativa hasta encontrar la cantidad buscada.

En la Tabla 3.4 se muestra la calibración de la tolva, en ella se aprecia el gasto de sólidos de entrada (G.S.E.) en kg/h y la frecuencia asociada a dicha cantidad de sedimentos en hertz.

Tabla 3.4: Calibración de la tolva.

Experiencia	G.S.E. [kg/h] Teórico	G.S.E. [kg/h] Empírico	Frecuencia [Hz]
1	12	12	160
2	6	6.0	78
3	12	12	190
4	6	6.3	68
5	6	6.3	90
6	12	10	250

Es importante mencionar que la tolva es un instrumento muy difícil de controlar en cuanto al gasto de sólidos de entrada (G.S.E.) ya que la evacuación de los sedimentos varía según a su humedad relativa, la altura de carga que tenga el depósito de sedimentos, el tamaño de las partículas de sedimento, la formación de gránulos, la presencia de pequeñas gravas y los desajustes técnicos que pueda tener el motor. Son por estas razones que se ven las variaciones presentadas en la tabla para un mismo gasto sólido de entrada teórico, ya que los factores anteriormente mencionados no pueden ser completamente controlados y tampoco se pueden mantener constantes las condiciones en todo momento.

Tabla 3.5: Desviación estándar de G.S.E. y frecuencia.

G.S.E. [kg/h]	$\sigma_{G.S.E.}$ [kg/h]	$\sigma_{frecuencia}$ [Hz]
6	0.1	11
12	2	46

Como se muestra en la Tabla 3.5, las desviaciones estándar son bastantes considerables, de esto se puede concluir que la calibración de la tolva es poco precisa, pero a pesar de serlo, sigue siendo un dispositivo que cumple la función de vertir el sedimento al canal y aunque no se conozca con total precisión en qué cantidad, se obtiene una buena e intuitiva estimación para llevar a cabo las experiencias.

3.1.1.5. Estación de tamizado

Para poder construir la curva granulométrica del relave, se procedió a tamizar las muestras a ensayar, para esto se eligieron las más homogeneizadas, es decir, las muestras más representativas. Se tamizaron las muestras con los tamices del Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez. En el laboratorio de hidráulica se cuenta con una estación de tamizado (Figura 3.13), es aquí en donde se tamiza el sedimento disponiendo los tamices en forma vertical, al estar correctamente instalados, se puede encender el motor el que le entrega vibración a dichos tamices un par de minutos y de esta forma se logra tamizar de manera mecánica la muestra.



Figura 3.13: Estación de tamizado.

Luego de realizado lo anterior se procede a pesar el sedimento retenido en cada tamiz con una balanza electrónica, finalmente se pesa lo que no fue retenido por la malla #200, residuo que corresponde a la fracción fina de ese tipo de suelo. Para conocer la granulometría fina se debe realizar una granulometría láser en un granulómetro láser. La granulometría láser se llevó a cabo en las instalaciones del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, en particular en el Área de Sedimentología, el equipo que la realiza se llama Mastersizer 2000 marca Malvern (Figura 3.14) y determina el tamaño de las partículas gracias a la difracción láser.



Figura 3.14: Mastersizer 2000 marca Malvern.

Este equipo es muy utilizado en investigación gracias a su elevada precisión, posee un rango de medición de $0.02 \mu\text{m}$ a $2000 \mu\text{m}$, requiere de una pequeña cantidad de sedimento (aproximadamente 10 g) para ser estudiada. Para que el procedimiento de medición se realice correctamente, se cuenta con un sistema de agitación mecánica el cual evita la formación de grumos para que las partículas sean correctamente chequeadas a través del haz del láser. Otra de las funciones que posee este equipo es entregar datos de diámetros característicos (D_{10} , D_{50} y D_{90}).

En la Figura 3.15 se observa el reporte que entrega el equipo Mastersizer 2000 para la muestra 1 de relave.

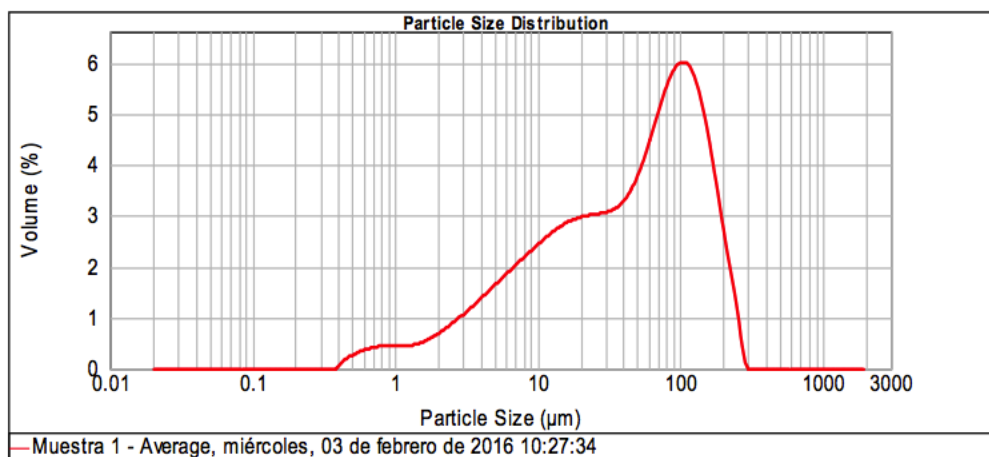


Figura 3.15: Reporte entregado por Mastersizer 2000 para la Muestra 1 de relave.

3.1.2. Sedimento empleado y caracterización

3.1.2.1. Relaves mineros

Las muestras de relave a ensayar pertenecen a un tranque minero de la minería del cobre y molibdeno. Del tranque se extrajeron 15 muestras de diferentes calicatas de entre 30 y 60 kg, las cuales se guardaron en sacos para poder ser transportadas al Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez. Luego de ser recepcionadas se procedió a secar las muestras en un horno industrial a una temperatura de 200°C durante 48 horas. De las 15 muestras sólo se pudo experimentar con 9 ya que las otras 6 presentaron dificultades al momento de secado, las partículas de relave se cristalizaron formando grandes masas o "piedras", además el contenido de estas 6 muestras tenía un gran porcentaje de gravas, lo que hace imposible

poder ensayarlas.

Para conocer algunas propiedades intrínsecas del suelo se realizaron ensayos geotécnicos de acuerdo al procedimiento planteado por Dimitrova y Yanful (2012). Se realizaron ensayos de granulometría gruesa y fina; para esta última se utilizó la metodología láser mientras que para la gruesa la metodología tradicional, a través de tamizado.

3.1.2.2. Elección de relaves para experimentación

Como se mencionó anteriormente, de las 15 muestras obtenidas de las calicatas del tranque, sólo 9 de ellas se pueden ensayar. Luego del secado de las partículas se realiza la granulometría láser, de la cual se puede conocer la granulometría del sedimento que alcanza un tamaño mínimo de 0.00017825 mm ($178.25 \mu\text{m}$) para algunas muestras.

En esta sección se quiere conocer la parte fina de las muestras dado serán utilizadas para crear muestras artificiales por lo que se deja afuera el análisis granulométrico grueso ya que no tiene mayor relevancia para su creación.

En la Figura 3.16 se muestran todas las curvas granulométricas finas obtenidas de la granulometría láser.

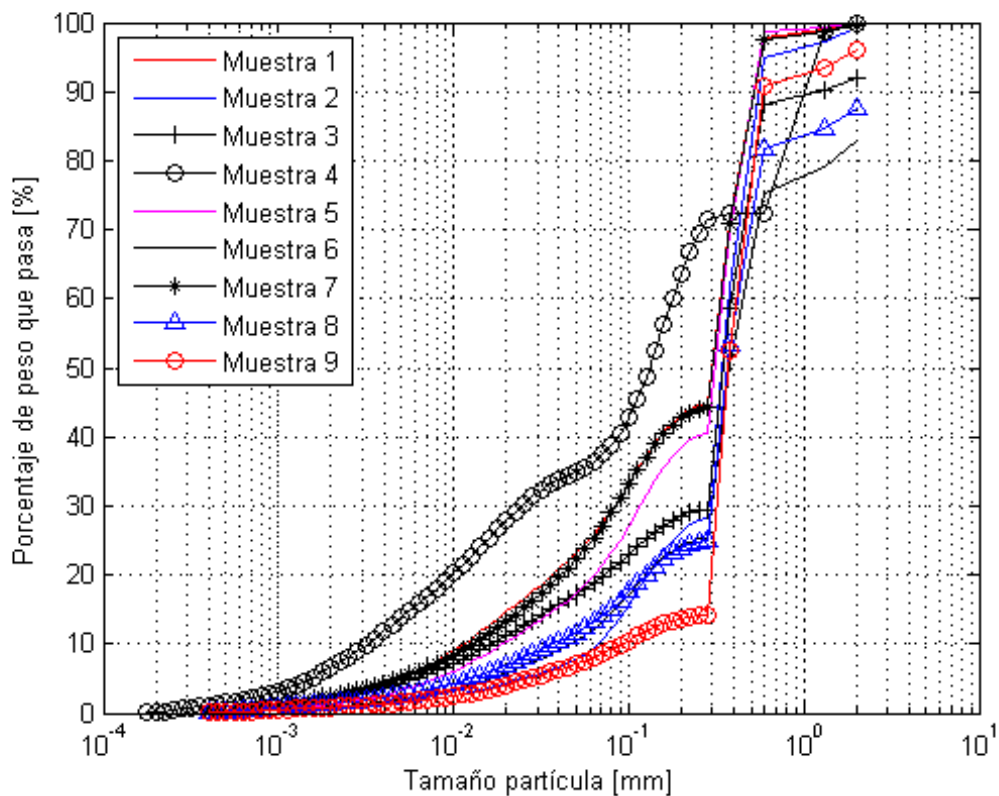


Figura 3.16: Granulometría fina de las 9 muestras, Mastersizer 2000.

Los datos obtenidos para crear estas curvas fueron entregadas por el equipo Mastersizer 2000.

Del análisis de los datos de cada muestra (Anexo A) se obtienen los diámetros característicos, coeficiente de forma (S) y desviación estándar geométrica (σ_g), lo que se resume en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Diámetros característicos y estadísticos relevantes para las 9 muestras.

Muestra	D_{10} [mm]	D_{16} [mm]	D_{50} [mm]	D_{84} [mm]	D_{90} [mm]	S [-]	σ_g [-]
1	0.01137	0.02345	0.30099	0.48225	0.53294	7	4.5
2	0.06691	0.10175	0.34309	0.52603	0.56638	3	2.3
3	0.01655	0.04201	0.34747	0.56780	1.24701	9	3.7
4	0.00320	0.00640	0.13140	0.90730	1.06760	18	11.9
5	0.01933	0.04368	0.31244	0.48526	0.53172	5	3.3
6	0.04677	0.09079	0.37384	2.02326	2.14954	7	4.7
7	0.01299	0.02724	0.30263	0.48485	0.53559	6	4.21
8	0.03802	0.08643	0.36411	1.13012	2.06957	7	3.6
9	0.09233	0.28694	0.36911	0.56054	0.59581	3	3.61

Las cifras significativas indicadas están relacionadas con el mínimo valor que es capaz de medir mediante granulometría láser, correspondiente a 0.00002 mm . Por otra parte, el coeficiente de forma y las desviación estándar geométrica se expresan como valores enteros y con un decimal, respectivamente, pues proveen información acerca de qué tan uniforme o no es la granulometría de las muestras analizadas, lo que se define mediante rangos enteros para el coeficiente de forma y con un decimal para la desviación estándar geométrica. (Lambe y Whitman, 1972).

3.1.2.3. Fabricación de relaves mineros artificiales

Para la fabricación de los relaves mineros artificiales se analizó la granulometría de las 9 muestras estudiadas en la sección anterior, se armaron 3 grupos tal como lo muestra la Tabla 3.7, el criterio utilizado fue elegir las 3 muestras con mayor porcentaje de finos, 3 con la menor porcentaje de finos y las 3 restante como un término intermedio para formar cada grupo. Estas 3 muestras se mezclaron de forma manual, tratando de lograr la uniformidad de la nueva muestra, para luego ser depositado en un barril aceitunero, cada muestra de relave artificial fabricado tiene un peso aproximado de 70 kg.

Tabla 3.7: Producción de relaves mineros artificiales.

G1	Pasa malla 200 [%]	G2	Pasa malla 200 [%]	G3	Pasa malla 200 [%]
M1	41	M2	24	M6	23
M4	36	M3	27	M8	22
M7	37	M5	36	M9	13

Luego de fabricar estas muestras artificiales se realizan los siguientes ensayos para caracterizar los relaves mineros artificiales:

1. Granulometría Láser:

La Figura 3.17 muestra la granulometría fina (láser) de los 3 grupos fabricados.

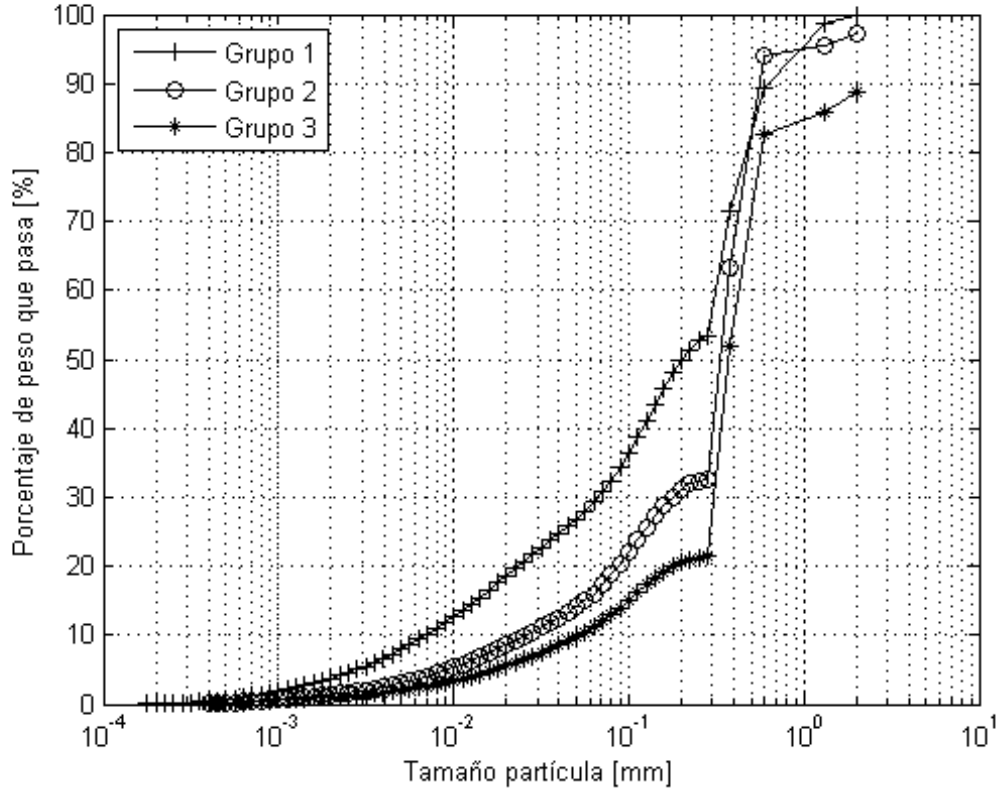


Figura 3.17: Granulometría fina de los 3 grupos, Mastersizer 2000.

Se observa lo esperable, que es que la curva del grupo 1 esté más a la izquierda con respecto a las otras 2 y que la del grupo 3 se encuentre más a la derecha.

Al igual que en la sección anterior los datos fueron obtenidos con el equipo Mastersizer 2000.

La tabla 3.8 muestra los diámetros característicos, el coeficiente de forma y la desviación estándar geométrica para cada grupo artificial de relave fabricado.

Tabla 3.8: Diámetros característicos y estadísticos relevantes, granulometría láser.

Muestra	D_{10} [mm]	D_{16} [mm]	D_{50} [mm]	D_{84} [mm]	D_{90} [mm]	S [-]	σ_g [-]
Grupo 1	0.00698	0.01506	0.20193	0.53228	0.64837	10	5.9
Grupo 2	0.02579	0.06281	0.33475	0.52654	0.57056	5	2.9
Grupo 3	0.05271	0.11042	0.36885	0.90999	0.65434	4	2.9

2. Granulometría con tamices:

Además del análisis granulométrico láser, también se realizó el análisis granulométrico tradicional con el cual se recorre desde el tamiz más grueso (diámetro de abertura 64 mm) hasta el tamiz que separa a los suelos finos de los gruesos (Malla # 200, abertura de 0.074 mm).

Como se mencionó anteriormente la granulometría gruesa fue llevada a cabo en el Laboratorio de Hidráulica Francisco J. Domínguez, en donde se tamizó con 14 tamices una muestra representativa de cada grupo.

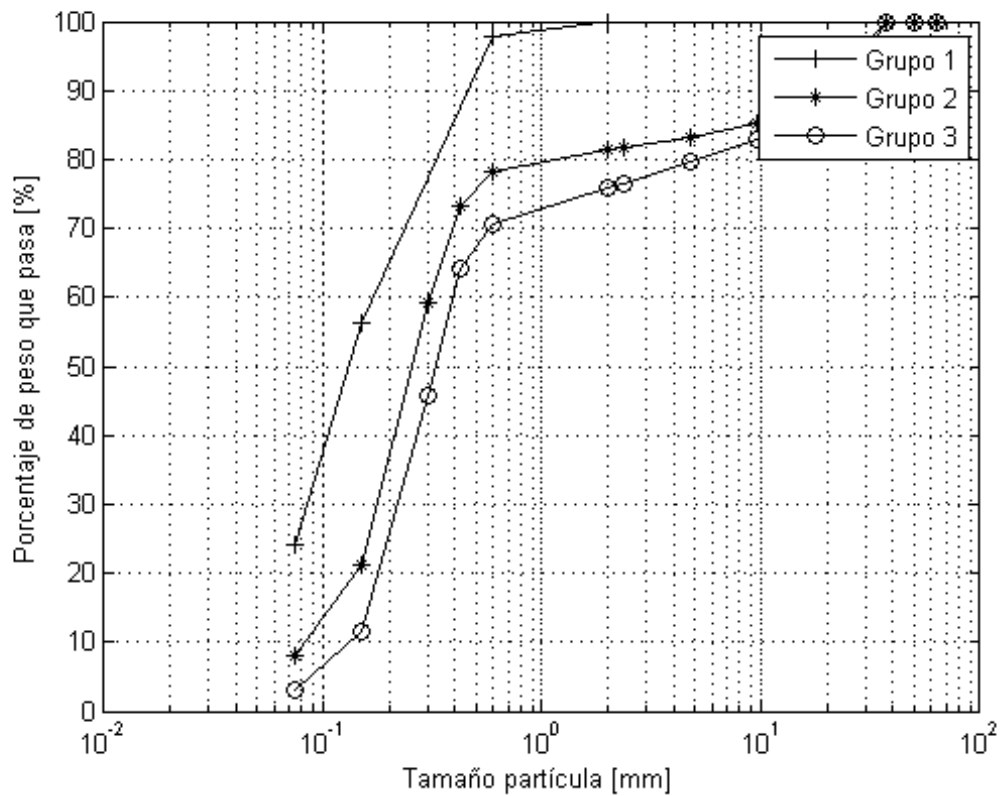


Figura 3.18: Granulometría gruesa grupo 1, 2 y 3.

Análogo al caso fino, se obtienen los diámetros característicos de los grupos de relave artificiales, el coeficiente de forma y la desviación estándar geométrica, lo que se muestra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Diámetros característicos y estadísticos relevantes para G1, G2 y G3.

Muestra	D_{10} [mm]	D_{16} [mm]	D_{50} [mm]	D_{84} [mm]	D_{90} [mm]	S [-]	σ_g [-]
Grupo 1	0.026	0.063	0.14	0.45	0.52	4	2.7
Grupo 2	0.086	0.12	0.27	6.8	23.0	16	7.5
Grupo 3	0.14	0.17	0.33	10.5	17.6	11	7.9

3. Ensayo de densidad máxima y mínima, Método Japonés:

Para medir la densidad máxima se utiliza el Método Japonés, el que consiste en aplicar vibraciones manuales a la muestra; se vierte una capa de sedimento en un molde y a éste se le aplica cien golpes con un fierro, después se vierte otra capa y se procede de la misma forma, al final se debe realizar un total de 10 capas hasta llenar el recipiente, luego de esto se pesa, este proceso se realiza 3 veces. El molde posee dimensiones conocidas por lo que después solo resta dividir el peso obtenido por el volumen de las tres medidas que luego se promediarán con los errores obtenidos por propagación de errores respectivos.

Para la densidad mínima, se procede igual que el experimento anterior, con la diferencia que para llenar el contenedor, se vierte el suelo con un cono de papel, aplicándole manualmente movimientos en forma de espiral, con la idea que minimice la segregación entre partículas. No se aplican golpes y no hay necesidad de formar las 10 capas ya que se irá vertiendo lentamente el material hasta llenar el molde de dimensiones conocidas y distintas a las de la instrumentación para hallar la densidad máxima. Finalmente se pesa. Este proceso se realiza 3 veces y el procesamiento de datos es análogo al caso de densidad máxima.

La Figura 3.19 muestra la instrumentación utilizada para ambas experiencias.



