

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