Figura 3.19: Cilindros e instrumentación método japonés (Izq.) y densidad mínima (der.).

En la Tabla 3.10 se muestra un resumen de las densidades obtenidas por el proceso descrito anteriormente, la densidad elegida para calcular la velocidad de sedimentación será el promedio de la densidad máxima y mínima.

Tabla 3.10: Densidad máxima, mínima y media Grupo 1, 2 y 3.

Grupo	ρ_{max}	$\sigma_{\rho max}$	ρ_{min}	$\sigma_{\rho min}$	ρ_{medio}	$\sigma_{\rho medio}$
1	1748	19	1238	15	1493	12
2	1918	24	1301	17	1609	15
3	1791	32	1327	11	1559	17

4. Ensayo de medición de pH:

Dado que se está trabajando con relaves mineros, sedimentos que provienen de los procesos para extraer mineral de la minería del cobre y molibdeno, se supone la presencia de metales pesados en forma de iones libres, estos modifican el pH natural del agua.

Para caracterizar el pH de los grupos artificiales de relave creados se sigue el siguiente procedimiento llevado a cabo en el Laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo:

- Se toma una muestra de 100 g del relave minero seco y se vierte en una matraz con 1 l de agua.
- Se coloca el matraz con la mezcla sobre una mesa imantada. Dentro del matraz se coloca un imán que mantiene la mezcla revuelta. Se mantiene mezclándose durante 10 min, luego de esto se deja sedimentando durante 15 min.
- Se mide el pH durante los 30 min que dura el procedimiento con un pH-ímetro electrónico HQ40d marca HACH, para esto se inserta la punta del pH-ímetro en la mitad de la matraz y se registra la medición que indica el instrumento junto con la temperatura indicada por éste. La medición se realiza cada 1 min.

La Figura 3.20 muestra la instrumentación y la secuencia de procedimiento realizados para medir el pH de una muestra de relave minero artificial.

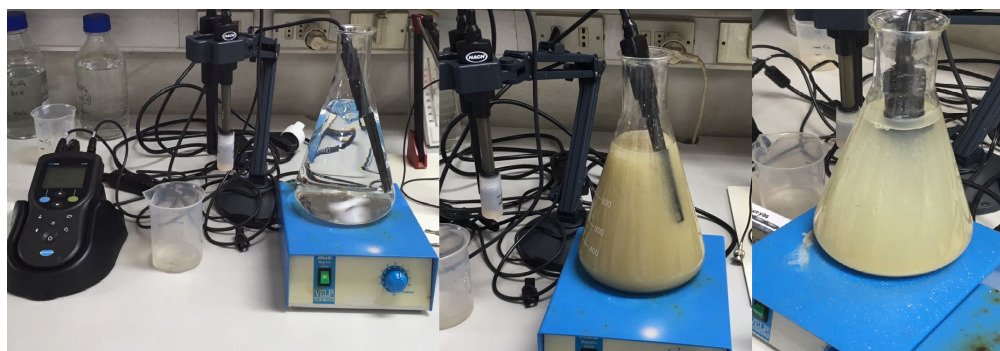


Figura 3.20: Instrumentación para medición de pH (Izq.), medición primeros 15 min (Central) y últimos 15 min (Der.).

La Figura 3.21 muestra la medición del pH en el tiempo de las muestras de relave del grupo 1, 2 y 3 siguiendo el método descrito.

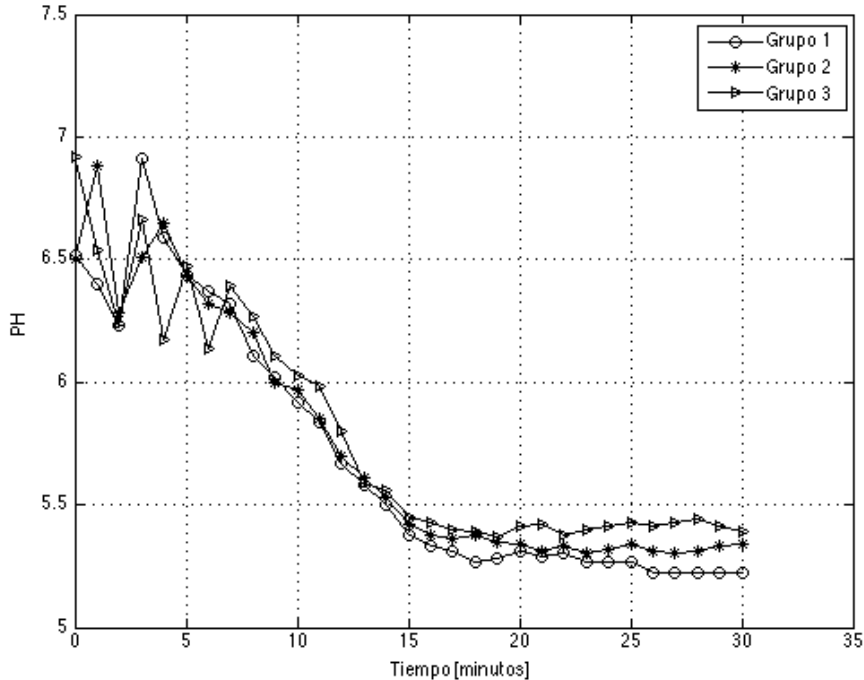


Figura 3.21: Evolución temporal de pH de muestras de relaves artificiales grupo 1, 2 y 3.

Se observa que los 3 grupos de relaves mineros artificiales tienen un pH ácido. La Tabla 3.11 muestra pH final de las muestras ensayadas de cada grupo. El detalle de las mediciones de pH en el tiempo junto con las temperaturas medidas se muestra en el Anexo.

Tabla 3.11: pH medido de grupo 1, 2 y 3.

Grupo	pH
1	5.22
2	5.34
3	5.39

3.2. Instrumentación

3.2.1. Software Arduino para alimentación de sedimentos

Arduino es una herramienta tecnológica que permite controlar una acción física a través de un ordenador, está compuesto por una placa con un sencillo microcontrolador, la cual posee diversas entradas y salidas tanto analógicas como digitales y un entorno de desarrollo para crear software para la placa el cual posee un lenguaje propio de programación para poder darle órdenes. Es un open-hardware, lo que quiere decir que tanto su diseño como su distribución es libre, sirve para cualquier tipo de proyecto y el software de desarrollo se puede adquirir gratis en su página web ya que no requiere licencia.

Se pueden realizar diversos proyectos con esta herramienta, tales como controlar un sistema de riego, controlar un motor o un sistema de iluminación, independiente de la aplicación que se le de, su uso representa una alternativa de muy bajo costo para cualquier proyecto. Los proyectos con Arduino pueden ser tanto autónomos como controlados por un software, en el caso de este experimento, se ocupará la segunda modalidad mencionada.

La implementación de esta plataforma la realizó un Ingeniero Civil Eléctrico del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC), quien realizó tanto las instalaciones físicas como la interfaz en el software para que cualquier usuario pueda controlarlo. La placa controladora está conectada al computador a través de un cable USB, esta conexión es la que le da la orden a la placa y esta se la comunica al motor a través de las conexiones soldadas internas. Para poder alimentar el sistema con energía, éste además se debe conectar a la corriente, para esto se debe realizar una instalación eléctrica, la cual es independiente a la plataforma Arduino.

La operación de Arduino es muy simple, se abre el software en el computador y accede a la interfaz creada, la cual pide como input la frecuencia en unidades Hz, se debe colocar un número dentro del rango [70-250]. Lo anterior se debe realizar mientras se encuentre alimentado por la corriente alterna, ya que de otra manera no funcionaría el motor, en la Figura 3.12 se ve la conexión del motor con la caja que contiene al Arduino, se conecta a través de dos cables, uno es el polo positivo y el otro el negativo.

3.2.2. Pieza oscura para registro de datos

La pieza oscura es una estructura que sirve para poder controlar la iluminación en un trayecto específico del canal, en particular en la sección que se tiene mayor interés de estudio, esta zona es la central del canal, ya que es ahí en donde se presentan la mayor cantidad de fenómenos de interés. Posee un esqueleto de PVC y tiene forma de prisma rectangular posee 2.2 m de alto, 10 m de largo y 3 m de ancho por lo que abarca aproximadamente 2/3 del largo total del canal, la estructura está revestida con una lona negra impermeable, la cual cubre la totalidad del volumen.

Su principal finalidad es para poder operar una cámara de alta velocidad, la cual es capaz de registrar la distribución de velocidades del flujo en un plano vertical, esto sólo es posible en condiciones de oscuridad ya que es un requerimiento del lente, el cual debe captar un láser que se dispone dentro del canal.

3.2.3. Sistema de cámaras

Para registrar los fenómenos ocurrentes en el lecho durante la experimentación se utilizaron dos cámaras GoPro, una de ellas corresponde a una GoPro HERO3 White y la otra a una GoPro HERO4 Silver. La finalidad de estas cámaras es tomar fotografías cada 30 s mientras se está virviendo relave. Estas se encuentran coordinadas entre sí a través de un control remoto que las comunica vía bluetooth.

Las cámaras se encuentran dispuestas a 1.5 m distancia entre sí y a 0.55 m del canal (Figura 3.22).

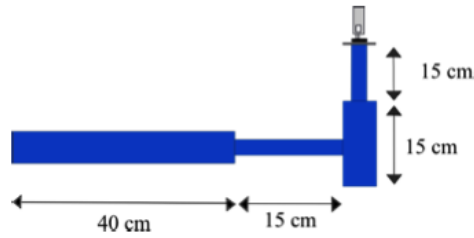


Figura 3.22: Disposición de las cámaras, (Licanqueo, 2016).

3.2.4. Velocimetría por métodos ópticos

3.2.4.1. Particle Image Velocimetry

Como se mencionó en la sección 3.2.2., uno de los objetivos de este experimento es poder registrar la distribución de velocidades del flujo en un plano vertical, para esto se utilizan técnicas ópticas tales como la velocimetría de partículas por imágenes (PIV). Para poder aplicar este método se debe utilizar un cámara de alta velocidad, la cual se describirá en las secciones siguientes. La necesidad de que sea una cámara de alta velocidad es para poder realizar mediciones instantáneas del fluido con una cantidad de 1000 cuadros o fotos por segundo (fps) para la experimentación.

La metodología del PIV consiste en analizar las fotografías obtenidas por la cámara, en ellas se puede estudiar la velocidad y la dirección del flujo, lo que capta la cámara realmente es la posición de una partícula en un determinado momento y trayecto del canal, por lo que con la cámara de alta velocidad se pueden conocer todas las posiciones de dichas partículas en la columna de agua. Las partículas ocupadas deben tener propiedades fluorescentes ya que serán iluminadas con un láser para que sean visibles, para esto se ocupará partículas de rodamina que es un compuesto muy tóxico que usa habitualmente como medio amplificador de láseres. Es importante mencionar que para poder trabajar tal cantidad de fotografías es necesario el uso de una memoria externa ya que la cámara de alta velocidad puede hacer 2000 capturas por segundo lo cual es mucha información para un computador. Para este trabajo experimental se realizaron 7 PIV de los cuales sólo 1 de ellos se pudo procesar. El primero se realizó en condiciones iniciales, es decir cuando aún no se había vertido sedimentos de relave en el agua, el resto se realizaron después de cada experimentación con los sedimentos, por lo que las condiciones de turbiedad del agua no eran las óptimas para tener medidas coherentes ya que se encontraba mucho sedimento en suspensión.

3.2.4.2. Cámara de alta velocidad

Para el registro del campo de velocidades del flujo se ocupó una cámara de alta velocidad modelo FASTCAM Mini UX50 marca Photron (Figura 3.23), posee las siguientes características:

- UX50: 2.000 fotos por segundo a un millón de píxeles, 160.000 fotos por segundo máximo.



Figura 3.23: Cámara de alta velocidad FASTCAM Mini UX50/100.

Su portabilidad y rendimiento de grabación la convierten en una herramienta muy útil para múltiples propósitos como la investigación como lo es en este caso. Posee conectores de señal de entrada y salida además de conexión Gigabit Ethernet, lo que permite el transporte de datos a una alta velocidad y el control del sistema desde un computador. Es compatible con una gran variedad de lentes, en este caso se emplea un lente de 60 mm, este es un accesorio aparte de la cámara.

El lente de la cámara de alta velocidad disminuye las aberraciones por curvatura, permitiendo obtener velocidades más exactas, con menor error asociado.

3.2.4.3. Lente de alta precisión

Un accesorio muy importante que debe tener una cámara es su lente, en este caso se eligió el modelo AF-S Micro-Nikkor 60 mm f/2.8G ED, el cual presenta una buena alternativa para este experimento. A continuación se mencionan sus principales características:

- El Motor de Onda Silenciosa SWM (Silent Wave Motor) de Nikon permite un enfoque automático de alta velocidad, preciso y silencioso.
- El vidrio de Dispersión Extra baja ED (Extra-low Dispersion) ofrece nitidez y corrección de color superior al reducir eficazmente la aberración cromática.
- La Capa de Nano Cristal de Nikon elimina los reflejos internos en diversas longitudes de onda y da una integridad de imagen aún mayor.
- Optimizado para ofrecer nitidez de borde a borde para sensores de imagen de formato DX y FX (23.9 x 36 mm) de Nikon.



Figura 3.24: Lente de alta precisión.

3.2.4.4. Láser

Para poder visualizar las partículas fluorescentes es necesario iluminarlas con un láser, para esto se ocupó un equipo de la línea Flex modelo *BWI – 532 – 100 – E_66969* marca BW TEC inn como se muestra en la Figura 3.25, este equipo está conformado por dos partes, una de ellas corresponde a la fuente de poder y la otra parte es el dispositivo que provee el haz de luz. Las principales características de este equipo son las siguientes:

- Longitudes de onda de 405 nm a 1064 nm.
- Se acerca a la calidad de transmisión limitada de difracción.
- Bajo ruido y excelente estabilidad de potencia.
- Interfaz gráfica de usuario amigable.
- Acoplamiento de fibra monomodo o cabezal externo láser para una fácil alineación



Figura 3.25: Láser.

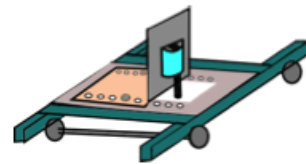


Figura 3.26: Esquema de carro que porta el láser (Licanqueo, 2016).

El láser se posiciona aproximadamente en la mitad del canal, por lo que se mencionó en una sección anterior, la mayoría de los fenómenos se espera que ocurran aproximadamente a la mitad del canal. El láser va dispuesto sobre el canal arriba de un carro como se muestra en la Figura 3.26.

3.2.4.5. Partículas trazadoras de rodamina

Para obtener las partículas de rodamina, las cuales servirán como trazadoras del campo de velocidades de un flujo hay que producirlas, su producción consta de un proceso mecánico y otro químico. Su fabricación se basará en la fórmula que postuló Pedochi et al (2008) y consiste en lo siguiente:

- Se mezcla 1 kg de resina con 1 g de rodamina B disuelta al 20 %, esto se revuelve hasta que la mezcla adquiera un color rojo oscuro homogéneo.
- A la mezcla obtenida se le agrega 40 gotas de acelerante octato de cobalto al 6 %, esto se revuelve hasta que quede bien mezclado.

- A lo anterior se agregan 400 gotas de catalizador con el cuidado de que la mezcla del punto anterior haya quedado bien homogénea ya que la reacción directa del octato de cobalto con el catalizador puede resultar riesgosa.
- La mezcla obtenida se vierte en 5 cilindros de PVC de 40 mm de diámetro y 20 cm de largo.
- Se deja reposar la mezcla de manera que comience a solidificar, este proceso puede tardar desde minutos hasta un día según como sea la temperatura del ambiente. Si se quiere acelerar este proceso se debe aplicar calor a la mezcla.
- Una vez se solidifica la mezcla se procede a desmoldarlos para luego producir las partículas con el torno (Figura 3.27)
- Para generar las partículas se instala el tubo de rodamina en el torno del laboratorio, acercándole la lima se ejerce una fuerza resistente de manera mantener la lima en una misma posición (Figura 3.29).
- Finalmente se recolecta el material fabricado y se guarda en bolsas plásticas y correctamente cerrada, debido a la toxicidad de este producto (Figura 3.28).



Figura 3.27: Tubos de rodamina.



Figura 3.28: Partículas de rodamina.

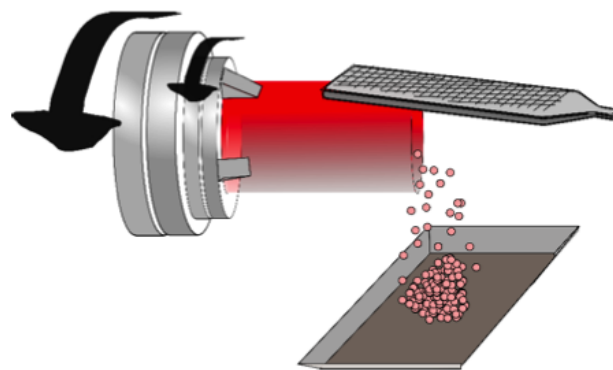


Figura 3.29: Metodología para fabricar rodamina (Fuentes 2017).

Este proceso se repite 6 veces para obtener la cantidad necesaria para el experimento completo. Cuando ya se produce la cantidad total de rodamina, esta se tamiza para conocer su granulometría para poder así almacenarla según el tamaño de las partículas. Una curva granulométrica se muestra en la Figura 3.30.

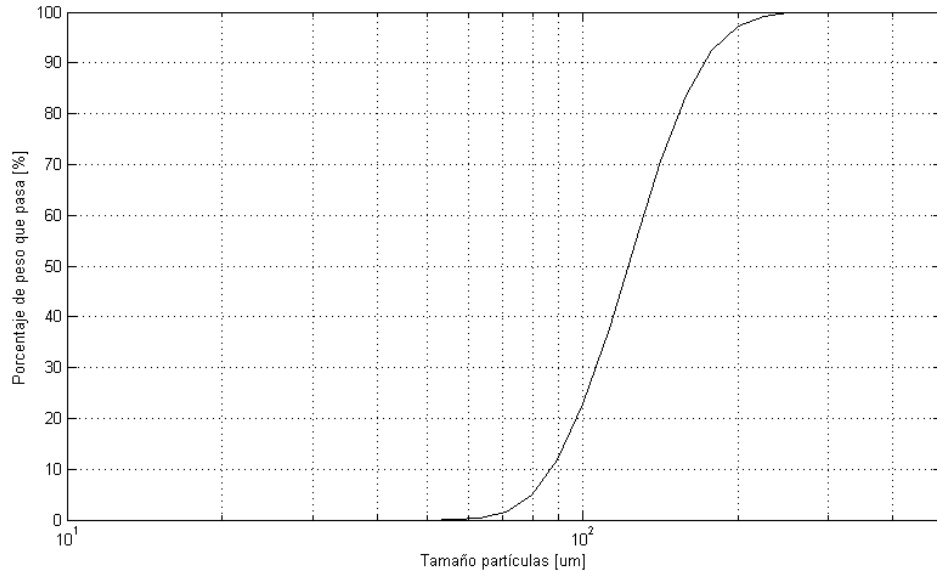


Figura 3.30: Curva granulométrica muestra rodamina.

3.2.4.6. Procesamiento de datos

Con la cámara de alta velocidad se toman mediciones de 4 s, las mediciones se toman de forma sincronizada con el vertimiento de la rodamina. Se deben hacer el total de experiencias que represente un total 90 s, es decir aproximadamente 23 experiencias, con esta cantidad se obtienen aproximadamente un total de de 90.000 fotografías para ser analizadas, ya que se registran imágenes a 1000 fps.

Luego de obtenido el total de las imágenes, estas son cargadas a la aplicación Pivlab de MATLAB, la que procesa las imágenes y entrega el archivo con los vectores de velocidad en el plano estudiado para cada fotografía. Cada una de las imágenes es pre-procesada con la idea de mejorar la precisión de los resultados, para esto se debe seleccionar el área de la imagen que se utilizará para efectuar los cálculos, lo que permite restringir la zona de cálculo de vectores de velocidad, ahorrando tiempo de procesamiento. La zona media es la zona más óptima para seleccionar el área de análisis ya que es la que recibe mayor intensidad de luz homogénea no así los extremos que tienden a verse muchas menos partículas debido a que no recibe la suficiente luz. Luego se crea una máscara en la zona del lecho de grava para que su presencia no interfiera con la sección escogida, reduciendo más el tiempo de procesamiento y descartando obtener vectores de velocidad en la zona del lecho, donde no se observa la presencia de partículas trazadoras de rodamina. Un ejemplo de lo descrito anteriormente se muestra en la Figura 3.31.

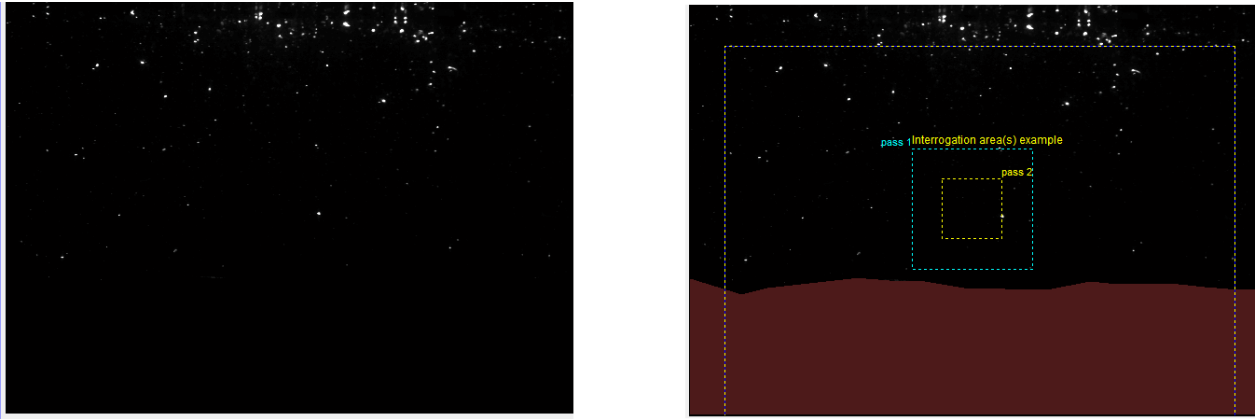


Figura 3.31: Imagen original (izquierda) y pre-procesada (derecha) en Software de Matlab Pivlab.

Para evaluar las imágenes se utiliza un algoritmo que corresponde al FFT con ventanas de deformación. Luego las imágenes son sometidas a validación e interpolación esto quiere decir que se analizan los vectores obtenidos, los que sean mucho más grandes que el promedio son eliminados manualmente. Este es un proceso muy minucioso ya que se debe revisar toda la secuencia de fotografías y analizar caso a caso. Un ejemplo de los resultados de los vectores que arroja PivLab luego de los pasos mencionados se muestra en la Figura 3.32. Se observa que se guardarán 9 vectores de velocidad en la vertical y 14 en la horizontal para cada fotografía. Lo anterior resulta relevante para caracterizar el perfil de velocidades, dado que se dispondrá de 9 puntos para éste en la vertical para una zona estudiada.

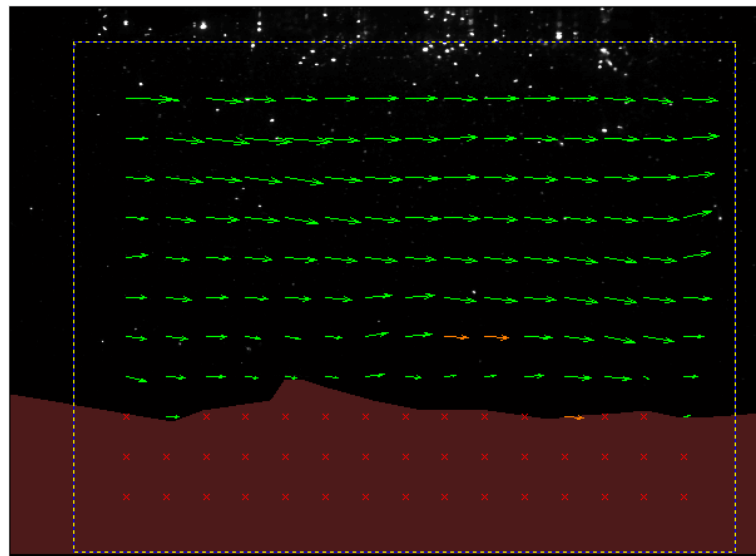


Figura 3.32: Vectores de velocidad mediante FFT en región de interés.

Finalmente los resultados son exportados a MATLAB y se procesan para obtener los perfiles de velocidad y de esfuerzo de corte.

3.2.5. Sistema de extracción de muestras de gasto sólido

3.2.5.1. Extracción de muestras de gastos sólido de fondo

El canal posee una estructura llamada trampa de sedimentos (Figura 3.1), en este lugar quedan atrapados los sedimentos que se han desplazado a lo largo del lecho y que llegan a ese lugar. Para efectos de este experimento, se revisó la trampa de sedimentos para cada experiencia y se observó en todos los experimentos que estaba vacío, es decir el sedimento del fondo del lecho se quedó depositado y no se desplazó a lo largo del canal a pesar de existir un flujo sobre él.

3.2.5.2. Extracción de muestras de gastos sólido en suspensión

Para medir la concentración de sólidos suspendidos en distintos niveles del canal se usa la estructura mostrada en la Figura 3.33, la cual consiste en un sistema de tuberías que posee dos aberturas de interés, una de ellas corresponde a la que recibe directamente los sedimentos en suspensión (Figura 3.34) y la otra se encuentra conectada a una manguera. Este sistema se posiciona en la mitad del canal de forma arbitraria. El procedimiento consiste en tomar 2 medidas de gasto de sólidos en suspensión por cada altura. Son 5 alturas, la primera se toma a ras del lecho de grava y las siguientes se toman cambiándole la altura de la tubería receptora dentro del canal, se va subiendo de 1,7 cm en cada medición hasta llegar a la superficie libre.

El fluido obtenido de cada altura es guardado en un frasco de vidrio, el cual es rotulado con la altura, el tiempo que demoró en llenar el frasco, para luego ser ensayado en el Laboratorio de Calidad de Agua Gabriela Castillo de la Universidad de Chile. Estas 10 muestras se toman para las 6 experiencias realizadas con sedimento.

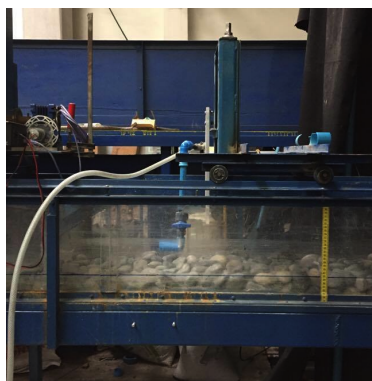


Figura 3.33: Carro que extrae gastos sólido en suspensión.



Figura 3.34: Tubería receptora de partículas.

3.3. Metodología experimental

3.3.1. Preparación de la experiencia

Antes de iniciar las experimentaciones, se debe proporcionar las condiciones ideales para que la experiencia sea exitosa, para esto se realizan los siguientes pasos para preparar la

experiencia:

1. **Preparación del montaje experimental:** En cuanto a las estructuras importantes, luego de tener la estructura completa se elige la pendiente del canal, la que debe ser calibrada ajustando los soportes de los apoyos. La pendiente se va acomodando con ayuda de una huincha metálica y se miden las distancias verticales y horizontales en cada punto de apoyo.
2. **Limpieza del canal y la sentina:** Es importante hacer una limpieza a estos elementos y eliminar todos los sedimentos de experiencias anteriores, también es importante cambiar el agua de la sentina, ya que si se quiere estudiar algún efecto en particular se debe partir con el agua limpia para notar las diferencias.
3. **Construcción del lecho de grava:** Esta labor se debe realizar manualmente y las gravas se deben disponer en el canal de manera poder alcanzar una altura de 6-7 cm intentando semejar el lecho de un río, la idea es que queden dispuestas lo más homogéneamente posible.
4. **Preparación del sedimento para poder cargar la tolva:** Para esto el sedimento se debe secar en un horno industrial, luego se debe depositar en un tarro aceitunero y se deja reposar 1 día para que adquiera una humedad natural.
5. **Carga y calibración de la tolva:** La idea es poder conocer el gasto de sólido de entrada, por lo que se realiza el proceso iterativo mencionado en una sección anterior para calibrar la tolva.
6. **Instalación de las cámaras GoPro:** Para hacer los respectivos registros se instalan en la disposición descrita anteriormente. Además de instalarlas se sincronizan para que funcionen la cantidad de horas que dura la experimentación en forma simultánea, junto con ello también se debe disponer la iluminación adecuada para la correcta captación de fotografías.
7. **Fijar caudal:** Para esto se utiliza la curva de calibración de la placa orificio, en conjunto con eso se mide el caudal a la salida del canal, midiendo con cronómetro cuánto se demora en llenar un bidón de 500 l.

Luego de tener preparado todos estos puntos, se encienden las cámaras, la tolva y se comienza a medir el tiempo, todo lo anterior se realiza simultáneamente.

3.3.2. Extracción de muestras de gasto sólido en suspensión

Transcurrida 1 hora de experimentación, en las 6 experiencias se midió el gasto de sólidos en suspensión y se usó la siguiente metodología:

1. Se escogen 5 alturas de la columna de agua relativa respecto del lecho para medir el gasto de sólidos en suspensión en cada uno, estas medidas deben abarcar desde la superficie del

lecho de grava (6-7 cm sobre la base del canal) hasta la superficie libre.. Los puntos de medición se escogen cada 2 cm hasta llegar la superficie libre, esto pues la instrumentación no permite moverse con mayor precisión y registrar cada distancias menores y obtener mayor cantidad de datos de concentración.

2. Luego de escoger un punto, se dispone la manguera de manera de poder llenar los recipientes de vidrio con comodidad.
3. De forma simultánea se abre la válvula para que de paso al fluido, que contiene sus correspondientes sólidos en suspensión y se coloca el cronómetro para poder conocer el tiempo que tarda en llenar el recipiente de vidrio de 1000 ml, este paso se hace dos veces para cada altura.
4. Se tapa el recipiente de vidrio y se rotula con la información relevante tal como tiempo de llenado, la altura y el número de experimento de cual se trate.

Finalmente luego de obtenido los 60 recipientes de vidrio llenos con la muestra a estudiar, se llevan al Laboratorio de Calidad de Aguas Gabriela Castillo de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, para esto se realiza una análisis de concentración de sedimentos en las muestras por medio del análisis del peso seco de las muestras tomadas. El método consiste en el filtrado de las muestras en filtros de Boro-Silicato, marca ADVANTEC (Figura 3.35) con porosidad igual a $0.5 \mu m$. La filtración de muestras se realiza utilizando un sistema de bombeo en vacío compuesto por los siguientes instrumentos (Figura 3.35):

- Bomba de vacío.
- Matraz Kitazato.
- Porta-filtro.
- Embudo de filtrado.
- Sistema de mangueras conectoras.



Figura 3.35: Filtros Boro-Silicato (Izq.) y sistema de filtrado (Central y Derecha).

Este sistema permite la separación del líquido de la solución, dejando las partículas sólidas en los filtros con una baja humedad. Posterior a la filtración, los filtros son secados a 105

$^{\circ}C$ durante 1 hora según la norma, para finalmente obtener solamente el filtro en su estado natural más la masa de partículas sólidas de la solución filtrada.

El pesaje de las muestras se realiza en un balanza analítica marca Sartorius. Esta balanza permite realizar mediciones desde 0.0001 g con un error de $\pm 0.00005\text{ g}$. Así se obtienen los pesos del agua extraída, filtro seco, filtro húmedo con sólidos y filtro seco con sólidos. Con lo anterior se puede determinar la masa de las partículas sólidas, y en consecuencia, la cantidad o concentración de sedimentos en el punto de análisis. Esta metodología se repite para cada uno de los puntos de medición.

La precisión del método es de $\pm 0.025\left[\frac{mg}{ml}\right]$, y permite determinar la concentración media de sedimentos en el volumen de control utilizado. .

3.3.3. Medición de velocidad con PIV

3.3.3.1. Metodología

1. Se debe tener fabricadas las partículas de rodamina y separadas según su granulometría.
2. Se debe tener correctamente instalada la cámara de alta velocidad asegurando que no se fugue luz de la cámara oscura para que la cámara de alta velocidad funcione correctamente.
3. Se debe encender el láser para que pueda rastrear las partículas de rodamina al momento de ser vertidas.
4. Se ajusta una base de acrílico sobre la superficie superior de la columna de agua con el objetivo de que el haz de luz del laser refleje las partículas de rodamina en un plano más uniforme. Esta base de acrílico cubre el ancho del canal, tiene una altura de 1 cm y un largo de 30 cm . Toca tangencialmente la superficie libre, modificando la parte superior de la columna de agua. Esta influencia no tiene relevancia en las velocidades obtenidas mediante la técnica PIV para caracterizar el perfil logarítmico dado que en la zona superior se desarrollan corrientes secundarias donde esta ley no es válida, por lo que no resulta un problema para los cálculos. Los resultados obtenidos no consideran esta sección dado que para el pre-procesamiento de datos se seleccionó un área que no considerara esta zona tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 3.31.
5. En un jarro se mezcla cierta cantidad de partículas de rodamina con agua para poder vertirlas con mayor facilidad, para esto se van probando combinaciones de granulometría según como se vea la imagen procesada.
6. Se enciende el motor del canal y se fija un caudal en específico.
7. Se vierten las partículas de rodamina en el inicio del ganal y de manera casi instantánea se manipula el computador para que la cámara tome las 1000 fotografías por segundo, se consideran 4 s de recorrido por lo que se debe estar muy atento cuando la rodamina llegue al láser.

Luego de realizado los 90 segundos totales que se requiere para estudiar se procesan los datos en la aplicación pivlab de MATLAB para su posterior interpretación.

Se escogen 90 segundos dado que en este tiempo se asegura que las velocidades medias a una altura específica de la columna de agua son constantes. Lo anterior se muestra en la Figura 3.36, en donde para 3 alturas relativas al lecho de la columna de agua adimensionalizadas ($y/h = 0.15, 0.26$ y 0.5) en donde se registran datos de velocidades mediante PIV se calcula el promedio temporal de las velocidades instantáneas desde 0 a 50 s. Se observa que ya para 30 s de datos, la velocidad media $\bar{u}(t)$ comienza a aparecer invariable, ya en 50 s se observa constante, por lo que se concluye que 90 s resultan suficientes para registrar mediciones de velocidad y obtener velocidades medias representativas estadísticamente.

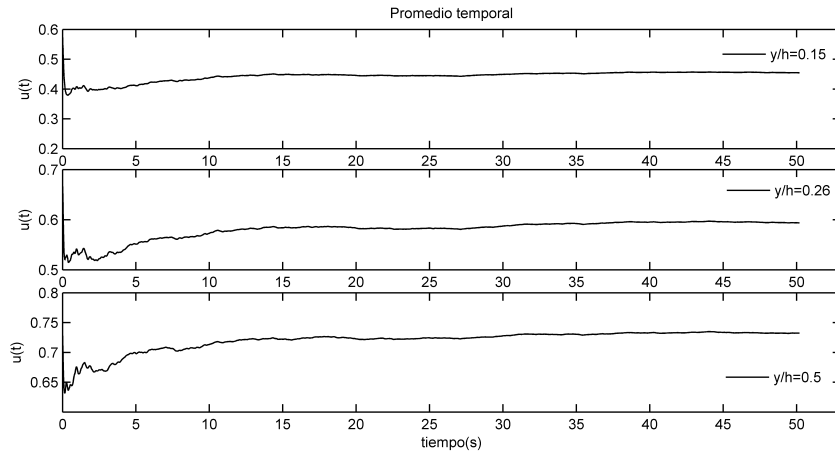


Figura 3.36: Promedio temporal de velocidades para distintos tiempos a 3 alturas de columna de agua.

3.3.4. Errores Experimentales

En la Tabla 3.12 se muestran los errores de la medición de cada parámetro medido en el estudio experimental para la propagación de errores.

Tabla 3.12: Errores experimentales.

Parámetro	Notación	Valor	Unidad	Medición
Error ancho canal	σ_a	3	mm	Directa
Error altura del flujo	σ_h	10	mm	Directa
Error PIV	σ_{PIV}	0.5	pixel	Directa
Error peso sedimento	σ_b	0.03	g	Directa

El error del ancho del canal se obtiene como la desviación estándar de las mediciones de ancho cada 30 cm a lo largo del canal, mediciones realizadas con un pie de metro; el error de la altura del flujo se obtiene como la desviación estándar de las mediciones de alturas de

la superficie libre registradas en la zona de interés mediante las Go-pro mientras la precisión de la pesa utilizada es de ± 0.05 g y se concluye que el error asociado al peso del sedimento de cada tramo es ± 0.03 g mientras el error del peso total en los 5 tramos del canal por propagación de errores es ± 0.06 g.

Capítulo 4

Resultados Experimentales y Análisis

4.1. Introducción

En este estudio experimental se realiza un total de 6 experimentos, los que se agrupan en 3 pares. Los 3 pares mantienen el mismo caudal, pero varían la granulometría del relave minero generado, teniendo entonces 3 pares con 3 granulometrías distintas y con distintos gastos sólidos entrantes.

El canal de experimentación tiene una pendiente fija de 1.2% para los 6 experimentos, esto pues a mayores pendientes se obtienen más altos valores de esfuerzo de corte.

En cada experiencia se realiza el análisis de concentración de sedimentos en suspensión mediante el muestro en 5 puntos sobre el lecho. Con los resultados obtenidos para la concentración se realiza un ajuste para la distribución de sedimentos en la vertical permitiendo obtener el flujo másico total de sedimentos en suspensión o gasto sólido en suspensión.

Se muestran los resultados obtenidos para la distribución de velocidad en la vertical mediante la técnica PIV y perfil logarítmico, así también para el esfuerzo de corte total, turbulento, espacial o de forma y viscoso. Todo lo anterior se realiza para la condición experimental antes de verter el sedimento, que es solo una, en que el caudal es constante e igual para los 6 experimentos. No fue posible procesar los datos de los experimentos luego de verter el sedimento dado que no se cumple la condición de PIV descrita en el capítulo 2 que requiere que no haya turbiedad para poder identificar las partículas trazadoras pues el sedimento en suspensión mantiene la columna de agua turbia. Se intentó solucionar el problema aumentando la densidad de rodamina como sugieren las investigaciones del marco teórico, más el procesamiento de imágenes no mostró resultados coherentes para las variables a caracterizar.

Finalmente se presenta la variación de la estratigrafía del lecho durante la experimentación para las distintas combinaciones experimentales posibles mediante el procesamiento de imágenes junto con la distribución de sedimentos de suspensión y el balance sedimentológico.

4.2. Parámetros asociados a la velocidad

Para registrar la velocidad del flujo en la columna de agua se hace uso de la técnica PIV. Se obtiene un perfil de velocidad que recorre toda la vertical hasta casi alcanzar la superficie libre ($0 < y/h < 0.83$), este perfil se realiza en el centro del canal para evitar efectos de las paredes laterales del canal. Dada las condiciones uniformes del lecho, altura de escurrimiento y del canal este perfil se cumple para toda la longitud del canal.

A continuación se muestran los distintos parámetros desprendidos de la medición de la velocidad en el plano correspondiente, donde cada punto del gráfico representa el promedio temporal de la medición.

4.2.1. Perfiles de velocidad

La Figura 4.1 muestra el perfil de velocidad media adimensionalizado u'/u_* en función de la altura adimensionalizada y/h en el plano de medición donde la velocidad de corte se obtiene del método del esfuerzo de Reynolds. A la izquierda se observa el perfil utilizando la técnica PIV y a la derecha se utiliza el perfil logarítmico descrito en el capítulo 2.

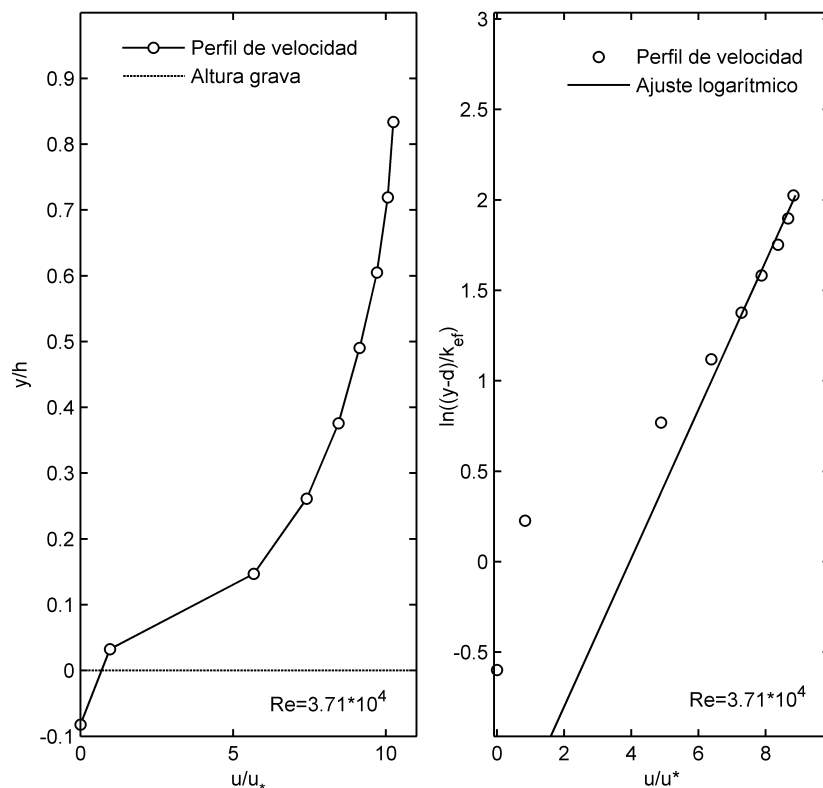


Figura 4.1: Perfil de velocidad adimensionalizado para el plano de medición con técnica PIV y perfil logarítmico.

Los parámetros para obtener el mejor ajuste para el perfil logarítmico son considerar $B = 4.4$, cercano a los valores sugeridos en el marco teórico; $k_{ef} = 0.19D = 8.8 \text{ mm}$ con $D = 45 \text{ mm}$

el diámetro del sedimento del lecho; $d = 36.2 \text{ mm}$ que sale de la relación entre $k_{ef} = D - d$. Se observa que los datos no se ajustan al perfil logarítmico para zonas cercanas al lecho, lo que se relaciona con que en esa zona se desarrollan los efectos de forma del lecho y donde deja de ser válida la Ley logarítmica de velocidades.

La Tabla 4.1 muestra el valor de la velocidad de corte u_* obtenida de la técnica PIV y del perfil logarítmico.

Tabla 4.1: Velocidad de corte por método de esfuerzos de Reynolds y logarítmico.

Re	$u_{*Reynolds}$ [cm/s]	u_{*Log} [cm/s]
$3.71 \cdot 10^4$	8.32	9.32

El cálculo de la velocidad de corte mediante la técnica PIV se obtiene del promedio espacial en la zona sobre la superficie del lecho sobre el esfuerzo de corte turbulento, lo que entrega el esfuerzo de corte, lo que se relaciona mediante la ecuación típica con la velocidad de corte.

El perfil de velocidad logarítmico presenta un correcto ajuste al perfil medido con PIV para alturas adimensionales mayores a 0.3. Sin embargo para valores menores no existe una correcta relación, esto debido a que velocidades bajas están ligadas a la zona cercana al lecho, donde se presentan los efectos de forma o espacialidad que ejerce la rugosidad sobre el fluido (subregión inducida por la forma), efecto que no está considerado en el perfil logarítmico y donde se cumplen las ecuaciones descritas por Raupach et al. (1991).

Ambos perfiles muestran que la velocidad máxima en el plano medido está situada a $y/h = 0.83$ desde el lecho.

Se concluye que la velocidad de corte se corresponde con los estudios de Licanqueo (2016) para caudales similares en condiciones similares de experimentación. Las diferencias entre las velocidades de corte mostradas mediante el PIV y mediante la Ley logarítmica radica en que u_{*Log} se calcula a partir de un modelo ajustado, donde los parámetros son tomados de la bibliografía y del mejor ajuste realizado, lo que implica errores y permiten obtener un valor distinto al valor de $u_{*Reynolds}$.

4.2.2. Intensidad de la turbulencia

La intensidad de la turbulencia, u_p y v_p , se entiende como la razón entre el valor cuadrático de la fluctuación de velocidad (Ecuación 4.1 y 4.2) sobre la velocidad de corte.

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i'^2} \quad (4.1)$$

$$v_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i'^2} \quad (4.2)$$

Para ser consistente, la velocidad de corte utilizada corresponde a la obtenida a través del esfuerzo de Reynolds. Los perfiles de las intensidades turbulentas para u_p y v_p son graficadas en conjunto con las expresiones semiteóricas de Nezu y Nakagawa (1993) para el plano de medición (Figura 4.2).

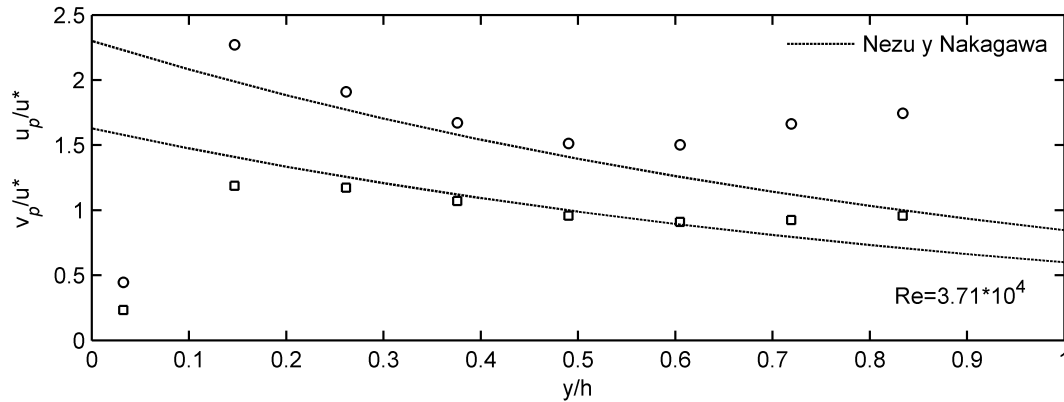


Figura 4.2: Comparación de los perfiles de la intensidad turbulenta u' y v' con las expresiones universales de Nezu y Nakagawa (1993).

Se observa una cercanía a la expresión semiteórica de Nezu y Nakagawa (1993) para valores de $0.5 \geq y/h \geq 0.15$. No obstante, para valores de y/h cercanos a 1 los datos experimentales no se ajustan correctamente. Puede ser debido a la presencia de corrientes secundarias, pero se debería verificar tomando más datos del perfil de velocidad en la zona superior.

4.3. Caracterización esfuerzo de corte mediante técnica PIV

Como se revisó en el capítulo 2, el esfuerzo de corte permite explicar gran parte de los procesos de transporte de sedimento.

A continuación se muestran los perfiles de esfuerzo de corte total, espacial o de forma, turbulento o de Reynolds y laminar o viscoso, todos calculados a partir de la técnica PIV con las ecuaciones (2.49), (2.46), (2.47) y (2.48), respectivamente.

En la Figura 4.3 se muestra el perfil de corte total, espacial, laminar y de Reynolds para los experimentos realizados, todos en función de la altura sobre el lecho adimensionalizada y/h .

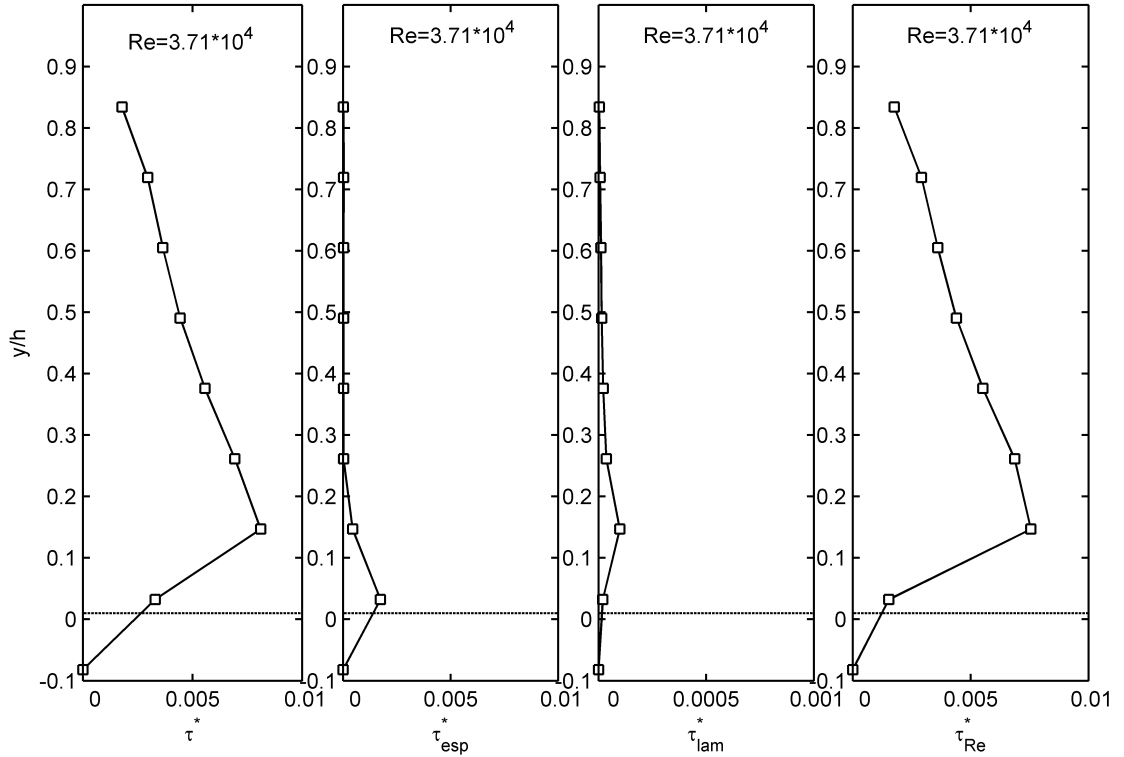


Figura 4.3: Perfiles de esfuerzo de corte adimensional total, espacial, laminar y de Reynolds.

El esfuerzo de corte total τ_* representa la suma del esfuerzo de corte espacial τ_{esp}^* , esfuerzo de corte laminar o viscoso τ_{lam}^* y esfuerzo de corte de Reynolds τ_{Re}^* , todos estos adimensionalizados por $\rho g R d_s$ con $d_s = D_{50grava} = 45 \text{ mm}$. Del análisis del PIV el esfuerzo de corte tiene un valor $\tau_* = 0.008$.

El análisis de los perfiles se detalla a continuación:

- **Esfuerzo de corte espacial:**

El esfuerzo de corte espacial, expresado como $\tau_{esp} = -\rho \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle$ representa los efectos de las formas de la rugosidad sobre el flujo, ésta se refleja a través de la función de las rugosidades $A(z)$. Como se muestra el segundo Figura a la derecha en la Figura 4.3 el esfuerzo adimensional deja de ser nulo solo en las proximidades del lecho y dentro de éste. Su efecto se nota desde -0.1 a 0.14 del lecho siendo máximo en la zona intersticial justo sobre 0 , donde $A(z) = 0$ varía de $A(z) = A_{max} < 1$. De esta forma se corresponde la teoría formulada por Nikora et al (2001).

En comparación con el estudio de Fuentes (2017), no se presenta distorsiones en el esfuerzo de corte espacial en la zona alta, dado que no hay formación de burbujas al no existir una condición de no resbalamiento en la zona superior.

- **Esfuerzo de corte laminar o viscoso:**

El esfuerzo de corte viscoso o laminar, expresado como $\tau_v = \mu \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z}$ representa los efectos de la viscosidad sobre el flujo, que de acuerdo a la teoría de la capa límite son perceptibles llegando al fondo cuando el lecho es liso. Dado que el lecho de grava es

rugoso rompe la subcapa viscosa, por lo que estos efectos deberían no ser perceptibles.

El tercer perfil a la derecha de la Figura 4.3 muestra un efecto casi nulo en toda la vertical, aunque se percibe un pequeño efecto sobre el esfuerzo de corte total en la zona sobre el lecho rugoso, zona conocida como de transición o buffer, aun así el efecto es casi imperceptible sobre el esfuerzo de corte total y solo ocurre en la zona de máximo esfuerzo de corte adimensional.

- **Esfuerzo de corte de Reynolds:**

El esfuerzo de corte de Reynolds expresado como $\tau_{tur} = -\rho\langle u'w' \rangle$ representa los efectos de la turbulencia sobre el flujo y los procesos de transporte de sedimentos. Como se observa en el último perfil hacia la derecha de la Figura 4.3, éste efecto representa casi la totalidad del esfuerzo de corte total, lo que se relaciona con el alto número de Reynolds que indica la alta turbulencia del estudio experimental.

Tal como indica Czernuszenko (2011), el esfuerzo de corte de Reynolds tiene un comportamiento lineal en la zona sobre el lecho rugoso para un flujo bidimension, alcanzando su máximo valor sobre la cresta de la rugosidad más alta, lo que indica el fin de la capa rugosa, dando lugar inmediatamente a los efectos turbulentos al no desarrollarse una subcapa viscosa o laminar pues el mismo lecho rugoso la ha destruido completamente ya.

A medida que se acerca y entra al lecho, el efecto turbulento de Reynolds comienza a disminuir. Nikora et al (2001) y Czernuszenko (2011) proporcionan un buen esquema teórico para abordar este problema, que se resume en que aparecen los efectos espaciales que le restan cantidad de movimiento al flujo y lo vuelven menos turbulento, esto en directa relación con lo mostrado en los perfiles de esfuerzo de corte.

- **Esfuerzo de corte total:**

El esfuerzo de corte total se expresa como la suma de todos los esfuerzos anteriormente analizados, $\tau_* = \tau_{esp}^* + \tau_{lam}^* + \tau_{Re}^*$ y del primer perfil a la derecha de la Figura 4.3 muestra un comportamiento lineal sobre el lecho de grava, alcanza su máximo en ese mismo punto y comienza a disminuir a medida que se acerca cada vez más hacia dentro del lecho. Se observa que el esfuerzo de corte no es máximo en el fondo como lo indica la Ecuación 2.9, esto pues la ecuación mencionada es un esfuerzo de corte medio, que viene del equilibrio de fuerzas para escurrimiento uniforme, pero que no toma en cuenta la existencia del lecho, por lo que no se corresponde en forma directa. En este caso, el efecto de las formas del lecho desplazan el máximo del esfuerzo de corte total a la zona sobre el lecho, donde las rugosidades ya no influyen en el flujo y el efecto de la turbulencia es máximo. El máximo valor del esfuerzo de corte, según Nikora y Goring (2000), indica el tope de la capa rugosa.

Se concluye que el esfuerzo de corte total, correspondiente a las fuentes laminar, turbulenta y espacial exhibe un comportamiento aproximadamente lineal hasta la zona sobre el lecho, donde la reducción observada en torno al lecho se debe a mecanismos de extracción de momentum asociados directamente con la heterogeneidad espacial de las condiciones media del flujo en torno al lecho, lo que es evidenciado en la literatura por ejemplo por Nikora

et al. (2001), Nikora et al. (2004) y Czernuszenco (2011). Además, el esfuerzo de corte espacial deducido a partir del promedio espacial es una buena medida para caracterizar los mecanismos adicionales de extracción de momentum en torno al lecho. Sin embargo, una mejor caracterización del fenómeno en torno a la grava debe realizarse para obtener resultados más precisos.

4.4. Experimentos

La Tabla 4.2 presenta un resumen de las experiencias desarrolladas y los parámetros característicos más relevantes mostrados en el capítulo 2. La altura del flujo es h_n , altura que se impone con la clapeta y se verifica sea uniforme a lo largo de todo el canal, para ésto se colocan reglas graduadas cada 30 cm a lo largo del canal y se verifica que la altura de escurrimiento sea lo más cercana a 14.5 cm, el Froude del flujo es $F_r \approx 0.30$, la altura crítica $h_c \approx 2.92$ y el Reynolds de $R_e \approx 3.71 \cdot 10^4$.

Tabla 4.2: Resumen condiciones experimentales.

Exp	t [h]	i [%]	Q [lt/s]	Sed	GSe [kg/h]	h_n [cm]
1	2.50	1.22	15,62±0.02	G1	12±2	14.45±0.05
2	2.45	1.22	15.64±0.02	G1	6.0±0.1	14.52±0.02
3	3.00	1.22	15.60±0.02	G2	12±2	14.5±0.1
4	2.60	1.22	15.60±0.02	G2	6.3±0.1	14.34±0.01
5	2.50	1.22	15.61±0.02	G3	6.3±0.1	14.42±0.08
6	2.10	1.22	15.67±0.02	G3	10±2	14.54±0.01

La primera columna indica la experiencia realizada; la segunda indica el tiempo durante el cual se vertió sedimento mediante la tolva; la pendiente se indica en la tercera columna y se mantiene constante para todas las experiencias, para esto se mantienen fijos los tornillos fijadores según lo indicado en la sección anterior; el caudal, indicado en la cuarta columna se intenta mantener constante, para chequear esto se mide durante la experimentación cada 15 min las alturas del mercurio en el piezómetro, se indica el error asociado; el grupo de relave correspondiente se muestra en la columna 5; el gasto sólido de entrada (GSe) que vierte la tolva para cada experimento se indica en la columna 6; por último la altura de escurrimiento h_n con el error asociado, medido como la desviación estándar de todas las alturas registradas mediante la cámara Go pro a lo largo de la zona de interés.

Se observa que los sedimentos de granulometría $G1$, $G2$ y $G3$ se mueven en vórtices en la zona intersticial sobre las crestas de la grava y que el esfuerzo inducido por el flujo no genera arrastre de fondo porque el sedimento se va depositando en el fondo de manera uniforme a lo largo del canal. Se observa además que luego que se para la tolva en el canal el sedimento depositado se pone de a poco en suspensión, no desapareciendo del todo y disminuyendo la altura relativa del relave con respecto a la grava en 1 cm en 24 horas para $G1$. Se observa que se forman grumos o agregados del relave y se depositan inmediatamente, hasta el fondo, al caer de la tolva hasta los 8 m de la longitud del canal.

Se registra que no existe arrastre de fondo debido a la depositación del material y las fuerzas electroquímicas propias de sedimentos de relaves mineros, que contienen arenas finas, limos,

arcillas y metales pesados, que mantienen al sedimento adsorbido a las partículas del lecho de grava inmóvil. La Figura 3.21 mostró que el pH de los grupos ensayados es ácido, lo que muestra la presencia de iones libres, estos generan fuerzas electroquímicas que bloquean el avance del sedimento sobre el fondo.

Para estimar el peso del material depositado se utiliza la metodología descrita en el capítulo 3, pesando por tramos de 2 metros desde la zona de vertimiento hasta el final del canal, dando 5 tramos a pesar.

En la Tabla 4.3 se muestra el peso depositado en el fondo por tramo para cada experimento.

Tabla 4.3: Pesos sedimento depositado por tramo y total.

E	t[h]	GS_e [kg/h]	GS_t [kg]	Sed.	t_1 [kg]	t_2 [kg]	t_3 [kg]	t_4 [kg]	t_5 [kg]	Tot_d [kg]	[%]
1	2.5	12±2	29.88	G1	4.18	3.94	2.39	0.96	0.48	11.95	40
2	2.5	6.0±0.1	14.79	G1	2.54	1.99	1.09	0.69	0.43	6.73	45
3	3.0	12±2	37.20	G2	5.99	5.00	4.06	2.47	1.54	19.06	51
4	2.6	6.3±0.1	16.25	G2	4.08	3.33	1.28	0.78	0.52	9.99	61
5	2.5	6.3±0.1	15.75	G3	5.23	3.19	1.22	0.70	0.59	10.92	69
6	2.1	10±2	20.10	G3	7.76	5.73	2.20	1.03	0.78	17.50	87

La primera columna indica el experimento realizado; la segunda el tiempo de experimentación; la tercera el gasto sólido de entrada vertido por la tolva; la cuarta columna indica el gasto sólido vertido total en el tiempo t de duración de cada experimento. t_i indica el peso del sedimento depositado en el tramo i . Las últimas dos columnas indican el peso total depositado en el canal para cada experimento en unidades de masa y porcentaje.

La última columna de la Tabla 4.3 permite relacionar el tipo de granulometría con la cantidad de sedimento que fue depositado y la que debería ir en suspensión. Se desprende también que el grupo 1 presentan una depositación entre el 40-50 % del total del sedimento vertido; el grupo 2 deposita entre el 51-61 % del sedimento vertido al canal mientras el grupo 3 deposita entre el 69-87 % del sedimento. Todo el resto del sedimento por consiguiente se debe transportar en suspensión.

La Tabla 4.4 presenta la relación de peso depositado que se da en cada tramo respecto al total en el canal.

Tabla 4.4: Pesos sedimento depositado por tramo y total en forma porcentual.

E	t[h]	QS_e [kg/h]	GS_t [kg]	Sed.	t_1 [%]	t_2 [%]	t_3 [%]	t_4 [%]	t_5 [%]
1	1.40	12±2	29.88	G1	35	33	20	8	4
2	2.45	6.0±0.1	14.79	G1	38	30	16	10	6
3	3.00	12±2	37.20	G2	31	26	21	13	8
4	2.60	6.3±0.1	16.25	G2	41	33	13	8	5
5	2.50	6.3±0.1	15.75	G3	48	29	11	7	5
6	2.10	10±2	20.10	G3	44	33	13	6	4
Prom					40 %	30 %	15 %	9 %	6 %

La Figura 4.4 muestra en forma gráfica el porcentaje de relave depositado de cada experimento a lo largo del canal.

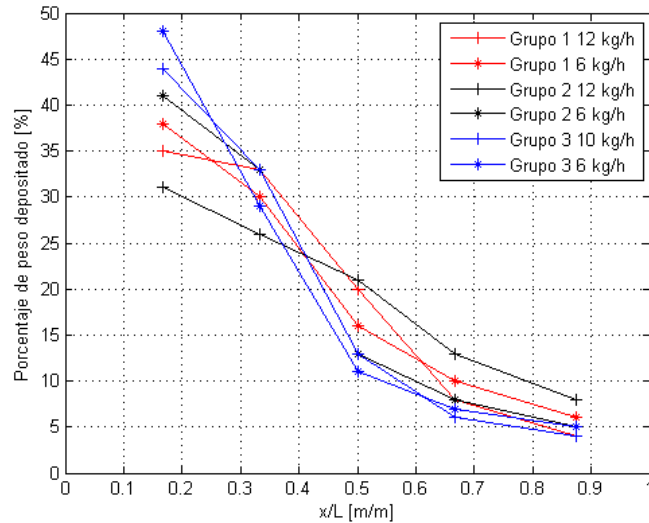


Figura 4.4: Porcentaje de relave depositado para cada tramo.

Para el gráfico se adimensionaliza la longitud donde se mide el sedimento depositado mediante el largo del canal ($L = 12$ m). El valor de x se toma como el punto medio de la distancia que corresponde a cada tramo (2 m para los primeros 4 tramos y 3 m para el tramo final) así el primer punto se toma como la distancia desde el inicio del canal a la tolva más 1 m, y así para los otros tramos.

Se concluye que dependiendo del grupo de relave con el que se experimenta, entre el 40-80 % del material vertido sobre el canal se deposita en el fondo y se mantiene depositado durante la experimentación debido a las fuerzas electroquímicas, las que se caracterizan por el pH ácido de los 3 grupos, justificando la presencia de iones libres en la columna de agua, las que impiden el movimiento a lo largo del fondo y por consiguiente la presencia de gasto sólido de fondo. Se observa además que existe una relación entre las granulometrías más finas de los grupos experimentados con menores porcentajes de depositación de relaves mineros

artificiales, indicando que a medida que la muestra tiene más porcentaje de finos, mayor es el arrastre de sedimentos en suspensión. Se concluye que el tramo 1 es el que presenta la mayor cantidad de material depositado, algo que se evidencia en todas los grupos de relave. El porcentaje del total del sedimento depositado va disminuyendo a lo largo del canal siendo mayor mientras más cerca de la tolva, lo que se explica por la presencia de material de distinta granulometría en los grupos de relaves artificiales creados donde el material de granulometría más gruesa se depositará en las zonas cercanas a la tolva.

4.5. Descripción de la estratigrafía y transporte de sedimentos

Dado que no se pudo describir el gasto sólido de fondo entonces se describe la estratigrafía y el arrastre de sólidos en suspensión.

En forma cualitativa es posible describir el perfil vertical real de los relaves mineros en la longitud del canal para la cual se registra la medición, esto permite apreciar formas de fondo y tendencias a zonas de depositación de sedimentos.

Las mediciones de estratigrafía se realizan mediante el uso de las cámaras de digitales Go pro. Las imágenes durante el período de experimentación en cada caso se procesan y se obtiene la altura del sedimento depositado relativa al lecho de grava para la zona central del canal.

Se muestra la estatigrafía de 2 m de longitud del canal donde el origen está ubicado a 4 m del inicio del canal y a 3 m de la tolva que vierte el sedimento. Se muestra el perfil del sedimento en distintos tiempos característicos de cada experimento. En los gráficos por simplicidad comparativa se consideran gastos sólidos de entrada 6 kg/h y 12 kg/h.

Por otra parte, mediante el peso del gasto sólido en suspensión con el procedimiento descrito en el capítulo 3 se obtiene un perfil vertical de concentración de sedimento en suspensión, el que permite obtener el gasto sólido en la zona de suspensión y completar el balance sedimentológico en conjunto con el material depositado mostrado en la Tabla 4.4.

4.5.1. Estratigrafía conjunta

Resulta útil comparar los perfiles del sedimento generando condiciones similares.

Si bien se sabe que el gasto sólido de entrada difiere en cada uno de los 6 experimentos, este se puede aproximar a dos valores, 6 kg/h y 12 kg/h, solo el último experimento escapa a este valor con una diferencia aproximada de 2 kg/h, pero se compara de igual manera con los de 12 kg/h por encontrarse dentro de límites. Si se agrupan los datos en 2 gastos sólidos característicos es posible agrupar las 3 granulometrías en 2 pares distintos, las que están alrededor de los 6 kg/h y las de 12 kg/h. sedimentos.

4.5.1.1. Estratigrafía para $GS_e = 6 \text{ kg/h}$

En la Figura 4.5 se compara el perfil de sedimentos respecto al lecho para las tres granulometrías a igual gasto sólido de entrada (6 kg/h).

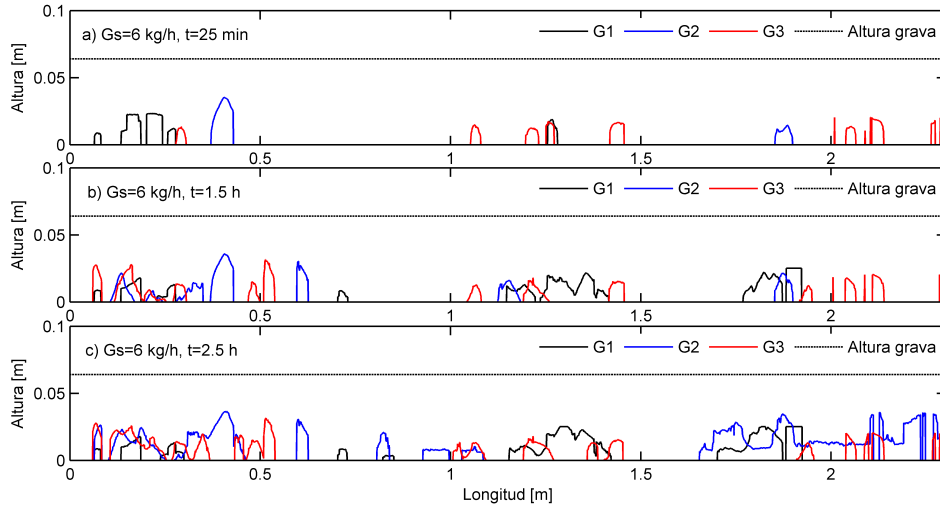


Figura 4.5: Distribución longitudinal del relave minero en función del tiempo, comparación a 6 kg/h .

Se observa claramente que la granulometría G3, en rojo, presenta un perfil mayor y más uniforme a lo largo del canal, esto va de la mano con el hecho de que la granulometría G3 posee los sedimentos más gruesos de las 3.

Se observan 3 zonas con tendencia a la depositación, el primer tercio de la zona registrada, la zona central y el metro final registrado.

La altura máxima la alcanza la granulometría G2, y es también la que muestra la depositación más tardía.

4.5.1.2. Estratigrafía para $GS_e = 12 \text{ kg/h}$

En la Figura 4.6 se compara el perfil de sedimentos respecto al lecho para las tres granulometrías a igual gasto sólido de entrada (12 kg/h).

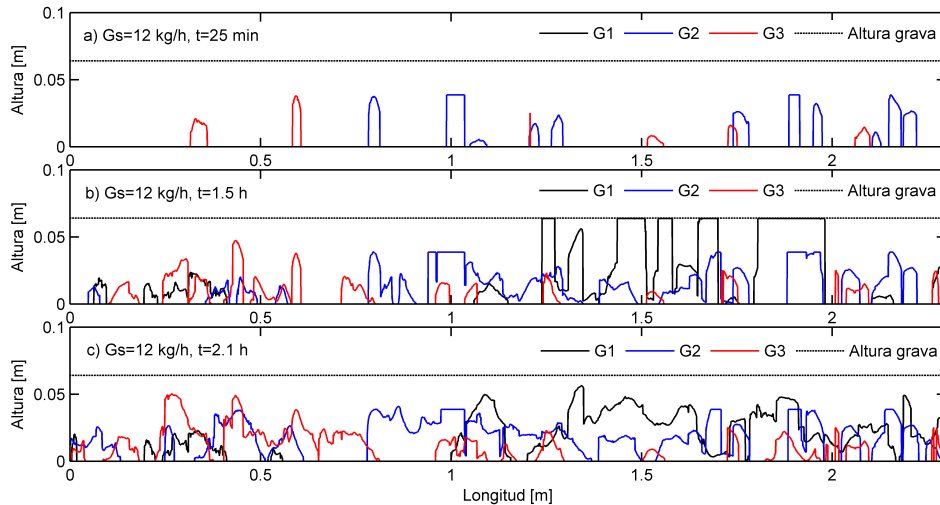


Figura 4.6: Distribución longitudinal del relave minero en función del tiempo, comparación a 12 kg/h .

Se observa que la granulometría G3 es la que presenta la depositación más uniforme longitudinalmente, no así la altura mayor, que es presentada por la granulometría G1. Se debe notar que el sedimento de granulometría G3 se vierte con un gasto sólido de entrada aproximadamente 2 kg/h menor que en las otras granulometrías, por lo que no es posible realizar una comparación total, pero si del orden.

Se observa que la uniformidad longitudinal del sedimento depositado aumenta en general con el tiempo. Este efecto es apreciable en esta figura y no en la anterior pues en el éste caso se alcanza a depositar más cantidad de sedimento, lo que permite observar más fenómenos que el caso anterior.

Al igual que en los casos anteriores, se advierte el desarrollo incompleto de formas de fondo del tipo dunas en la longitudinal.

La granulometría G1 es la que presenta el perfil de sedimento más bajo en el primer tramo, esto debido a que es la granulometría más fina, por lo que el sedimento será transportado en suspensión, al menos en los tramos iniciales, luego por formación probable de agregados se tenderá a depositar en mayor medida en la zona final, tal como muestra la Figura 4.6.

Se concluye que el sedimento se deposita en forma no uniforme a lo largo del canal cuando el gasto sólido de entrada es $\approx 6 \text{ kg/h}$, a medida que éste aumenta, se logra una depositación más uniforme a lo largo del canal. Lo anterior se interpreta dado la granulometría de los sedimentos, que muestran una fracción fina y gruesa marcada, así a menores gastos sólidos se puede apreciar de mejor manera el fenómenos no uniforme de depositación, sedimentando en el trayecto adyacente a la tolva gran parte del material, donde se depositan las partículas gruesas. Las partículas que quedan se van depositando conforme van formando agregados o grumos debido a las fuerzas electroquímicas que caracterizan a una mezcla con iones libres. Se

distingue la formación de formas de fondo incompletas a lo largo del canal, del tipo dunas, las que se desarrollan de mejor forma a mayores gastos sólidos de entrada. Para poder observar el desarrollo completo de formas de fondo se debe verter durante más tiempo el relave minero artificial, esto permitiría acumular más sedimento en el fondo y observar el desarrollo de mayor cantidad de fenómenos.

4.5.2. Comportamiento del sedimento y concentración del sedimento en suspensión

Los sedimentos utilizados en el estudio corresponden a relaves mineros de la minería del cobre, de carácter cohesivo al poseer limos y arcillas, no cohesivo al tener arenas finas y medias y electroreactivos al tener metales pesados propios de los relaves mineros. Este sedimento fue vertido al sistema con la finalidad de simular el fenómeno de transporte de sedimentos en cauces naturales en eventos como roturas de tranques.

Dado que las dimensiones del material varían entre 7 y 50 μm para el D_{10} de las 3 muestras artificiales de granulometría $G1$, $G2$ y $G3$, el análisis de las muestras extraídas se realizó con instrumentos capaces de operar partículas de ese tamaño. Por esto el análisis de las muestras para estimar la concentración del material suspendido en las muestras extraídas fue realizado en el Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Ingeniería Civil.

Si bien se utilizaron las metodologías recomendadas por la literatura, no necesariamente los resultados obtenidos deben mostrar una tendencia pues por lo revisado anteriormente no se alcanzaron a generar condiciones uniformes en cuanto a la depositación y transporte generalizado de sedimentos.

4.5.2.1. Análisis de la concentración de sedimentos en suspensión

El análisis realizado a cada una de las muestras corresponde a la estimación de la concentración del sedimento en suspensión en la columna de agua sobre el lecho en una posición longitudinal fija, específicamente a 7 m de distancia de la tolva.

Luego de estimar la concentración se crean perfiles de concentración media, la que se adimensionaliza por la densidad del media ρ_m de cada grupo de relave ensayado, en cada uno de los puntos muestreados, el que se adimensionaliza además de manera de expresar el eje de las ordenadas como y/h al igual que los análisis anteriores.

A continuación se muestran los perfiles de concentración media adimensional para cada experiencia, agrupándolos en pares correspondiente al grupo 1, 2 y 3.

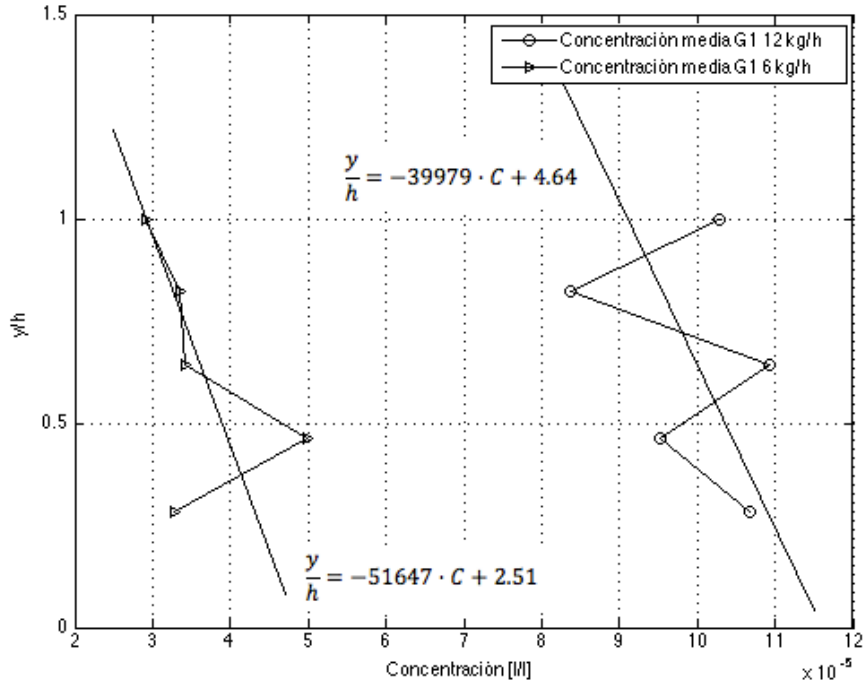


Figura 4.7: Perfil de concentración media puntual. Datos muestreados, Granulometría G1.

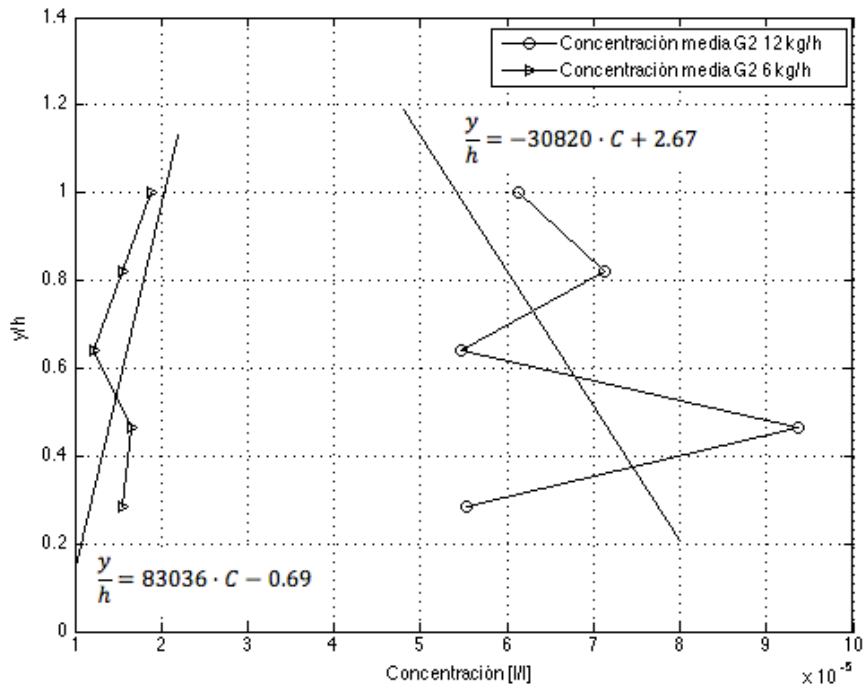


Figura 4.8: Perfil de concentración media puntual. Datos muestreados, Granulometría G2.

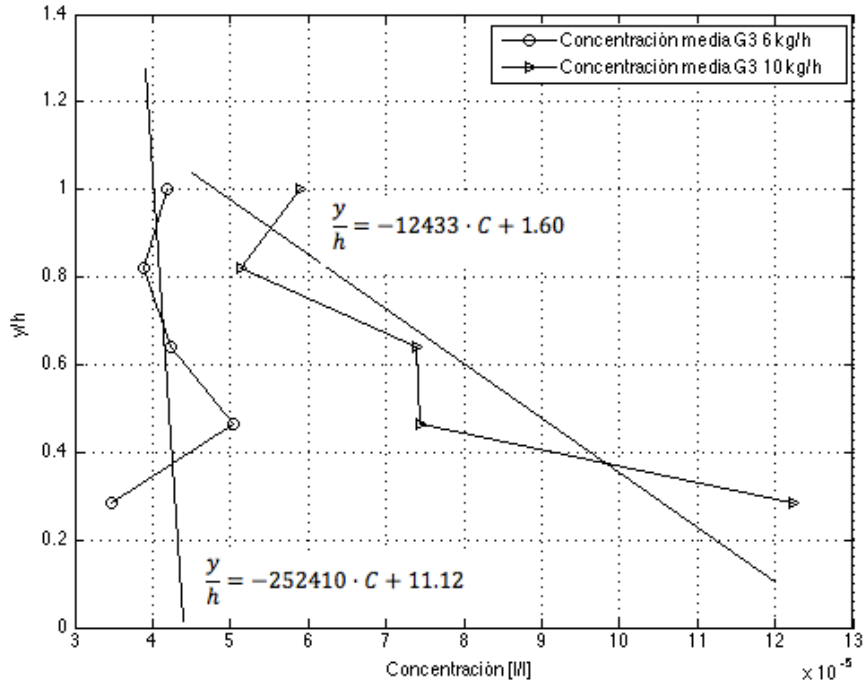


Figura 4.9: Perfil de concentración media puntual. Datos muestreados, Granulometría G3.

En la Figura 4.7, 4.8 y 4.9 se muestra la línea de tendencia de cada perfil de concentración media adimensionalizada, la que permite obtener la concentración en cualquier punto de la vertical para cada experimento realizado.

La zona de muestreo de la concentración en suspensión podría tener alguna influencia sobre éste, dado que existen zonas con altos gradientes de depositación tal como se explica en la estratigrafía, en estas zonas se presume que la concentración de los sólidos en suspensión podría ser menor.

Tanto para $G1$, $G2$ y $G3$ se observa que a mayor gasto sólido de entrada mayor es la concentración media en suspensión, lo que se explica pues existe más carga de sedimento a ser transportada en conjunto con que cada sedimento de relave contiene finos que serán transportados en suspensión.

Tanto en la Figura 4.7, 4.8 y ?? se observa que mientras más bajo es el gasto sólido en suspensión de entrada más uniforme es el perfil, por el contrario, a mayor gasto sólido de entrada (12 kg/h , líneas de más a la derecha) mayor se vuelve la distorsión y no es posible apreciar una uniformidad en el perfil, volviéndose solo puntos que a los 3 cm ($y/h \approx 0.4$) del lecho alcanzan su máximo valor, salvo para la granulometría $G3$ que alcanza su máximo en la zona más cercana al lecho.

Por otra parte, del procedimiento iterativo descrito mediante las Ecuaciones 2.41 y 2.42 se obtiene la velocidad de sedimentación de las partículas de diámetros característicos del grupo 1, 2 y 3 de relave artificial generado. Los resultados se muestran en las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7.

Tabla 4.5: Velocidad de sedimentación grupo 1.

	Diámetro [cm]	Re_p [-]	C_d [-]	ω_s [cm/s]
D_{10}	0.00070	22	2.26	0.04
D_{16}	0.00151	107	0.98	0.10
D_{50}	0.02019	7752	0.45	0.54
D_{84}	0.05323	34168	0.42	0.90
D_{90}	0.06484	46124	0.42	1.00

Tabla 4.6: Velocidad de sedimentación grupo 2.

	Diámetro [cm]	Re_p [-]	C_d [-]	ω_s [cm/s]
D_{10}	0.00258	319	0.68	0.17
D_{16}	0.00628	528	0.61	0.29
D_{50}	0.03347	1313	0.52	0.71
D_{84}	0.05265	1671	0.51	0.91
D_{90}	0.05706	1744	0.51	0.95

Tabla 4.7: Velocidad de sedimentación grupo 3.

	Diámetro [cm]	Re_p [-]	C_d [-]	ω_s [cm/s]
D_{10}	0.00527	1001	0.55	0.27
D_{16}	0.01104	1488	0.52	0.40
D_{50}	0.03688	2811	0.48	0.75
D_{84}	0.09100	4499	0.47	1.19
D_{90}	0.06543	3791	0.47	1.01

Utilizando la velocidad de corte obtenida del PIV de la Tabla 4.1 y los valores de velocidad de sedimentación de las partículas de diámetros característicos de cada grupo es posible mostrar el perfil adimensionalizado de concentración en función de la profundidad adimensionalizada utilizando la Ecuación 2.50 para los 3 grupos de relaves mineros artificiales.

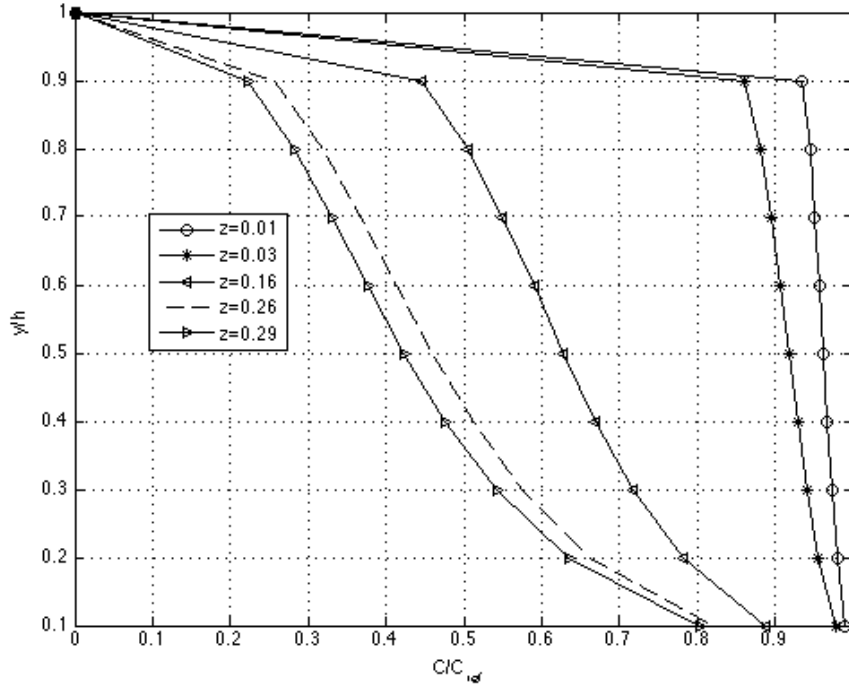


Figura 4.10: Concentración de sedimento en suspensión adimensional en función de y/h ($\xi_{ref} = 0.05$) para G1.

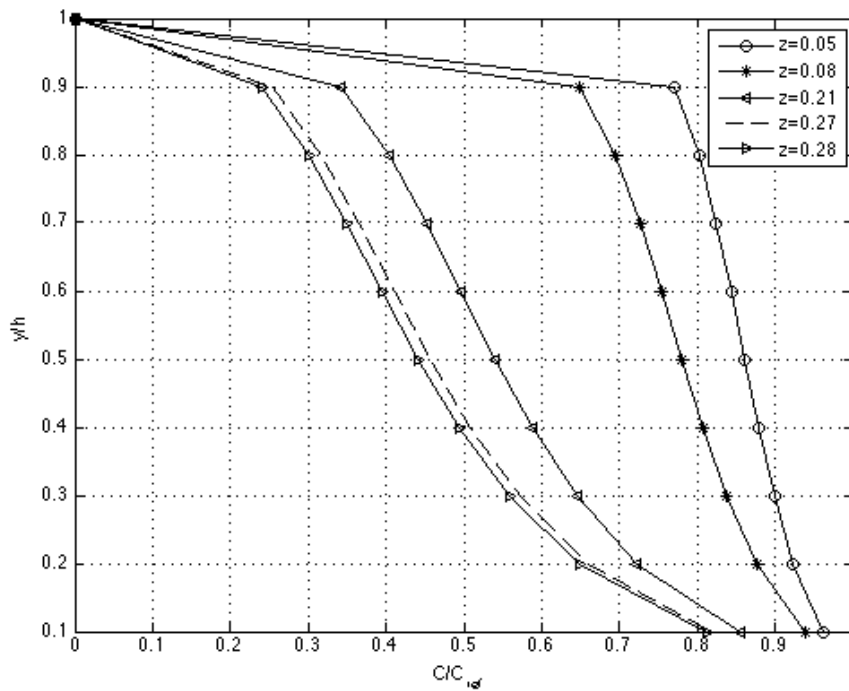


Figura 4.11: Concentración de sedimento en suspensión adimensional en función de y/h ($\xi_{ref} = 0.05$) para G2.

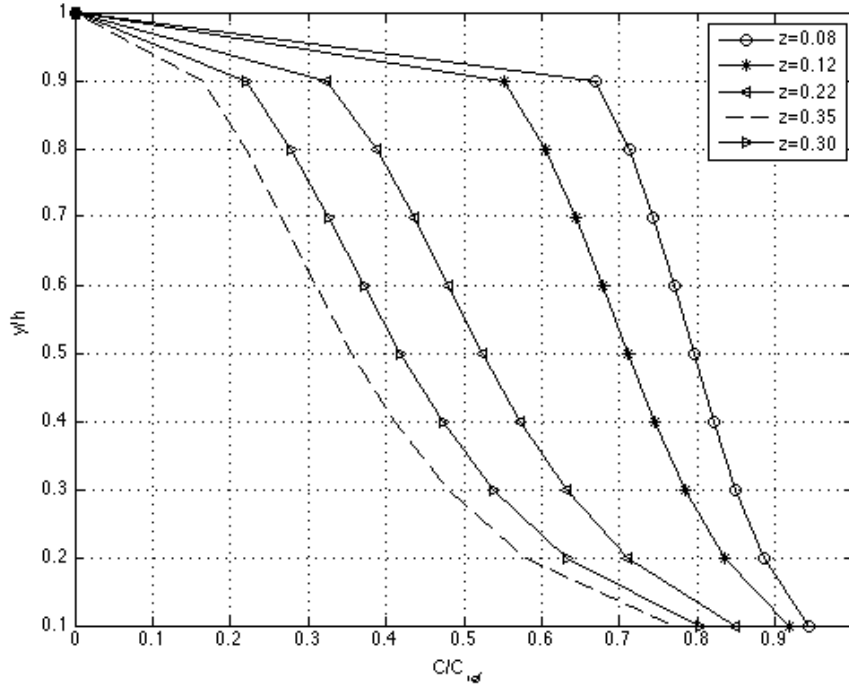


Figura 4.12: Concentración de sedimento en suspensión adimensional en función de y/h ($\xi_{ref} = 0.05$) para G3.

Se observa un correcto ajuste a las curvas mostradas por Rouse (1937), pero dadas las velocidades de sedimentación de las partículas de diámetros característicos asociados no es posible observar el perfil para $Z \geq 0.35$.

De los perfiles de concentración de sedimento en suspensión adimensional y las líneas de tendencia mostradas en las Figuras 4.7, 4.8 y ?? es posible obtener la concentración media en cada experimento; del perfil de velocidad adimensional mostrada en la Figura 4.1 es posible hallar la velocidad media $\overline{u(z)}$ asociada a cada valor de altura adimensional, con esto es posible calcular el gasto sólido en suspensión utilizando la Ecuación 2.52. Las Tablas 4.8, 4.9 y 4.10 muestran los valores del gasto sólido en suspensión acarreado en cada experimentación junto con el detalle de los datos utilizados para su cálculo.

Tabla 4.8: Resumen datos utilizados para el cálculo del Gasto sólido en suspensión total, Experiencia 1 y 2.

y/h [-]	Δy [cm]	$\overline{u(z)}$ [m/s]	$\overline{C(z)}_{E2}$ [mg/l]	q_{ssE2} [kg/h]	$\overline{C(z)}_{E1}$ [mg/l]	q_{ssE1} [kg/h]
0.03	1.1	0.08	72	0.07	172	0.16
0.15	1.1	0.45	68	0.36	168	0.90
0.26	1.1	0.59	65	0.45	164	1.14
0.38	1.1	0.68	62	0.49	159	1.27
0.49	1.1	0.73	58	0.50	155	1.33
0.60	1.1	0.78	55	0.50	151	1.38
0.72	1.1	0.81	52	0.49	146	1.39
0.83	1.1	0.82	48	0.47	142	1.37

La columna 1, 2 y 3 son constantes para todos los cálculos y se obtienen de la técnica de velocimetría PIV; la columna 4 de izquierda a derecha muestra la concentración media en la altura correspondiente en las unidades coherentes al resultado para la experiencia 2; la quinta columna muestra el gasto sólido en suspensión calculado discretamente mediante la Ecuación 2.52, además se multiplica por el ancho del canal para obtener en las unidades correspondientes, en este caso para la experiencia 2. Las últimas 2 columnas muestran los mismos datos para la experiencia 1. El razonamiento es el mismo en las siguientes tablas.

Tabla 4.9: Resumen datos utilizados para el cálculo del Gasto sólido en suspensión total, Experiencia 3 y 4.

y/h [-]	Δy [cm]	$\overline{u(z)}$ [m/s]	$\overline{C(z)}_{E4}$ [mg/l]	q_{ssE4} [kg/h]	$\overline{C(z)}_{E3}$ [mg/l]	q_{ssE3} [kg/h]
0.03	1.1	0.08	14	0.01	138	0.13
0.15	1.1	0.45	16	0.09	132	0.70
0.26	1.1	0.59	18	0.13	126	0.88
0.38	1.1	0.68	21	0.16	120	0.95
0.49	1.1	0.73	23	0.20	114	0.98
0.60	1.1	0.78	25	0.23	108	0.99
0.72	1.1	0.81	27	0.26	102	0.96
0.83	1.1	0.82	30	0.28	96	0.92

Tabla 4.10: Resumen datos utilizados para el cálculo del Gasto sólido en suspensión total, Experiencia 5 y 6.

y/h [-]	Δy [cm]	$\overline{u(z)}$ [m/s]	$\overline{C(z)}_{E5}$ [mg/l]	q_{ssE5} [kg/h]	$\overline{C(z)}_{E6}$ [mg/l]	q_{ssE6} [kg/h]
0.03	1.1	0.08	68	0.06	197	0.18
0.15	1.1	0.45	68	0.36	182	0.97
0.26	1.1	0.59	67	0.47	168	1.17
0.38	1.1	0.68	66	0.53	153	1.22
0.49	1.1	0.73	66	0.56	139	1.20
0.60	1.1	0.78	65	0.59	125	1.14
0.72	1.1	0.81	64	0.61	110	1.04
0.83	1.1	0.82	64	0.61	96	0.93

El gasto sólido en suspensión total acarreado durante la experimentación se calcula sumando los valores discretos en toda la vertical. Para obtener la carga de sedimento total en suspensión durante la experiencia (en unidades de kg) se multiplica el gasto sólido en suspensión total por el tiempo total de experimentación.

En la Tabla 4.11 se detalla el Gasto sólido en suspensión total en la columna de agua para cada experiencia junto con la carga de sedimentos total respectiva. Además se compara con la carga en suspensión real que debería existir, la que se obtiene de la Tabla 4.3, indicando el error porcentual entre el valor real y el calculado.

Tabla 4.11: Resumen gasto sólido en suspensión calculada y real.

Experiencia	qss [kg/h]	Carga en suspensión calculada [kg]	Carga en suspensión real [kg]	error
E1	8.9	12.50	17.93	30 %
E2	3.3	8.18	8.06	1 %
E3	6.5	19.53	18.14	8 %
E4	1.4	3.54	6.26	43 %
E5	3.8	9.50	4.83	97 %
E6	7.9	16.49	2.6	534 %

Se concluye por una parte que las mediciones de concentración media en suspensión no permiten obtener líneas de tendencia satisfactorias, lo que se acarrea como un problema al calcular el gasto sólido en suspensión total, dado que las concentraciones medias en los puntos donde existen registros de velocidad mediante la técnica PIV se calculan con estas líneas de tendencia, es así como en la Tabla 4.11 la mayor diferencia entre la carga total real y la calculada mediante la Ecuación 2.52 se obtiene para los perfiles de concentración menos uniformes y con las líneas de tendencia de menor R^2 . Para los perfiles más uniformes se obtienen errores porcentuales entre 1-43 %. Por otra parte, los perfiles de concentración de sedimento en suspensión adimensional en función de y/h muestra un ajuste a las calculadas por Rouse (1937), pero no se observan datos para Z altos, inherentes a velocidades de sedimentación mayores dado que las partículas de los relaves mineros artificiales generados no alcanzan grandes tamaños, por lo que tienen velocidades bajas de sedimentación.

Capítulo 5

Conclusiones

El presente estudio experimental realizado tiene por objetivo principal estudiar experimentalmente la respuesta de un canal con lecho de grava bajo la presencia de contaminación de relaves mineros, lo que se cumple parcialmente, dado que si bien se logra describir múltiples fenómenos característicos de un estudio así, como lo es el transporte en suspensión y la ausencia de arrastre de fondo y por consiguiente el estudio de la estratigrafía, no es posible obtener relaciones empíricas que permitan cerrar el problema del balance sedimentológico para las condiciones experimentadas de manera precisa.

Por otra parte, los objetivos específicos se cumplen satisfactoriamente en cuanto a modificar el montaje experimental y realizar un análisis y discusión de los datos obtenidos. Sin embargo, se logra parcialmente caracterizar el perfil de velocidad del flujo, pues en la condición final de experimentación, cuando el relave ya ha sido vertido, el arrastre en suspensión no permite el seguimiento de las partículas trazadoras que caracterizan el perfil de velocidad, lo anterior pues no se cumplen las condiciones mínimas indicadas por Prasad (2000) y Thielicke y Stamhuis (2014), que exigen que la sección de escurrimiento tenga una baja turbiedad, dado que las partículas suspendidas producen una alta turbiedad de la columna de agua sobre el lecho.

Los cumplimientos parciales en los objetivos anteriores no permitieron el total y correcto desarrollo y registro de los experimentos, a pesar de esto, fue posible obtener datos que describieran el fenómeno y permitieran una mejor comprensión de las interacciones entre el flujo y los relaves mineros en canales con lecho de grava inmóvil, generándose importante información respecto del transporte de sedimentos en estos sistemas.

Se presentan a continuación las conclusiones más importantes del estudio experimental, refiriéndose a cada aspecto que se desarrolló durante éste.

5.1. Montaje experimental

En el ámbito experimental, fue posible la creación de un método para caracterizar relaves mineros y generar mezclas artificiales para experimentación, corroborando las técnicas utilizadas por Dimitrova y Yanful (2012).

El montaje experimental permite estudiar parcialmente el transporte de fondo, dado que si bien el desarrollo del experimento mostró que éste se deposita y no se mueve del fondo en la dirección longitudinal del canal, no es posible aseverar que no existe un método para determinar si existe un arrastre en suspensión por más bajo que éste sea.

En la zona sobre el lecho, el montaje experimental permite realizar una correcta medición del transporte en suspensión a distintas alturas, éste se puede desplazar a lo largo del canal y es capaz de registrar cada 2 *cm* de altura la concentración de sedimento en suspensión, lo que permitió el cálculo de perfiles de concentración media.

La cámara oscura resulta ser funcional para generar las condiciones necesarias de luz para la grabación de videos de alta velocidad en el canal con la técnica PIV.

La técnica PIV no resulta satisfactoria para estudiar el campo de velocidades bidimensional cuando existe vertimiento del sedimento en el lecho, pues incluso cuando se finaliza la experimentación al dejar de ingresar gasto sólido, la turbiedad del agua resulta tan alta debido a la recirculación del material fino desde la sentina al canal, que no permite seguir las partículas de trazadoras de rodamina, habiendo incluso aumentado al triple la densidad de éstas en la columna de agua. Sin embargo, la técnica permite estudiar de manera satisfactoria el campo de velocidades bidimensional del flujo sobre un lecho de grava sin contaminación de relaves mineros hasta $\approx 0,8h_{flujo}$.

El diseño de la tolva permite entregar un gasto sólido de entrada de manera relativamente constante para gastos sólidos $< 10 \text{ kg/h}$, no así para valores mayores, donde la desviación estándar aumenta hasta tener diferencias de hasta 2 *kg/h* en una medición y otra. Para lo últimos casos, se aumentó la cantidad de datos para calibrar la tolva con el objetivo de obtener un promedio más representativo. Por otra parte, es alta la variabilidad de gasto sólido de entrada para distintas condiciones de humedad del sedimento, dado que cuando este tenía 0% de humedad, no existía diferencia entre frecuencias configuradas, deslizándose el sedimento por el tornillo sin fin. A medida que ésta aumentaba, el gasto sólido se hacía cada vez menos dependiente de la humedad y se tenía un control rápido e intuitivo sobre los kilogramos por hora de sedimento vertido.

La placa Arduino permite controlar satisfactoriamente la tolva, de manera intuitiva y directa, sin requerir sistema de caja de adquisición. Por otra parte, la placa Arduino no permite controlar motores de alta potencia, lo que resulta un problema cuando el tornillo sin fin se atasca, dado que la potencia del motor no es suficiente para hacerlo girar sin que el motor se queme.

5.2. Parámetros derivados de la velocidad del flujo

Existe una cercanía entre las expresiones semiteóricas para la intensidad de la turbulenta de Nezu y Nakagawa (1993) y las intensidades turbulentas u'/u_* y v'/u_* para valores de $y/h > 0.15$ en el plano de medición, no así valores > 0.5 , donde las expresiones de Nezu y Nakagawa (1993) tienden a subestimar la intensidad turbulenta. Más datos permitirían verificar el cumplimiento de las relaciones con la experimentación.

El esfuerzo de corte total medido es casi en su totalidad debido a la turbulencia, se nota un nulo aporte del esfuerzo de corte laminar o viscoso, mientras el esfuerzo de corte espacial o de forma se vuelve significativo en torno al 5 % de la altura de escurrimiento sobre el lecho, alcanzando el máximo valor justo sobre en la rugosidad del lecho. El esfuerzo de corte espacial resulta mayor que el esfuerzo de Reynolds en la zona de la rugosidad, lo que no corrobora las mediciones de Fuentes (2017).

5.3. Arrastre de sedimentos

No es posible predecir el gasto sólido de fondo en comparación con los estudios de Licanqueo (2016) y Fuentes (2017) pues no se dispone de un método para registrar el arrastre de fondo, dado que el método utilizando en los anteriores estudios experimentales no permite registrar nada en este estudio. Se concluye que no existe arrastre de fondo, lo que se explica debido a la presencia de iones libres, los que se manifiestan cambiando el pH de la solución acuosa. Esto iones interactúan con la grava del lecho y los sedimentos del relave minero artificial impidiendo el avance de las partículas por el fondo.

Se verifica que el sedimento tiene un doble comportamiento; por una parte se deposita y no se mueve del lecho salvo para entrar en suspensión en cantidades que no es posible medir, esto pues se adsorbe a las partículas de grava del lecho siguiendo el comportamiento de la carga natural de sedimentos corroborando las investigaciones de Macklin et al (2006). La composición mineralógica de los relaves experimentados junto a la granulometría de éstos permiten explicar gran parte de los procesos de transporte que sufren.

La concentración del sedimento en suspensión se comporta en general de acuerdo a lo estudiado, dado que la granulometría más fina transporta en promedio las mayores cantidad de material en suspensión, así también lo corroboran los pesos depositados, que crecen en función que disminuye el porcentaje de finos de los relaves generados.

Es posible calcular el gasto sólido en suspensión para cada experimentación, pero se obtienen valores variables respecto a la carga real de sedimentos en suspensión, esto por las líneas de tendencia poco precisas que se pudieron generar con los datos. Se deben realizar mayor cantidad de datos de concentración de sólidos en suspensión para obtener un mejor ajuste estadístico y cerrar el balance sedimentológico de manera más precisa.

El perfil de concentración media de sedimento en suspensión se hace más uniforme mientras menos es el gasto sólido de entrada, tendiendo a una línea vertical.

El material depositado tiene el aspecto de un barro cohesivo con arenas, el que se encuentra adherido a las paredes de las partículas del lecho de grava.

5.4. Descripción estratigrafía

En general se identifican formas de fondo del tipo dunas incompletas en la vertical y barras transversales incompletas. Se requiere de una mayor carga de sedimentos sobre el lecho para

identificar la formación de formas de fondo completas.

En análisis de fotografías del lecho mediante rutinas de Matlab representa de manera satisfactoria la posición del sedimento en el lecho al interior del canal, permitiendo estudiar de manera no intrusiva lo que sea necesario, evitando deformar el lecho y no alterando las posibles formas de fondo que se pudieran formar.

Si bien los sedimentos de mayor diámetro (arenas) en los 3 relaves estudiados, tienen una velocidad mayor de sedimentación haciendo presumible su depositación en el lecho, no es posible predecir de manera correcta que éstas formarán las formas de fondo usuales asociadas a sedimentos no cohesivos (micro y mesoformas en este caso), incluso cumpliendo con la restricción del número de Froude, lo anterior pues dado que el sedimento contienen partículas finas cohesivas, no existen formulaciones para formas de fondo para sedimentos cohesivos.

Para caracterizar el tamaño del sedimento depositado se debería realizar una curva granulométrica, la que al ser comparada con la curva inicial permitiría determinar qué diámetros serían transportados en suspensión, concluyendo así en una mejor comprensión de los procesos de transporte del sedimento.

Capítulo 6

Bibliografía

6.1. Bibliografía

Adrian, R. J. (1991). Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 261-304.

Axtmann, E.V., Louma S.N. (1991). Large-scale distribution of metal contamination in the fine-grained sediments of the Clark Fork River, Montana, U.S.A.. *Applied Geochemistry*, 6(1), 75-88.

Bagnold, R. A. (1956). The flow of cohesionless grains in fluids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, *Physical and Engineering Sciences*, 249(964), 235-297.

Fuentes, J. (2017). Estudio experimental del transporte de sedimento mediante tomógrafo en el marco de la evaluación de la contaminación de ríos por sedimento fino. Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Berlamont, J., Ockenden, M., Toorman, E., Winterwerp, J. (1993). The characterisation of cohesive sediment properties. *Coastal Engineering*, 21(1-3), 105-128.

Bradley, R. H., Caldwell, B. M. (1984). Home observation for measurement of the environment. Little Rock: University of Arkansas at Little Rock.

Brevis W., Niño Y., (2014) Particle Tracking Velocimetry (Velocimetría por Rastreo de Partículas), Experimental Methods for Hydraulics (In Spanish: Métodos Experimentales en Hidráulica) International Association of Hydraulics Research (Submitted, in review).

Buckingham, E. (1914) On physically similar systems, illustrations of the use of dimensional equations. *Phys. Rev.* 4, 345-376.

Coulthard, T. J., Macklin, M. G. (2003). Modeling long-term contamination in river systems from historical metal mining. *Geology*, 31(5), 451-454.

- Czernuszenko, W. (2011). Spatially averaged log-law for flows over rough bed in zero-and non-zero- pressure gradient boundary layers. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 58(1-4):65-86.
- Dimitrova, R.S., Yanful, E.K. (2012) Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy. *Engineering Geology*, 125, pp. 11-25.
- Geremew, A. M., Yanful, E. K. (2011). Role of fines on cohesive behavior of mine tailings inferred from critical shear stress. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(4), 568-582.
- Giménez-Curto, L. A., Lera, M. A. C. (1996). Oscillating turbulent flow over very rough surfaces. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C9), 20745-20758.
- Graf, J. B., Schmidt, J. C. (1990). Aggradation and degradation of alluvial sand deposits, 1965 to 1986, Colorado River, Grand Canyon National Park, Arizona. United States Geological Survey, *Professional Paper*;(USA), 1493.
- Harding, P., Gibbard, P. L., Lewin, J., Macklin, M. G., Moss, E. H. (1987, October). The transport and abrasion of flint handaxes in a gravel-bed river. In *The Human Uses of Flint and Chert: Proceedings of the Fourth International Flint Symposium Held at Brighton Polytechnic, Oct-15 April* (Vol. 1983, pp. 115-126).
- Honkanen, M., Nobach, H. (2005). Background extraction from double-frame PIV images. *Experiments in fluids*, 38(3), 348-362.
- Kuhnle, R., Wren, D., Langendoen, E., and Rigby, J. (2013). Sand transport over an immobile gravel substrate. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2):167-176.
- Lambe, T. W., Whitman, R. V. (1972). *Mecánica de suelos* (No. 624.151 LAM).
- Leakey, R. E., Lewin, R. (1977). Origins: What new discoveries reveal about the emergence of our species and its possible future. Macdonald and Jane's.
- Lewin, J., Wolfenden, P. J. (1978). The assessment of sediment sources: a field experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 3(2), 171-178.
- Licanqueo, W. (2016). Estudio experimental del transporte de sedimentos finos en un canal con lecho de grava. Memoria para optar al título de ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Macklin, M. G., Klimek, K. (1992). Dispersal, storage and transformation of metalcontaminated alluvium in the upper Vistula basin, southwest Poland. *Applied Geography*, 12(1), 7-30.
- Macklin, M. G., Brewer, P. A., Hudson-Edwards, K. A., Bird, G., Coulthard, T. J., Dennis, I. A., Turner, J. N. (2006). A geomorphological approach to the management of rivers

contaminated by metal mining. *Geomorphology*, 79(3), 423-447.

Musalem, R. (1999). Medicion de Campos de Velocidades Instantaneas en Canales mediante Procesamiento de Imagenes. Memoria para optar al titulo de ingeniero Civil. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Fisicas y Matematicas.

Nezu, I., Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open channels. IAHR/AIRH Monograph. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Niño, Y., (2013), Apunte del curso Transporte Hidráulico de Sólidos.

Niño, Y., Licanqueo W., Janampa C., Tamburrino A. (2017), Front of sand moving as sediment transport through immobile coarse gravel. *Journal of Hydraulic Research*, TJHR-2016-0247.R1.

Nikora, V., Goring, D. (2000). Flow turbulence over fixed and weakly mobile gravel beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(9), 679-690.

Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., Griffiths, G. (2001). Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 123-133.

Nikora, V., Koll, K., McEwan, I., McLean, S., Dittrich, A. (2004). Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(10), 1036-1042.

Parker, G. (2008). Transport of gravel and sediment mixtures. *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, 110, 165-252.

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.

Prasad, A. K. (2000). Particle image velocimetry. *CURRENT SCIENCE BANGALORE*, 79(1), 51-60.

Raupach, M. R., Antonia, R. A., Rajagopalan, S. (1991). Rough-wall turbulent boundary layers. *Appl. Mech. Rev*, 44(1), 1-25.

Rouse, H. (1937). Modern concepts of the mechanics of turbulence. ASCE. Transactions, 102.

Taylor, M. P., Kesterton, R. G. (2002). Heavy metal contamination of an arid river environment: Gruben River, Namibia. *Geomorphology*, 42(3), 311-327.

Teisson, C., Ockenden, M., Le Hir, P., Kranenburg, C., Hamm, L. (1993). Cohesive sediment transport processes. *Coastal Engineering*, 21(1-3), 129-162.

Thielicke, W., Stamhuis, E. (2014). PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2(1).

- Turner, J. N., Brewer, P. A., Macklin, M. G., Hudson-Edwards, K. A., Coulthard, T. J., Howard, A. J., Jamieson, H. E. (2013). Heavy metals and As transport under low and high flows in the River Guadamar three years after the Aznalcóllar tailings dam failure: implications for river recovery and management. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 28, 31-47.
- Walling, D. E., Owens, P. N., Carter, J., Leeks, G. J. L., Lewis, S., Meharg, A. A., Wright, J. (2003). Storage of sediment-associated nutrients and contaminants in river channel and floodplain systems. *Applied Geochemistry*, 18(2), 195-220.
- Westerweel, J., Adrian, R. J., Eggels, J. G., Nieuwstadt, F. T. (1992). Measurements with particle image velocimetry on fully developed turbulent pipe flow at low Reynolds number. *DELFT UNIV OF TECHNOLOGY (NETHERLANDS)*.
- Westerweel, J. (1999). Theoretical analysis of the measurement precision and reliability in PIV. In International Workshop on PIV'99- Santa Barbara, 3 rd, Santa Barbara, CA (pp. 9-14).
- White, F. M. (2003). Mecánica de fluidos (No. 532 W45Y).
- Wilcock, P. R., Crowe, J. C. (2003). A surface-based transport model for sand and gravel. *Hydraulic Engineering*, 129(2), 120.
- Wilson, N. R., Shaw, R. H. (1977). A higher order closure model for canopy flow. *Journal of Applied Meteorology*, 16(11), 1197-1205.
- Wren, D. G., Kuhnle, R. A., Langendoen, E. J., Rigby, J. R. (2013). Turbulent flow and sand transport over a cobble bed in a laboratory flume. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(4), 04014001.
- Yen, B. C. (2002). Open channel flow resistance. *Journal of hydraulic engineering*, 128(1), 20-39.

Apéndice A

Anexo I: Granulometría de muestras de relave

En orden de caracterizar los sedimentos utilizados para la experimentación se realiza el análisis granulométrico láser y en tamiz para cada muestra de relave. En los siguientes gráficos se muestra la curva granulométrica para la parte fina de las 9 muestras de sedimentos.

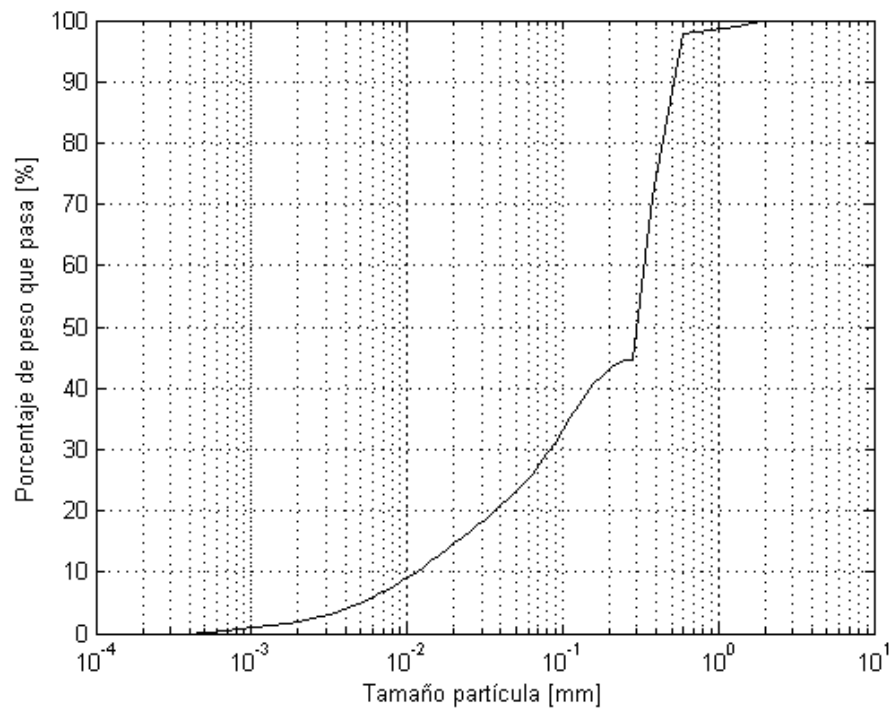


Figura A.1: Granulometría fina Muestra 1.

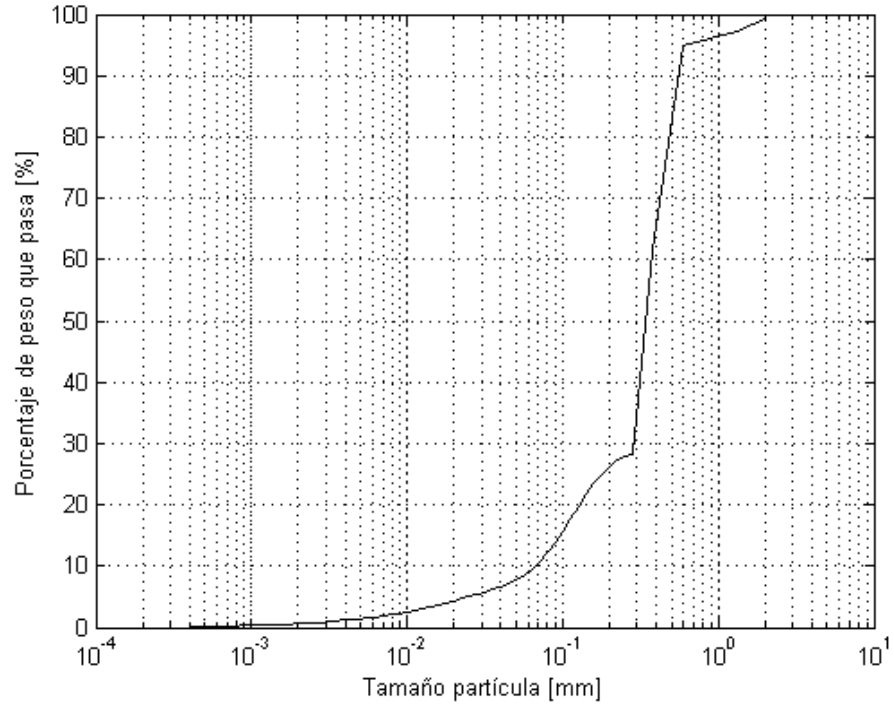


Figura A.2: Granulometría fina Muestra 2.

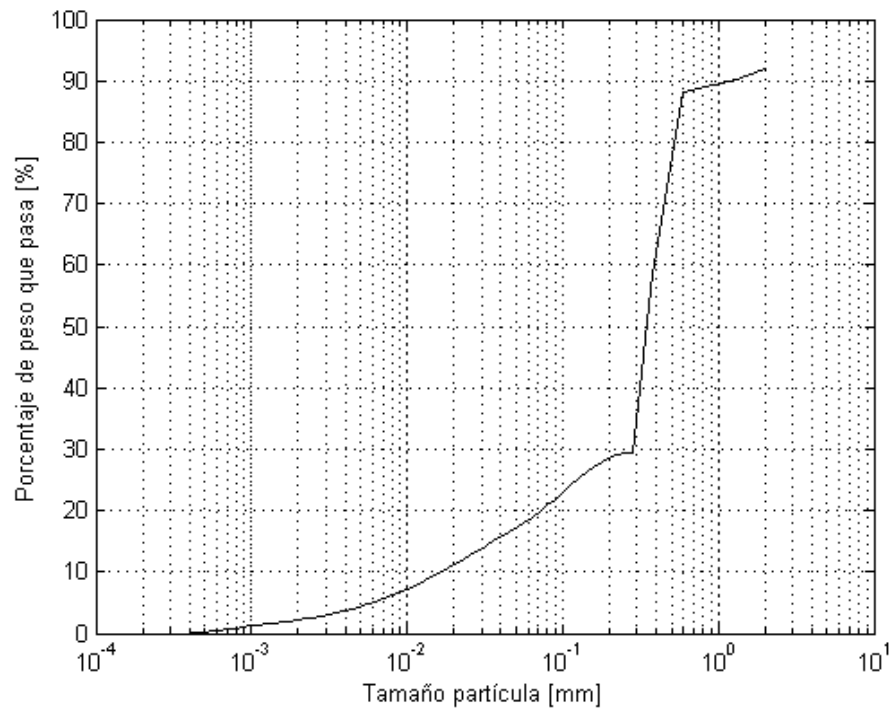


Figura A.3: Granulometría fina Muestra 3.

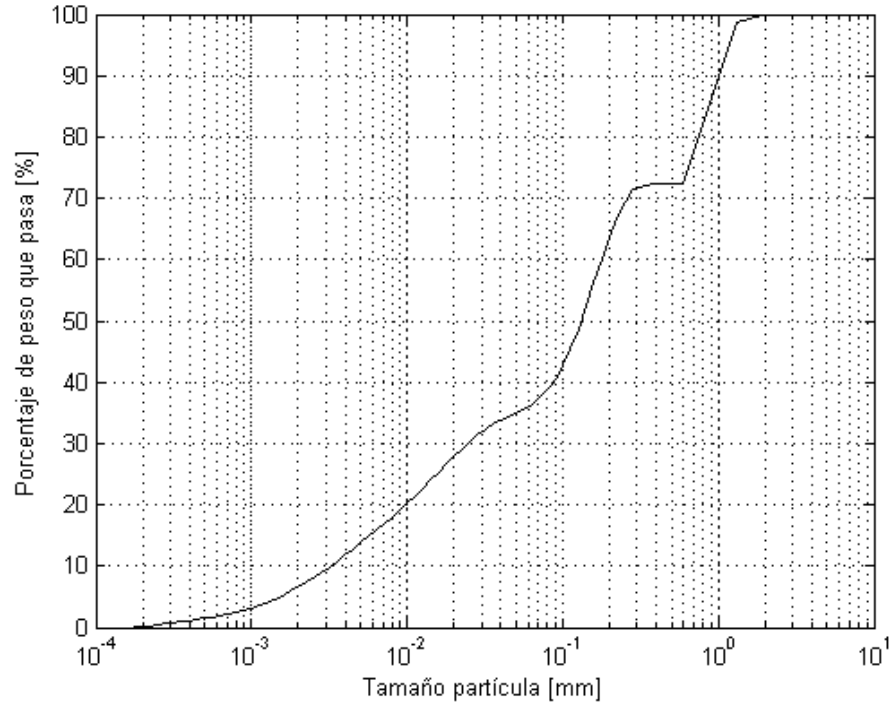


Figura A.4: Granulometría fina Muestra 4.

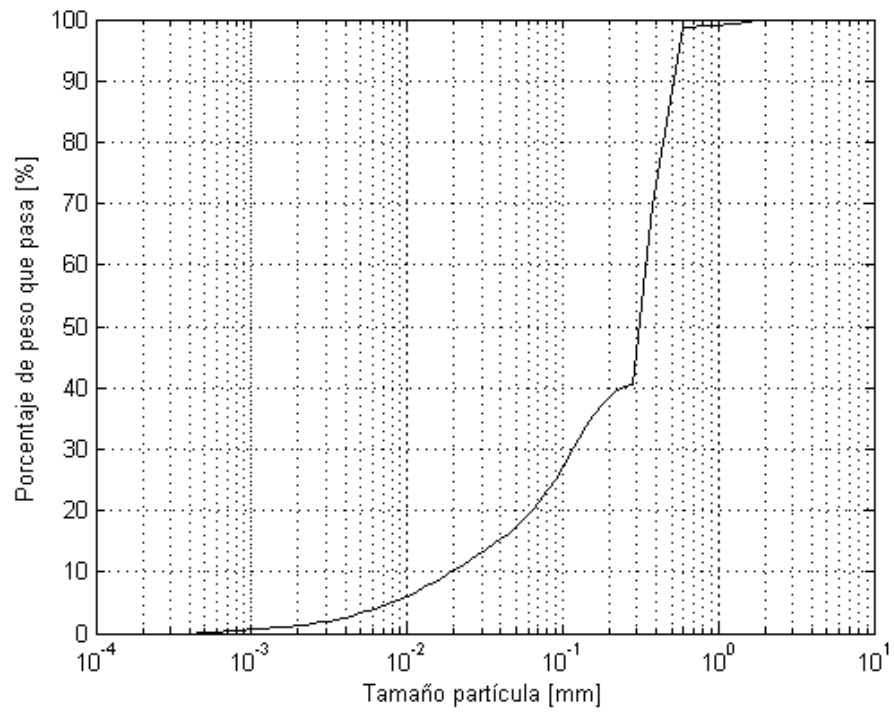


Figura A.5: Granulometría fina Muestra 5.

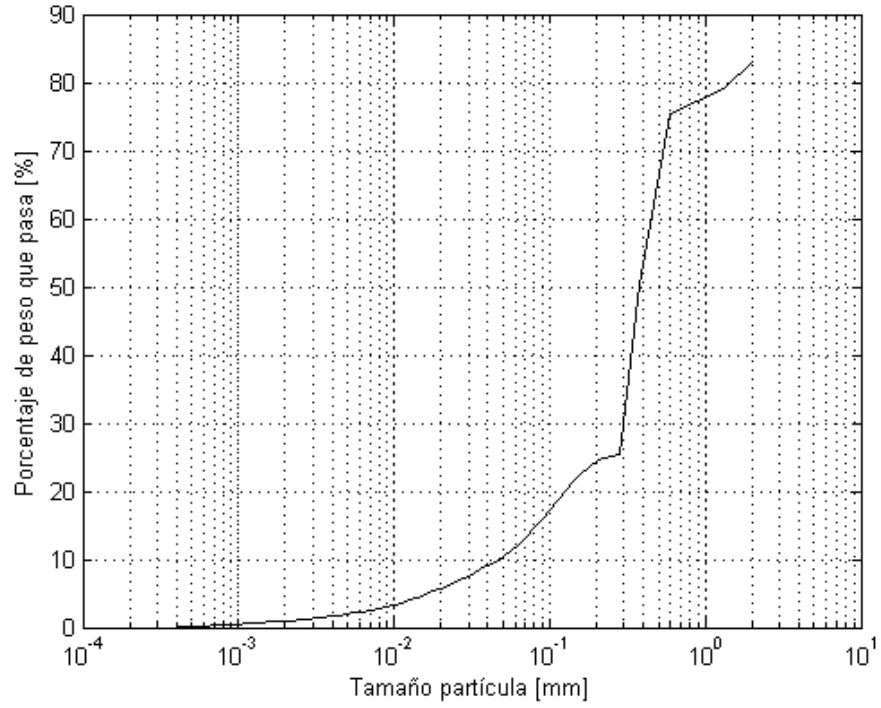


Figura A.6: Granulometría fina Muestra 6.

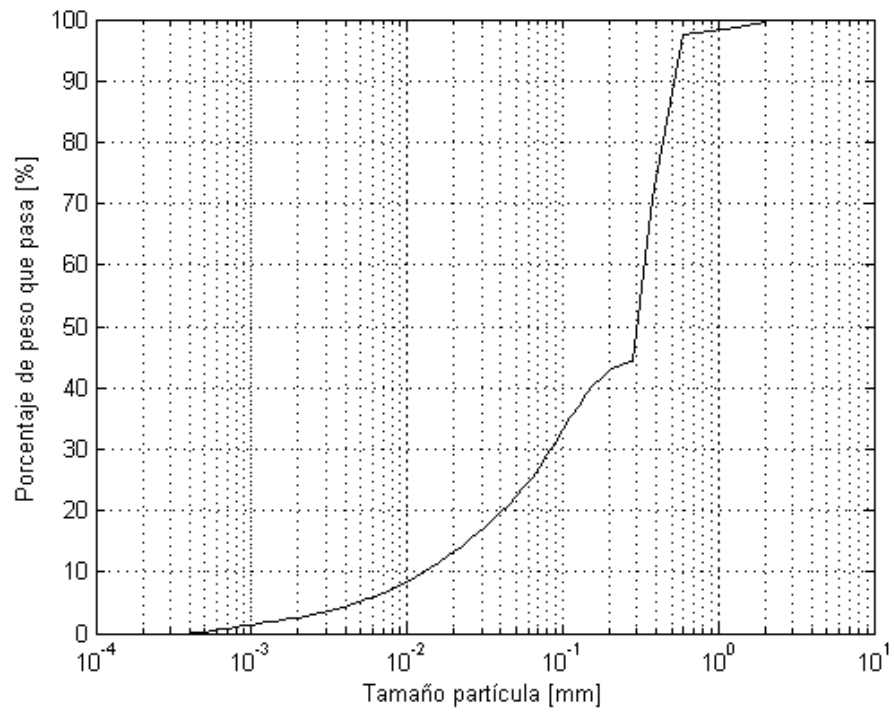


Figura A.7: Granulometría fina Muestra 7.

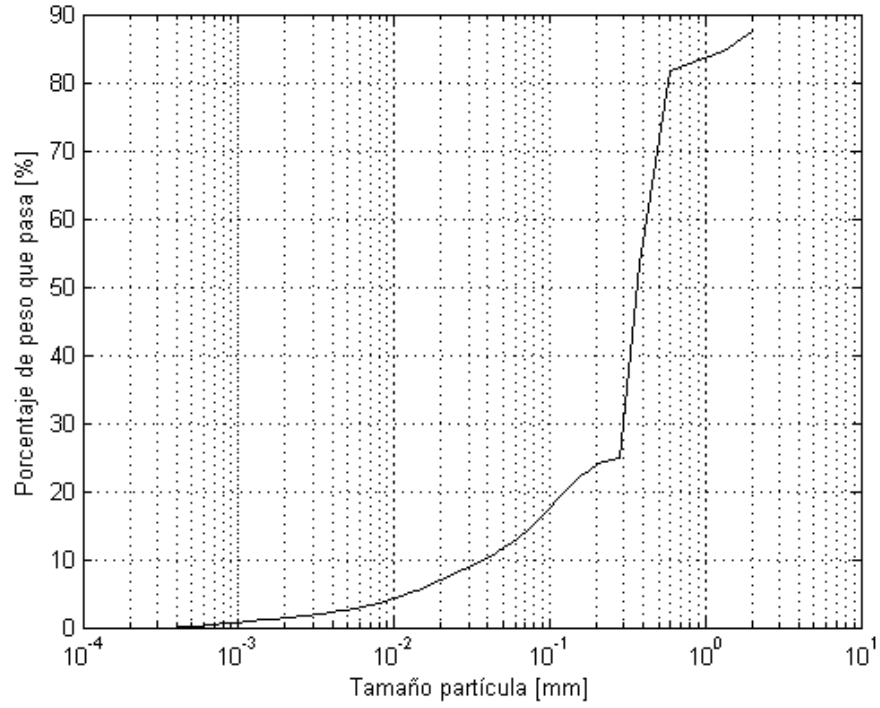


Figura A.8: Granulometría fina Muestra 8.

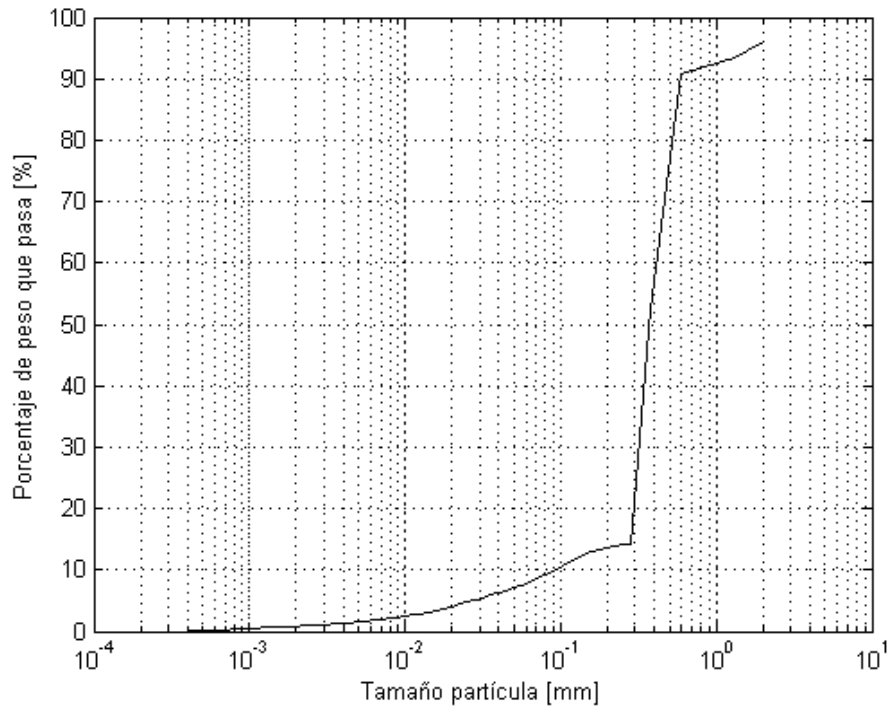


Figura A.9: Granulometría fina Muestra 9.

En las siguientes Figuras se muestra la curva granulométrica obtenida de la granulometría láser para los grupos de relaves artificiales creados.

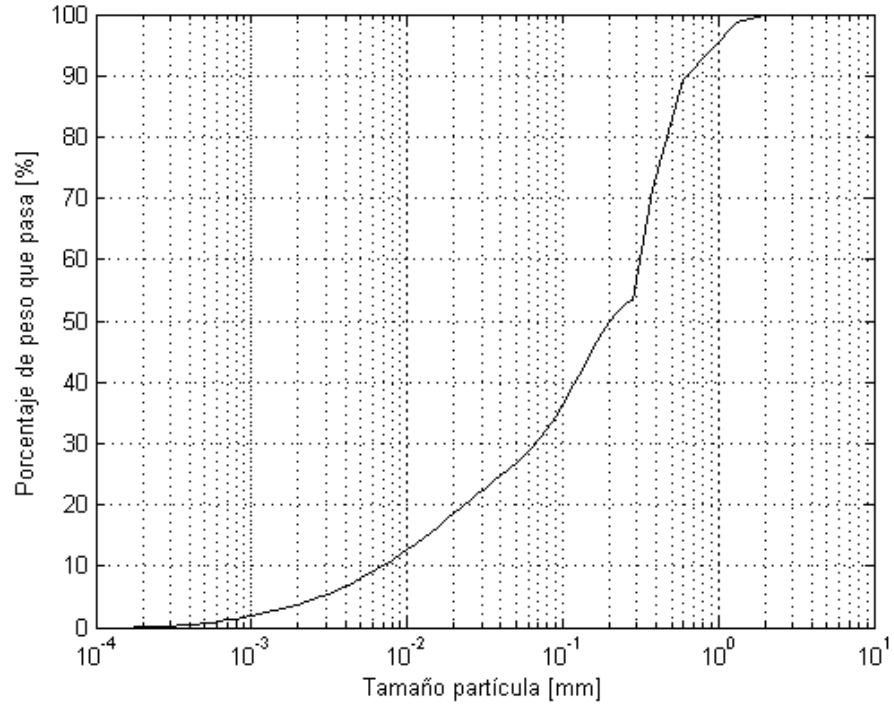


Figura A.10: Granulometría fina Grupo 1.

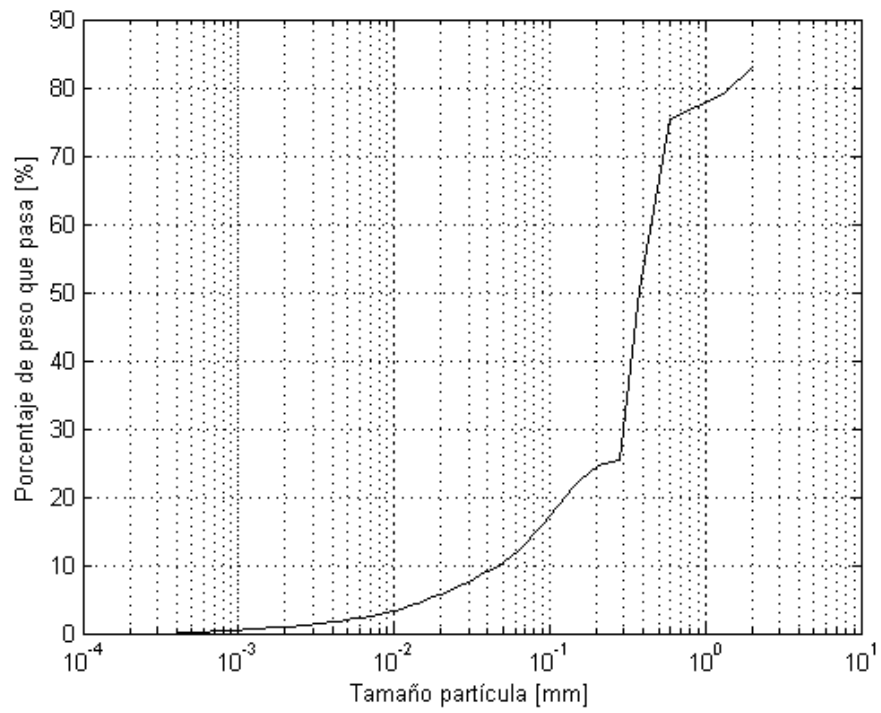


Figura A.11: Granulometría fina Grupo 2.

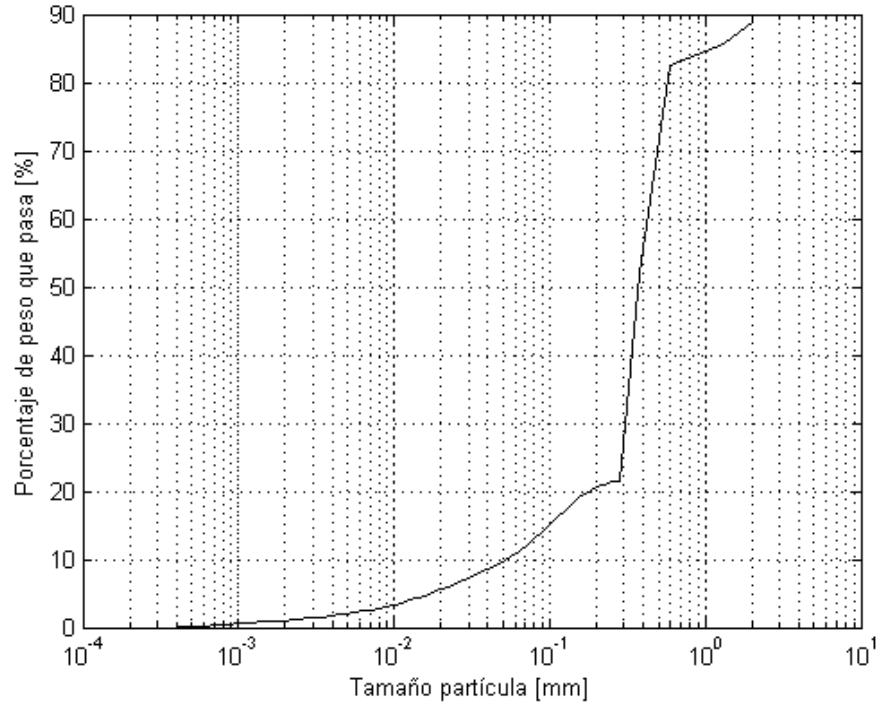


Figura A.12: Granulometría fina Grupo 3.

Por otra parte, del análisis granulométrico con tamices se obtienen las curvas granulométricas mostradas en la siguientes Figuras.

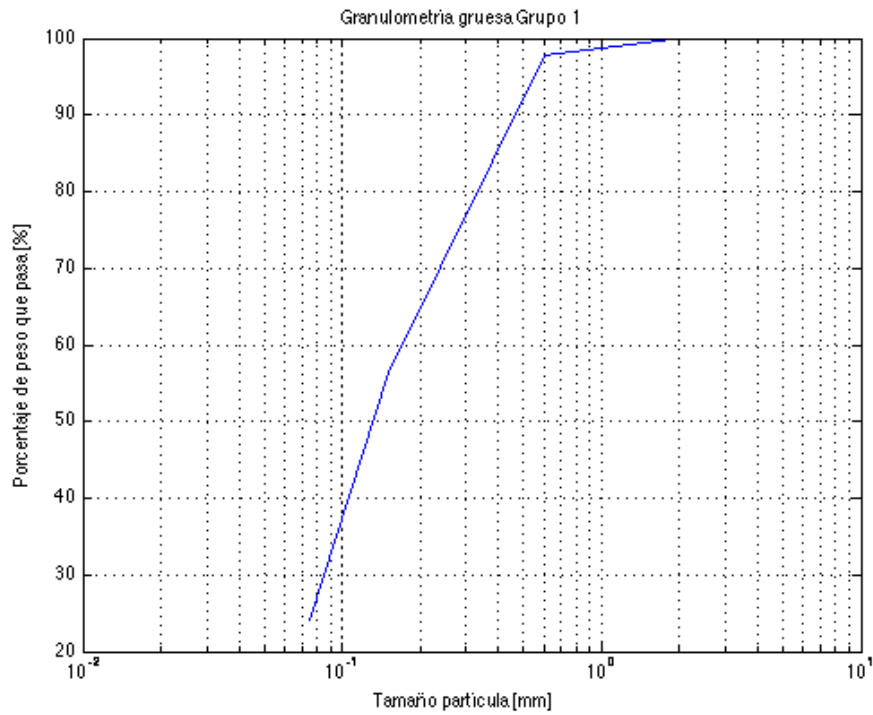


Figura A.13: Granulometría gruesa Grupo 1.

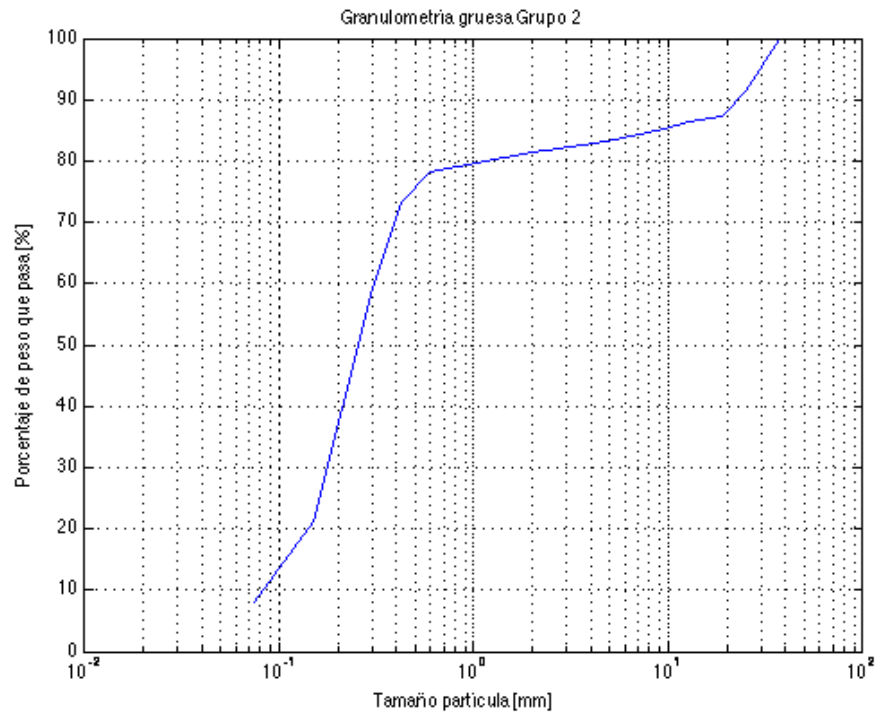


Figura A.14: Granulometría gruesa Grupo 2.

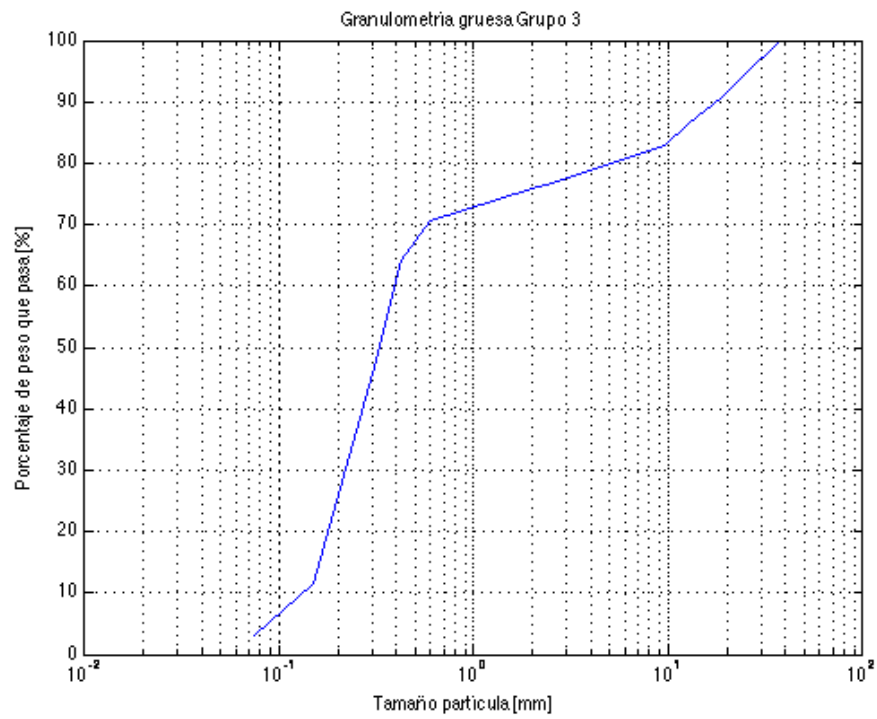


Figura A.15: Granulometría gruesa Grupo 3.

Apéndice B

Anexo II: Mediciones de pH

La Tabla B.1 y B.2 detallan los valores de pH medido mediante el procedimiento descrito y la temperatura medida en el tiempo correspondiente para las muestras de relave del grupo 1, 2 y 3 para el caso antes de ser vertidas y luego de ser recogidas del fondo del canal posterior a la experimentación, respectivamente.

Tabla B.1: Medición de pH grupo 1

Tiempo [min]	$pH_{inicial}$	$T_{inicial}$ [°C]	pH_{final}	T_{final} [°C]
0	6.52	20.3	7	20.4
1	6.4	20.3	7.36	20.4
2	6.23	20.4	7.28	20.5
3	6.91	20.5	7.18	20.6
4	6.59	20.4	7.05	20.6
5	6.44	20.5	7.03	20.6
6	6.37	20.6	6.7	20.7
7	6.32	20.6	6.95	20.7
8	6.11	20.7	7	20.8
9	6.02	20.9	6.95	21.1
10	5.92	20.9	6.9	21.1
11	5.84	20.9	6.85	21.1
12	5.67	20.9	6.84	21.1
13	5.58	20.9	6.83	21.1
14	5.5	21	6.81	21.2
15	5.38	21.1	6.79	21.2
16	5.33	21.1	6.76	21.2
17	5.31	21.2	6.74	21.3
18	5.27	21.2	6.75	21.3
19	5.28	21.2	6.76	21.3
20	5.31	21.2	6.78	21.3
21	5.29	21.2	6.77	21.3
22	5.3	21.3	6.75	21.3
23	5.27	21.3	6.76	21.3
24	5.27	21.3	6.76	21.3
25	5.27	21.3	6.75	21.3
26	5.22	21.3	6.76	21.3
27	5.22	21.3	6.77	21.3
28	5.22	21.3	6.75	21.3
29	5.22	21.3	6.75	21.3
30	5.22	21.3	6.76	21.3

Tabla B.2: Medición de pH grupo 2

Tiempo [min]	$pH_{inicial}$	$T_{inicial}$ [°C]	pH_{final}	T_{final} [°C]
0	6.5	20.3	6.91	20.4
1	6.88	20.4	7.35	20.5
2	6.28	20.5	7.21	20.6
3	6.51	20.6	7.13	20.7
4	6.65	20.5	7.04	20.7
5	6.44	20.6	7.01	20.7
6	6.32	20.7	6.72	20.8
7	6.28	20.7	6.88	20.8
8	6.2	20.8	6.95	20.9
9	6	21.0	6.92	21.2
10	5.97	21.0	6.87	21.2
11	5.85	21.0	6.82	21.3
12	5.7	21.0	6.81	21.3
13	5.61	21.0	6.8	21.3
14	5.53	21.1	6.76	21.3
15	5.42	21.2	6.74	21.3
16	5.38	21.2	6.71	21.3
17	5.36	21.2	6.7	21.3
18	5.38	21.2	6.71	21.3
19	5.35	21.2	6.72	21.3
20	5.34	21.2	6.72	21.3
21	5.31	21.2	6.73	21.3
22	5.33	21.3	6.73	21.3
23	5.3	21.3	6.74	21.3
24	5.32	21.3	6.74	21.3
25	5.34	21.3	6.74	21.3
26	5.31	21.3	6.74	21.3
27	5.3	21.3	6.74	21.3
28	5.31	21.3	6.74	21.3
29	5.33	21.3	6.74	21.3
30	5.34	21.3	6.74	21.3

Tabla B.3: Medición de pH grupo 3

Tiempo [min]	$pH_{inicial}$	$T_{inicial}$ [°C]	pH_{final}	T_{final} [°C]
0	6.92	20.4	7.1	20.4
1	6.54	20.4	7.4	20.5
2	6.24	20.5	7.3	20.6
3	6.66	20.6	7.25	20.7
4	6.17	20.6	7.15	20.6
5	6.47	20.6	7.05	20.7
6	6.14	20.7	6.8	20.8
7	6.39	20.7	6.98	20.8
8	6.27	20.8	7.05	20.9
9	6.11	21.1	7	21.1
10	6.03	21.1	6.95	21.1
11	5.98	21.2	6.87	21.2
12	5.8	21.2	6.86	21.2
13	5.59	21.2	6.85	21.2
14	5.56	21.2	6.84	21.2
15	5.45	21.2	6.83	21.3
16	5.43	21.2	6.8	21.3
17	5.4	21.3	6.75	21.3
18	5.39	21.3	6.79	21.3
19	5.37	21.3	6.81	21.3
20	5.41	21.3	6.78	21.3
21	5.42	21.3	6.79	21.3
22	5.38	21.3	6.78	21.3
23	5.4	21.3	6.77	21.3
24	5.41	21.3	6.79	21.3
25	5.43	21.3	6.78	21.3
26	5.41	21.3	6.8	21.3
27	5.43	21.3	6.79	21.3
28	5.44	21.3	6.78	21.3
29	5.41	21.3	6.77	21.3
30	5.39	21.3	6.79	21.3